



ONDAS BICROMÁTICAS E BIDIRECIONAIS:
APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG
ÀS VELOCIDADES ORBITAIS

Mario Grüne de Souza e Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Claudio Freitas Neves

Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

Abril de 2019

ONDAS BICROMÁTICAS E BIDIRECIONAIS: APLICAÇÃO DA
TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG ÀS VELOCIDADES ORBITAIS

Mario Grüne de Souza e Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Claudio Freitas Neves, Ph.D.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.

Prof. Torsten Schlurmann, Dr.Ing.

Prof. Claudio Alexis Rodríguez Castillo, D.Sc.

Prof. Roger Matsumoto Moreira, Ph.D.

Dra. Valéria Souza Rego, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2019

Souza e Silva, Mario Grüne de

Ondas Bicromáticas e Bidirecionais: Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang às Velocidades Orbitais / Mario Grüne de Souza e Silva – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XXIII, 229 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Claudio Freitas Neves

Paulo Cesar Colonna Rosman

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 195-203.

1. Onda de infragravidade. 2. Velocidade orbital. 3. Transformada de Hilbert-Huang. 4. Tensão de radiação. I. Neves, Claudio Freitas *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por sempre colocarem a educação de seus filhos em primeiro lugar e por proporcionarem o melhor ambiente possível para o nosso desenvolvimento.

Aos meus irmãos, por estabelecerem um exemplo a ser seguido e pela companhia nesses 23 anos de surf. Não é à toa que esta tese se dedica inteiramente às ondas do mar.

Ao meu orientador, prof. Claudio, pela incansável dedicação a esta tese. Obrigado por me incentivar a fazer o doutorado sanduíche e por me mostrar o caminho das ondas. Mas principalmente, obrigado pela sua luta diária para proporcionar a melhor Universidade possível para todos nós alunos.

Ao meu co-orientador, prof. Rosman, por ter me introduzido à Engenharia Costeira e por me servir de exemplo, profissional e de vida, desde o meu 7º período da Graduação. Obrigado por fazer de mim um profissional.

À Marise, por criar uma magnífica atmosfera de trabalho dentro da AECO e por cuidar de todos que permeiam a C-209.

A todos os meus amigos da Costeira, que desde 2009 me fazem ter um grande prazer em ir ao Fundão. Obrigado pelo clima alegre e descontraído, e pelas diversas trocas de conhecimento e experiências.

Ao prof. Torsten, e todos os meus amigos do LuFi, por me receberem tão bem na Alemanha e me fazerem sentir em casa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ONDAS BICROMÁTICAS E BIDIRECIONAIS: APLICAÇÃO DA
TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG ÀS VELOCIDADES ORBITAIS

Mario Grüne de Souza e Silva

Abril/2019

Orientadores: Claudio Freitas Neves

Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Espectros bimodais ocorrem com bastante frequência ao redor do mundo, seja em uma região de costa aberta ou dentro de um ambiente estuarino. São caracterizados pela presença de duas frequências primárias principais, e muitas vezes associados a grupos de ondas colineares. É importante considerar que estes espectros possam ser o resultado da superposição de dois sistemas de ondas independentes com sentidos diferentes, contendo múltiplas componentes de interação onda-onda.

O objetivo deste estudo é investigar as ondas Bicromáticas e Bidirecionais (Bi-Bi) para caracterizar as interações não-lineares entre pares de onda, utilizando técnicas adaptativas ao invés de técnicas espectrais tradicionais. Testes em modelo físico em uma bacia de ondas tridimensional foram conduzidos e as medições foram feitas com dois arranjos de sensores ultrassônicos de superfície livre e um arranjo de ADVs. A Transformada de Hilbert-Huang (HHT), auxiliada pela Decomposição de Modo Empírico Multivariada (MEMD), foi aplicada aos dados de velocidades orbitais e as principais características da onda de interação subtrativa (amplitude de velocidade, período e direção) foram extraídas com boa precisão em relação à teoria.

Equações para a tensão de radiação resultante de um sistema Bi-Bi foram desenvolvidas. Os resultados mostram que a oscilação gerada pela onda de interferência subtrativa, comumente associada à onda de infragravidade, é capaz de gerar correntes hidrodinâmicas mesmo fora da zona de surfe com batimetria plana e horizontal, e sugerem a importância de se considerar os termos não lineares em modelos numéricos quando dois ou mais sistemas se aproximam da costa.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

BICHROMATIC-BIDIRECTIONAL WAVES: APPLICATION OF THE HILBERT-HUANG TRANSFORM TO ORBITAL VELOCITIES

Mario Grüne de Souza e Silva

April/2019

Advisors: Claudio Freitas Neves

Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

Bimodal spectra are quite a common feature in many places around the world, either on the open coast or within estuarine environments. They may often be thought of as group of collinear waves with two primary frequencies. However, it is important to consider that these spectra may be the result of the superposition of two independent wave systems with different directions, containing multiple wave-wave interaction components.

The aim of this study is to investigate Bichromatic-Bidirectional (Bi-Bi) waves to characterize the wave-wave nonlinear interactions, using adaptive techniques rather than traditional spectral techniques. A physical model test in a 3D wave basin was conducted and measurements were made with two arrays of ultrasonic sensors of free surface and one array of ADVs. The Hilbert-Huang Transform (HHT), aided by the Multivariate Empirical Mode Decomposition (MEMD), was applied to the orbital velocity data and the main characteristics of the subtractive interaction wave (velocity amplitude, period and direction) were extracted with a good precision.

Equations for the radiation stresses resulting from a Bi-Bi system were developed. The results show that the oscillation generated by the subtractive wave-wave interference, commonly associated to the infragravity wave, is capable of generating hydrodynamic currents even outside the surf zone and in a flat bathymetry, and suggest the importance of considering the nonlinear terms in numerical models when two or more systems approach the shore.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	1
I.1. MARES BIMODAIS	3
I.2. TÉCNICAS DE ANÁLISE ADAPTATIVA.....	7
I.3. MODELAGEM FÍSICA	7
I.4. OBJETIVOS	8
I.5. ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	9
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
II.1. GRUPOS UNIDIRECIONAIS	11
II.1.1. Batimento de surfe.....	11
II.1.2. Ondas de Borda	13
II.1.3. Outros estudos	15
II.2. GRUPOS BIDIRECIONAIS	16
III. TEORIA DAS BI-BIS	22
III.1. CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS DE INTERAÇÃO SUBTRATIVA	22
III.1.1. Período.....	22
III.1.2. Direção e comprimento	24
III.1.3. Refração.....	25
III.1.4. Perfil de velocidade	27
III.2. TENSÃO DE RADIAÇÃO	29
III.3. NÍVEL MÉDIO DA ÁGUA PROMEDIADO	31
III.3.1. Promediação da equação de Sharma e Dean (1981).....	31
III.3.2. Promediação da equação de Bernoulli.....	32
III.4. INTERVALO DE PROMEDIAÇÃO	39
III.5. CÍRCULO DE MOHR.....	44
IV. MODELAGEM FÍSICA EM LABORATÓRIO.....	46
IV.1. CARACTERÍSTICAS DA BACIA.....	46
IV.2. Planejamento dos Testes	50
IV.2.1. Grupo principal.....	50
IV.2.2. Grupo extra	53
IV.2.3. Visão geral.....	53
IV.3. Instrumentação.....	54
IV.3.1. ADV: Acoustic Doppler Velocimeter	54
IV.3.2. USS: Ultrasonic Sensor	55
IV.3.3. Arranjo dos equipamentos	56

IV.3.4. Cuidado especial com os ADVs	59
V. METODOLOGIA DE ANÁLISE	64
V.1. ELIMINAÇÃO DE SPIKES	64
V.2. FILTRO DE THOMPSON	65
V.3. CORREÇÃO DA INCLINAÇÃO DOS ADVs.....	68
V.4. HHT	71
V.4.1. EMD: Empirical Mode Decomposition.....	72
V.4.2. EEMD: Ensemble Empirical Mode Decomposition	74
V.4.3. NA-MEMD: Noise Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition	75
V.4.4. Parâmetros utilizados na NA-MEMD	79
V.4.5. Transformada de Hilbert.....	81
V.5. AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DOS RESULTADOS	83
V.5.1. Análise qualitativa	84
V.5.2. Avaliação quantitativa	84
V.6. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE	88
V.7. AJUSTE DE FASE ENTRE MODELO E MEDIÇÃO	88
VI. RESULTADOS	91
VI.1. Testes T4-B.....	92
VI.1.1. Arranjo 2: USS	93
VI.1.2. Arranjo 2: ADV	96
VI.2. Testes T6-B.....	100
VI.2.1. Arranjo 2: USS	101
VI.2.2. Arranjo 2: ADV	104
VI.3. Testes T2-C.....	108
VI.3.1. Arranjo 2: USS	108
VI.3.2. Arranjo 2: ADV	111
VI.4. Testes T5-E.....	115
VI.4.1. Arranjo 2: USS	115
VI.4.2. Arranjo 2: ADV	118
VI.5. Testes T1-E.....	122
VI.5.1. Arranjo 2: USS	122
VI.5.2. Arranjo 2: ADV	125
VI.6. Testes T3-A.....	129
VI.6.1. Arranjo 2: USS	129

VI.6.2. Arranjo 2: ADV	132
VI.7. Testes T7-E3	134
VI.7.1. Análise das ondas primárias	135
VI.7.2. Análise da onda interativa	143
VI.8. Teste T8-B2	149
VI.8.1. Arranjo 2: USS	150
VI.8.2. Arranjo 2: ADV	154
VI.9. Teste T8-C5	156
VI.9.1. Arranjo 2: USS	157
VI.9.2. Arranjo 2: ADV	160
VII. DISCUSSÃO	163
VII.1. SIMULAÇÕES DAS ONDAS BI-BI	163
VII.2. MEDIÇÕES DAS ONDAS BI-BI	166
VII.2.1. Despiking e Filtragem	166
VII.2.2. Correção da inclinação	167
VII.2.3. Arranjo de ADV	169
VII.2.4. Profundidade dos ADVs	169
VII.2.5. Mistura de modo: frequência	170
VII.2.6. Mistura de modo: amplitude	173
VII.2.7. Onda monocromática-bidirecional	174
VII.2.8. Espectros bimodais	174
VII.2.9. Superfície livre x velocidade	174
VII.2.10. Superfície livre: arranjo 1 x arranjo 2	175
VII.2.11. Superfície livre: CERC-6 x CERC-5	178
VII.3. TEORIA DAS ONDAS BI-BI	179
VII.3.1. Nível médio	180
VII.3.2. Tensão de radiação	181
VII.3.3. Quantidade de movimento	184
VII.3.4. O caso bimodal na foz do Rio Doce	186
VIII. CONCLUSÃO	190
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
CARACTERÍSTICAS DOS TESTES	204
TESTE T4-B2	212
SAÍDA DO WAVELAB®	225
DADOS E ROTINAS	228

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Ação de um mar bimodal na praia da Regência, na foz do Rio Doce, Espírito Santo, no dia 07/07/2018. Cortesia da fotógrafa Ana Catarina (<http://www.anacatarinaphoto.com/>). 5
- Figura 1.2. Espectro direcional para o dia 07/07/2018 calculado a partir dos dados da Boia Vitória do projeto PNBOIA (Latitude 19°55'33,96" S, Longitude: 39°41'28,68" O). Resolução espectral de 0,0041 Hz com corte aplicado às frequências menores que 0,0418 Hz. Cortesia da M.Sc. Oc. Izabel Christina Martins Nogueira. 5
- Figura 1.3. Sistemas de mar bimodal ao redor do mundo: (a) e (b) Nova Zelândia (foto: Rambo Estrada - <http://www.estradasurfing.co.nz/>); (c) Île de Ré - França (Michael Griffon - https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ile_de_r%C3%A9.JPG); (d) Huntington Beach – EUA (Pat Nolan - <http://www.patnolanphoto.com/>). 6
- Figura 2.1. Grupo de ondas composto por duas ondas bicromáticas (a) colineares e (b) não colineares, e a onda de interferência subtrativa gerada pelo grupo (c) colinear e (d) não colinear. O vetor número de onda das ondas primárias e de interação subtrativa estão representados para indicar a direção de propagação das ondas. 11
- Figura 2.2. Cúspides e correntes de retorno presentes em praias do Rio de Janeiro: (a) Praia de Botafogo (09/08/2015) e (b) Praia do Leme (15/07/2016). Imagens capturadas do Google Earth. 14
- Figura 3.1. Exemplos de grupos de onda formados por ondas de gravidade com (a) períodos próximos; e (b) períodos significativamente distintos. 23
- Figura 3.2. Números de onda (a, c) subtrativo e (b, d) aditivo resultantes das interações onda-onda. 25
- Figura 3.3. Coeficientes de refração (K_r) e empinamento (K_s). 27
- Figura 3.4. Módulo da velocidade máxima horizontal para $\Delta\theta = 10^\circ$ 28
- Figura 3.5. Módulo da velocidade máxima horizontal para $\Delta\theta = 100^\circ$ 28
- Figura 3.6. Elevação instantânea da superfície livre e componentes horizontais da quantidade de movimento geradas de acordo com cada opção de promediação. Caso 1, em que $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s. 42
- Figura 3.7. Elevação instantânea da superfície livre e componentes horizontais da quantidade de movimento geradas de acordo com cada opção de promediação. Caso 2, em que $T_a = 5$ s e $T_b = 10$ s. 42
- Figura 3.8. Elevação instantânea da superfície livre e componentes horizontais da quantidade de movimento geradas de acordo com cada opção de promediação. Caso 3, em que $T_a = 4$ s e $T_b = 10$ s. 43
- Figura 3.9. Componente subtrativa da equação do nível médio instantâneo e promediado de acordo com cada opção de promediação. Caso 1, em que $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s. 43

Figura 3.10. Componente subtrativa da equação do nível médio instantâneo e promediado de acordo com cada opção de promediação. Caso 2, em que $T_a = 5$ s e $T_b = 10$ s.....	44
Figura 3.11. Componente subtrativa da equação do nível médio instantâneo e promediado de acordo com cada opção de promediação. Caso 3, em que $T_a = 4$ s e $T_b = 10$ s.....	44
Figura 3.12. Círculo de Mohr do Caso 1, em que $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s; $H_a = 0,5$ m, $H_b = 1,0$ m, $D_a = 30^\circ$ e $D_b = 0^\circ$	45
Figura 4.1. Complexo experimental do Instituto Ludwig-Franzius, em Hannover-Marienwerder, na Alemanha.	48
Figura 4.2. Desenho esquemático (a) da bacia de ondas 3D do Instituto Ludwig-Franzius; (b) com foco nos arranjos de instrumentação utilizadas.....	49
Figura 4.3. Influência da diferença de ângulo sobre a onda de infragravidade. As setas correspondem aos vetores número de onda.	52
Figura 4.4. (a) Condição de propagação de ondas para os testes do grupo Principal e (b) performance do gerador de ondas e condições dos testes planejados.	52
Figura 4.5. Desenho esquemático de funcionamento do (a) ADV; e (b) USS.....	56
Figura 4.6. Perfis de velocidade máxima de todos os testes do subconjunto T4. Gráfico superior mostra velocidades horizontais (u-preto, v-verde) e gráfico inferior, velocidades verticais (w-azul). Linhas de perfil tracejada correspondem à contribuição das ondas de interação subtrativa (legenda 'IG' de infragravidade). Linhas horizontais tracejadas mostram a posição do ADVs para os testes T4 e T6, e linhas verticais contínuas mostram as velocidades máximas medidas pelo ADVs para cada velocidade nominal.	59
Figura 4.7. (a) Conjunto de toneis e bombas utilizados para armazenar e bombear material particulado para os experimentos; e (b) fonte circular desenvolvida para dispersar material no entorno dos ADVs.	61
Figura 4.8. Determinação da velocidade de queda do material particulado e o tempo de bombeamento prévio a cada teste.	62
Figura 4.9. Arranjo 1 (USS) com arranjo 2 (USS e ADV) ao fundo.	62
Figura 4.10. Arranjo 2 (USS e ADV) com arranjo 1 (USS) ao fundo.....	63
Figura 4.11. Dado bruto típico de um ADV do arranjo 2 (teste T4-B2).	63
Figura 5.1. Exemplo do resultado da aplicação do método de GORING e NIKORA (2002) ao teste T4-B2.....	65
Figura 5.2. Função-resposta do filtro ideal e do filtro de função contínua $L(f)$	66
Figura 5.3. Exemplo do resultado da aplicação do Filtro de Thompson para o teste T4-B2.	67

Figura 5.4. Curva de resposta obtida a partir da aplicação do Filtro de Thompson para o teste T4-B2. As linhas verticais indicam as frequências de cortes.....	68
Figura 5.5. Comparação entre a transformada de Fourier do dado sem <i>spikes</i> e filtrado para o teste T4-B2. As linhas verticais indicam as frequências de cortes.	68
Figura 5.6. Exemplificação teórica de um sistema de coordenadas inclinado: (a) inclinação do sistema de coordenadas; (b) efeitos sobre a órbita de velocidades; (c) efeitos sobre as séries temporais de cada componente.....	69
Figura 5.7. Inclinações dos eixos do ADV 2.2.1 calculadas durante um dia de testes (15/12/2017).	70
Figura 5.8. Exemplo de rotação do eixo de coordenadas do ADV 2.2.5 para o teste T4-B2: (a) hodógrafa tratada apenas até a etapa do Filtro de Thompson; e (b) hodógrafa filtrada já rotacionada.	71
Figura 5.9. Envoltória do teste T4-B2 definida por um spline cúbico e a média da envoltória.....	74
Figura 5.10. Cinco primeiras IMFs resultantes do processo de EMD aplicado à componente de velocidade u do teste T4-B2.....	74
Figura 5.11. Direções de vetores para as projeções de sinais tridimensionais em uma esfera 2, geradas usando (a) sistema de coordenadas esféricas e (b) a sequência de Hammersley com baixa discrepância (adaptado de REHMAN e MANDIC, 2009).	77
Figura 5.12. Exemplo de alinhamento de modo gerado pela MEMD aplicado a uma série temporal sintética de 6 dimensões: U, V, W, X, Y, Z (adaptado de REHMAN e MANDIC, 2009).	78
Figura 5.13. Órbita tridimensional de ruído branco adicionado ao processo da NAMEMD na análise do teste T4-B2.	81
Figura 5.14. Comparação entre velocidades modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas. Representação por (a) série temporal; e (b) hodógrafa.	84
Figura 5.15. Evolução dos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} para os casos da Tabela 5.3.	87
Figura 5.16. Comparação entre as órbitas modeladas e alteradas para os casos 1 e 5. Neste exemplo, os erros foram introduzidos apenas na componente u de velocidade.	87
Figura 5.17. MMQNL aplicado para o ajuste de fase entre velocidades medidas e modeladas.	90
Figura 6.1. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T4-B2.	94
Figura 6.2. Espectro direcional calculado para o teste T4-B2.....	94
Figura 6.3. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T4-B2.....	95

Figura 6.4. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T4-B2.	96
Figura 6.5. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T4-B2. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (9) estão plotadas.	98
Figura 6.6. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T4-B2....	99
Figura 6.7. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T4-B2.	99
Figura 6.8. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T4-B1, B3, B4 e B5.	100
Figura 6.9. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T6-B2.	102
Figura 6.10. Espectro direcional calculado para o teste T6-B2.	102
Figura 6.11. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T6-B2.	103
Figura 6.12. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T6-B2.	104
Figura 6.13. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T6-B2. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (9) estão plotadas.	106
Figura 6.14. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T6-B2..	106
Figura 6.15. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T6-B2.	107
Figura 6.16. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T6-B1, B3, B4 e B5.	107
Figura 6.17. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T2-C4.	109
Figura 6.18. Espectro direcional calculado para o teste T2-C4.	109
Figura 6.19. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T2-C4.	110
Figura 6.20. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T2-C4.	111

Figura 6.21. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T2-C4. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (8) estão plotadas.....	113
Figura 6.22. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T2-C4..	113
Figura 6.23. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T2-C4.....	114
Figura 6.24. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T2-C1, C2, C3 e C5.....	114
Figura 6.25. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T5-E5.....	116
Figura 6.26. Espectro direcional calculado para o teste T5-E5.....	116
Figura 6.27. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T5-E5.....	117
Figura 6.28. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T5-E5.	118
Figura 6.29. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T5-E5. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (10) estão plotadas.....	120
Figura 6.30. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T5-E5..	120
Figura 6.31. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T5-E5.....	121
Figura 6.32. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T5-E1, E2, E3 e E4.....	121
Figura 6.33. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T1-E3.....	123
Figura 6.34. Espectro direcional calculado para o teste T1-E3.....	123
Figura 6.35. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T1-E3.....	124
Figura 6.36. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T1-E3.	125

Figura 6.37. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T1-E3. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (9) estão plotadas.....	127
Figura 6.38. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T1-E3..	127
Figura 6.39. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T1-E3.....	128
Figura 6.40. Comparação entre hodógrafa modelada (Sharma and Dean, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T1-E1, E2, E4 e E5.	128
Figura 6.41. Série de elevação do USS 1.2.3 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T3-A2.	130
Figura 6.42. Espectro direcional calculado para o teste T3-A2.....	130
Figura 6.43. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T3-A2.	131
Figura 6.44. Séries temporais e hodógrafa resultantes das Bi-Bis para o caso T3-A2.	132
Figura 6.45. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T3-A2. As IMFs das ondas primárias (5 e 6) e todas as demais com frequência inferior são plotadas.....	133
Figura 6.46. Comparação entre hodógrafas modeladas (Sharma e Dean, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T3-A2.....	133
Figura 6.47. IMFs 7, 8, 9 e 10 extraídas do ADV 2.2.2 para o caso T3-A2.....	134
Figura 6.48. Séries temporais e hodógrafa resultantes das Bi-Bis para o caso T7-E3.	136
Figura 6.49. Espectro direcional do arranjo 2 de USS, calculado para a sétima repetição do teste T7-E3.....	137
Figura 6.50. Diagrama de caixas da diferença de ângulo entre as ondas primárias ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados.	139
Figura 6.51. Diagramas de caixa dos valores de DTW_{3D} para cada um dos ADVs do arranjo 2 ao longo das 10 repetições do teste T7-E3.....	139
Figura 6.52. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.1. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.....	144
Figura 6.53. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.2. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.....	145

Figura 6.54. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.3. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.....	146
Figura 6.55. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.4. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.....	147
Figura 6.56. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.5. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.....	148
Figura 6.57. Espectro bimodal inserido no programa computacional do gerador de ondas para o teste T8-B2.....	150
Figura 6.58. Espectro bimodal calculado para o teste T8-B2.....	151
Figura 6.59. Séries temporais dos USSs pertencentes ao arranjo 2 durante o teste T8-B2. (a) período completo de medição; e (b) primeiros 200 s de medição.....	152
Figura 6.60. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T8-B2.....	153
Figura 6.61. Séries temporais e hodógrafa medidas resultantes do espectro bimodal para o caso T8-B2.....	154
Figura 6.62. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T8-B2. Apenas as IMFs 5 a 10 estão plotadas.	155
Figura 6.63. Séries temporais e hodógrafa extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T8-B2. A hodógrafa calculada para o caso T4-B2 também é plotada como referência.	155
Figura 6.64. Hodógrafas extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelo espectro bimodal do caso T8-B2 para os demais ADVs do arranjo. As hodógrafas calculadas para o caso T4-B2 também são plotadas como referência.....	156
Figura 6.65. Espectro bimodal inserido no programa computacional do gerador de ondas para o teste T8-C5.....	157
Figura 6.66. Espectro bimodal calculado para o teste T8-C5.....	158
Figura 6.67. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T8-C5.....	159
Figura 6.68. Séries temporais e hodógrafa medidas resultantes do espectro bimodal para o caso T8-C5.....	160
Figura 6.69. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T8-C5. Apenas as IMFs 5 a 10 estão plotadas.	161
Figura 6.70. Séries temporais e hodógrafa extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T8-C5. A hodógrafa calculada para o caso puramente Bi-Bi também é plotada como referência.	161

Figura 6.71. Hodógrafas extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelo espectro bimodal do caso T8-C5 para os demais ADVs do arranjo. As hodógrafas calculadas para o caso puramente Bi-Bi também são plotadas como referência.	162
Figura 7.1. Fotografia frontal e lateral do teste T4-B2.....	164
Figura 7.2. Fotografia frontal e lateral do teste T4-B3.....	165
Figura 7.3. Séries temporais filtradas para o caso com uma onda: $H = 0,13$ m; $T = 1,1$ s; $D = 0^\circ$; $h = 0,75$ m; e $d = 0,35$ m.....	167
Figura 7.4. Séries temporais filtradas para o caso com uma onda: $H = 0,16$ m; $T = 2,8$ s; $D = 0^\circ$; $h = 0,75$ m; e $d = 0,35$ m.....	168
Figura 7.5. Plataforma metálica destinada à colocação do arranjo 1 de USSs.....	168
Figura 7.6. Comparação entre a análise de (a) um ADV separadamente sem a introdução de ruído; e (b) arranjo com 5 ADVs e a introdução de um orbital de ruído.....	169
Figura 7.7. Espectro de Hilbert das IMFs 5 a 10 extraídas do ADV 2.2.1 para os testes T2-B2, T2-C2, T3-C2 e T1-C2.....	171
Figura 7.8. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o teste monocromático anterior ao caso T2-E1. Apenas as IMFs 5 a 10 estão plotadas.	172
Figura 7.9. Espectro direcional calculado para o arranjo 1 de USS durante o teste T4-B3.	177
Figura 7.10. Espectro direcional calculado para o arranjo 2 de USS durante o teste T4-B3.	177
Figura 7.11. Espectro direcional calculado para o arranjo 1 de USS durante o teste T2-E4 para uma configuração tipo CERC-5.	178
Figura 7.12. Espectro direcional calculado para o arranjo 1 de USS durante o teste T2-E4 para uma configuração tipo CERC-6.	179
Figura 7.13. Sobre-elevação e rebaixamento do nível médio em função da propagação das ondas Bi-Bi do caso T4B e T2B.....	180
Figura 7.14. Onda de interação subtrativa gerada pelo teste T4-B2.....	181
Figura 7.15. Círculo de Mohr para diferentes combinações de ângulos entre as ondas ‘a’ e ‘b’.....	182
Figura 7.16. Campo de tensão de radiação das componentes S_{xx} , S_{xy} e S_{yy} , respectivamente, para o teste T4-B2.	183
Figura 7.17. Aceleração resultante da ação de ondas Bi-Bi do teste T4-B2.	185
Figura 7.18. Série temporal da aceleração no eixo x resultante da ação de ondas Bi-Bi do teste T4-B2.	185

Figura 7.19. Série temporal da aceleração no eixo y resultante da ação de ondas Bi-Bi do teste T4-B2.	186
Figura 7.20. Profundidades ao longo de uma área 1 km ² , a 4 km da costa.	188
Figura 7.21. Elevação da superfície livre ao longo de uma área 1 km ² , a 4 km da costa.	188
Figura 7.22. Nível médio e campo de acelerações gerados pelas ondas Bi-Bi ao longo de uma área 1km ² , a 4 km da costa.	189
Figura A2.1. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.	213
Figura A2.2. Séries de velocidade bruta do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.	214
Figura A2.3. Séries de velocidade sem spikes do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.	215
Figura A2.4. Séries de velocidade filtrada do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.	216
Figura A2.5. Séries de velocidade rotacionada do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.	217
Figura A2.6. Órbita de velocidade final do ADV 2.2.1 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.	218
Figura A2.7. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.1 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.	218
Figura A2.8. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.2 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.	219
Figura A2.9. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.3 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.	219
Figura A2.10. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.4 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.	220
Figura A2.11. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.5 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.	220
Figura A2.12. Séries de velocidade da IMF 9 extraída do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.	221
Figura A2.13. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.1 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.	222

Figura A2.14. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.2 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.	222
Figura A2.15. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.3 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.	223
Figura A2.16. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.4 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.	223
Figura A2.17. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.5 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.	224
Figura A3.1. Gráfico tridimensional de saída do WaveLab [®] para o teste T4-B2.	225

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Matriz de interações aditivas (+) e subtrativas (-). Legenda das cores: azul claro - 1ª ordem; verde claro - 2ª ordem; vermelho claro - 3ª ordem; amarelo claro - 4ª ordem; cinza claro - 5ª ordem; verde escuro - 6ª ordem.....	3
Tabela 1.2. Características do sistema bimodal do dia 07/07/2018 na foz do Rio Doce, Espírito Santo.	5
Tabela 1.3. Matriz de períodos de interações aditivas (+) e subtrativas (-), respectivamente. Legenda das cores: azul claro - 1ª ordem; verde claro - 2ª ordem; vermelho claro - 3ª ordem; amarelo claro - 4ª ordem; cinza claro - 5ª ordem; verde escuro - 6ª ordem.....	6
Tabela 4.1. Características principais dos grupos de testes ($h \rightarrow$ coluna d'água; $d \rightarrow$ profundidade dos ADVs; H_a e $H_b \rightarrow$ altura de onda; $T \rightarrow$ período de onda; $D \rightarrow$ direção de onda).	50
Tabela 4.2. Combinação de ângulos para teste T1-B, onde $H_a = H_b = 0,13$ m, $T_a = 1,2$ s e $T_b = 1,5$ s. Combinações semelhantes foram feitas para todos os outros testes.	51
Tabela 4.3. As seis combinações de períodos feitas para cada grupo de teste.	53
Tabela 4.4. Coordenadas de cada instrumento e profundidades dos ADVs. Os USSs do arranjo 1 são numerados como '1.1.x', do arranjo 2 como '2.1.x', e os ADVs como '2.2.x', onde 'x' é o número mostrado na Figura 4.2.	58
Tabela 5.1. Média (μ_D) e desvio padrão (σ_D) da inclinação angular de cada ADV durante o dia 15/12/2017.	70
Tabela 5.2. Algoritmo da MEMD como proposto por REHMAN e MANDIC (2009).	76
Tabela 5.3. Erros sintéticos adicionados às componentes de velocidade U, V e W, separadamente.	86
Tabela 5.4. Parâmetros das ondas Bi-Bis ajustados pelo MMQNL.	90
Tabela 6.1. Resumo das propriedades das ondas Bi-Bi dos subgrupos selecionados para apresentação de resultados.....	92
Tabela 6.2. Resumo das características dos testes T4-B.	92
Tabela 6.3. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T4-B2... ..	94
Tabela 6.4. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T4-B2.....	97
Tabela 6.5. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T4-B2.	98
Tabela 6.6. Resumo das características dos testes T6-B.	100
Tabela 6.7. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T6-B2.	102

Tabela 6.8. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T6-B2.....	105
Tabela 6.9. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T6-B2.	105
Tabela 6.10. Resumo das características dos testes T2-C.	108
Tabela 6.11. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T2-C4.	109
Tabela 6.12. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T2-C4.	112
Tabela 6.13. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T2-C4.	112
Tabela 6.14. Resumo das características dos testes T5-E.....	115
Tabela 6.15. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T5-E5.	116
Tabela 6.16. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T5-E5.	119
Tabela 6.17. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T5-E5.	119
Tabela 6.18. Resumo das características dos testes T1-E.....	122
Tabela 6.19. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T1-E3.	123
Tabela 6.20. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T1-E3.	126
Tabela 6.21. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T1-E3.	126
Tabela 6.22. Resumo das características dos testes T3-A.	129
Tabela 6.23. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T3-A2.	130
Tabela 6.24. Resumo das características dos testes T2-E3 (ou T7-E3).....	135
Tabela 6.25. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias para a sétima repetição do teste T7-E3, ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear.	136
Tabela 6.26. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.1 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	140

Tabela 6.27. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.2 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	140
Tabela 6.28. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.3 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	141
Tabela 6.29. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.4 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	141
Tabela 6.30. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.5 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	142
Tabela 6.31. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.1 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	144
Tabela 6.32. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.2 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	145
Tabela 6.33. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.3 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	146
Tabela 6.34. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.4 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	147
Tabela 6.35. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.5 durante as 10 repetições do teste T7-E3.	148
Tabela 6.36. Resumo das características do teste T8-B2 e comparação com o T4-B2 (s = espalhamento direcional, em que x% da energia na direção de pico foi espalhada igualmente entre as direções adjacentes).....	149
Tabela 6.37. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T8-B2.	150
Tabela 6.38. Resumo das características do teste T8-C5 e comparação com o T4-C5 (s = espalhamento direcional, em que x% da energia na direção de pico foi espalhada igualmente entre as direções adjacentes).....	157
Tabela 6.39. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T8-C5.	158
Tabela 7.1. Características principais dos testes T2-B2, T2-C2, T3-C2 e T1-C2.....	171
Tabela 7.2. Resumo das características do teste T4-B3.	175
Tabela 7.3. Valores de frequência (Hz), comprimento (m) e ângulo (°) das interações aditivas do teste T4-B3, respectivamente.	176
Tabela 7.4. Valores de frequência (Hz), comprimento (m) e ângulo (°) das interações subtrativas do teste T4-B3, respectivamente.	176
Tabela 7.5. Resumo das características do teste T2-E4.....	178

Tabela 7.6. Características do sistema Bi-Bi simulado no dia 07/07/2018 em uma região próxima à foz do Rio Doce, Espírito Santo. Ângulos em azimute.....	187
Tabela A1.1. Características das ondas Bi-Bi simuladas em cada grupo de teste (H_a e H_b → altura de onda; T_a e T_b → período de onda; L_a e L_b → comprimento de onda; D_a e D_b → direção de onda; h → coluna d'água; d → profundidade dos ADVs; e # Teste → número sequencial dos testes realizados). O asterisco a esquerda dos testes identifica aqueles cujos resultados foram apresentados no Capítulo VI.	204
Tabela A3.1. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T4-B2.....	226
Tabela A3.2. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T6-B2.....	226
Tabela A3.3. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T2-C4.....	227
Tabela A3.4. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T5-E5.....	227
Tabela A3.5. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T1-E3.....	227
Tabela A3.6. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T3-A2.	227

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Ondas de infragravidade são ondas que possuem frequências de 0,004 Hz a 0,04 Hz e amplitudes da ordem de 10^0 a 10^1 cm. Seus comprimentos podem ser muito maiores que os das ondas geradas pelo vento, com valores da ordem de 10^2 a 10^3 m, tornando-as difíceis de serem identificadas no mar. Assim como as ondas de gravidade, as ondas de infragravidade possuem a força gravitacional como sua força restauradora.

As primeiras observações destas oscilações de baixa frequência foram feitas por MUNK (1949), na Califórnia – EUA, e TUCKER (1950), em Cornwall – Inglaterra. De forma independente, ambos autores identificaram em seus registros uma correlação entre o grupo de ondas incidente na costa e uma oscilação da superfície livre fora da zona de arrebentação, de pequena amplitude, mas com períodos de 2 a 3 min. O fenômeno foi denominado batimento de surfe (*surf beat*) e associado à envoltória do grupo de onda que causaria um transporte de massa variável dentro do grupo.

Somente após o trabalho de LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964), uma base teórica e conceitual foi ajustada para explicar a formação das ondas de infragravidade. A introdução da ideia de tensão da radiação para ondas do oceano permitiu a descrição matemática de propriedades de longo período resultantes das interações não-lineares entre as ondas de gravidade. Tornou-se possível, então, compreender melhor a dinâmica não-linear dos grupos de ondas, nível médio da superfície livre, fluxo de massa integrado na coluna d'água e vários dos principais mecanismos que regem a hidrodinâmica costeira.

Ressalta-se que o conceito de tensão de radiação foi também criado, de forma independente, por DORRESTEIN (1961) e LUNDGREN (1963), tendo este autor dado o nome de impulso de onda (*wave thrust*) para o fenômeno. No entanto, a base matemática mais sólida desenvolvida por LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964) tornou o seu trabalho, e conseqüentemente o termo ‘tensão de radiação’, referência na Engenharia Costeira.

De acordo com BERTIN *et al.* (2018), as ondas de infragravidade são, no momento atual, amplamente reconhecidas como responsáveis por impactos significativos na hidrodinâmica e morfodinâmica de áreas costeiras como portos, praias arenosas, enseadas e recifes de corais. JANSSEN (2003) afirma que a lenta modulação das ondas de

infragravidade pode causar ressonância dentro de portos, afetando o sistema de atracação dos navios e a altura da onda de projeto para estruturas portuárias. De acordo com o autor, a consideração das forçantes das ondas de infragravidade deveria ser normativa aos projetos portuários.

Estas oscilações de longo período podem impulsionar as correntes de retorno (DALRYMPLE *et al.*, 2011); se propagar em aquíferos nas costas arenosas e causar fluxos de água subterrâneos através de cordões arenosos que separam o mar e as lagunas costeiras (GENG e BOUFADEL, 2015; LI e BARRY, 2000; LONGUET-HIGGINS, 1983); intensificar o espraiamento (*run-up*) e galgamento (*over-topping*) sobre dunas, estruturas e recifes de coral (CHERITON *et al.*, 2016); e eventualmente dominar o transporte de sedimentos na zona de surfe (AAGAARD e GREENWOOD, 2008). Ondas de infragravidade têm ainda sido associadas a vibrações em falésias costeiras, levando à sua instabilidade e erosão (YOUNG *et al.*, 2011); e relacionadas com as ondas sísmicas na crosta planetária, um fenômeno conhecido como “o zumbido” (*the hum*), amplamente descrito por ARDHUIN *et al.* (2015).

A onda de infragravidade não é o único subproduto das interações não-lineares entre ondas. SHARMA e DEAN (1981) desenvolveram as equações fundamentais que explicam matematicamente o surgimento de ondas não-lineares em 2ª ordem na esbeltez da onda. A partir da soma e subtração de frequências e vetores número de onda, os autores mostraram quais as frequências e direções de propagação de cada componente não-linear gerada.

As equações de SHARMA e DEAN (1981) utilizam a teoria de onda de Stokes (STOKES, 1847) e, conseqüentemente, o método de perturbação para descrição das interações onda-onda. A chamada ‘ordem de interação’ se refere ao expoente da variável de esbeltez da onda, $(kH/2)^x$, dentro da função que descreve a oscilação, onde k é o número de onda e H a altura. Se $x = 1$, a função é de 1ª ordem e linear na esbeltez da onda. Se $x = 2$ a função é não-linear de 2ª ordem e assim por diante.

A Tabela 1.1 apresenta a matriz de interação resultante da propagação simultânea das ondas ‘a’ e ‘b’ no mesmo meio. As diferentes cores representam interações de mesma ordem. Por exemplo, as interações de 3ª ordem estão representadas pela cor vermelho claro e são: $3f_a$, $2f_a \pm f_b$, $f_a \pm 2f_b$ e $3f_b$.

Tabela 1.1. Matriz de interações aditivas (+) e subtrativas (-). Legenda das cores: azul claro - 1ª ordem; verde claro - 2ª ordem; vermelho claro - 3ª ordem; amarelo claro - 4ª ordem; cinza claro - 5ª ordem; verde escuro - 6ª ordem.

Matriz de interação		Harmônicos da onda 'a'			
		f_a	$2f_a$	$3f_a$...
Harmônicos da onda 'b'	f_b	$f_a \pm f_b$	$2f_a \pm f_b$	$3f_a \pm f_b$...
	$2f_b$	$f_a \pm 2f_b$	$2f_a \pm 2f_b$	$3f_a \pm 2f_b$...
	$3f_b$	$f_a \pm 3f_b$	$2f_a \pm 3f_b$	$3f_a \pm 3f_b$...

Nota-se que a frequência de qualquer onda interativa depende unicamente das frequências das ondas primárias. A partir da matriz de interações, observa-se a vasta quantidade de frequências que estão envolvidas dentro de um fenômeno tão básico quanto a simples propagação simultânea de duas ondas.

Apesar de não serem o foco deste trabalho, frequências aditivas são de grande relevância para a Engenharia Costeira. As interações de alta frequência podem causar ressonância em estruturas e até mesmo em falésias costeiras. Segundo LONGUET-HIGGINS (1950) a interação aditiva de 2ª ordem entre ondas de mesmo período e direções diferentes podem gerar microssismos, que é a contínua oscilação do leito com períodos de 3 a 10 s.

Dentre as interações subtrativas, a interação de 2ª ordem na teoria de Stokes, $f_a - f_b$, é responsável por uma das ondas de infragravidade muito estudadas na literatura, e é também o foco deste estudo. Dependendo da combinação de frequências do par de ondas, não necessariamente a onda de interação subtrativa de 2ª ordem se restringirá aos limites de 0,004 Hz a 0,04 Hz, como demanda a definição da onda de infragravidade. No entanto, mesmo que sua frequência não satisfaça essa definição, esse fenômeno não-linear permanece presente na Natureza caso haja a propagação simultânea de ao menos duas ondas distintas, como em mares bimodais.

I.1. MARES BIMODAIS

Espectros bimodais são uma característica comum em muitos lugares ao redor do mundo, seja na costa aberta ou dentro dos ambientes estuarinos (BERTIN e OLABARRIETA, 2016; BOUDET *et al.*, 1991; SZMYTKIEWICZ e RÓZYNSKI, 2016). RAPIZO *et al.* (2015) observaram os dados de ondas de vento de uma boia atracada no Oceano Índico, ao sul da costa australiana, e identificaram que os espectros bimodais estavam presentes em 26% dos registros. Até casos trimodais (3%) foram identificados. MELO *et al.* (1995)

e PARENTE *et al.* (2015) atestam que um longo trecho da costa brasileira está sujeito ao clima de onda bimodal resultante de diferentes sistemas meteorológicos, em latitudes baixas e altas do Oceano Atlântico Norte e Sul, resultando em regimes simultâneos de ondas geradas local (*local sea*) e remotamente (*swell*). Tais regimes oceanográficos podem ser suficientes para a geração de ondas de interação subtrativa de 2ª ordem na região costeira.

A Figura 1.1 mostra uma foto tirada no dia 07/07/2018 na praia da Regência, foz do Rio Doce, Espírito Santo – Brasil. A foto aérea permite a identificação visual de dois sistemas de onda distintos. A frente de onda de propagação normal à praia fica mais evidente na região central da fotografia, enquanto a frente de onda que se aproxima de forma oblíqua ao litoral é mais visível na parte superior da imagem. Na região central da foto, observam-se regiões onde a sobreposição das cristas dos dois sistemas geram formas losangulares, semelhante ao que foi observado por INMAN *et al.* (1971) e que inspirou DALRYMPLE (1975) a propor uma nova hipótese sobre a formação de correntes de retorno (*rip currents*).

A Figura 1.2 apresenta o espectro direcional calculado a partir dos dados de uma boia localizada na costa da cidade de Vitória/ES (PNBOIA: Boia Vitória), a uma profundidade de 546 m, para o mesmo instante da Figura 1.1. A análise confirma a presença de um espectro bimodal na região, com um sistema proveniente de Leste e outro de Sul. NOGUEIRA (2014) mostra que a região do Espírito Santo é constantemente atingida por espectros bimodais devido à frequente atuação conjunta do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do Anticiclone Móvel Polar. A Tabela 1.2 apresenta as características principais do sistema bimodal do dia 07/07/2018 e a Tabela 1.3 os valores dos períodos esperados para as ondas resultantes das interações não-lineares entre os dois sistemas.

É importante ressaltar que o espectro da Figura 1.2 foi gerado com um corte na frequência de 0,0418 Hz, uma vez que não se havia o interesse específico em detectar as interações onda-onda. Portanto, qualquer onda com período inferior a 23,92 s não poderia ser representada na figura, o que inclui a onda de interação subtrativa de 2ª ordem ($T^- = 65,74$ s).

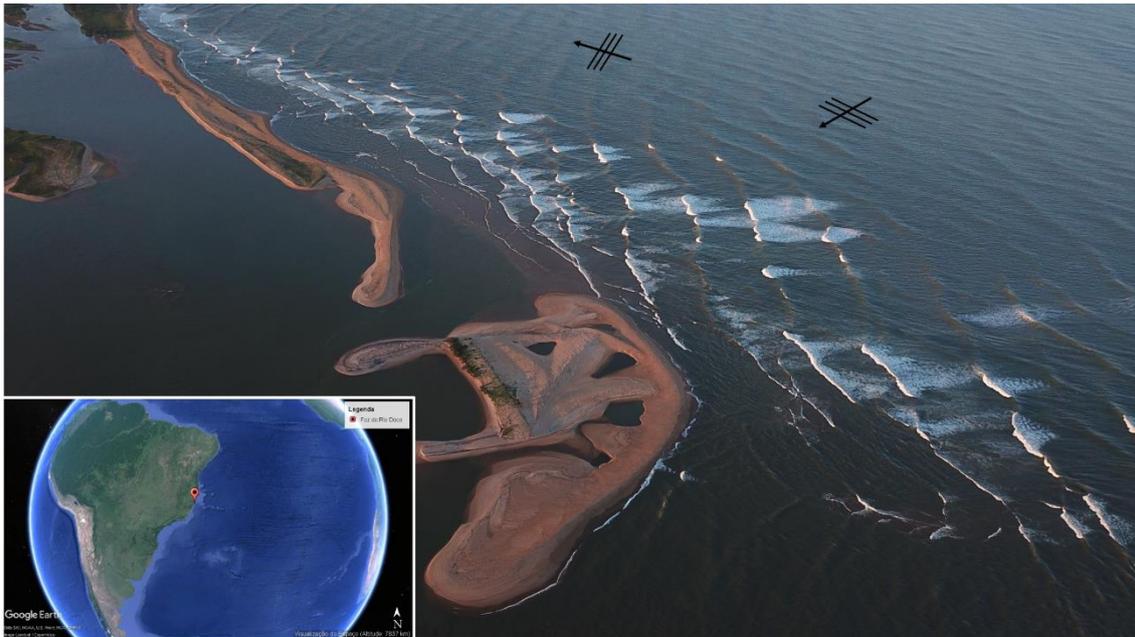


Figura 1.1. Ação de um mar bimodal na praia da Regência, na foz do Rio Doce, Espírito Santo, no dia 07/07/2018. Cortesia da fotógrafa Ana Catarina (<http://www.anacatarinaphoto.com/>).

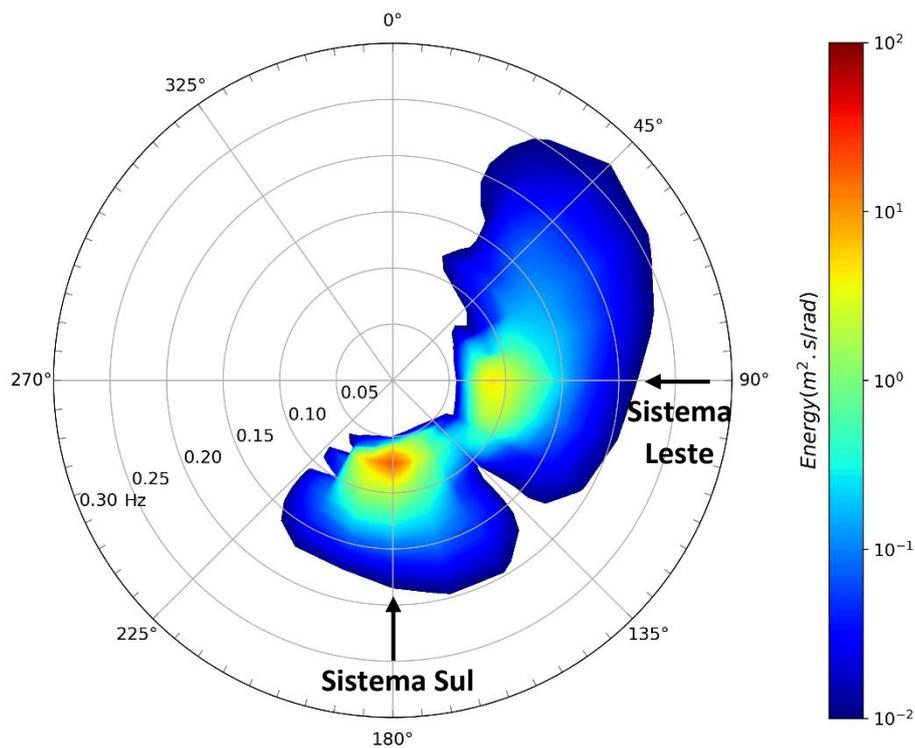


Figura 1.2. Espectro direcional para o dia 07/07/2018 calculado a partir dos dados da Boia Vitória do projeto PNBOIA (Latitude 19°55'33,96" S, Longitude: 39°41'28,68" O). Resolução espectral de 0,0041 Hz com corte aplicado às frequências menores que 0,0418 Hz. Cortesia da M.Sc. Oc. Izabel Christina Martins Nogueira.

Tabela 1.2. Características do sistema bimodal do dia 07/07/2018 na foz do Rio Doce, Espírito Santo.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	2,91	13,5	180° (S)
a	1,54	11,2	90° (E)
b	2,47	13,5	180° (S)

Tabela 1.3. Matriz de períodos de interações aditivas (+) e subtrativas (-), respectivamente. Legenda das cores: azul claro - 1ª ordem; verde claro - 2ª ordem; vermelho claro - 3ª ordem; amarelo claro - 4ª ordem; cinza claro - 5ª ordem; verde escuro - 6ª ordem.

Períodos de interações aditivas / subtrativas		T_a (s)	$T_{a/2}$ (s)	$T_{a/3}$ (s)	...
		11,2	5,60	3,73	...
T_b (s)	13,50	6,12 / 65,74	3,96 / 9,57	2,92 / 5,16	...
$T_{b/2}$ (s)	6,75	4,21 / 16,99	3,06 / 32,87	2,40 / 8,35	...
$T_{b/3}$ (s)	4,50	3,21 / 7,52	2,50 / 22,91	2,04 / 21,91	...
...

Outros exemplos de sistemas bimodais ao redor do mundo são ilustrados na Figura 1.3. Nas imagens (a), (b) e (c), a presença de um sistema bimodal é nítida, com a arrebenção das ondas nos vértices dos losangos, onde há a sobreposição de cristas. O mar bimodal na imagem (d) não é tão claro quanto dos exemplos anteriores, mas alguns aspectos da fotografia indicam a presença de mais de um sistema atingindo a costa, como: (i) o formato losangular das cristas na região próxima ao limite do píer; e (ii) o desalinhamento das cristas próxima à zona de arrebenção.



Figura 1.3. Sistemas de mar bimodal ao redor do mundo: (a) e (b) Nova Zelândia (foto: Rambo Estrada - <http://www.estradasurfing.co.nz/>); (c) Île de Ré - França (Michael Griffon - [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Île de r%C3%A9.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Île_de_r%C3%A9.JPG)); (d) Huntington Beach - EUA (Pat Nolan - <http://www.patnolanphoto.com/>).

Assim como foi feito no exemplo do Espírito Santo, o clima de ondas e consequentemente as ondas de interação são, em geral, caracterizados a partir da análise de dados de boia ou

sensores de pressão que fornecem, de forma direta ou indireta, séries temporais da variação da elevação da superfície livre. Nos últimos 60 anos, a análise espectral de Fourier tem sido o método mais comum de se analisar tais dados de medição, e é responsável por grande parte do avanço científico no estudo sobre ondas.

Apesar da boa eficiência e acurácia para a caracterização do clima de onda, seja em campo, laboratório ou modelos numéricos, essa metodologia contém algumas limitações que devem ser sempre fruto de investigação científica.

I.2. TÉCNICAS DE ANÁLISE ADAPTATIVA

Uma hipótese básica da transformada de Fourier consiste em pressupor que o fenômeno em estudo seja linear, estacionário e ergódico, uma vez que o método decompõe a série analisada em funções seno ou cosseno com amplitudes e frequências constantes, múltiplas da frequência fundamental. Portanto, qualquer alteração do fenômeno que ocorra dentro do período da janela de medição não será captada de forma adequada.

Para superar esta limitação as chamadas técnicas adaptativas vêm sendo continuamente desenvolvidas e cada vez mais aplicadas ao estudo das ondas de gravidade, dentre as quais destacam-se a Wavelet e a Transformada de Hilbert-Huang. A Wavelet utiliza funções matemáticas ondulatórias (*wavelets*) que, assim como as funções seno e cosseno da análise de Fourier, servem de base para a representação dos fenômenos em análise. Apesar de possibilitar a captação da não-estacionariedade dos processos, esse método ainda pressupõe a linearidade do sistema e parte de funções pré-estabelecidas.

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) foi proposta por HUANG *et al.* (1998) como uma ferramenta para a análise de processos não-lineares e não-estacionários. Diferentemente da análise de Fourier e da Wavelet, a HHT não impõe *a priori* funções matemáticas aos fenômenos em estudo, deixando que os dados “falem por si”. Pela semelhança entre os princípios desse método e a natureza das ondas de interações não-lineares, a HHT foi escolhida como a ferramenta principal de análise ao longo deste trabalho.

I.3. MODELAGEM FÍSICA

O interesse dos efeitos das ondas de infragravidade sobre o transporte litorâneo e estruturas costeiras vem crescendo de forma exponencial na comunidade científica (BERTIN *et al.*, 2018). No entanto, a literatura ainda é insuficiente para consolidar os

aspectos teóricos do assunto e proporcionar diagnósticos e prognósticos adequados aos fenômenos de interesse.

A maioria dos projetos de engenharia se apoia sobre modelos matemáticos e numéricos que consideram os efeitos de apenas uma onda – altura (significativa), período e direção (de pico), na zona costeira. Mas qual seria o transporte litorâneo resultante para a praia da Regência no dia 07/07/2018? As forças de um sistema bimodal atuantes sobre grãos de areia ou estruturas costeiras podem ser simplesmente somadas? É preciso ter em mente que a superposição linear dos efeitos individuais de cada onda pode não ser adequada devido às interações não-lineares.

Como muitas incertezas ainda permanecem, investigações científicas básicas são necessárias para observar, entender e quantificar as interações de ondas não-lineares com o ambiente costeiro. Devido à complexidade de tal sistema, estudos experimentais em um ambiente adequado são de grande necessidade no momento para superar os obstáculos teóricos.

Neste trabalho, experimentos em laboratório foram realizados na bacia tridimensional de ondas do *Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen*, da *Leibniz Universität Hannover*, Alemanha. A bacia multidirecional possui condições ideais para a geração simultânea de ondas de diferentes períodos e direções e o estudo das ondas de interação não-linear. Como simplificação básica de experimento em laboratório, ondas bicromáticas e bidirecionais (doravante chamadas de ondas Bi-Bi) foram geradas, ou seja, apenas duas ondas com períodos e direções distintas.

I.4. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar as ondas Bi-Bi a partir da medição das órbitas de velocidade das ondas em um ambiente controlado – bacia experimental, com a instrumentação adequada para caracterizar as interações não-lineares, em especial a interação subtrativa de 2ª ordem, usando técnicas adaptativas em vez de técnicas espectrais tradicionais. Devido às características das ondas de infragravidade mais comumente observadas na Natureza – longo período e pequena amplitude, acredita-se que sua detecção seja mais adequada a partir do campo de velocidades em vez da elevação da superfície livre. A velocidade é uma grandeza vetorial tridimensional, carregando consigo mais informação do que a medição pontual da superfície livre. Além disso, instrumentos de medição de velocidade, como o *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)*,

são mais sensíveis do que instrumentos resistivos e capacitivos de medição da superfície livre, sendo capazes de detectar, com maior precisão, oscilações de pequena magnitude.

I.5. ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O texto da presente tese possui oito capítulos:

Neste **Capítulo I**, buscou-se apresentar uma breve contextualização do problema a ser analisado nesta tese, mostrando a existência de mares bimodais ao redor do mundo, a oscilação de baixa frequência gerada, algumas perguntas ainda em aberto no campo da Ciência e as principais técnicas de análise desses fenômenos.

No **Capítulo II**, uma revisão bibliográfica é feita, detalhando-se o início do interesse científico sobre as ondas de infragravidade e todo o esforço feito por diversos pesquisadores para a compreensão deste fenômeno. O **Capítulo III** apresenta os primeiros passos do autor deste trabalho para dar continuidade ao avanço científico sobre os efeitos das ondas Bi-Bi na costa, e mostra o desenvolvimento das equações da tensão de radiação sob influência de pares de ondas. Uma discussão mais detalhada sobre as características das ondas de interação subtrativa de 2ª ordem também é feita.

O **Capítulo IV** descreve toda a etapa de modelagem física feita na bacia de ondas, detalhando-se as características da bacia, os instrumentos de medição utilizados, além do planejamento dos testes. No **Capítulo V** as etapas de pós-processamento de dados são discutidas e a metodologia da HHT é apresentada de forma detalhada.

O **Capítulo VI** exhibe os resultados representativos das análises feitas sobre todos os testes realizados, e o **Capítulo VII** faz uma discussão sobre a aplicação da HHT aos dados de velocidades orbitais, propõe recomendações para a melhoria dos resultados e faz uma ligação entre as ondas não-lineares extraídas nos experimentos com os resultados das equações de tensão de radiação desenvolvidas para ondas Bi-Bi.

Por fim, o **Capítulo VIII** traça as principais conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estados de mar multimodais e multidirecionais são a condição essencial e necessária para a formação de grupos de ondas bidimensionais que resultam da interação entre os trens de ondas de gravidade, cada um com seu próprio período, altura e direção de propagação. Devido à diferença de celeridade de cada componente, dada pela equação de dispersão, geram-se, a partir da superposição das ondas, regiões construtivas e destrutivas ao longo do campo de propagação, ou seja, locais de maiores e menores alturas de onda, respectivamente.

ZHANG e CHEN (1999) classificaram as interações dentro do grupo de ondas como “fortes” e “fracas”. Interações fortes aparecem imediatamente após o início da propagação de ondas livres, estão intrinsecamente relacionadas à existência das ondas primárias, não seguem uma relação de dispersão, e são geralmente referidas como ondas aprisionadas (*bound waves*). As interações fracas, por sua vez, estão relacionadas com a transferência de energia entre diferentes frequências e só podem iniciar quando condições específicas são atendidas (PHILLIPS, 1960); são geralmente referidas como ondas ressonantes (*resonant waves*). No entanto, uma vez que tais ondas são formadas, não dependem mais das ondas primárias e se propagam como ondas livres, de acordo com a equação de dispersão. As interações fortes podem ser expressas matematicamente usando teorias de até 2ª ordem, enquanto interações fracas requerem expressões de 3ª ou 4ª ordem na esbeltez da onda.

As ondas aprisionadas, resultantes da interação forte, são o foco deste trabalho. A interação subtrativa de 2ª ordem é apenas uma das interações fortes que geram ondas aprisionadas. Exemplos dessa onda de interferência subtrativa estão ilustradas na Figura 2.1. Seus períodos são relacionados ao período característico do grupo, em geral, de infragravidade (25 s a 250 s) dependendo dos períodos primários. A Figura 2.1a e a Figura 2.1c ilustram o grupo de ondas formado por duas ondas de diferentes períodos ($T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s), porém colineares, e a onda de interação subtrativa gerada, respectivamente. A Figura 2.1b apresenta o grupo formado pelas mesmas ondas, porém com 30° de diferença nos seus ângulos de propagação, e a Figura 2.1d a onda não-linear de longo período gerada.

Embora desde a década de 1950 as ondas de infragravidade tenham sido motivo de grande interesse científico, na maioria das vezes as suas propriedades direcionais não foram abordadas. Segundo NOSE *et al.* (2016), um dos motivos pode ser a complexidade dos seus mecanismos de geração e a inerente dificuldade de se medir com acurácia sinais de pequenas magnitudes e de grandes períodos.

Quando o grupo de ondas é unidirecional, é evidente que a direção de propagação da onda aprisionada é a mesma do grupo (Figura 2.1c). No entanto, quando as ondas primárias se interceptam em diferentes direções, a direção dessa oscilação não-linear passa a não ser mais trivial (Figura 2.1d). A seguir, alguns dos principais trabalhos publicados são descritos, separadamente, entre aqueles que consideram ondas colineares ou multidirecionais.

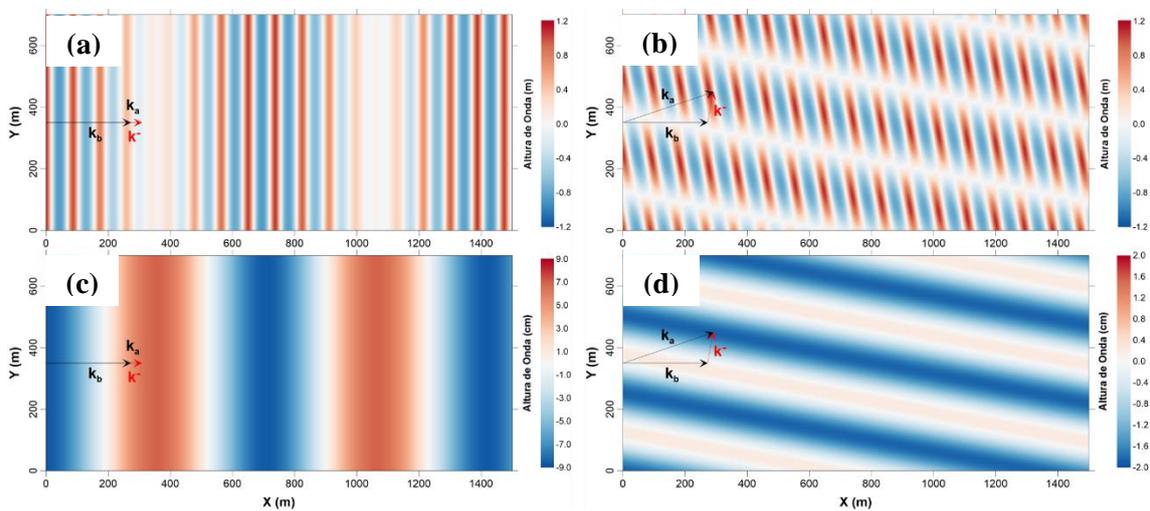


Figura 2.1. Grupo de ondas composto por duas ondas bicromáticas (a) colineares e (b) não colineares, e a onda de interferência subtrativa gerada pelo grupo (c) colinear e (d) não colinear. O vetor número de onda das ondas primárias e de interação subtrativa estão representados para indicar a direção de propagação das ondas.

II.1. GRUPOS UNIDIRECIONAIS

Nesta seção são descritos fenômenos que podem ser explicados pela propagação de um grupo de onda unidirecional, ou seja, em que todas as ondas do grupo são colineares.

II.1.1. Batimento de surfe

O termo *surf beat* foi primeiramente utilizado por MUNK (1949). Durante uma campanha de campo realizada no *Scripps Institution of Oceanography* em La Jolla, Califórnia – EUA, foram instalados um registrador de tsunamis e um sensor de pressão a 304,8 m e 609,6 m da costa, respectivamente. Enquanto o primeiro instrumento tinha por objetivo

registrar oscilações de baixa frequência da superfície livre, o sensor mais ao largo era responsável por medir as ondas incidentes à costa. Os dados do registrador de tsunamis mostravam que havia uma oscilação com período de 2 a 3 min que se propagava para alto mar. A partir da análise do transporte de massa, MUNK (1949) sugeriu que durante períodos de ondas com alturas maiores que a média, havia um excesso de transporte de massa em direção à costa, que deveria ser equilibrado por um transporte em sentido oposto. Esse equilíbrio se daria pela onda longa medida pelo registrador de tsunami, e que tinha uma defasagem de 140 s em relação às ondas de curto período. O atraso registrado seria o tempo necessário para que as ondas de *swell* incidissem na costa e fossem refletidas para alto mar na forma de uma onda longa e de baixa frequência.

A partir de dados de campo medidos em Perranporth, em Cornwall, Inglaterra, TUCKER (1950) detectou uma relação entre as alturas das ondas longas medidas e as alturas do grupo de ondas de alta frequência. Assim como Munk, Tucker também observou um atraso (de 4 a 5 min) entre os dois tipos de onda, e o associou ao tempo necessário para a incidência das ondas curtas na costa e seu retorno como onda longa refletida. A partir da teoria de conservação da quantidade de movimento, Tucker propôs que a chegada do grupo de ondas na zona de arrebentação causaria um aumento do transporte de massa em direção à costa. De forma equivalente, haveria de ter um transporte de massa no sentido oposto, provocando o rebaixamento do nível do mar na linha de arrebentação. Esse rebaixamento se propagaria para alto mar em forma de uma onda longa de baixa frequência.

Um das primeiras explicações matemáticas para a geração de ondas de infragravidade veio com os trabalhos de LONGUET-HIGGINS e STEWART (1960, 1961, 1962, 1964), onde o conceito de tensão de radiação para ondas oceânicas foi definido para uma onda monocromática como “o excesso de fluxo de quantidade de movimento devido à presença das ondas”. De acordo com os autores, a tensão de radiação é proporcional ao quadrado da altura da onda e tem a natureza de um tensor. As equações (2.1) a (2.3) mostram as componentes normais e de cisalhamento do tensor de tensão, S_{ij} , onde E é a energia de onda por unidade de área; n é a razão entre a velocidade de grupo e a celeridade da onda; e θ é o ângulo de propagação da onda em relação ao sistema de coordenadas x - y .

$$S_{xx} = E \left[n \left(\cos^2 \theta + 1 \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.1)$$

$$S_{yy} = E \left[n \left(\sin^2 \theta + 1 \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.2)$$

$$S_{xy} = \frac{E}{2} n \sin 2\theta \quad (2.3)$$

Assim, dentro de um grupo de ondas, onde existe uma lenta e periódica variação das alturas das ondas de curto período, há também uma variação da tensão de radiação, que é compensada pelo gradiente do nível médio da água das regiões de maiores para menores alturas de onda, conhecidas como rebaixamento e sobre-elevação do nível médio. A comparação entre a Figura 2.1a e a Figura 2.1c ilustra essa diferença de 180° entre as fases da envoltória do grupo e da onda de infragravidade, para o caso de ondas progressivas.

Ademais, os autores propuseram que, na zona de arrebentação, enquanto as ondas primárias do grupo são dissipadas pela quebra, a onda longa forçada é liberada e refletida pela costa, passando a obedecer à equação de dispersão. Essa onda livre e de baixa frequência seria aquela captada pelos instrumentos nos estudos de MUNK (1949) e TUCKER (1950).

II.1.2. Ondas de Borda

Se o ataque do grupo de ondas for oblíquo à costa, a onda refletida não mais se propagará em um sentido próximo ao do vetor normal à costa, como o fenômeno do batimento de surfe. Caso a incidência das ondas primárias seja com um ângulo igual ou superior a um crítico de incidência, ao menos parte da onda longa refletida é refratada totalmente a tal ponto que não consegue sair da zona de surfe (DEAN e DALRYMPLE, 2004), dando origem às ondas de borda (*edge waves*). A componente que escapa e se propaga para alto mar é chamada de *leaky waves*.

Ondas de borda são ondas livres de infragravidade refletidas pela costa e aprisionadas na zona de arrebentação devido à refração. Possuem amplitudes máximas próximo ao litoral e decaem em direção a alto mar (BOWEN, 1972). Possuem uma equação de dispersão própria (GALLAGHER, 1971) e podem ser progressivas, mas com maior frequência são estacionárias.

Estudos iniciais de BOWEN e INMAN (1971) constataram que as ondas de borda sofrem um processo de ressonância gerado pela incidência das ondas primárias. No entanto, HUNTLEY e BOWEN (1973) perceberam em seus experimentos que as ondas de borda são subharmônicos das ondas incidentes, fato que também foi identificado em alguns casos pelos primeiros autores.

Em um dos principais esforços para a investigação das ondas de borda e do batimento de surfe, HUNTLEY *et al.* (1981) realizaram medições de campo na praia de Torrey Pines, em San Diego, Califórnia – EUA. Foram utilizados 19 correntômetros, sendo 10 na longitudinal localizados na metade da zona de surfe, e 10 na transversal percorrendo a distância da zona de espraiamento até um ponto afastado em 320 m da zona de arrebatção. A análise dos dados do eixo longitudinal, deixou evidente a presença de uma onda de borda de caráter progressivo e com a mesma frequência da onda de batimento de surfe.

Após a sua descoberta, as ondas de borda se tornaram um dos principais focos de estudo na investigação de formações rítmicas na face de praia, como as cúspides e correntes de retorno (BOWEN e INMAN, 1971, GUZA e INMAN, 1975, KOMAR, 1976, HUNTLEY e BOWEN, 1978, RASCH *et al.*, 1993, HOLLAND e HOLMAN, 1996, PRUSZAK *et al.*, 2007, GARNIER *et al.*, 2010). Na Figura 2.2 cúspides são observadas na praia de Botafogo e do Leme. Esse tipo de formação rítmica é visto como sendo uma impressão da onda de borda, aprisionada dentro da zona de arrebatção. Na Figura 2.2b, correntes de retorno são também observadas.



Figura 2.2. Cúspides e correntes de retorno presentes em praias do Rio de Janeiro: (a) Praia de Botafogo (09/08/2015) e (b) Praia do Leme (15/07/2016). Imagens capturadas do Google Earth.

II.1.3. Outros estudos

BERTIN e OLABARRIETA (2016) estudaram a propagação da onda de infragravidade no canal de maré da lagoa de Albufeira, em Portugal. A partir de medições de campo e simulações feitas com o modelo numérico XBeach (ROELVINK *et al.*, 2009), concluíram que a onda de infragravidade adentra a lagoa pelo canal de maré durante períodos de enchente, podendo ser temporariamente responsável por até 100% das magnitudes de velocidade. Durante a vazante, no entanto, a onda de infragravidade é bloqueada pelas correntes de maré. Segundo os autores, essa flutuação da dinâmica da onda de baixa frequência pode levar a lagoa a ter uma dominância de enchente, contribuindo para o fechamento do canal de maré.

INCH *et al.* (2017) investigaram a dependência da onda de infragravidade em relação às características das ondas incidentes durante uma campanha de campo realizada na praia de Perranporth – Inglaterra. Foram identificadas ondas de infragravidade de até 1 m de altura próximo à costa, e a reflexão e dissipação da onda de infragravidade na zona de surfe também foram investigadas. Verificou-se a correlação entre diversos parâmetros das ondas de gravidade em águas profundas para se prever a altura da onda de infragravidade. No entanto, nenhum desses parâmetros continha a direção das ondas como variável.

AAGAARD e GREENWOOD (2008) realizaram medições de campo em duas praias na costa da Dinamarca e verificaram que a onda de infragravidade pode dominar o transporte de sedimento dentro da zona de surfe. Os autores afirmam que a oscilação de baixa frequência atua advectando os sedimentos ressuspensos pelas ondas de gravidade, modificando o posicionamento dos bancos de areia.

ALSINA *et al.* (2016) investigaram a evolução do perfil de praia sob a ação de diferentes grupos de ondas bicromáticas-unidirecionais. Os testes foram realizados em um canal de ondas na Universidade Politécnica da Catalunha, em Barcelona – Espanha. Foi observado que, mesmo se mantendo igual a energia imposta sobre o sistema em todos os experimentos, a variabilidade do banco do perfil foi maior para maiores períodos de grupo. Mais importante, a distância entre o banco e a linha de costa e a distância do ponto de arrebatção à linha de costa inicial aumentaram quanto maior foi o período do grupo de ondas.

O'HARA MURRAY *et al.* (2012) concluíram a partir de testes em canal de ondas que a quantidade de sedimentos em suspensão está associada à passagem de grupos de onda, ou o chamado “efeito de bombeamento de onda” (*wave pumping effect*). Esse efeito teria a capacidade de defasar a concentração de sedimento em suspensão em relação às ondas de gravidade, além de alterar a direção de transporte de sedimentos.

Com o objetivo de identificar a onda de interação subtrativa, MOURA *et al.* (2011) aplicaram a Transformada de Hilbert-Huang aos dados de velocidade horizontal gerados por ondas Bi-Bi sintéticas. Os autores verificaram que a metodologia era capaz de extrair a onda de longo período em alguns casos, mas que ainda não era suficiente para determinar com clareza o estado de mar medido.

CONDE *et al.* (2013) realizaram testes de modelo físico com ondas bicromáticas-unidirecionais em um canal de ondas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa – Portugal. O objetivo do estudo foi estudar os processos envolvidos na propagação e arrebentação de ondas sobre batimetria variável. Dados de medições da superfície livre e das velocidades foram analisados por CONDE *et al.* (2014a) e CONDE *et al.* (2014b), respectivamente, por dois métodos de análise: (i) Análise de Fourier; e (ii) Wavelet. A formação de superharmônicos e subharmônicos foram observadas nos registros, mas ficou claro que a análise das velocidades através do método adaptativo trouxe mais informação sobre os processos hidrodinâmicos do que a análise espectral de Fourier da superfície livre.

II.2. GRUPOS BIDIRECIONAIS

Apesar dos primeiros estudos sobre os efeitos de trens de ondas cruzadas sobre o litoral terem sido publicados ainda no final do século XIX (BRANNER, 1900), apenas na década de 1970 o assunto passou a ter um maior interesse científico. Usando a teoria Stokes de 2ª ordem, DALRYMPLE (1975) estudou a interação entre duas ondas com a mesma frequência, mas diferentes direções de propagação. Esta condição pode acontecer quando ondas são refletidas por uma estrutura ou uma característica morfológica natural (SMIT *et al.*, 2016).

Segundo DALRYMPLE (1975), trens de onda monocromático-bidirecional geram ondulações estáticas do nível médio do mar, que podem ser um dos possíveis mecanismos para a formação de correntes de retorno e uma explicação para o seu espaçamento uniforme (INMAN *et al.*, 1971). Na zona de arrebentação, estas oscilações espaciais

modulam a altura da onda e a circulação induzida pela onda ao longo da costa, fenômenos atribuídos, geralmente, às ondas de borda ou à batimetria irregular (BOWEN, 1969; DALRYMPLE *et al.*, 2011; XIE, 2012).

DALRYMPLE (1975) derivou analiticamente o nível médio do mar sob efeitos de grupos de ondas monocromáticas-bidirecionais através da promediação da equação de Bernoulli e obteve a seguinte expressão:

$$\bar{\eta} = -\frac{k}{8 \sinh(2kh)} \left\{ H_a^2 + H_b^2 + 4H_a H_b \sinh^2(kh) \cdot \left[\left[1 - \frac{\cos(\Delta\theta)}{\tanh^2(kh)} \right] \cos(\Delta\vec{k} \cdot \vec{x}) \right] \right\} \quad (2.4)$$

onde $\vec{x} = (x, y)$ é o vetor posição, sendo x a coordenada transversal positiva em direção à costa e y a coordenada longitudinal positiva para a direita de um observador olhando para o mar; h = profundidade local; H = altura da onda; $\Delta\vec{k} = (\vec{k}_a - \vec{k}_b)$ = vetor diferença do número da onda; $\Delta\theta = (\theta_a - \theta_b)$ = diferença entre os ângulos das ondas incidentes; e os subscritos 'a' e 'b' correspondem a cada uma das ondas primárias. Deve-se observar que a equação (2.4) descreve uma ondulação estática (independente do tempo) que estaria presente ao longo do litoral durante a ocorrência de ondas monocromáticas-bidirecionais.

Posteriormente, DALRYMPLE e LANAN (1976) realizaram testes de modelo físico e verificaram que as ondas monocromáticas-bidirecionais podem gerar cúspides, mesmo em praias onde a batimetria é uniforme e ondas de borda são inexistentes. Tais formações rítmicas são geradas pelas correntes de retorno, que apresentaram um espaçamento uniforme de acordo com o comprimento da onda estacionária não-linear, como descrito por DALRYMPLE (1975).

Alguns anos mais tarde, FOWLER e DALRYMPLE (1990) desenvolveram a teoria de correntes de retorno migratórias a partir da consideração de que as ondas incidentes pudessem ter não apenas direções, mas períodos distintos. Considerando apenas as características do grupo de ondas e permanecendo apenas na teoria linear de ondas, os autores mostraram analiticamente que ondas Bi-Bi são capazes de gerar correntes de retorno com espaçamento uniforme, que se deslocam ao longo da costa. Oito casos experimentais foram realizados na bacia tridimensional da Universidade de Delaware – EUA, com medições de velocidades em 10 pontos ao longo da praia. Os resultados

confirmaram a formação e migração das correntes de retorno, com erros de apenas $\pm 10\%$ na previsão dos seus espaçamentos.

Os primeiros pesquisadores a desenvolverem uma teoria analítica consistente para mares irregulares foram SHARMA e DEAN (1981). Os autores associaram a diferença/adição de frequências à diferença/adição de vetores de número de onda, e tomaram dentro do espectro, pares de frequências de modo a obter as ondas de interferência subtrativa/aditiva, além da auto-interação (2ª ordem) de cada onda primária. Se o par de ondas possui períodos T_a e T_b , as ondas de interação terão períodos $T_a T_b / (|T_a + T_b|)$ e $T_a T_b / (|T_a - T_b|)$. A parte subtrativa da interação é, sob certas condições, chamada de onda de infragravidade. Após o desenvolvimento das equações para o potencial de velocidade, as forças das ondas sobre cilindros puderam ser calculadas, agora com a inclusão das interferências de 2ª ordem (de alta e baixa frequência). O trabalho de SHARMA e DEAN (1981) foi inovador e é, até os dias atuais, o bloco fundamental para a compreensão de estados mais complexos de mar.

SAND (1982) utilizando-se da mesma técnica de interação entre pares de ondas de um espectro, analisou a energia e o espalhamento direcional (*spreading*) das ondas de interação subtrativa de 2ª ordem em função do espectro de ondas. Segundo o autor, o espalhamento direcional das oscilações de baixa frequência é consideravelmente maior do que o das ondas primárias. Com o interesse prático de auxiliar projetos portuários, desenvolveu um diagrama adimensional de onde é possível obter as características básicas da onda de infragravidade (altura, período e direção) em função das diferenças de frequência e ângulo entre as ondas de curto período e a profundidade de interesse.

NWOGU (1995) utilizou dados experimentais de laboratório e um modelo de Boussinesq (NWOGU, 1993) para avaliar as transformações sofridas pelo espectro direcional ao longo de um talude de 1:25 para condições de mares puramente Bi-Bi e espectros bimodais, com uma diferença de ângulo de 45° no batedor de ondas. O autor concluiu que as interações não-lineares causam mudanças significativas no espectro direcional de onda, mas que a amplificação dos subhamônicos para casos bidirecionais ou multidirecionais não é tão significativa quanto para ondas colineares.

HERBERS *et al.* (1995) verificaram na costa da Carolina do Norte – EUA, que o espectro direcional das ondas de infragravidade é, em geral, mais largo do que o espectro das ondas primárias, além de poder estar em uma direção diferente destas. RENIERS *et al.* (2010)

utilizou dados da mesma região para produzir espectrogramas da direcionalidade da onda de infragravidade e os comparou às simulações feitas com o modelo IDSB – 1D SurfBeat Model (RENIERS *et al.*, 2002). As medições e o modelo mostraram que a onda de infragravidade possui um elevado espalhamento direcional. No entanto, enquanto o resultado das medições mostrou um pico de energia maior na direção de incidência à costa, o modelo apresentou que a onda de infragravidade possuía maior energia na direção de reflexão à costa.

NOSE *et al.* (2017) utilizaram dois anos de dados medidos na costa dos EUA e da África para investigar especificamente a direcionalidade da onda de infragravidade. Os dados foram analisados por métodos espectrais tradicionais e mostraram que: (i) a altura da onda de infragravidade é fortemente relacionada positivamente com a altura das ondas de gravidade incidente; (ii) os espectros direcionais da onda de infragravidade são largos e possuem, em geral, picos nas direções de incidência e reflexão à costa; (iii) a direção de propagação da onda de infragravidade possui uma correlação positiva com a direção da onda de gravidade. No entanto, a onda de infragravidade tende a se propagar de forma mais normal à costa do que as ondas de gravidade, quando estas incidem de forma oblíqua.

MADSEN e FUHRMAN (2006) e MADSEN e FUHRMAN (2012) desenvolveram equações de 3ª ordem na teoria de Stokes para a elevação da superfície livre e para o potencial de velocidades ao longo da coluna d'água em condições de ondas Bi-Bi e multicromáticas-multidirecionais, respectivamente. Os modelos permitem a inserção de uma corrente ambiente e levam em consideração a equação de dispersão de 3ª ordem. São uma extensão direta das equações de SHARMA e DEAN (1981), permitindo não apenas a modelagem das interações onda-onda fortes, mas também das interações ressonantes, que só podem ser resolvidas a partir da 3ª ordem da teoria de Stokes.

Apesar de grandes avanços terem sido feitos no desenvolvimento de expressões matemáticas e modelos numéricos que caracterizam e reproduzem as interações não-lineares onda-onda em estados de mar bimodais, os efeitos sobre as tensões de radiação têm sido menos estudados. Desde o trabalho de LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964), poucos trabalhos têm se dedicado ao tensor de radiação.

BATTJES (1972) formulou as componentes da tensão de radiação para casos de ondas de cristas curtas, ou seja, um mar aleatório. Segundo o autor, as componentes de tensão de radiação podem ser expressas, segundo a teoria linear, por:

$$S_{xx} = \rho g \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} E(f, \theta) \left\{ n(f) [\cos^2(\theta) + 1] - \frac{1}{2} \right\} d\theta df \quad (2.5)$$

$$S_{yy} = \rho g \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} E(f, \theta) \left\{ n(f) [\sin^2(\theta) + 1] - \frac{1}{2} \right\} d\theta df \quad (2.6)$$

$$S_{xy} = \rho g \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} E(f, \theta) n(f) \sin(2\theta) d\theta df \quad (2.7)$$

onde ρ é a massa específica do meio; e g é a aceleração gravitacional; E é a energia de onda por unidade de área; n é a razão entre a velocidade de grupo e a celeridade da onda; f é a frequência da onda; e θ é o ângulo de propagação da onda em relação ao sistema de coordenadas x-y. As equações (2.5) a (2.7) reduzem-se às equações (2.1) a (2.3) para casos de ondas monocromáticas-unidirecionais.

Utilizando o espectro de Pierson-Moskowitz para a distribuição da energia em frequência e algumas alternativas para a distribuição simétrica da energia na direção, BATTJES (1972) estimou analiticamente os termos da tensão de radiação e comparou com valores calculados pelas equações de LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964). Segundo o autor, a não consideração do mar aleatório pode superestimar as componentes normais em torno de 33% a 43% e a componente cisalhante de 100% a 150%.

A partir de dados de campo observados em uma praia de Duck, Carolina do Norte – EUA, FEDDERSEN (2004) verificou que as tensões de radiação são sistematicamente superestimadas ao se considerar as equações monocromáticas-unidirecionais, mesmo para espectros estreitos. O autor também fez uso do espectro direcional simétrico de Pierson-Moskowitz para os cálculos. No entanto, LEE *et al.* (2010) ressaltam que a simetria direcional espectral pode não ser apropriada para regiões de águas rasas, onde os efeitos das tensões de radiação são mais importantes.

O'DEA e HALLER (2015) compararam a aproximação de ondas monocromáticas-unidirecionais e espectros do tipo JONSWAP simétricos e assimétricos e verificaram que: (i) a consideração da assimetria espectral leva a erros menores das componentes normais do tensor para espectros estreitos, mas aumentam os erros sobre S_{xy} ; (ii) o efeito da

assimetria espectral aumenta de acordo com espalhamento de frequência do espectro a ponto de serem da mesma ordem de magnitude em relação à componente cisalhante; e (iii) a aproximação feita ao se utilizar as equações de LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964) em projetos de engenharia pode levar a uma significativa superestimação das correntes longitudinais e do transporte de sedimento dentro da zona de arrebentação.

HSU *et al.* (2006) investigaram a influência da direcionalidade da onda incidente sobre as tensões de radiação e nos efeitos da sobre-elevação e rebaixamento do nível médio da água. SHI e KIRBY (2008) e HSU e LAN (2009) mais tarde fizeram algumas correções no trabalho original, e verificaram que as ondas oblíquas unidirecionais não são capazes de conduzir circulação costeira fora da zona de arrebentação. Entretanto, nenhum deles estudou os efeitos de dois sistemas de onda diferentes alcançando a costa ao mesmo tempo.

Sob a ótica dos estudos analíticos, o presente trabalho estende os estudos de DALRYMPLE (1975) e FOWLER e DALRYMPLE (1990) por considerar ondas Bi-Bi na 2ª ordem da teoria de Stokes. É um avanço em relação aos trabalhos de LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964), HSU *et al.* (2006), SHI e KIRBY (2008) e HSU e LAN (2009) por analisar o campo de tensão de radiação associado às ondas Bi-Bi, uma simplificação necessária para uma melhor compreensão de mares bimodais. Apesar de, na parte analítica deste trabalho não se considerar um estado de mar espectral, os efeitos não-lineares são levados em consideração, diferentemente do que foi feito por BATTJES (1972), FEDDERSEN (2004) e ODEA e HALLER (2015).

Em relação aos estudos experimentais e de análise de dados de onda, este trabalho pode ser visto como uma continuação dos estudos de CONDE *et al.* (2014b), uma vez que adiciona direção como uma variável das ondas bicromáticas. Assim como MOURA *et al.* (2011), foco também é dado sobre as órbitas de velocidade, que são analisadas a partir da Transformada de Hilbert-Huang. Mas agora, as análises são feitas sobre dados medidos em modelo físico em vez de dados sintéticos. A revisão bibliográfica da Transformada de Hilbert-Huang é feita no **Capítulo V**.

CAPÍTULO III

TEORIA DAS BI-BIS

No **Capítulo II** apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre as interações fortes onda-onda, em particular, a onda de infragravidade, mostrando os principais estudos que agregaram novos conhecimentos sobre o fenômeno, desde a década de 1950. Este capítulo abordará as características do tensor de radiação em 2ª ordem das ondas Bi-Bi que estão relacionadas à natureza das ondas de interação aditiva e subtrativa. No entanto, alguns aspectos da interação subtrativa de 2ª ordem nem sempre são abordados com muita clareza na literatura, de modo que se faz necessário tecer alguns esclarecimentos conceituais sobre esse tipo de interação, antes do desenvolvimento matemático do tensor de radiação das ondas Bi-Bi.

III.1. CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS DE INTERAÇÃO SUBTRATIVA

Nesta seção, alguns esclarecimentos são feitos a respeito do período, direção e comprimento das ondas de interação de 2ª ordem, além de alguns comentários sobre como se dá a refração dessas ondas aprisionadas e como é o seu perfil de velocidades.

III.1.1. Período

TUCKER (1950) afirma que encontrou as melhores evidências de ondas de infragravidade durante eventos de incidência de grupos de ondas bem definidos. Na prática, grupos de onda são definidos pela contagem do número de ondas sucessivas cujas propriedades (exemplo: altura) superam um determinado valor limite (GODA, 1976). Uma boa definição do grupo de ondas ocorre, em geral, quando o grupo é formado por um espectro estreito, formando uma envoltória nítida.

A Figura 3.1 exemplifica a formação do grupo, ilustrando dois grupos de ondas Bi-Bi. No primeiro caso, as ondas primárias possuem períodos $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s. Nota-se que a altura das ondas é suavemente variável e a envoltória do grupo, bem definida. Já na Figura 3.1b, ondas com período $T_a = 4$ s e $T_b = 10$ s geram oscilações de altura de onda mais abruptas e um grupo menos nítido. Em ambos os casos, a onda de interação subtrativa, calculada pela equação de SHARMA e DEAN (1981), é também ilustrada. Se os períodos das ondas primárias são T_a e T_b , a onda de infragravidade possui um período

de $T_a T_b / (|T_a - T_b|)$. Para o primeiro caso $T^- = 90$ s, enquanto que para o segundo caso, $T^- = 6,67$ s.

No primeiro parágrafo do **Capítulo I**, definiu-se onda de infragravidade como sendo “ondas que possuem frequências de 0,004 Hz a 0,04 Hz”, ou seja, períodos de 25 s a 250 s. É nítido, portanto, que nem toda onda resultante da interação subtrativa entre pares de onda é de infragravidade! No exemplo da Figura 3.1b, o período da interação subtrativa é inclusive inferior ao da onda primária ‘b’. No entanto, o fato da onda subtrativa não estar dentro do intervalo de infragravidade, não significa que ela não esteja presente nas medições. O fenômeno continua sendo o mesmo, no entanto a sua identificação é mais complexa, uma vez que sua frequência é próxima às ondas primárias, mas sua intensidade é consideravelmente menor (SAND, 1982). Fica claro, portanto, a razão pela qual TUCKER (1950) conseguiu melhor identificar esse fenômeno durante grupos bem estabelecidos.

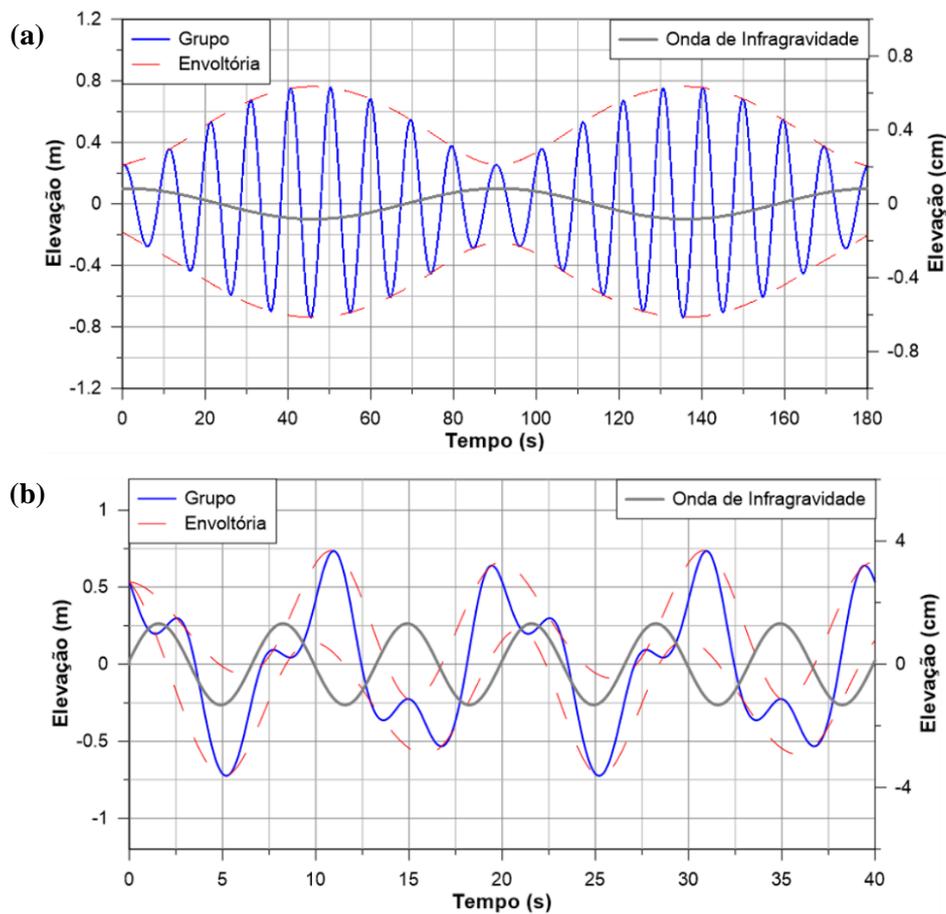


Figura 3.1. Exemplos de grupos de onda formados por ondas de gravidade com (a) períodos próximos; e (b) períodos significativamente distintos.

III.1.2. Direção e comprimento

Pela equação de dispersão, ondas de maiores períodos possuem também, maiores comprimentos. No entanto, a onda de interferência não se comporta como uma onda livre e, portanto, não respeita as imposições da equação de dispersão. O comprimento e a direção das ondas de interação subtrativa e aditiva podem ser determinados pela subtração e adição dos pares de vetores números de onda primários.

Considere duas ondas cujos números de onda sejam k_a e k_b como mostrado na Figura 3.2, onde a onda ‘a’ pode ter qualquer direção (360°) em relação à onda ‘b’. Ambas interferências, subtrativas e aditivas (SHARMA e DEAN, 1981), terão comprimentos de onda dadas pela magnitude da diferença ou adição dos vetores de número de onda primária. Enquanto os períodos primários não forem iguais, a interferência se propagará no espaço e no tempo como uma onda aprisionada, na direção do vetor de número de onda resultante. O comprimento da onda de interferência será dado por $L_a L_b / \sqrt{L_a^2 + L_b^2 \pm 2L_a L_b \cos \Delta\theta}$ e, portanto, dependente da diferença de ângulo entre as ondas primárias. A direção de propagação da onda de interferência será limitada a um ângulo θ_{lim} em relação à onda mais curta ‘a’, dado por $\theta_{lim} = \sin^{-1}(|\vec{k}_b|/|\vec{k}_a|)$.

Na Figura 3.2 (a) e (b), são mostrados apenas os vetores resultantes da subtração e adição vetorial para um exemplo de \vec{k}_a . Na Figura 3.2 (c) e (d), o vetor \vec{k}_a é rotacionado em 360° , mostrando os vetores resultantes \vec{k}^- e \vec{k}^+ para alguns casos. Para o caso aditivo, o centro do círculo é projetado para o limite do vetor \vec{k}_b para auxiliar a visualização da operação aditiva. O comprimento dos vetores números de onda \vec{k}_a e \vec{k}_b são arbitrários.

Dependendo do ângulo entre as ondas primárias, o comprimento da onda de interferência pode ser maior ou menor do que as ondas primárias. Para pequenos ângulos, a interferência aditiva terá maior frequência e menor comprimento em comparação com as ondas primárias, enquanto a interferência subtrativa terá menor frequência e comprimento de onda mais longo. Se a diferença do ângulo for grande, entretanto, a interferência aditiva pode ter um comprimento maior que as ondas primárias, e a interferência subtrativa, um comprimento menor, embora as suas frequências permaneçam as mesmas para qualquer caso de ângulo.

Por exemplo, para o caso com ondas de períodos $T_a = 4$ s e $T_b = 10$ s e com $\Delta\theta = 10^\circ$, os comprimentos das ondas de interação de 2ª ordem subtrativas e aditivas são, respectivamente, $L^- = 165$ m e $L^+ = 37$ m. Aumentando a diferença de ângulo entre as ondas primárias para $\Delta\theta = 110^\circ$, tem-se que $L^- = 44$ m e $L^+ = 61$ m.

Esta é uma característica relevante e diferente do que acontece com grupos de ondas formados por ondas colineares, cujo comprimento de onda da interação subtrativa é sempre maior do que o comprimento das ondas primárias.

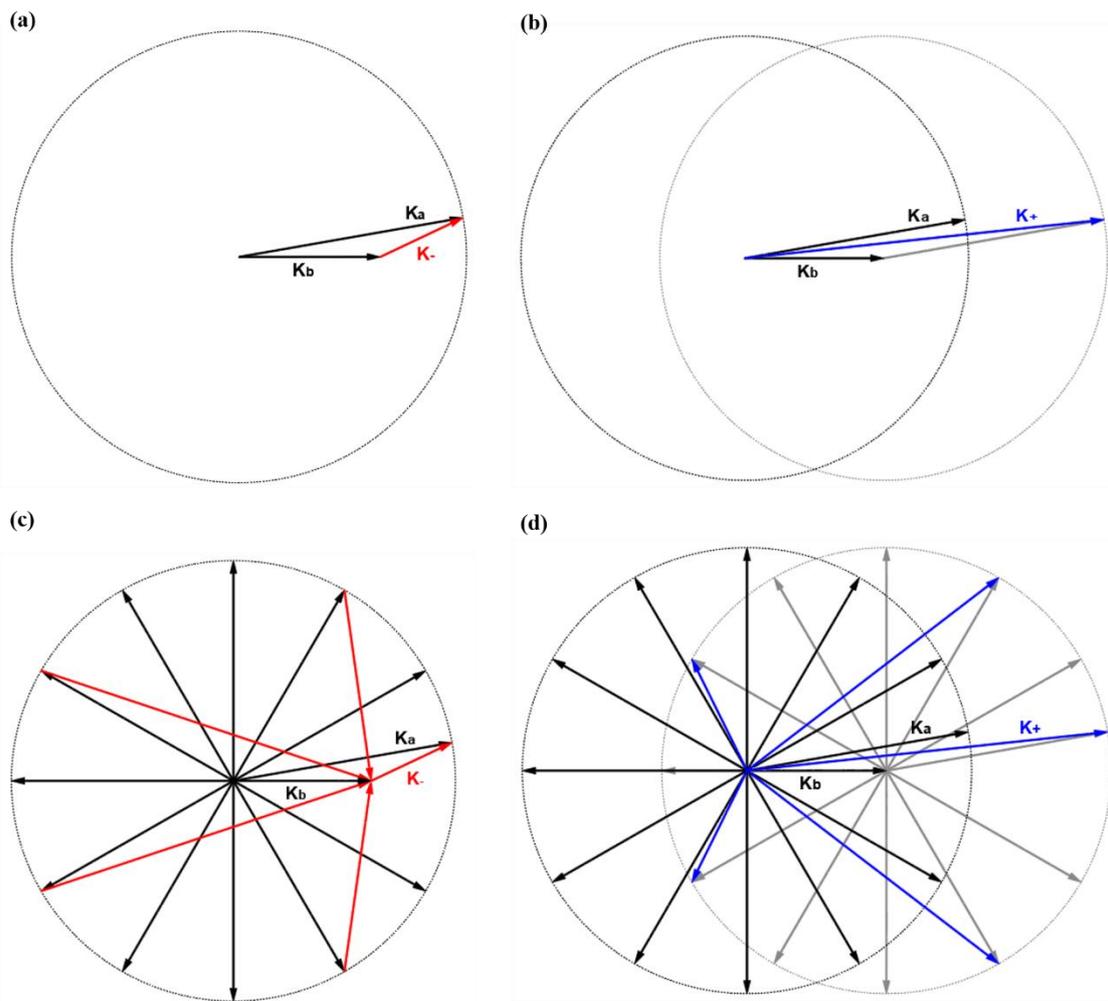


Figura 3.2. Números de onda (a, c) subtrativo e (b, d) aditivo resultantes das interações onda-onda.

III.1.3. Refração

Em óptica, a refração é definida como a mudança de velocidade de fase de uma onda ao se propagar em um meio variável, resultando em uma mudança na direção da propagação do raio de luz. Uma analogia direta se aplica entre raios de luz e ondas marinhas se o

índice de refração, que é definido como a razão entre a velocidade local da luz e a velocidade no vácuo, for definido como a proporção entre a celeridade local e a celeridade em águas profundas (NEVES, 1979). A analogia, entretanto, se limita à ótica geométrica.

Primeiramente, a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal, enquanto a celeridade da onda em águas profundas varia com a frequência da onda devido às suas características dispersivas. Em segundo lugar, a intensidade da onda costeira (altura de onda) muda ao longo do caminho de refração, ao contrário das ondas de luz.

É importante abordar dois equívocos comumente mencionados na literatura sobre a refração das ondas costeiras. Em primeiro lugar, considerando-se a batimetria uniformemente variável, à medida que as ondas se aproximam da costa, suas cristas nunca se tornam paralelas às isóbatas. Isso é facilmente visto aplicando-se a lei de Snell:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (3.1)$$

onde θ_i é o ângulo da crista a uma profundidade h_i ou o ângulo entre o número de onda e a normal às isóbatas de profundidade. O ângulo θ_i só poderá ser zero (com incidência normal à costa) se a celeridade da onda (c_i) na profundidade h_i for zero, ou seja, se a própria profundidade for nula.

Em segundo lugar, à medida que uma onda se propaga para águas mais rasas, sua altura pode diminuir em até mais do que 10%, dependendo do seu ângulo de incidência. A Figura 3.3 mostra um exemplo da proporção entre a altura da onda local (H) e a altura da onda em águas profundas (H_0) para valores de incidência diferentes. Para um ângulo de incidência em águas profundas de 50° , por exemplo, a altura da onda volta a ser a mesma a uma profundidade relativa (h/L) igual a 0,0578, muito perto do limite de águas rasas.

Considerando a refração simultânea de dois trens de onda (digamos, onda 'a' e onda 'b') ao longo da mesma batimetria plana inclinada, os padrões de interação mudam, à medida que as orientações das cristas de cada onda evoluem. Em outras palavras, os raios individuais de onda sofrem refração de forma diferente entre si. Em um determinado ponto com profundidade conhecida h , para a onda 'a' corresponderá a uma profundidade de água relativa h/L_a , enquanto para a onda 'b', h/L_b . Isso significa também que cada onda primária passa por processos diferentes (por exemplo, mudanças na altura da onda ou efeitos de 2ª ordem) no local da interação. As linhas verticais da Figura 3.3 correspondem

a três pontos (x_1 , x_2 e x_3) com profundidades diferentes (digamos, h_1 , h_2 e h_3); para cada ponto, a profundidade relativa (h/L) para uma onda de 10 s (linha sólida) será diferente daquelas para uma onda de 7 s (linha tracejada), por exemplo.

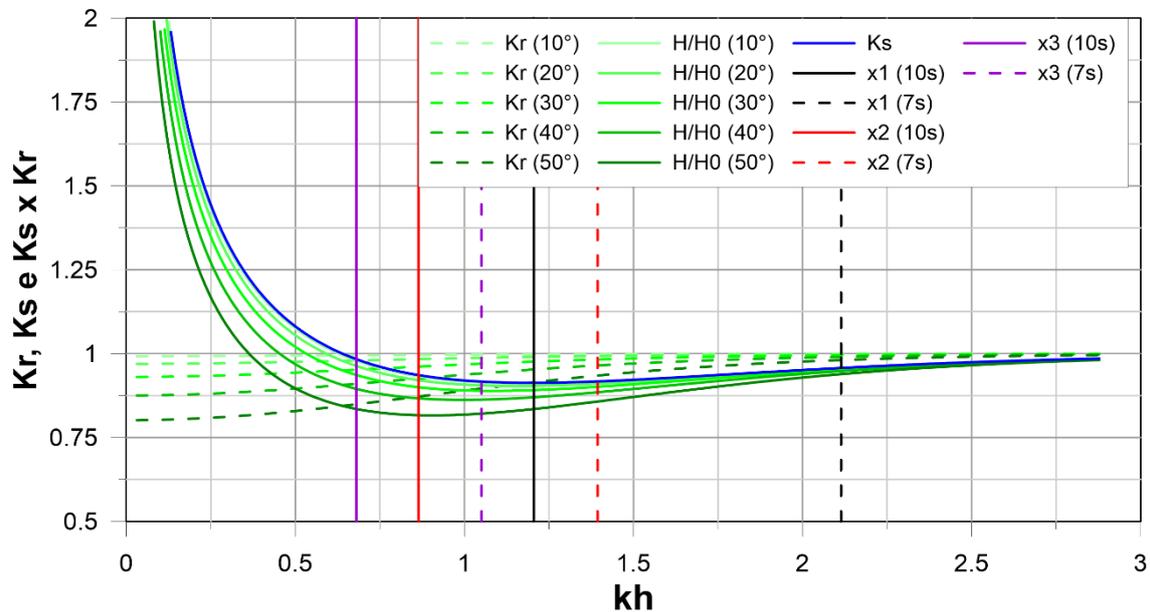


Figura 3.3. Coeficientes de refração (K_r) e empinamento (K_s).

III.1.4. Perfil de velocidade

O perfil de velocidades de uma onda ao longo da coluna d'água decai de acordo com o $\cosh[k(h+z)]$. Quanto maior é o módulo do vetor número de onda, ou menor o comprimento de onda, mais rápido é o decaimento da velocidade ao longo da coluna d'água. SHARMA e DEAN (1981) mostraram que as interações não-lineares aditivas e subtrativas decaem com o $\cosh[k^\pm(h+z)]$, onde $k^+ = |\vec{k}_a + \vec{k}_b|$ e $k^- = |\vec{k}_a - \vec{k}_b|$.

Observando-se a Figura 3.2, é nítido que o decaimento de cada componente interativa dependerá fortemente do ângulo formado entre os vetores números de ondas primários. Para casos em que $\Delta\theta < 90^\circ$, k^- decairá mais lentamente do que k^+ . Quando $\Delta\theta > 90^\circ$, o contrário será observado.

A Figura 3.4 exhibe os perfis do módulo da velocidade horizontal máxima da órbita total (Vel), e das componentes de interação positiva (Vel^+) e negativa (Vel^-) para um caso em que $h = 10$ m; $H_a = 0,5$ m; $T_a = 7,0$ s; $H_b = 1,0$ m; $T_b = 10,0$ s; e $\Delta\theta = 10^\circ$. É clara a diferença entre os decaimentos das velocidades das interações. Embora a velocidade de interação positiva seja maior próximo à superfície, seu decaimento em relação ao leito é

de 65%. Já a velocidade da onda de infragravidade decai apenas 7% ao longo da coluna d'água, tornando-se mais relevante do que a interação aditiva (em módulo) a partir de uma profundidade de 1,90 m.

Já a Figura 3.5 ilustra a mesma situação, porém com um $\Delta\theta = 100^\circ$. Nesse caso, embora o valor máximo da interferência positiva seja maior ao longo de toda a coluna d'água, seu decaimento é de 42%, enquanto a velocidade da onda de infragravidade decai 51%.

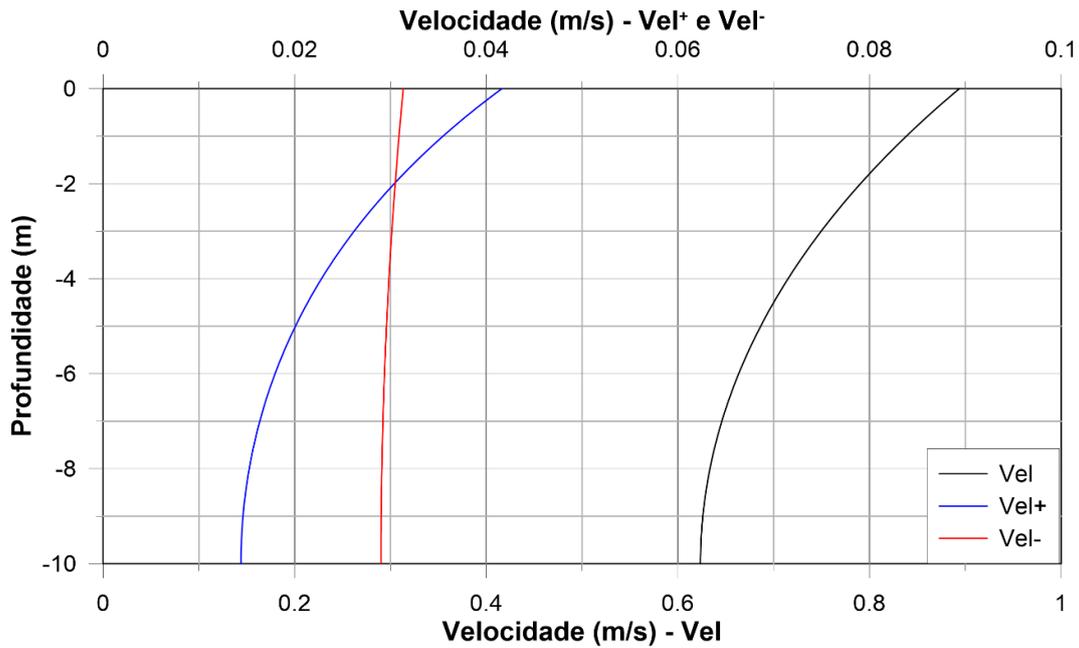


Figura 3.4. Módulo da velocidade máxima horizontal para $\Delta\theta = 10^\circ$.

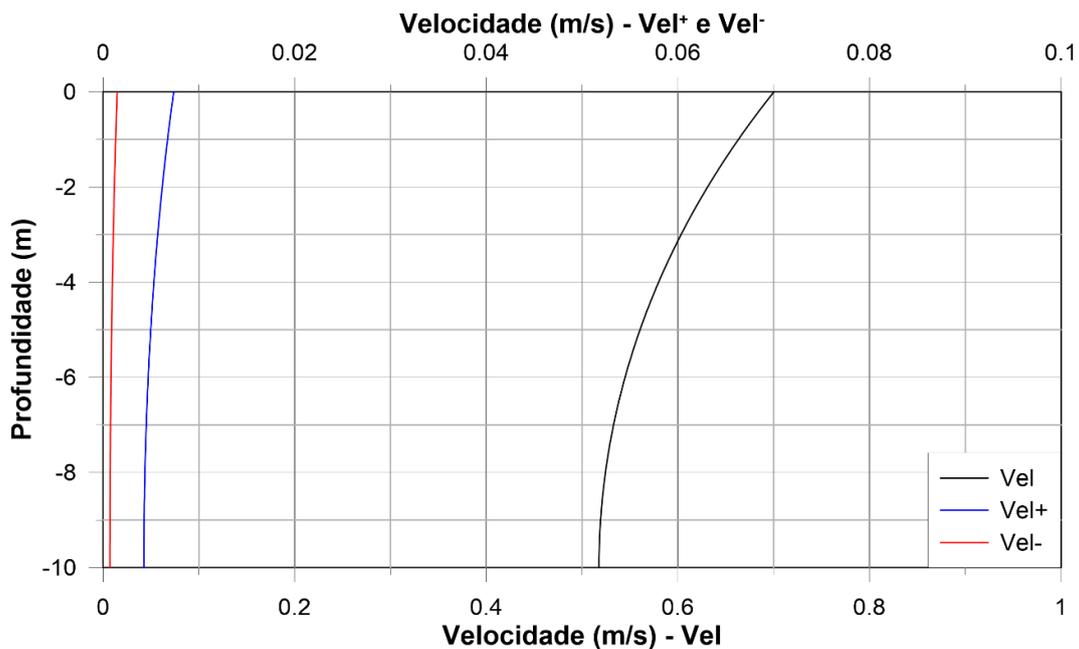


Figura 3.5. Módulo da velocidade máxima horizontal para $\Delta\theta = 100^\circ$.

III.2. TENSÃO DE RADIAÇÃO

LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964) definiram a tensão de radiação como o “excesso de quantidade de movimento devido à presença da onda”, uma propriedade integrada na coluna d’água e promediada no período da onda incidente. O desenvolvimento da expressão analítica parte da equação da quantidade de movimento¹ apresentada abaixo:

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{\text{Aceleração local}} + u_j \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\text{Aceleração advectiva}} = \underbrace{-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{Força do gradiente de pressão/massa}} + \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\underbrace{\tau_{ij}}_{\text{Viscosas}} + \underbrace{\tau_{ij}^T}_{\text{Turbulentas}} \right)}_{\text{Força/massa}} - \underbrace{\frac{\rho}{\rho_0} g \delta_{i3}}_{\text{Força gravitacional/massa}} + \underbrace{a_{ci}}_{\text{Força de Coriolis/massa}}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

onde u_i = velocidade hidrodinâmica do meio; t = tempo; x_i = coordenada espacial; ρ_0 = massa específica do meio; p = termo de pressão; τ , τ^T = tensões viscosas e turbulentas, respectivamente; g = aceleração gravitacional; a_c = força de Coriolis por massa; e os índices i e j correspondem às componentes das coordenadas Cartesianas x , y e z (equivalentes a 1, 2 e 3, respectivamente). O termo de Coriolis e as tensões viscosas e turbulentas podem ser desprezados para o desenvolvimento das equações da tensão de radiação.

Integrando-se a equação (3.2) na vertical ($-h \leq z \leq \eta$) e fazendo uso das condições de contorno cinemática na superfície livre e no fundo, apresentadas em DEAN e DALRYMPLE (1991), chega-se a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} \rho u_i dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_{-h}^{\eta} \rho \left(u_i u_j + \frac{p}{\rho} \delta_{ij} \right) dz = p \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + p \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

Para as ondas Bi-Bi, considera-se neste momento que a velocidade hidrodinâmica u_i seja composta por uma velocidade média na coluna d’água (corrente de maré, por exemplo) e pelo movimento oscilatório provocado por duas ondas, ‘a’ e ‘b’: $u_i = \hat{U}_i + \tilde{u}_i^a + \tilde{u}_i^b$. Inserindo cada termo da velocidade hidrodinâmica na equação (3.3), o próximo passo é

¹ Detalhes do desenvolvimento da equação da quantidade de movimento 3D podem ser vistos em DE SOUZA E SILVA (2013).

fazer a média dos termos da equação no período da onda. Para uma onda monocromática, essa etapa é direta. Para Bi-Bis, no entanto, tem-se um problema de escala, uma vez que há mais de uma opção de “período da onda” a utilizar como escala de promediação. A equação a seguir faz uso da barra superior para se referir à promediação temporal, mas sem especificar o período de promediação. A discussão da escala de tempo a ser utilizada é feita nas seções III.3 e III.4.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{\int_{-h}^{\eta} \rho \hat{U}_i dz} + \overline{\int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{u}_i^a dz} + \overline{\int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{u}_i^b dz} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\int_{-h}^{\eta} \rho \hat{U}_i \hat{U}_j + \rho \hat{U}_i \tilde{u}_j^a + \rho \hat{U}_i \tilde{u}_j^b + \rho \hat{U}_j \tilde{u}_i^a + \rho \hat{U}_j \tilde{u}_i^b + \rho \tilde{u}_i^a \tilde{u}_j^b + \rho \tilde{u}_i^a \tilde{u}_j^a + \rho \tilde{u}_i^b \tilde{u}_j^b + \rho \tilde{u}_i^b \tilde{u}_j^a + \rho \tilde{u}_i^a \tilde{u}_j^a + \rho \tilde{u}_i^b \tilde{u}_j^b + \rho \delta_{ij} dz} \right) = p|_{\eta} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} + p|_{-h} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (3.4)$$

Define-se $\overline{\int_{-h}^{\eta} \rho u dz}$ como sendo o transporte de massa total (M). A substituição da velocidade hidrodinâmica (u) por cada um dos seus componentes (\hat{U} , \tilde{u}^a ou \tilde{u}^b) se refere ao transporte de massa associado a cada parcela da velocidade total. Assumindo-se que:

$$p|_{\eta} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} = 0, \quad p|_{-h} \frac{\partial h}{\partial x_i} = \rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (3.5)$$

uma vez que $p|_{\eta} = 0$ e que o termo dinâmico da pressão se anula com a promediação temporal, chega-se a:

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[M_i U_j - \underbrace{\frac{\tilde{\Pi}_i \tilde{\Pi}_j}{\rho (\bar{\eta} + h)} + \int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \rho \tilde{u}_i \tilde{v}_j + \rho \tilde{u}_j \tilde{v}_i + \rho \tilde{v}_i \tilde{v}_j + \rho \delta_{ij} dz}_{\text{Tensão de Radiação}} - \frac{1}{2} \rho g (h + \bar{\eta})^2 \delta_{ij} \right] = \quad (3.6)$$

$$= -\rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i}$$

onde $\tilde{\Pi}$ = soma do transporte de massa das ondas Bi-Bi. O primeiro termo da tensão de radiação é de 4ª ordem na teoria de Stokes. Considerando-se apenas os termos até a 2ª ordem, o termo da tensão de radiação é dado pela seguinte expressão:

$$S_{ij} = \int_{-h}^{\eta} \overline{\rho \tilde{u}_i^a \tilde{u}_j^a + \rho \tilde{u}_i^a \tilde{u}_j^b + \rho \tilde{u}_j^a \tilde{u}_i^b + \rho \tilde{u}_i^b \tilde{u}_j^b + p \delta_{ij}} dz - \frac{1}{2} \rho g (h + \bar{\eta})^2 \delta_{ij} \quad (3.7)$$

Portanto, a tensão de radiação para ondas Bi-Bi (S_{ij}) é resultante de uma promediação temporal da quantidade de movimento integrada na coluna d'água resultante de cada onda e suas interações. Observa-se que a retirada de uma das ondas do sistema ($\tilde{u}_{i,j}^a$ ou $\tilde{u}_{i,j}^b = 0$) resulta na equação clássica desenvolvida por LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964) e, conseqüentemente, nas equações (2.1) a (2.3).

A equação (3.7) difere da simples superposição linear de duas ondas, como sugerido por BATTJES (1972), devido à presença das componentes da interação ($\tilde{u}_i^a \tilde{u}_j^b$ e $\tilde{u}_j^a \tilde{u}_i^b$) e pelo próprio termo correspondente ao nível médio do mar promediado, discutido a seguir.

III.3. NÍVEL MÉDIO DA ÁGUA PROMEDIADO

O cálculo das componentes do tensor de radiação na equação (3.7) demanda valores promediados do nível médio no tempo, e não instantâneos. Para tal, existe a possibilidade de se aplicar dois métodos distintos:

III.3.1. Promediação da equação de Sharma e Dean (1981)

SHARMA e DEAN (1981) calcularam a expressão de 2ª ordem do nível médio instantâneo, $\eta^{(2)}$, a partir da interação entre pares de onda, resultando em:

$$\eta^{(2)} = \frac{1}{4} \sum_{a=1}^{\infty} \sum_{b=1}^{\infty} a_a a_b \left\{ \left[\frac{D_{ab}^- - (\vec{k}_a \cdot \vec{k}_b + R_a R_b)}{\sqrt{R_a R_b}} + (R_a + R_b) \right] \cos(\phi_a - \phi_b) + \left[\frac{D_{ab}^+ - (\vec{k}_a \cdot \vec{k}_b - R_a R_b)}{\sqrt{R_a R_b}} + (R_a + R_b) \right] \cos(\phi_a + \phi_b) \right\} \quad (3.8)$$

onde ϕ = fase da onda ($\phi = \vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma t + \varepsilon$); σ = frequência angular da onda; ε = fase inicial da onda; $R_a = k_a \tanh(k_a h)$; e D^{\pm} são funções de interação onda-onda definidas no trabalho original, nas equações (34) e (35). D^+ está associado ao $\cos(\phi_a + \phi_b)$ e representa as interações aditivas, enquanto D^- está associado ao $\cos(\phi_a - \phi_b)$ e representa as interações subtrativas.

Considerando-se apenas duas ondas (Bi-Bi), a promediação da equação (3.8) resulta em:

$$\begin{aligned}
\bar{\eta} = & -\frac{H_a^2 k_a}{8 \sinh(2k_a h)} - \frac{H_b^2 k_b}{8 \sinh(2k_b h)} + \\
& + \frac{H_a H_b}{8g} \left\{ \sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} + \sigma_a \sigma_b \right\} \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \\
& + \frac{H_a H_b}{8g} \left\{ \sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} - \sigma_a \sigma_b \right\} \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} + \quad (3.9) \\
& + \frac{1}{g} (\sigma_a + \sigma_b) \cosh\left(|\vec{k}_a + \vec{k}_b| h\right) A_{ab}^+ \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \\
& + \frac{1}{g} (\sigma_a - \sigma_b) \cosh\left(|\vec{k}_a - \vec{k}_b| h\right) A_{ab}^- \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)}
\end{aligned}$$

onde A^+ e A^- são termos de interação aditiva e subtrativa entre as ondas primárias, respectivamente, dados pelas expressões:

$$\begin{aligned}
A_{ab}^+ = & -\frac{H_a H_b}{4} \cdot \\
& \frac{\frac{gk_a \sigma_a}{\sinh(2k_a h)} + \frac{gk_b \sigma_b}{\sinh(2k_b h)} + \sigma_a \sigma_b (\sigma_a + \sigma_b) \left[\frac{\cos(\theta_a - \theta_b)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} - 1 \right]}{g|\vec{k}_a + \vec{k}_b| \sinh\left(|\vec{k}_a + \vec{k}_b| h\right) - (\sigma_a + \sigma_b)^2 \cosh\left(|\vec{k}_a + \vec{k}_b| h\right)} \quad (3.10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{ab}^- = & -\frac{H_a H_b}{4} \cdot \\
& \frac{\frac{gk_a \sigma_a}{\sinh(2k_a h)} - \frac{gk_b \sigma_b}{\sinh(2k_b h)} + \sigma_a \sigma_b (\sigma_a - \sigma_b) \left[\frac{\cos(\theta_a - \theta_b)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} + 1 \right]}{g|\vec{k}_a - \vec{k}_b| \sinh\left(|\vec{k}_a - \vec{k}_b| h\right) - (\sigma_a - \sigma_b)^2 \cosh\left(|\vec{k}_a - \vec{k}_b| h\right)} \quad (3.11)
\end{aligned}$$

III.3.2. Promediação da equação de Bernoulli

MEI (1973) propôs que o nível médio da água promediado no tempo pudesse ser calculado pela promediação da equação de Bernoulli, utilizando-se o potencial de velocidades de 1ª ordem na teoria de Stokes. O autor fez uso do método para a avaliação do balanço entre o nível médio promediado, o divergente do tensor de radiação e a pressão dinâmica promediada em casos em que esta não pode ser negligenciada.

DALRYMPLE (1975) utilizou a formulação proposta por MEI (1973) para calcular o nível médio promediado no tempo, resultante da interação entre ondas monocromáticas-bidirecionais. O nível médio resultante é de 2ª ordem na teoria de Stokes, dado pela

equação (2.4), e possibilitou a Dalrymple a proposição de uma nova hipótese sobre a formação de correntes de retorno.

Uma extensão natural dos trabalhos de MEI (1973) e DALRYMPLE (1975) seria utilizar a promediação temporal da equação de Bernoulli para o cálculo do nível médio promediado resultante da ação das ondas Bi-Bi. Partindo-se do potencial de velocidades de 1ª ordem na teoria de Stokes e considerando-se que $\Phi = \Phi_a + \Phi_b$, tem-se que:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \overline{(\Phi_a + \Phi_b)} \Big|_{\eta} + \frac{1}{2} \left[\overline{\frac{\partial (\Phi_a + \Phi_b)^2}{\partial x_i}} \right] \Big|_{\eta} + \frac{p|_{\eta}}{\rho} + g\bar{\eta} = \overline{C(t)}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.12)$$

onde $C(t)$ é o coeficiente de Bernoulli. Adotando-se a convenção $\vec{u} = -\nabla\Phi$ e $C(t) = 0$, após diversas manipulações algébricas é possível chegar em:

$$\begin{aligned} \bar{\eta} = & -\frac{H_a^2 k_a}{8 \sinh(2k_a h)} - \frac{H_b^2 k_b}{8 \sinh(2k_b h)} + \\ & + \frac{H_a H_b}{8g} \left\{ \sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} + \sigma_a \sigma_b \right\} \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \\ & + \frac{H_a H_b}{8g} \left\{ \sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} - \sigma_a \sigma_b \right\} \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Comparando-se a equação (3.13) com a (3.9), fica evidente a ausência dos termos que envolvem A^+ e A^- . Presume-se, então, que a metodologia proposta por MEI (1973) não se aplicaria ao caso das ondas Bi-Bi.

No Capítulo 10 de DEAN e DALRYMPLE (1991), intitulado *Nonlinear Properties Derivable from Small-Amplitude Waves*, os autores deixam claro que é possível deduzir expressões em 2ª ordem promediadas (nível médio, pressão média e fluxo de quantidade de movimento) a partir da teoria linear. No entanto, assim como MEI (1973), tais propriedades foram deduzidas apenas para o caso de propagação de uma única onda. Nesses casos, termos de mais alta ordem das variáveis iniciais (e.g. potencial de velocidades) se anulam durante o processo de promediação de termos oscilatórios no período da onda. No entanto, quando se tem mais de uma onda, nem todos os termos se anulam uma vez que o período de promediação não é mais de nenhuma das ondas. Isso faz com que a metodologia proposta por MEI (1973) não seja adequada às Bi-Bis.

Assim, o nível médio promediado utilizado para o cálculo do tensor de radiação será aquele definido a partir da promediação temporal da equação de SHARMA e DEAN (1981). As equações completas para cada termo do tensor de radiação estão apresentadas em (3.17) a (3.19).

Ao contrário da equação deduzida por DALRYMPLE (1975), a equação (3.9) possui termos que variam também no tempo. Observe que a equação (2.4) é obtida da equação (3.9) se: (i) ondas monocromática-bidirecionais forem consideradas; (ii) o termo de promediação temporal da interação aditiva for negligenciado; (iii) as magnitudes dos vetores número de onda forem as mesmas para as ondas com o mesmo período; e (iv) a fase da interação subtrativa independer do tempo para ondas com o mesmo período.

A equação (3.9) também se reduz às expressões clássicas do rebaixamento e sobre-elevação do nível médio da água causado por ondas progressivas – equação (3.14), e estacionárias – equação (3.15), se as diferenças do ângulo forem tomadas como 0° ou 180° , e as frequências forem as mesmas.

$$\bar{\eta} = -\frac{H^2k}{2\sinh(2kh)} \quad (3.14)$$

$$\bar{\eta} = \frac{H^2k}{4\sinh(2kh)} [\cosh(2kh)\cos(2kx) - 1] \quad (3.15)$$

Fisicamente, as ondas Bi-Bi geram uma onda aprisionada, de baixa frequência e progressiva, que se propaga na direção do vetor que resulta da subtração dos dois vetores primários (Figura 3.2). De modo análogo à onda estacionária associada a um estado de mar monocromático-bidirecional, pode-se inferir que a onda de infragravidade produzida por ondas Bi-Bi gere correntes de retorno. Esta onda progressiva também seria capaz de causar o deslocamento longitudinal das correntes de retorno, um fenômeno observado na natureza e confirmado em experimentos laboratoriais por FOWLER e DALRYMPLE (1990). No entanto, esses autores analisaram apenas a relação entre as correntes de retorno e a envoltória de grupo de ondas, um fenômeno de 1ª ordem na teoria de Stokes.

Cabe aqui, introduzir os efeitos da tensão de radiação sobre a equação de quantidade de movimento (3.2). Após a promediação da equação (3.2) na vertical e consideração de pressão hidrostática, a equação da quantidade de movimento 2DH² é:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t}}_{\text{Aceleração local}} + \hat{u}_j \underbrace{\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{Aceleração advectiva}} = & \underbrace{-g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i}}_{\text{Força do gradiente de pressão barotrópico/massa}} - \underbrace{\frac{g}{2} \frac{\partial (\hat{\rho}/\rho_0)}{\partial x_i}}_{\text{Força do gradiente de pressão baroclínico/massa}} - \underbrace{\frac{1}{\rho_0 (h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} \right)}_{\text{Força de tensão de radiação/massa}} + \\
 & + \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{1}{(h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial \hat{\tau}_{ij}^T (h + \bar{\eta})}{\partial x_j} + \tau_i^S - \tau_i^F \right)}_{\text{Força turbulenta/massa}} + \quad (3.16) \\
 & + \underbrace{\frac{1}{(h + \bar{\eta})} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(h + \bar{\eta}) K_{ij}^V \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]}_{\text{Força viscosa/massa}} + \underbrace{\hat{a}_{ci}}_{\text{Força de Coriolis/massa}}, \quad i, j = 1, 2
 \end{aligned}$$

onde variáveis com acento circunflexo (^) denotam promediação vertical; τ^S , τ^F correspondem às tensões turbulentas na superfície e no fundo, respectivamente; e K^V é o coeficiente de dispersão horizontal de quantidade de movimento. Ressalta-se a introdução dos efeitos da propagação de onda no meio, com a presença dos termos de tensão de radiação. Para ondas Bi-Bi, as equações (3.17) a (3.19) devem ser utilizadas.

² Detalhes do desenvolvimento da equação de quantidade de movimento 2DH podem ser vistos em DE SOUZA E SILVA (2013).

$$\begin{aligned}
S_{xx} = & E_a \left[n_a (\cos^2 \theta_a + 1) - \frac{1}{2} \right] + E_b \left[n_b (\cos^2 \theta_b + 1) - \frac{1}{2} \right] - \\
& - \frac{\rho h H_a H_b}{8} \left\{ \left[\sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} + \sigma_a \sigma_b \right] \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \right. \\
& + \left. \left[\sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} - \sigma_a \sigma_b \right] \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \right\} - \\
& - \rho h \left[(\sigma_a + \sigma_b) \cosh(|\vec{k}_a + \vec{k}_b| h) A_{ab}^+ \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + (\sigma_a - \sigma_b) \cosh(|\vec{k}_a - \vec{k}_b| h) A_{ab}^- \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \right] + \\
& + \frac{\rho H_a H_b \sigma_a \sigma_b}{16 \sinh k_a h \sinh k_b h} \left\{ \left[\frac{2g \sinh k_a h \sinh k_b h}{\sigma_a \sigma_b} + \frac{\sinh[|\vec{k}_b + \vec{k}_a| h]}{|\vec{k}_b + \vec{k}_a|} \right] [\cos(\theta_a + \theta_b) + 1] + \right. \\
& + \left. \frac{\sinh[|\vec{k}_b - \vec{k}_a| h]}{|\vec{k}_b - \vec{k}_a|} [\cos(\theta_a + \theta_b) - 1] \right\} \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \\
& + \left\{ \frac{2g \sinh k_a h \sinh k_b h}{\sigma_a \sigma_b} + \frac{\sinh[|\vec{k}_b + \vec{k}_a| h]}{|\vec{k}_b + \vec{k}_a|} [\cos(\theta_a + \theta_b) - 1] + \frac{\sinh[|\vec{k}_b - \vec{k}_a| h]}{|\vec{k}_b - \vec{k}_a|} [\cos(\theta_a + \theta_b) + 1] \right\} \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \quad (3.17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{yy} = & E_a \left[n_a (\sin^2 \theta_a + 1) - \frac{1}{2} \right] + E_b \left[n_b (\sin^2 \theta_b + 1) - \frac{1}{2} \right] - \\
& - \frac{\rho h H_a H_b}{8} \left\{ \left[\sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} + \sigma_a \sigma_b \right] \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \right. \\
& + \left. \left[\sigma_a^2 + \sigma_b^2 - \frac{\sigma_a \sigma_b \cos(\Delta\theta)}{\tanh(k_a h) \tanh(k_b h)} - \sigma_a \sigma_b \right] \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \right\} - \\
& - \rho h \left[(\sigma_a + \sigma_b) \cosh\left(|\vec{k}_a + \vec{k}_b| h\right) \Lambda_{ab}^+ \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + (\sigma_a - \sigma_b) \cosh\left(|\vec{k}_a - \vec{k}_b| h\right) \Lambda_{ab}^- \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \right] - \\
& - \frac{\rho H_a H_b \sigma_a \sigma_b}{16 \sinh k_a h \sinh k_b h} \left\{ \left\{ -\frac{2g \sinh k_a h \sinh k_b h}{\sigma_a \sigma_b} + \frac{\sinh\left[|\vec{k}_b + \vec{k}_a| h\right]}{|\vec{k}_b + \vec{k}_a|} \left[\cos(\theta_a + \theta_b) - 1 \right] + \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{\sinh\left[|\vec{k}_b - \vec{k}_a| h\right]}{|\vec{k}_b - \vec{k}_a|} \left[\cos(\theta_a + \theta_b) + 1 \right] \right\} \overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \right. \\
& + \left. \left\{ -\frac{2g \sinh k_a h \sinh k_b h}{\sigma_a \sigma_b} + \frac{\sinh\left[|\vec{k}_b + \vec{k}_a| h\right]}{|\vec{k}_b + \vec{k}_a|} \left[\cos(\theta_a + \theta_b) + 1 \right] + \frac{\sinh\left[|\vec{k}_b - \vec{k}_a| h\right]}{|\vec{k}_b - \vec{k}_a|} \left[\cos(\theta_a + \theta_b) - 1 \right] \right\} \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \right\} \quad (3.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{xy} = & \frac{E_a}{2} n_a \sin 2\theta_a + \frac{E_b}{2} n_b \sin 2\theta_b \\
& + \frac{\rho H_a H_b \sigma_a \sigma_b \sin(\theta_a + \theta_b)}{16 \sinh k_a h \sinh k_b h} \left\{ \frac{\sinh \left[\left| \vec{k}_b + \vec{k}_a \right| h \right]}{\left| \vec{k}_b + \vec{k}_a \right|} + \frac{\sinh \left[\left| \vec{k}_b - \vec{k}_a \right| h \right]}{\left| \vec{k}_b - \vec{k}_a \right|} \right\} \cdot \\
& \cdot \left[\overline{\cos(\phi_a + \phi_b)} + \overline{\cos(\phi_a - \phi_b)} \right]
\end{aligned} \tag{3.19}$$

III.4. INTERVALO DE PROMEDIAÇÃO

Um dos princípios fundamentais da tensão de radiação é a sua propriedade de ser um excesso de quantidade de movimento promediado no período da onda. No estudo clássico desenvolvido por LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964) a tensão de radiação foi definida para o caso de uma onda monocromática incidindo com um determinado ângulo à costa. HSU *et al.* (2006), SHI e KIRBY (2008) e HSU e LAN (2009) discutem o rebaixamento e a sobre-elevação do nível médio da água, considerando a incidência oblíqua de uma onda monocromática. Para todos esses casos, a promediação temporal no desenvolvimento das equações é direta, utilizando-se a média no período da onda incidente. Para o caso de ondas Bi-Bi, no entanto, o período de promediação não é tão trivial.

Considerando até a 2ª ordem da teoria de Stokes, as ondas Bi-Bi possuem quatro escalas distintas de tempo para as diversas grandezas físicas: T_a , T_b , $T_a T_b / (|T_a + T_b|)$ e $T_a T_b / (|T_a - T_b|)$. A questão é: qual dessas escalas utilizar para a promediação de termos que expressam a interação entre as duas ondas, ou seja, que dependem da adição ou subtração das fases das ondas?

É importante ressaltar que o período da interação aditiva de 2ª ordem (T^+) será sempre inferior aos períodos das ondas primárias. Supondo $T_a < T_b$:

$$T^+ = \frac{T_a T_b}{T_a + T_b} = \frac{T_a}{1 + \frac{T_a}{T_b}} < T_a \quad (3.20)$$

Em relação ao período da onda de interferência subtrativa, é possível afirmar que $T^- > T_a$, como mostra a equação (3.21). No entanto, sua faixa de valores em relação a T_b dependerá da combinação entre os períodos das ondas primárias – equação (3.22).

$$T^- = \frac{T_a T_b}{T_b - T_a} = \frac{T_a}{1 - \frac{T_a}{T_b}} > T_a \quad (3.21)$$

$$T^- = \frac{T_a T_b}{T_b - T_a} = \frac{T_a}{\frac{T_b}{T_a} - 1} \begin{matrix} > \\ \leq \end{matrix} T_b \quad (3.22)$$

Tem-se, portanto, que $T^+ < T_a < T^-$. No entanto, T^- pode ser menor, maior ou igual a T_b .

A análise sobre a escolha do período de promediação foi feita através de três casos simulados: (1) $T_a = 9$ s, $T_b = 10$ s e $T^+ = 4,7$ s, $T^- = 90$ s ; (2) $T_a = 5$ s, $T_b = 10$ s e $T^+ = 3,3$ s, $T^- = 10$ s; e (3) $T_a = 4$ s, $T_b = 10$ s e $T^+ = 2,9$ s, $T^- = 6,7$ s. Quatro opções foram testadas: (i) promediação no período médio ($[T_a+T_b]/2$); (ii) promediação no período da onda de interação aditiva (T^+); (iii) ausência de promediação; e (iv) ausência de promediação e eliminação dos termos de interação aditiva. Ressalta-se que a promediação em T^- não foi considerada, uma vez que essa opção anularia a onda de interação subtrativa, que representaria uma possível onda de infragravidade.

As Figuras 3.6 a 3.8 ilustram a quantidade de movimento gerada pelo termo referente às forças de tensão de radiação na equação (3.16). Nas figuras estão presentes a elevação instantânea das ondas Bi-Bi, calculadas pelas equações de SHARMA e DEAN (1981), e as componentes horizontais da quantidade de movimento gerada pela onda para as quatro opções apresentadas. As seguintes observações podem ser feitas:

- A promediação no período médio das ondas (T_{med}) – opção (i), gera oscilações de alta frequência, resultantes de resíduos do cálculo de promediação dos termos de interação aditiva. Quanto maior for o período de promediação em relação a T^+ , menor será esse resíduo;
- A promediação em T^+ – opção (ii), elimina por completo as oscilações de alta frequência, como esperado. A quantidade de movimento, por sua vez, oscila suavemente de acordo com a elevação instantânea;
- A opção (iii) foi descartada, uma vez que os termos de interação aditiva não promediados aumentam a escala dos valores de quantidade de movimento em uma ordem de grandeza em relação a qualquer outro método de promediação adotado, o que parece ser irreal;
- A opção (iv), onde os termos aditivos foram descartados e os termos subtrativos não foram promediados, apresentou valores muito próximos da opção (ii).

Nas Figuras 3.9 a 3.11 faz-se a análise apenas dos termos subtrativos do nível médio, equação (3.9). Nota-se que quando o período da interação subtrativa é consideravelmente discrepante das ondas primárias (Figura 3.9), o nível médio promediado tende ao valor do nível médio instantâneo para todos os tipos de promediação. Para o caso em que T^- é próximo ao valor de T_a e T_b (Figura 3.10 e Figura 3.11), o nível médio promediado sofre

um amortecimento relevante, sendo esse amortecimento mais significativo para a opção (i) de promediação do que para a opção (ii). É evidente que a opção (iv) não altera o valor do nível médio em relação às equações de SHARMA e DEAN (1981). Para o caso (3), $T_{\text{médio}} \approx T^-$, há quase a eliminação dos efeitos da onda de interação subtrativa adotando-se a opção (i).

Para casos práticos de Engenharia Costeira, ondas de períodos semelhantes tendem a possuir ângulos não muito discrepantes, uma vez que o fenômeno de refração encaminha seus ângulos a uma incidência próxima à normal sobre a costa. Para esses casos, propõe-se a opção (iv), em que os termos aditivos são desprezados e a promediação temporal dos termos subtrativos não é feita. É condizente anular-se as frequências positivas, uma vez que para o caso em questão $k^+ > k^-$, promovendo um decaimento mais rápido dos termos aditivos ao longo da coluna d'água (Figura 3.4). Os termos subtrativos, por sua vez, decaem lentamente, sendo quase uniformes para águas mais rasas. Além disso, essa opção agiliza consideravelmente o tempo de cálculo do resultado, uma vez que não há a necessidade de se calcular as médias temporais a cada passo de tempo.

Para casos em que há a presença de uma onda de longo período (*swell*) combinada a uma onda gerada por ventos locais, a opção (iv) continua a ser muito similar à opção (ii) e, portanto, válida. Porém a diferença entre tais opções com os resultados da promediação no período médio, torna-se ligeiramente maior. À medida que o ângulo entre as ondas Bi-Bi aumenta, k^+ diminui e k^- aumenta. Se $\Delta\theta > 90^\circ$, o decaimento das interações positivas torna-se menor do que das subtrativas, de modo que a lógica anterior não se sustenta (Figura 3.5). Porém, para $\Delta\theta$ elevados, a relevância dos termos de interação não-lineares é consideravelmente reduzida, de forma que a opção (iv) continua a ser uma escolha válida. Deve-se, no entanto, avaliar caso a caso para que se tenha consciência das possíveis aproximações que estão sendo feitas.

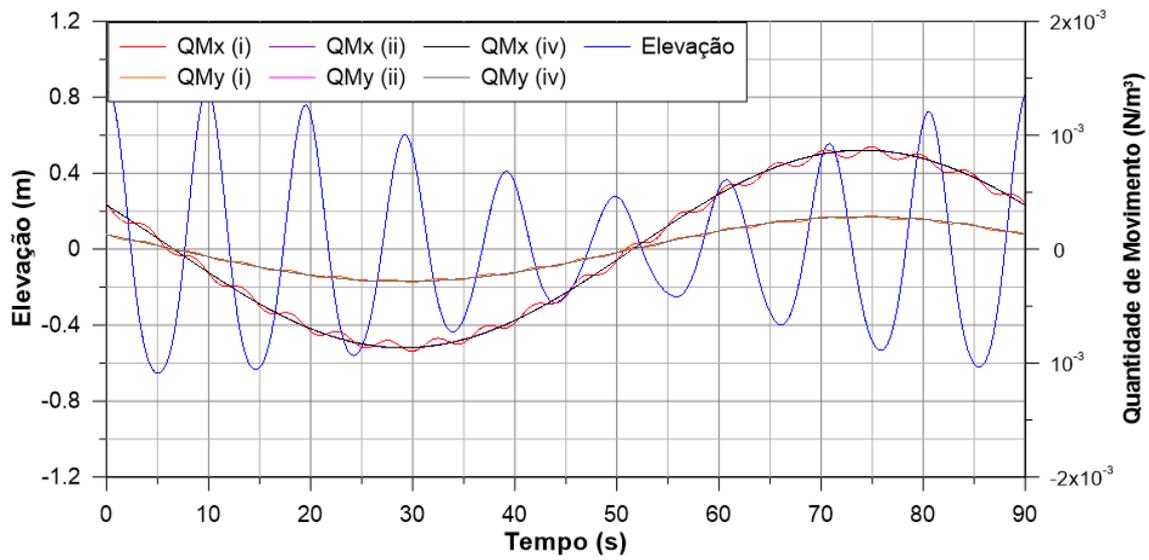


Figura 3.6. Elevação instantânea da superfície livre e componentes horizontais da quantidade de movimento geradas de acordo com cada opção de promediação. Caso 1, em que $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s.

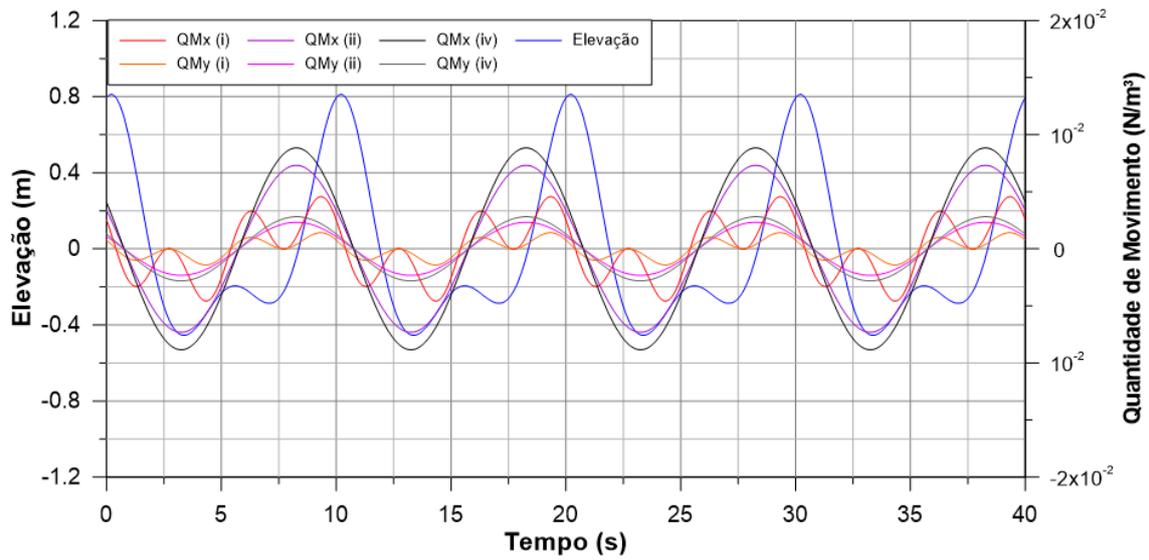


Figura 3.7. Elevação instantânea da superfície livre e componentes horizontais da quantidade de movimento geradas de acordo com cada opção de promediação. Caso 2, em que $T_a = 5$ s e $T_b = 10$ s.

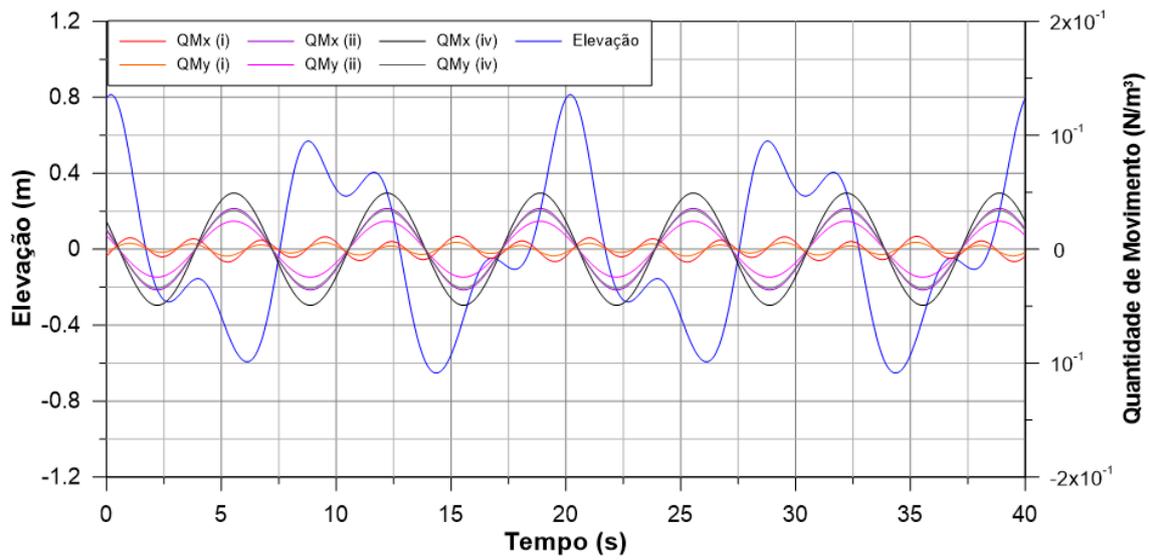


Figura 3.8. Elevação instantânea da superfície livre e componentes horizontais da quantidade de movimento geradas de acordo com cada opção de promediação. Caso 3, em que $T_a = 4$ s e $T_b = 10$ s.

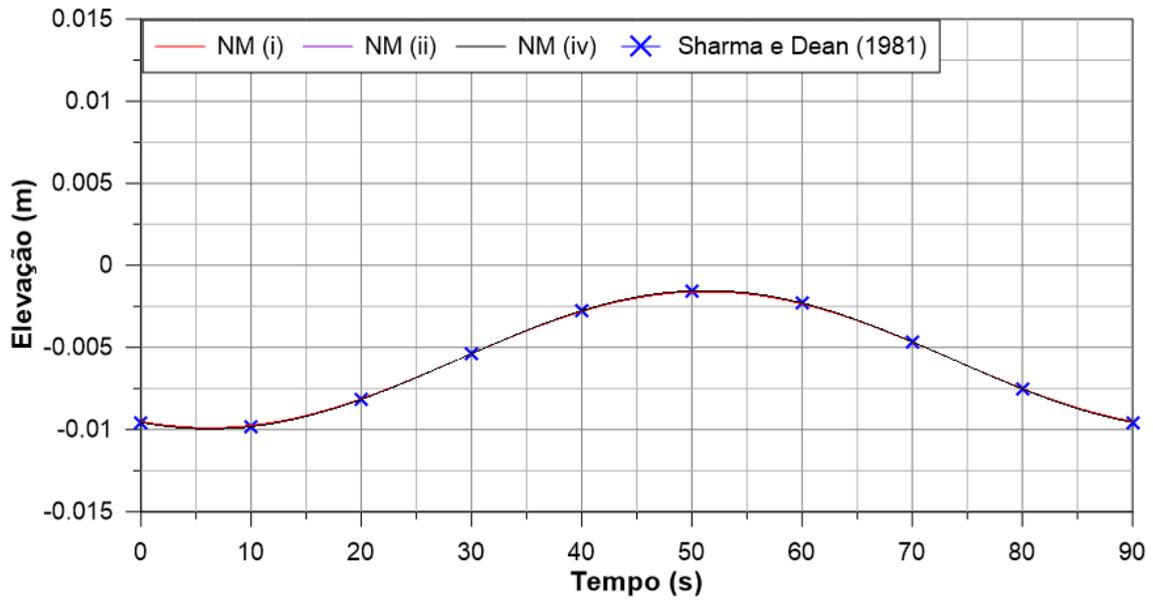


Figura 3.9. Componente subtrativa da equação do nível médio instantâneo e promediado de acordo com cada opção de promediação. Caso 1, em que $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s.

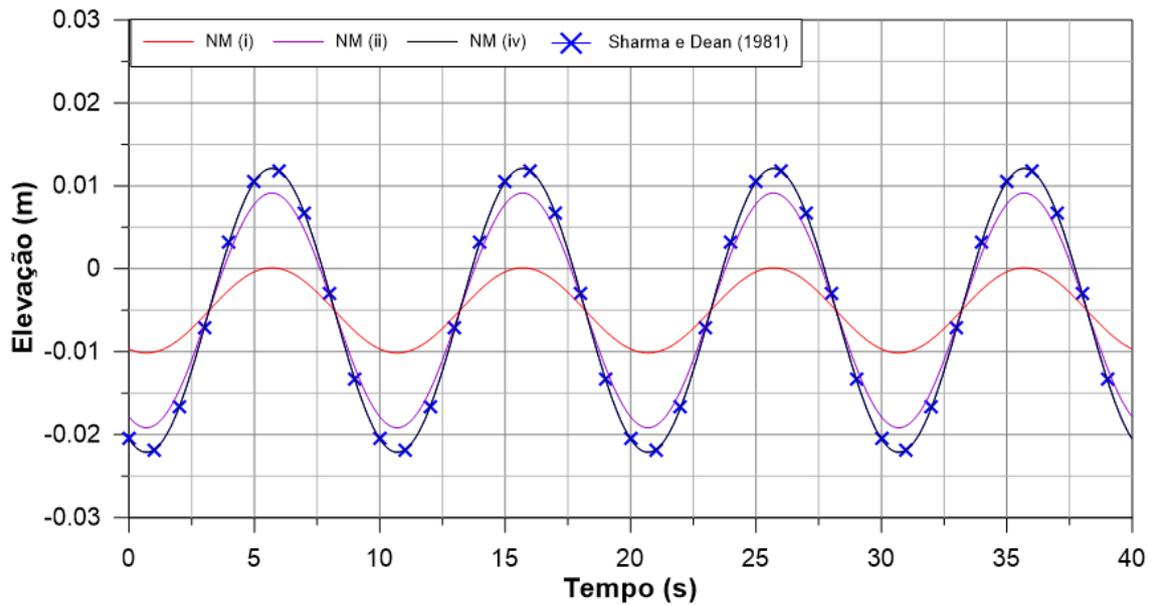


Figura 3.10. Componente subtrativa da equação do nível médio instantâneo e promediado de acordo com cada opção de promediação. Caso 2, em que $T_a = 5$ s e $T_b = 10$ s.

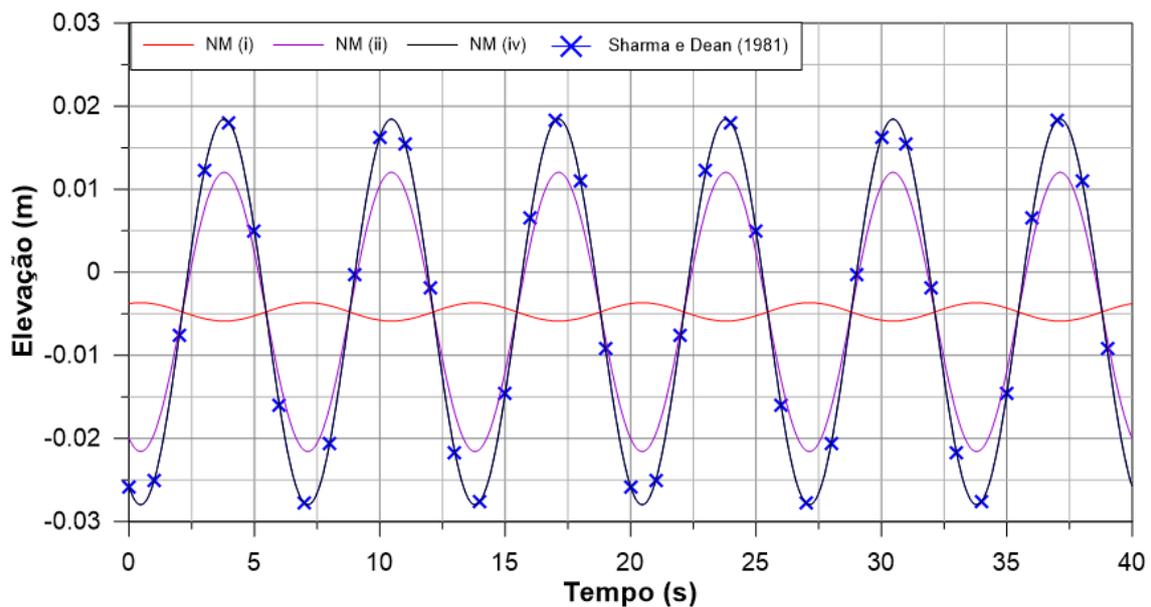


Figura 3.11. Componente subtrativa da equação do nível médio instantâneo e promediado de acordo com cada opção de promediação. Caso 3, em que $T_a = 4$ s e $T_b = 10$ s.

III.5. CÍRCULO DE MOHR

O círculo de Mohr é uma técnica bastante conhecida na área da Mecânica do Contínuo para a representação de estados de tensão. Com as equações do tensor de tensão de radiação desenvolvidas, pode-se traçar o círculo de Mohr para se ter uma ideia da influência da não-linearidade sobre as componentes de tensão de radiação geradas por ondas Bi-Bi.

A Figura 3.12 apresenta os círculos de Mohr de cada uma das ondas primárias ‘a’ e ‘b’ do caso 1 ($T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s), além do círculo resultante da soma linear das ondas Bi-Bi e da soma não-linear, utilizando a opção (iv) de promediação. Nota-se que a consideração dos termos não-lineares causa mudanças significativas sobre o estado de tensão das ondas Bi-Bi, o que evidencia a sua importância.

No **Capítulo VII**, uma discussão sobre a influência dos termos não-lineares do tensor de tensão de radiação sobre a quantidade de movimento gerada pelas ondas Bi-Bi é feita.

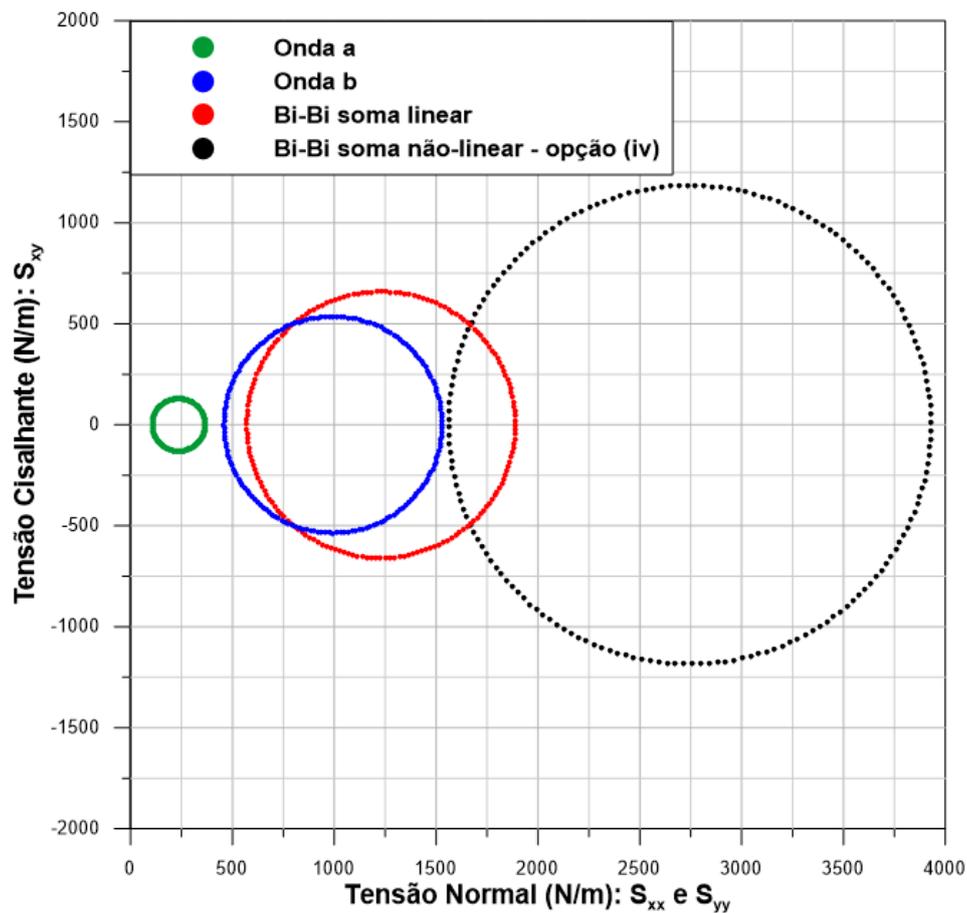


Figura 3.12. Círculo de Mohr do Caso 1, em que $T_a = 9$ s e $T_b = 10$ s; $H_a = 0,5$ m, $H_b = 1,0$ m, $D_a = 30^\circ$ e $D_b = 0^\circ$.

CAPÍTULO IV

MODELAGEM FÍSICA EM LABORATÓRIO

A onda gerada pelas interações não-lineares subtrativa entre pares de onda é um fenômeno estudado há muitos anos no contexto das ondas de infragravidade. No entanto, devido às dificuldades inerentes ao próprio fenômeno, um vasto campo ainda permanece desconhecido, sendo objeto de investigação científica. Para que as deduções matemáticas feitas no **Capítulo III** tenham confiabilidade e possam ser posteriormente inseridas em modelos numéricos utilizados em projetos de Engenharia, há necessidade de verificá-las experimentalmente, em um ambiente controlado.

Através do 19º Edital do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) na UFRJ, teve-se a oportunidade, neste trabalho, de se realizar experimentos laboratoriais no *Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen*, da *Leibniz Universität Hannover*, na Alemanha, que possui uma bacia tridimensional de ondas capaz de gerar ondas Bi-Bi.

A seguir, as características da bacia experimental, os parâmetros dos testes de modelagem física e a metodologia de análise dos dados laboratoriais são descritos. Todos os testes foram realizados durante 15 dias úteis entre as datas 08/12/2017 e 12/01/2018.

IV.1. CARACTERÍSTICAS DA BACIA

A bacia multidirecional de ondas em que os experimentos foram realizados é uma das poucas no mundo capaz de simular simultaneamente ondas e correntes. Financiada pelo Ministério de Ciência e Cultura da Baixa Saxônia (*Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur*) e pela Organização Alemã de Financiamento à Pesquisa (*Deutsche Forschungsgemeinschaft*) a um custo de €2,4 milhões, a bacia está localizada na cidade de Hannover-Marienwerder, na Alemanha, e faz parte de um complexo de instalações de modelagem física do Instituto Ludwig-Franzius, especializado em Engenharia Hidráulica, Estuarina e Costeira, da Universidade de Hannover (Figura 4.1).

A Figura 4.2a apresenta um desenho esquemático das dimensões da bacia 3D, que possui 40 m de largura, 25 m de comprimento e 1 m de profundidade. O gerador de ondas, fabricado pela empresa Bosch Rexroth AG, é formado por 72 pás individuais, tipo pistão, com 0,40 m de largura e 1,60 m de altura cada. A excursão e velocidade máxima do

gerador é de ± 0.60 m e 3,0 m/s, respectivamente, gerando ondas com altura de até 0,47 m (para profundidades de 1 m). A direção das ondas abrange um leque de 5° a 175° em relação ao eixo normal do batedor e podem ser do tipo: regulares; solitárias; espectrais³; espectros multidirecionais; e ondas de cristas curtas (*short crested waves*).

Correntes podem ser geradas por um conjunto de bombas capaz de atingir uma vazão total de 5 m³/s, reproduzindo velocidades de até 0,3 m/s para simulações com 1 m de coluna d'água na bacia. Para o presente trabalho, correntes não foram utilizadas.

A absorção de ondas na bacia é composta por um sistema ativo e outro passivo. A absorção passiva é feita por 8 placas metálicas de porosidade variável em cada margem da bacia, distribuídas com espaçamento não uniforme entre si ao longo de uma faixa com 5 m de largura em cada margem. O sistema é eficiente na absorção de ondas de até 3 s de período e foi inteiramente baseado no método desenvolvido para a bacia tridimensional do Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria – IH Cantabria (KLINGHAMMER *et al.*, 2012). No entanto, mesmo com a geração de ondas mais curtas que esse limite, a reflexão ainda pode ocorrer.

O sistema de absorção ativo, desenvolvido pela empresa Deltares, tem por objetivo evitar a re-reflexão das ondas no gerador. Cada uma das 72 pás possui sensores de elevação do nível d'água (*wave gauges*) que são analisados em tempo real pelo programa computacional do gerador. O sistema determina o deslocamento das pás de acordo com a movimentação exigida pela condição de mar previamente determinada e a reflexão identificada. A frequência máxima de absorção do gerador é de 6 Hz.

No presente trabalho o sistema de absorção ativo não foi utilizado. Testes iniciais mostraram que o sistema funciona para ondas regulares monocromáticas e espectros de ondas. No entanto, para as ondas Bi-Bi o sistema de absorção não se mostrou confiável, provocando nítidas deformações nas cristas durante o processo de geração de ondas após a incidência de ondas refletidas.

³ Tipos de espectros: Jonswap; Pierson-Moscowitz; TMA (Texel, Marsen, Arsloe); medidos na natureza; e grupos de onda.

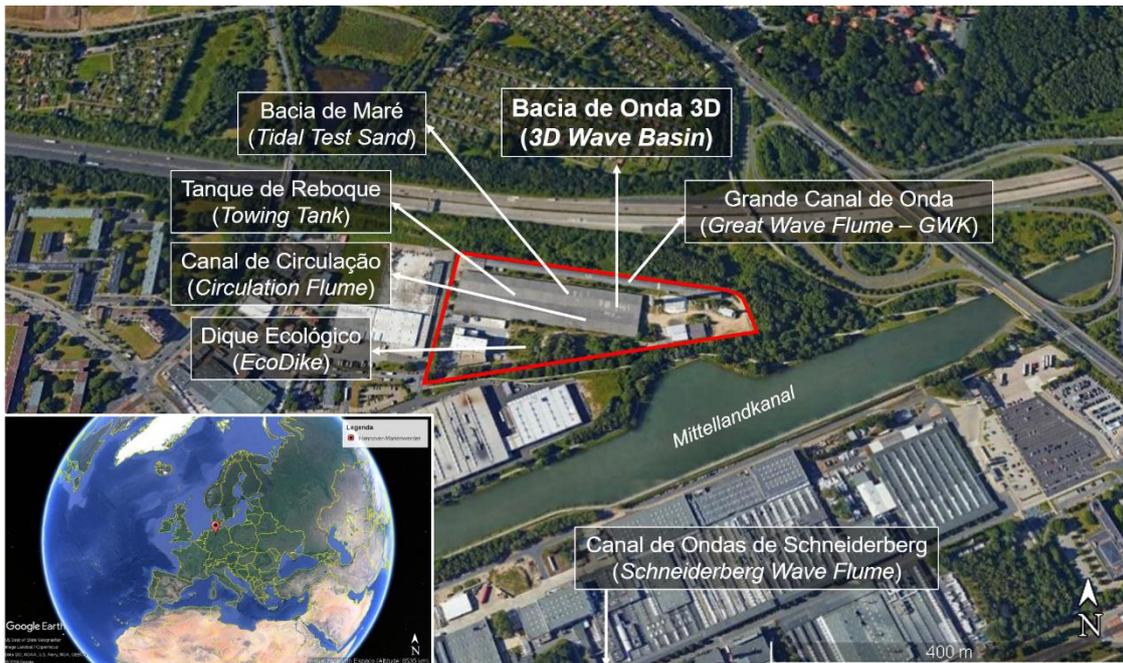


Figura 4.1. Complexo experimental do Instituto Ludwig-Franzius, em Hannover-Marienwerder, na Alemanha.

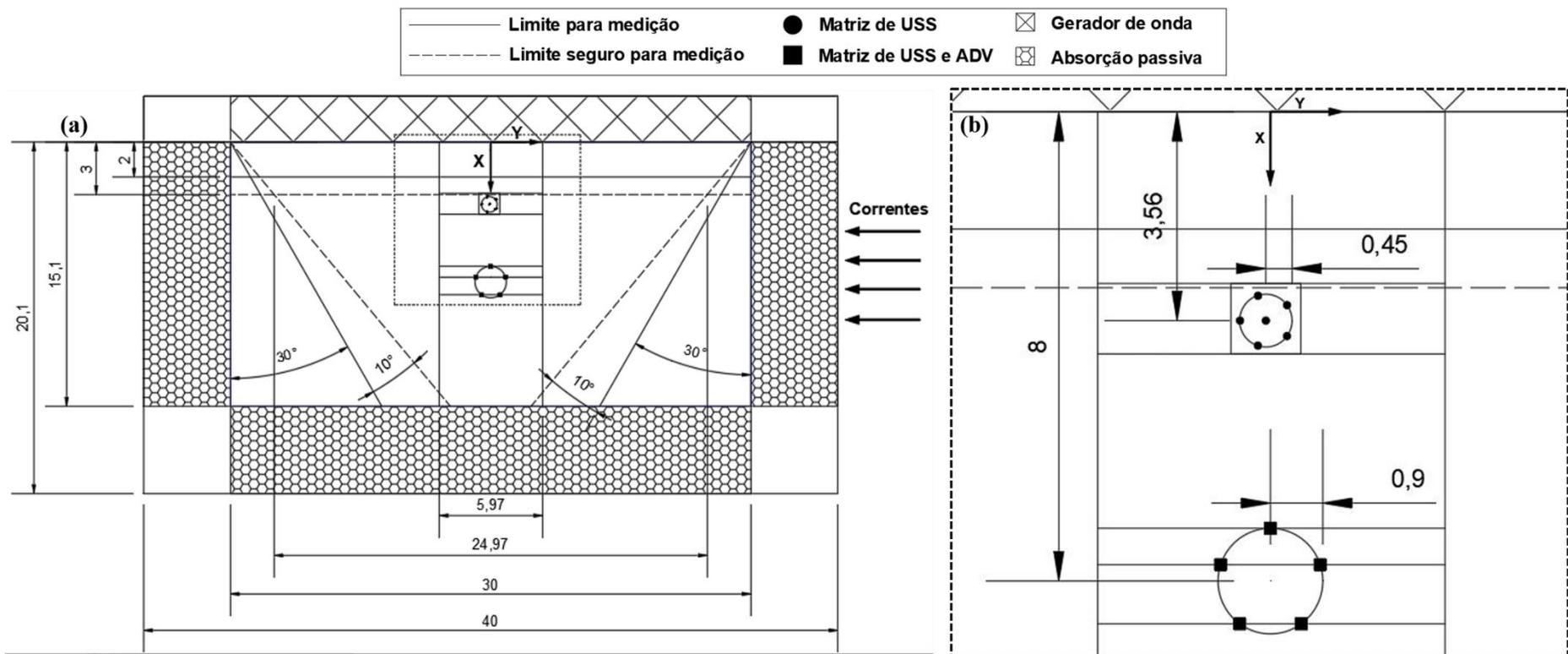


Figura 4.2. Desenho esquemático (a) da bacia de ondas 3D do Instituto Ludwig-Franzius; (b) com foco nos arranjos de instrumentação utilizadas.

IV.2. Planejamento dos Testes

Os testes foram divididos em um grupo Principal, composto por 4 subconjuntos de testes, e um grupo Extra, constituído por outros 4 subconjuntos. No grupo Principal, em cada um dos testes as características das ondas foram escolhidas de forma a se obter uma ampla amostra de diferentes combinações possíveis de ondas Bi-Bi. O grupo Extra, por sua vez, tinha por objetivo reproduzir determinados subconjuntos do grupo Principal com a alteração de algumas características-chave.

As únicas limitações para ambos os grupos eram que (i) todas as ondas deveriam respeitar a 2ª ou 3ª ordem da teoria de Stokes; (ii) as ondas não deveriam arrebentar na bacia; e (iii) as limitações impostas pelo gerador de ondas – em relação à esbeltez da onda e à excursão das pás, não deveriam ser excedidas. A Tabela 4.1 resume as principais características das ondas em cada teste e a Tabela A1.1, no **Anexo I**, apresenta de forma completa as propriedades das ondas Bi-Bi simuladas em laboratório.

Tabela 4.1. Características principais dos grupos de testes (h → coluna d'água; d → profundidade dos ADVs; H_a e H_b → altura de onda; T → período de onda; D → direção de onda).

Teste	h (m)	d (m)	H_a (m)	H_b (m)	T (s)	D (°)
Grupo Principal					Combinação de 3 diferentes períodos (1,1<T<3,0)	Combinação de 3 diferentes diferenças de ângulo (0°, 10°, 30°)
T1	0,60	0,35	0,13	0,13		
T2	0,60	0,35	0,10	0,16		
T3	0,75	0,35	0,13	0,13		
T4	0,75	0,35	0,10	0,16		
Grupo Extra						
T5	0,60	0,35	0,05	0,11		
T6	0,75	0,50	0,10	0,16		
T7	0,60	0,35	0,10	0,16	Repetição Estatística	
T8	Espectros Bimodais					

IV.2.1. Grupo principal

No grupo Principal, metade dos testes foi conduzido com lâmina d'água de 0,60 m e a outra metade com lâmina d'água de 0,75 m. Em dois conjuntos de testes (T1 e T3), ambas as ondas tinham a mesma altura (0,13 m) e nos outros dois (T2 e T4) as ondas tinham 0,10 m e 0,16 m. A soma das alturas de onda em cada teste foi propositalmente fixada para 0,26 m em todos os testes planejados para este grupo, para que não houvesse arrebentação de onda em nenhum teste e para não se introduzir a altura total (H_a+H_b) como uma nova variável entre os testes. Inicialmente a soma de ambas as alturas das ondas foi definida em 0,30 m. No entanto, devido à arrebentação de onda observada em

testes iniciais, essa soma foi reduzida para 0,26 m. Preferiu-se mudar as alturas em vez de alterar seus períodos.

Os períodos das ondas foram limitados entre 1,1 s e 3,0 s. Em cada um dos quatro testes principais, três períodos diferentes foram combinados dois a dois: o limite inferior foi imposto pela curva de performance do gerador de onda, determinada pelo fabricante, e pelas condições de arrebentação de onda. A capacidade do sistema de absorção passivo da bacia e o limite da teoria de Stokes de 3ª ordem impuseram o limite superior. O período intermediário foi calculado de modo que o parâmetro de propagação de onda (h/L) fosse metade das demais condições predefinidas. Por exemplo, se no teste T1, com as condições de profundidade e alturas de onda dadas pela Tabela 4.1, escolheu-se $T_{\min} = 1,2$ s ($h/L_{\min} = 0,28$) e $T_{\max} = 2,3$ s ($h/L_{\max} = 0,12$), tem-se que $h/L_{\text{médio}} = 0,20$, que corresponde a um período de 1,5 s.

Foi estabelecido que cada teste teria uma combinação de três diferenças de ângulo entre as duas ondas testadas: 0° , 10° e 30° . A Tabela 4.2 mostra um exemplo. O motivo dessas combinações foram:

- analisar de forma discreta a propagação de dois sistemas de ondas diferentes do oceano para a costa: ao se aproximarem do litoral, a diferença de ângulo entre as duas ondas diminui, até um ponto em que o sistema Bi-Bi pode ser, erroneamente (vide item III.1.3) identificado como um sistema bicromático, unidirecional;
- estudar as consequências da diferença de ângulo sobre a onda de interação subtrativa gerada: nota-se na Tabela 4.2 que os casos T1-B2/B4 e T1-B3/B5 têm a mesma diferença de ângulo, mas as ondas primárias têm ângulos diferentes. De acordo com SAND (1982), a magnitude do número do vetor da onda subtrativa deve ser o mesmo em cada caso, com pequenas diferenças de ângulo entre as duas ondas subtrativas geradas (Figura 4.3).

Tabela 4.2. Combinação de ângulos para teste T1-B, onde $H_a = H_b = 0,13$ m, $T_a = 1,2$ s e $T_b = 1,5$ s. Combinações semelhantes foram feitas para todos os outros testes.

T1			
Combinações	D_a ($^\circ$)	D_b ($^\circ$)	ΔD ($^\circ$)
T1-B1	0	0	0
T1-B2	10	0	10
T1-B3	30	0	30
T1-B4	5	-5	10
T1-B5	15	-15	30

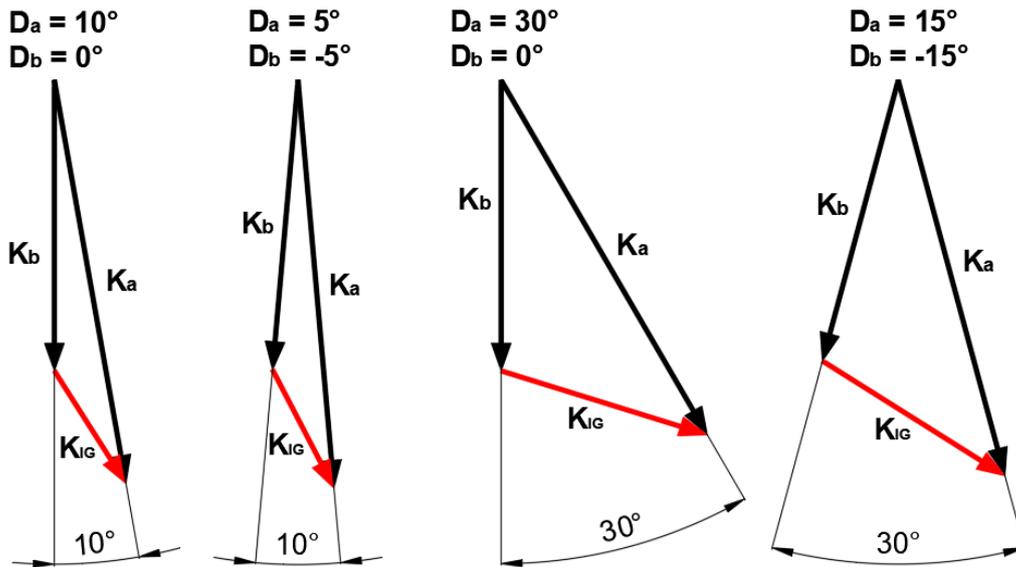


Figura 4.3. Influência da diferença de ângulo sobre a onda de infragravidade. As setas correspondem aos vetores número de onda.

A Figura 4.4 mostra as características de propagação das ondas de todos os testes planejados para o grupo Principal e suas condições sob as limitações do gerador de ondas. Observa-se que as ondas modeladas estão contidas dentro das faixas de aplicabilidade da 2ª ou da 3ª ordem da teoria de Stokes; estão dentro da zona de propagação de “água intermediária” e distantes do limite de arrebentação (Figura 4.4a) e não excedem a capacidade do gerador de ondas (Figura 4.4b). É importante ressaltar que não foi aplicado uma escala aos parâmetros do modelo físico.

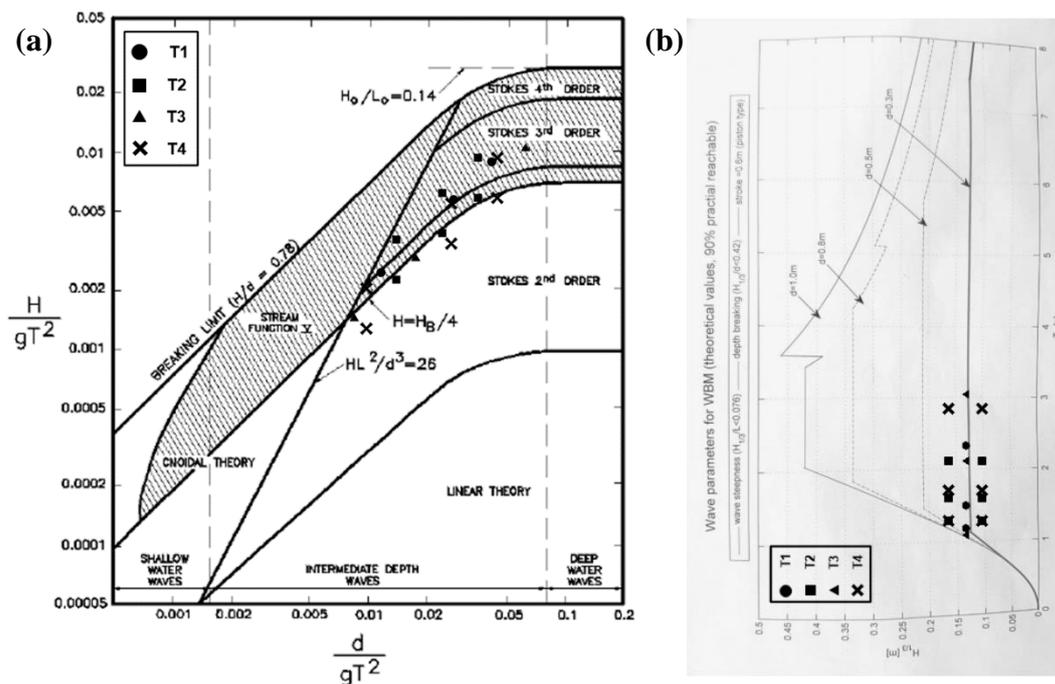


Figura 4.4. (a) Condição de propagação de ondas para os testes do grupo Principal e (b) performance do gerador de ondas e condições dos testes planejados.

IV.2.2. Grupo extra

Durante o período de experimentos, testes adicionais foram feitos, que incluíram: (i) T5: ondas menos esbeltas – repetição do grupo de teste T2 com alturas de onda de 0,05 m e 0,11 m; (ii) T6: medições de velocidade a uma profundidade diferente – grupo de teste T4 foi repetido com o reposicionamento de instrumentos; (iii) T7: repetição de um teste específico para análise estatística – teste T2-E3 foi escolhido para repetição; e (iv) T8: modelagem de espectros bimodais – testes T1-B3, T2-E2, T3-D5, T4-C4, T4-B2, T4-B3 e T4-C5 foram repetidos, mas com características espectrais (incluindo espalhamento do ângulo de propagação).

O código de numeração dos testes segue a seguinte lógica:

- T4-B2 se refere ao ‘grande’ teste de número 4. De acordo com a Tabela 4.1, existem 8 ‘grandes’ testes, onde o de número 4 possui uma coluna d’água de 0,60 m; os ADVs estavam posicionados a uma profundidade de 0,35 m; e as alturas das ondas ‘a’ e ‘b’ eram de 0,10 m e 0,16 m, respectivamente.
- T4-B2 se refere à combinação de períodos. Dentre cada ‘grande’ grupo de testes, foram feitas todas as combinações possíveis entre 3 períodos de onda: período ‘menor’; período ‘médio’ e período ‘maior’. Portanto, há um total de 6 combinações possíveis, como mostrado na Tabela 4.3. Por exemplo, os períodos combinados no ‘grande’ grupo T4 foram: 1,3 s; 1,7 s; e 2,8 s. Assim, o subgrupo B se refere à combinação entre os períodos de 1,3 s e 1,7 s.

Tabela 4.3. As seis combinações de períodos feitas para cada grupo de teste.

Subgrupo		Combinação	Subgrupo		Combinação
A	→	menor – menor	D	→	médio – médio
B	→	menor – médio	E	→	médio – maior
C	→	menor – maior	F	→	maior – maior

- T4-B2 se refere à combinação de direções das ondas Bi-Bi, exemplificadas na Tabela 4.2. Para este caso, $D_a = 10^\circ$ e $D_b = 0^\circ$.

IV.2.3. Visão geral

O número total de testes, incluindo ambos os grupos, foi de 271, onde 85% são considerados úteis para análise de dados, dentre os quais 90 correspondem aos testes

extras. Os 15% de testes inutilizados correspondem àqueles feitos durante os ajustes iniciais dos instrumentos de medição e controle ou àqueles em que pequenos erros laboratoriais foram identificados.

A duração de cada teste foi de 2 minutos, e o intervalo de tempo entre os testes, de 10 minutos. A duração dos testes foi definida a partir do mínimo denominador comum entre o tempo necessário para pelo menos 1 ciclo completo da onda de interação subtrativa de 2ª ordem – que tem, em geral, um período maior de oscilação do que as ondas primárias; o tempo para re-reflexão das ondas na bacia; e uma limitação do programa computacional do gerador de ondas⁴. Por sua vez, o intervalo de tempo entre os testes foi definido como o tempo necessário para que a bacia se acalmasse completamente: os instrumentos de medição de velocidade mostraram que depois de 7 minutos não havia mais velocidades significativas, arredondando-se o tempo de espera para 10 minutos por questões de segurança e conveniência.

IV.3. Instrumentação

As medições laboratoriais e as análises de dados, neste trabalho, concentram-se sobre o campo de velocidades gerado pelas ondas Bi-Bi. Para tais medições, fez-se uso de ADVs (*Acoustic Doppler Velocimeter*), um instrumento desenvolvido na década de 1990, com o intuito de possibilitar medições tridimensionais do campo de velocidade em escoamentos (LOHRMANN *et al.*, 1994).

Grande parte dos experimentos em modelos físicos e campanhas de medição de campo, faz uso de instrumentos que medem a elevação da superfície livre. Portanto, as ondas Bi-Bi também foram registradas a partir de sensores ultrassônicos de elevação de superfície livre (USS – *Ultrasonic Sensors*), possibilitando uma posterior comparação entre as informações que cada tipo de instrumento fornece sobre as ondas de interação subtrativa.

A seguir, uma breve descrição de cada equipamento é feita.

IV.3.1. ADV: Acoustic Doppler Velocimeter

Os ADVs *Vectrino Plus* utilizados neste trabalho, de fabricação da empresa Nortek, possuem um emissor acústico central e quatro receptores (Figura 4.5a). Para medir a

⁴ Para ondas com período maior ou igual a 2 s, o tempo de teste mínimo exigido pelo gerador é de 2 min.

velocidade da água, os ADVs fazem uso do efeito Doppler. O emissor central emite pulsos acústicos a uma frequência de 10 MHz que são refletidos por partículas em suspensão na coluna d'água e detectados pelos receptores do instrumento. A diferença de fase entre o pulso emitido e o receptado é identificada, possibilitando o cálculo da velocidade da partícula refletora. A inclinação e o posicionamento dos receptores permitem a computação de cada componente do vetor velocidade (u, v e w), com uma duplicação do cálculo da componente vertical (w)⁵. A hipótese básica feita pelo ADV é a de que a velocidade da água é igual à velocidade da partícula em suspensão.

Os ADVs utilizados nos experimentos são de medição pontual⁶. A distância e a inclinação entre o emissor e os quatro receptores determina esse ponto de medição, chamado de *sweet spot*, que em geral localiza-se a 5 mm abaixo do emissor. A frequência de aquisição de dados pode ser de 1 Hz a 200 Hz. Neste trabalho, utilizou-se uma frequência de 100 Hz.

Para que haja uma boa qualidade das medições, é necessário que: (i) o aparelho esteja afastado dos contornos da bacia; (ii) que haja material particulado em suspensão suficiente para que se tenha a reflexão adequada dos pulsos acústicos emitidos; e (iii) que não haja obstáculos indesejáveis que modifiquem o escoamento nas proximidades do aparelho. A acurácia das medições destes equipamentos é em torno de 1% da velocidade total medida⁷. Mais detalhes sobre o funcionamento destes equipamentos podem ser obtidos em CRAIG *et al.* (2011), LANE *et al.* (1998), LOHRMANN *et al.* (1994), RUSELLO (2009) e THOMAS *et al.* (2017).

IV.3.2. USS: Ultrasonic Sensor

Diferentemente dos medidores de elevação de superfície livre resistivos ou capacitivos (*wave gauges*), os USSs medem a elevação da superfície a partir da emissão de sinais sonoros de alta frequência (ultrassônicos), que refletem na superfície d'água e são

⁵ Em geral, a segunda medição da componente vertical da velocidade é ignorada.

⁶ A medição pontual é, na verdade, medição dentro de um pequeno volume no formato de um cilindro com 7 mm de altura e 1,8 mm de diâmetro. Diz-se de medição pontual, pois existem Vectrinos perfiladores que medem a velocidade 3D ao longo de um perfil de aproximadamente 34 mm.

⁷ <http://www.nortekusa.com/lib/data-sheets/datasheet-vecrino-lab>

recapturados pelo equipamento. Não necessitam de calibração⁸ e devem ficar a uma distância mínima de 0,20 m da maior elevação da superfície esperada, podendo medir a uma distância de até 1,20 m. O equipamento, da empresa General Acoustics e.K., possui uma precisão de 0,1 mm, e possui dificuldades apenas para a medição de ondas muito esbeltas.

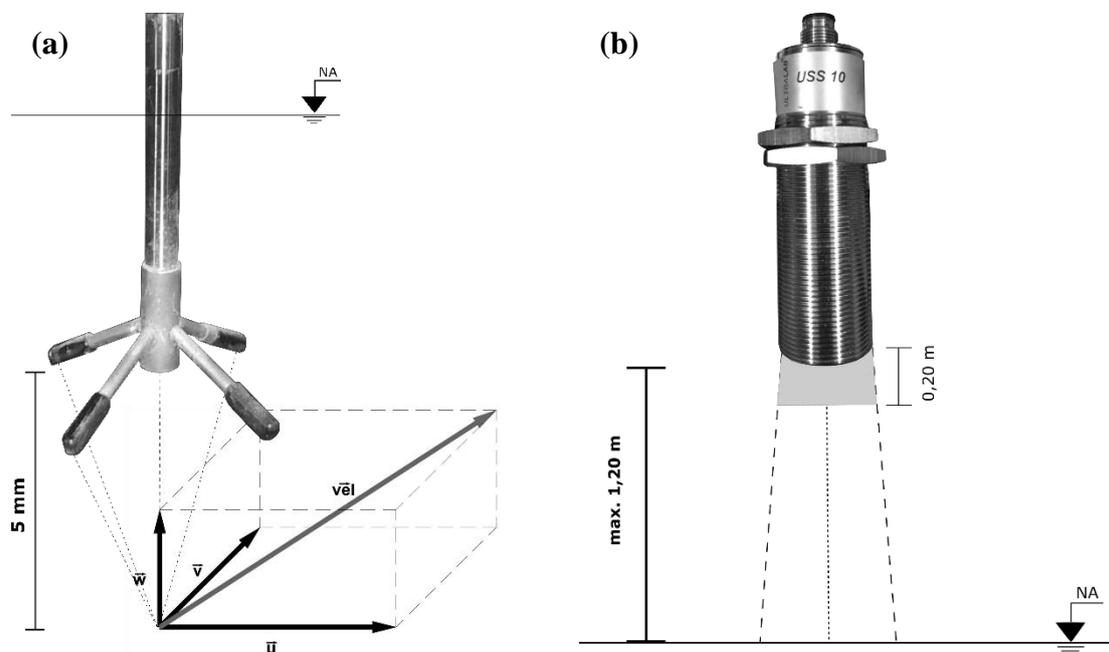


Figura 4.5. Desenho esquemático de funcionamento do (a) ADV; e (b) USS.

IV.3.3. Arranjo dos equipamentos

Dois arranjos de USSs e um de ADVs foram usados. A Figura 4.2b mostra um esboço de suas posições na bacia de ondas. Seis USSs compuseram o primeiro arranjo de USS, enquanto o segundo arranjo continha cinco sensores. Cada um dos USSs do segundo arranjo foi posicionado o mais próximo possível de cada um dos 5 ADVs que também faziam parte deste arranjo. A Tabela 4.4 mostra as coordenadas (x, y) de cada instrumento dentro da bacia⁹.

⁸ A calibração é feita de forma constante a partir de um USS específico que mede constantemente a distância a uma placa metálica, com localização pré-determinada fora da bacia.

⁹ O sistema de coordenadas adotado neste trabalho é mostrado na Figura 4.2 e não corresponde ao do gerador de ondas.

O arranjo 1, composto apenas por USSs, é constantemente utilizado em diversos projetos na bacia 3D, com o objetivo de avaliar se as condições de mar impostas ao programa computacional do gerador de ondas estão sendo de fato reproduzidas. Apesar de ser móvel, sua estrutura é pesada e de difícil locomoção. O posicionamento de cada instrumento é do tipo CERC-6, com cinco instrumentos em círculo e um central, como recomendado por PANICKER e BORGMAN (1970). O círculo de instrumentação possui um diâmetro de 0,45 m, adequado para a medição de ondas com os períodos dos testes propostos (Figura 4.2).

Por sua vez, o arranjo 2 foi instalado no formato CERC-5 e projetado especificamente para os experimentos deste trabalho. Como o objetivo principal é capturar as ondas de interferência subtrativa, que possuem em geral comprimentos maiores que as ondas primárias, houve a necessidade de se aumentar o raio do círculo de instrumentação. O raio determinado como adequado para o arranjo 2 foi de 0,90 m.

A profundidade dos ADVs foi planejada de acordo com as opções de velocidade nominal do aplicativo da Nortek e o perfil de velocidade máxima calculado para cada um dos testes. A velocidade nominal estabelece as componentes horizontais e verticais máximas de velocidade que o instrumento pode medir sem mistura de fase (*phase wrapping*). Assim, é desejável que se tenha conhecimento prévio da ordem de grandeza das velocidades esperadas no experimento.

Tabela 4.4. Coordenadas de cada instrumento e profundidades dos ADVs. Os USSs do arranjo 1 são numerados como ‘1.1.x’, do arranjo 2 como ‘2.1.x’, e os ADVs como ‘2.2.x’, onde ‘x’ é o número mostrado na Figura 4.2.

Instrumento	Identificação	Coordenadas (m)		Profundidade (m)	
		X	Y	T1 a T5, T7, T8	T6, T8
USS	1.1.1	3,137	-0,214	-	-
USS	1.1.2	3,561	-0,523	-	-
USS	1.1.3	3,987	-0,215	-	-
USS	1.1.4	3,824	0,285	-	-
USS	1.1.5	3,297	0,286	-	-
USS	1.1.6	3,561	-0,079	-	-
USS	1.2.1	7,207	-0,100	-	-
USS	1.2.2	7,913	-0,950	-	-
USS	1.2.3	8,817	-0,510	-	-
USS	1.2.4	8,844	0,285	-	-
USS	1.2.5	8,003	0,885	-	-
ADV	2.2.1	7,207	0,000	0,35	0,50
ADV	2.2.2	7,913	-0,840	0,35	0,50
ADV	2.2.3	8,732	-0,575	0,35	0,50
ADV	2.2.4	8,799	0,380	0,35	0,50
ADV	2.2.5	7,928	0,815	0,35	0,50

Perfis de velocidade máxima foram calculados de acordo com as equações apresentadas por SHARMA e DEAN (1981) para todos os testes executados. A Figura 4.6 apresenta os perfis calculados para os testes do subconjunto T4. As linhas verticais correspondem às velocidades máximas medidas pelo ADV sem que o fenômeno de mistura de fase ocorra, de acordo com cada opção de velocidade nominal. A velocidade vertical (w) é mais restritiva do que as velocidades horizontais (u e v). Para este caso específico, uma profundidade de 0,35 m foi escolhida como adequada, com os ADVs trabalhando com uma velocidade nominal de 0,30 m/s. Durante o teste extra T6 e para alguns casos do teste T8, os ADVs foram rebaixados a uma profundidade de 0,50 m a partir da superfície livre.

Assim como foi discutido no item III.1.4, a Figura 4.6 deixa claro que, dependendo da profundidade de medição, a relação entre as velocidades orbitais máximas das ondas Bi-Bi e as velocidades máximas da onda de interação subtrativa muda significativamente, uma vez que cada um dos perfis possui um decaimento diferente (SHARMA e DEAN, 1981). Assim, um dos objetivos desta investigação é ver se é mais fácil identificar a onda subtrativa em profundidades maiores, onde a onda de longo período tem uma maior contribuição percentual para a velocidade orbital total.

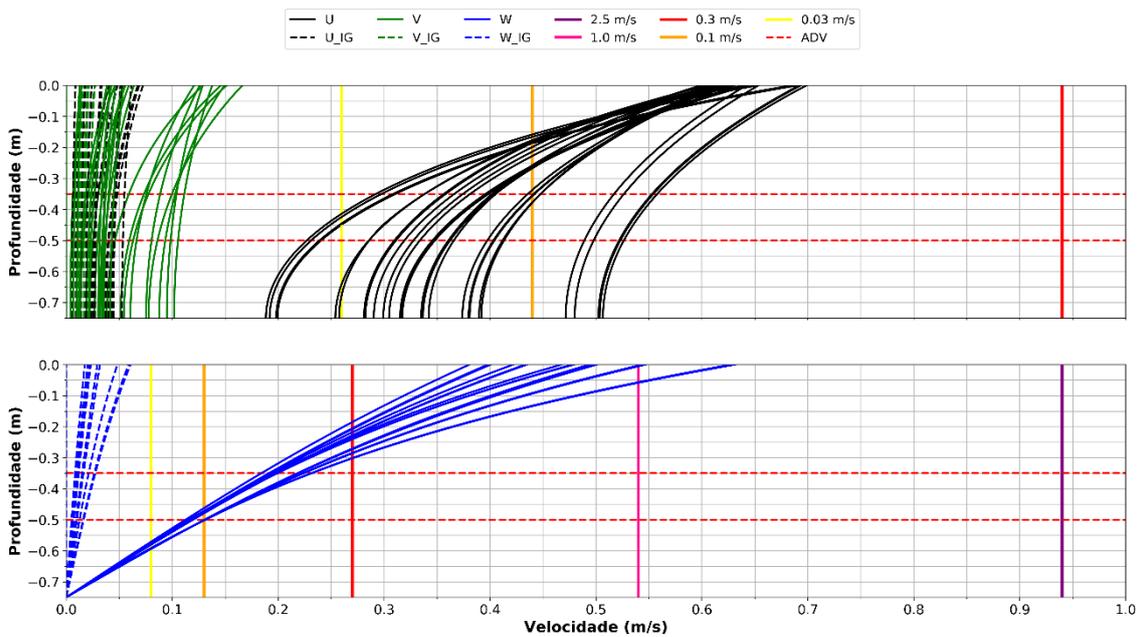


Figura 4.6. Perfis de velocidade máxima de todos os testes do subconjunto T4. Gráfico superior mostra velocidades horizontais (u-preto, v-verde) e gráfico inferior, velocidades verticais (w-azul). Linhas de perfil tracejada correspondem à contribuição das ondas de interação subtrativa (legenda 'IG' de infragravidade). Linhas horizontais tracejadas mostram a posição do ADVs para os testes T4 e T6, e linhas verticais contínuas mostram as velocidades máximas medidas pelo ADVs para cada velocidade nominal.

IV.3.4. Cuidado especial com os ADVs

Os ADVs foram escolhidos para medir o campo de velocidades na bacia, pela sua capacidade de medir as 3 componentes do vetor velocidade (u, v e w) sem interferir de forma significativa no escoamento. No entanto, dados espúrios (*spikes*) são muito comuns nos dados de saída dos ADVs, sendo motivo de crítica ao seu uso.

Spikes são anomalias presentes no registro de velocidades, que podem ocorrer pela movimentação aleatória de material suspenso na região de medição do instrumento (VOULGARIS e TROWBRIDGE, 1998), mistura de fase (RUSELLO, 2009), bolhas de ar (LIU *et al.*, 2002) ou interferência do contorno (LANE *et al.*, 1998). Em laboratório, uma outra fonte muito comum de *spikes* se dá pela falta de material em suspensão na água.

Para que o ADV possa medir a velocidade do escoamento, é preciso que haja uma quantidade suficiente de material particulado em suspensão na coluna d'água e, mais especificamente, no ponto exato de medição. Na natureza, esse requisito não costuma ser um problema, pois naturalmente os rios, estuários e oceanos são providos de uma quantidade suficiente de partículas em suspensão. No entanto, em laboratório, a água dos

canais e bacias experimentais costuma ser renovada constantemente por um volume de água com pouca concentração de material em suspensão. Como consequência, medições em laboratório com ADV podem ser contaminadas com uma alta porcentagem de *spikes*, caso os devidos cuidados não sejam tomados.

Uma solução comum para esse problema consiste em adicionar material particulado nas proximidades dos instrumentos (CHANSON, 2008). Em canais 2D, o gotejamento pontual na superfície livre costuma ser suficiente. No entanto, em bacias de onda 3D a dispersão do material particulado é consideravelmente maior e, caso existam velocidades residuais, há uma alta probabilidade do material particulado não atingir o ponto de medição do ADV.

O Eng. Mike Lieske¹⁰ (comunicação pessoal), realizou experimentos na bacia 3D do Instituto Ludwig-Franzius, utilizando ondas e correntes. O material particulado era gotejado ao longo da coluna d'água por tubos verticais perfurados, localizados a montante dos ADVs. Uma vez expelido, o material particulado era advectado pela corrente e difundido ao longo da coluna d'água até atingir o ponto de medição dos instrumentos. O gotejamento era garantido por bombas que impulsionavam o material particulado desde toneis de armazenamento até os tubos verticais (Figura 4.7a). O material utilizado era o Dióxido de Titânio (TiO_2) – um material inerte, não-corrosivo e não-condutor de eletricidade, a uma concentração ótima de 1,6 g/L, preestabelecida.

No entanto, para os experimentos deste trabalho, como não haveria correntes para advectarem o material, este sistema não seria adequado. Portanto, a solução deveria ser similar ao sistema utilizado em canais de onda, onde o gotejamento é feito na superfície livre.

Uma fonte circular foi desenvolvida para aumentar o espalhamento do material em torno do ADVs (Figura 4.7b). Este tipo de estrutura aumenta a probabilidade do material particulado alcançar o ponto de medição do equipamento, mesmo havendo a presença de quaisquer velocidades residuais dentro da bacia.

Um teste de sedimentação também foi feito previamente para estimar o tempo necessário para o material particulado chegar à elevação do ponto de medição do ADV, localizado 5 mm abaixo do emissor de pulsos acústicos. Utilizando-se um béquer graduado, mediu-

¹⁰ Até o fechamento deste trabalho, não havia publicação disponível para citação.

se o tempo de sedimentação de uma pequena quantidade de material particulado gotejado na superfície, ao longo de 10 cm. A Figura 4.8 mostra um exemplo deste teste e a equação ajustada. Para ADVs a 0,35 m de profundidade, estimou-se que o material particulado levaria aproximadamente 8 min para atingir o ponto de medição. Isto definiu o tempo necessário para começar o gotejamento de material na bacia antes de cada teste.

Para os testes com os equipamentos a 0,50 m de profundidade, não se considerou o resultado da equação (22 min) como válido, uma vez que a equação de sedimentação foi ajustada para apenas 10 cm. A extrapolação para 50 cm não pareceu ser adequada.

Ressalta-se que apenas os testes iniciais demandaram uma aplicação prévia de 8 min de duração do material particulado. Com a repetição sucessiva dos testes, a região em volta do arranjo de ADVs já se apresentava com uma concentração adequada de material, de forma que o bombeamento só era feito 3 min antes de cada teste, com o intuito de reabastecer a coluna d'água com TiO_2 .

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram uma visão frontal e traseira da bacia, com destaque para os arranjos 1 e 2, respectivamente. A Figura 4.11 mostra um resultado bruto de medição de velocidade típica. É perceptível a alta qualidade dos dados adquiridos, com raras ocorrências de *spikes* ao longo de todo o tempo de aquisição de dados.

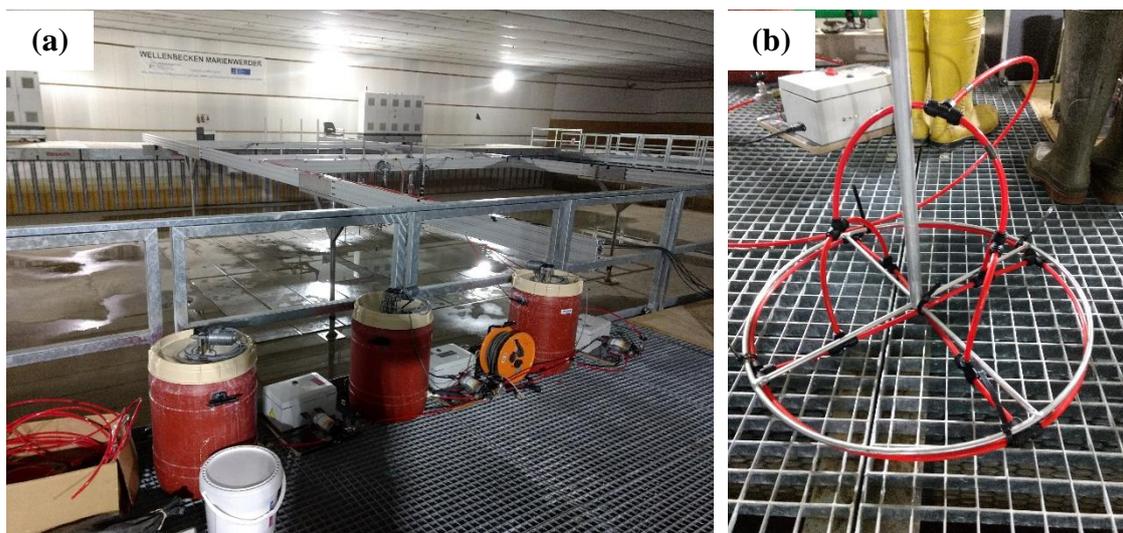


Figura 4.7. (a) Conjunto de toneis e bombas utilizados para armazenar e bombear material particulado para os experimentos; e (b) fonte circular desenvolvida para dispersar material no entorno dos ADVs.

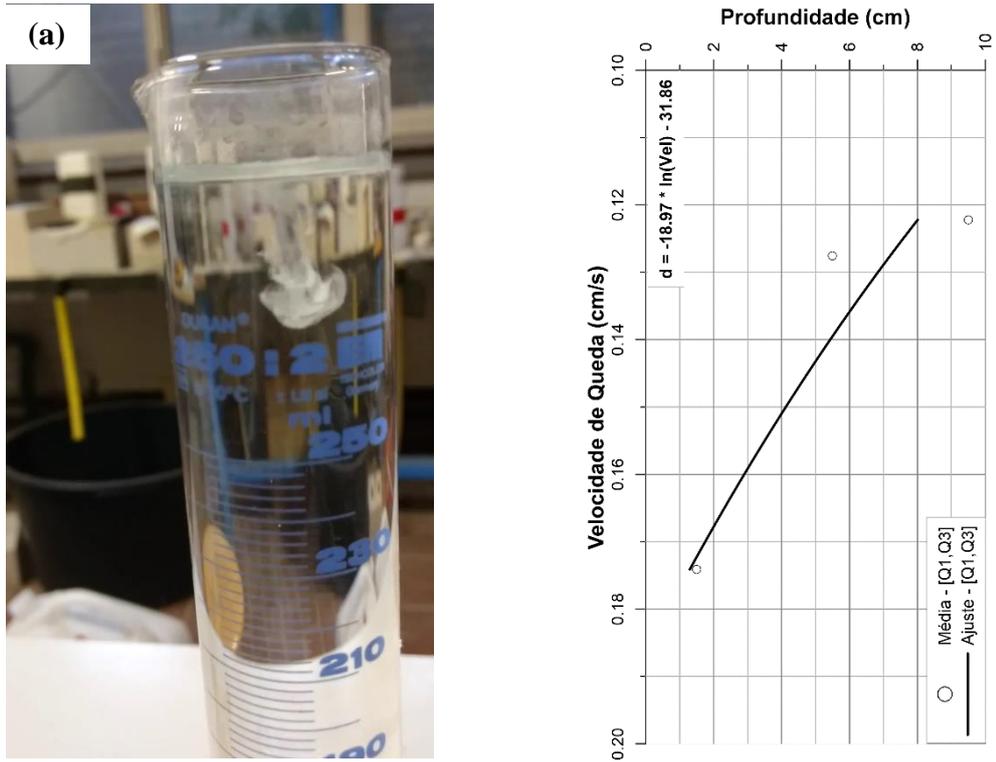


Figura 4.8. Determinação da velocidade de queda do material particulado e o tempo de bombeamento prévio a cada teste.



Figura 4.9. Arranjo 1 (USS) com arranjo 2 (USS e ADV) ao fundo.



Figura 4.10. Arranjo 2 (USS e ADV) com arranjo 1 (USS) ao fundo.

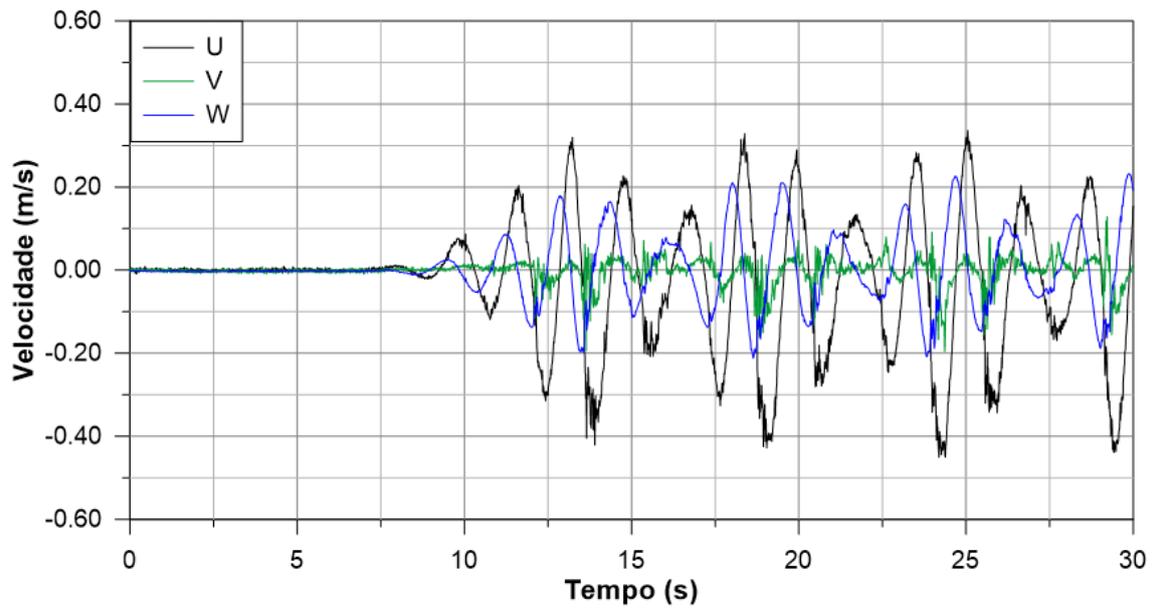


Figura 4.11. Dado bruto típico de um ADV do arranjo 2 (teste T4-B2).

CAPÍTULO V

METODOLOGIA DE ANÁLISE

No **Capítulo IV**, os experimentos em laboratório foram descritos, tendo sido apresentados a bacia 3D do Instituto Ludwig-Franzius; os equipamentos de medição utilizados e sua disposição dentro da bacia; além de alguns cuidados especiais com o instrumento principal de análise neste trabalho, o ADV. Neste capítulo, a metodologia desenvolvida para a análise dos dados de velocidade orbital é apresentada. Três passos de pós-processamento dos dados brutos foram utilizados para posterior utilização da Transformada de Hilbert-Huang: (i) eliminação de *spikes*; (ii) filtragem passa-baixa; e (iii) correção de inclinação dos instrumentos.

V.1. ELIMINAÇÃO DE SPIKES

Apesar da alta qualidade dos dados brutos, como evidenciado pela Figura 4.11, alguns *spikes* ainda poderiam estar presentes nas séries temporais de velocidades. Existem diversos métodos para retirar dados espúrios de registros de ADV que, em geral, se diferenciam pela forma de detecção das anomalias e posterior preenchimento das lacunas (GORING e NIKORA, 2002; ISLAM e ZHU, 2013; WAHL, 2003).

Neste trabalho, as séries temporais dos ADVs foram tratadas utilizando o método proposto por GORING e NIKORA (2002). A detecção dos *spikes* é feita a partir da limitação da velocidade medida (u_i) e das suas primeira (Δu_i) e segunda ($\Delta^2 u_i$) diferenças a um elipsoide (tridimensional). As características do elipsoide são definidas pelo desvio padrão de u_i , Δu_i e $\Delta^2 u_i$ e por um parâmetro chamado de Limite Universal (*Universal Threshold*), definido por DONOHO e JOHNSTONE (1994), que depende unicamente do tamanho da série. O Limite Universal corresponde ao valor máximo esperado para uma variável aleatória independente e normalmente distribuída. Todo e qualquer ponto que esteja fora desse elipsoide é considerado um dado espúrio e eliminado. O método é iterativo, uma vez que o desvio padrão da série é alterado após a exclusão de pontos externos ao elipsoide, e cessa quando o número de *spikes* torna-se zero. Os autores ressaltam que, apesar das violações estatísticas pressupostas – variáveis independentes e normalmente distribuídas, o método apresenta excelentes resultados para uma vasta quantidade de dados de velocidades medidos com ADV.

Para os dados do presente trabalho, o método de GORING e NIKORA (2002) identificou em torno de 3% a 4% dos valores medidos como sendo *spikes* nas séries temporais analisadas, confirmando a boa qualidade das medições. Os eventos espúrios eliminados foram interpolados por um spline cúbico. A Figura 5.1 exemplifica o resultado da aplicação do método à componente u da velocidade para o teste T4-B2.

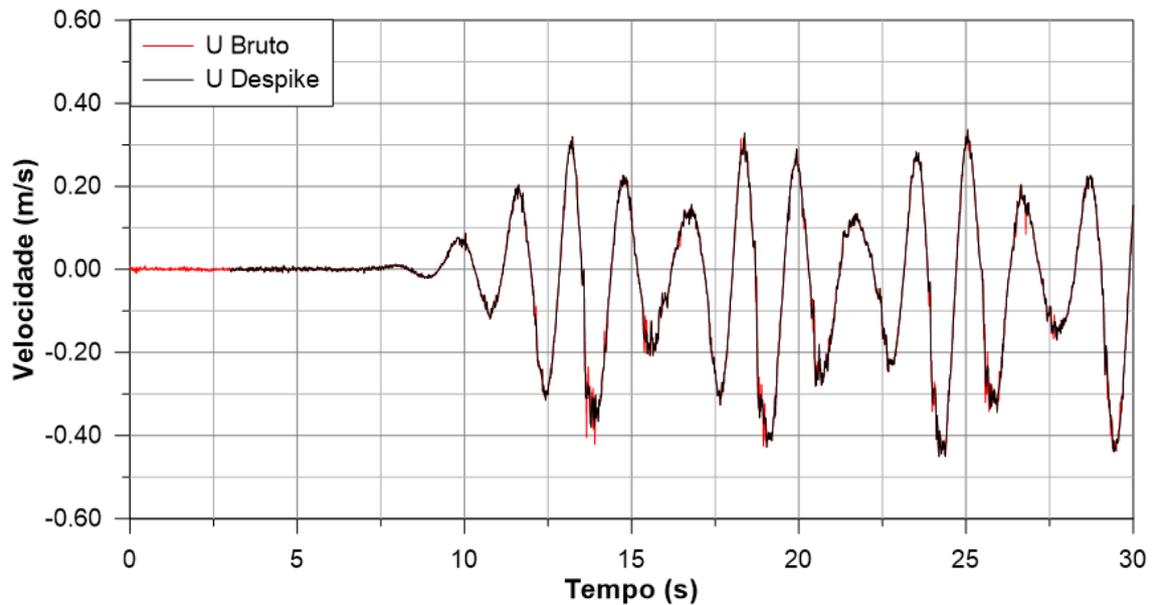


Figura 5.1. Exemplo do resultado da aplicação do método de GORING e NIKORA (2002) ao teste T4-B2.

V.2. FILTRO DE THOMPSON

Os ADVs são muito utilizados em estudos de turbulência devido à alta sensibilidade dos seus sensores. Na Figura 5.1 é evidente a presença da turbulência hidrodinâmica do escoamento, fenômeno que não deve ser caracterizado como *spike* pelos métodos de eliminação de dados espúrios. No entanto, para o presente estudo a turbulência não está dentro das escalas de interesse e deve, portanto, ser eliminada.

A eliminação desse fenômeno de alta frequência deve ser feita pela aplicação de um filtro passa-baixa. Filtros passa-baixa são filtros numéricos que têm por objetivo manter frequências menores que um determinado valor, f_0 , e eliminar frequências maiores que f_0 . Qualquer filtro numérico passa-baixa no domínio do tempo possui o mesmo princípio: faz-se a convolução de uma subamostra do sinal com uma série de pesos.

$$y_t = \sum_{k=-n}^n w_k x_{t+k} \quad (5.1)$$

onde x_t é a série temporal; w_k são os pesos a serem utilizados no processo de convolução; n é o número de pesos; e y_t é a série filtrada. A série de pesos é sujeita à condição de simetria ($w_{-k} = w_k$) e normalização:

$$\sum_{k=-n}^n w_k = 1 \quad (5.2)$$

O filtro ideal é aquele que, após o processo de convolução, elimina por completo as oscilações de frequências indesejadas e não altera as características das frequências de interesse. A Figura 5.2 ilustra a resposta em frequência do filtro ideal $H(f)$ para um filtro passa-baixa. A resposta em frequência do filtro para as frequências menores que f_0 é 1, e para as frequências maiores é 0. Matematicamente, o filtro ideal é definido como:

$$\begin{aligned} H(f) &= 1 & \text{para } f < f_0 \\ H(f) &= 0 & \text{para } f > f_0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

No entanto, essa descontinuidade da chamada função-resposta do filtro não é possível de ser atingida no domínio do tempo. Portanto, nas proximidades da frequência de corte f_0 há uma faixa de transição descrita por uma função-resposta ideal contínua $L(f)$, como também ilustrado pela Figura 5.2.

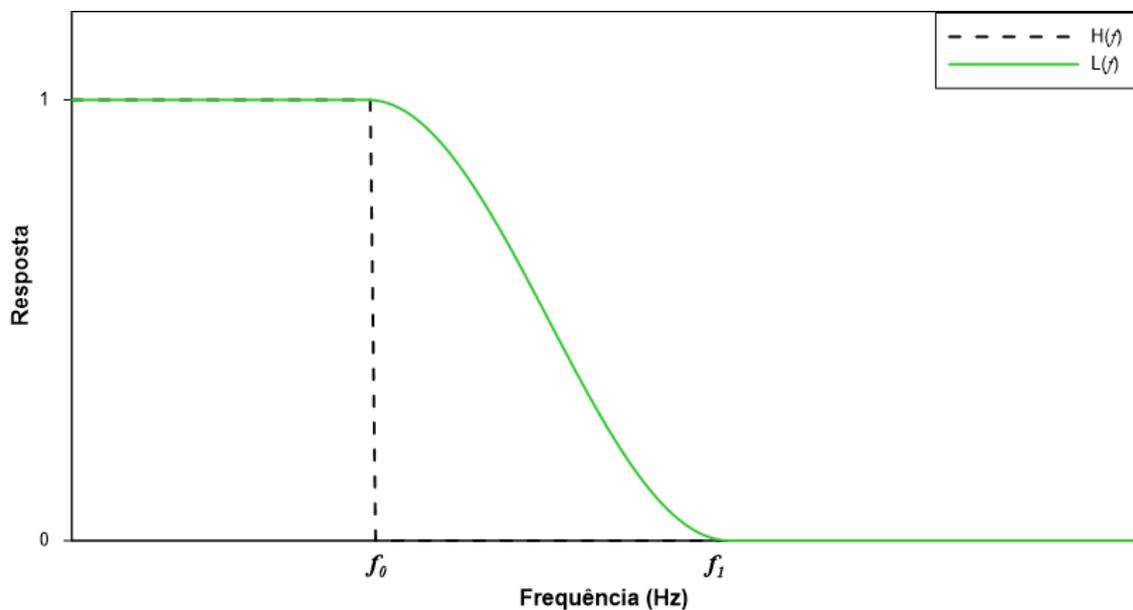


Figura 5.2. Função-resposta do filtro ideal e do filtro de função contínua $L(f)$.

THOMPSON (1983) definiu a função (5.4) como função-resposta ideal do filtro, onde os pesos devem ser escolhidos de forma a minimizar os desvios médios quadráticos entre a

curva de resposta numérica $R(f)$, correspondente aos pesos selecionados, e a função-resposta teórica $L(f)$, definida como:

$$L(f) = \begin{cases} 1 & \text{para } f < f_0 \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{\pi(f - f_0)}{f_0 - f_1} \right] & \text{para } f_0 < f < f_1 \\ 0 & \text{para } f > f_1 \end{cases} \quad (5.4)$$

SILVA (1992) descreve em detalhe a formulação matemática do Filtro de Thompson.

A Figura 5.3 ilustra o resultado após a aplicação do Filtro de Thompson para a componente u de velocidade do teste T4-B2. A comparação é feita com o resultado do passo anterior. A Figura 5.4 mostra o peso associado a cada frequência e a Figura 5.5 uma comparação da transformada de Fourier entre os dados sem *spikes* e filtrados. Para todos os testes, frequências até a 3ª ordem na teoria de Stokes foram mantidas.

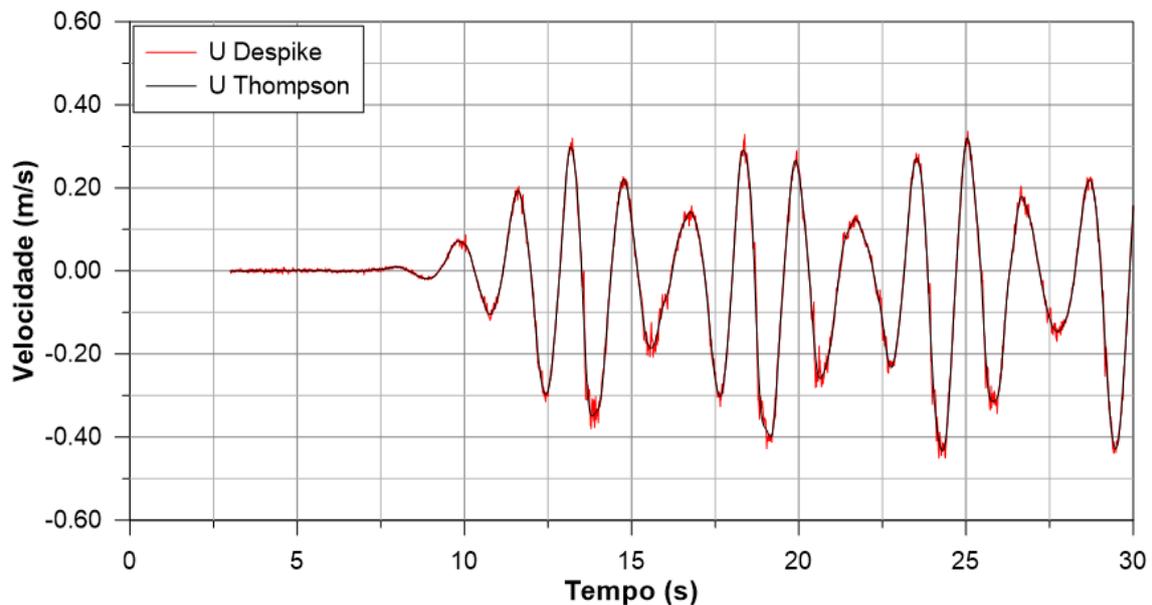


Figura 5.3. Exemplo do resultado da aplicação do Filtro de Thompson para o teste T4-B2.

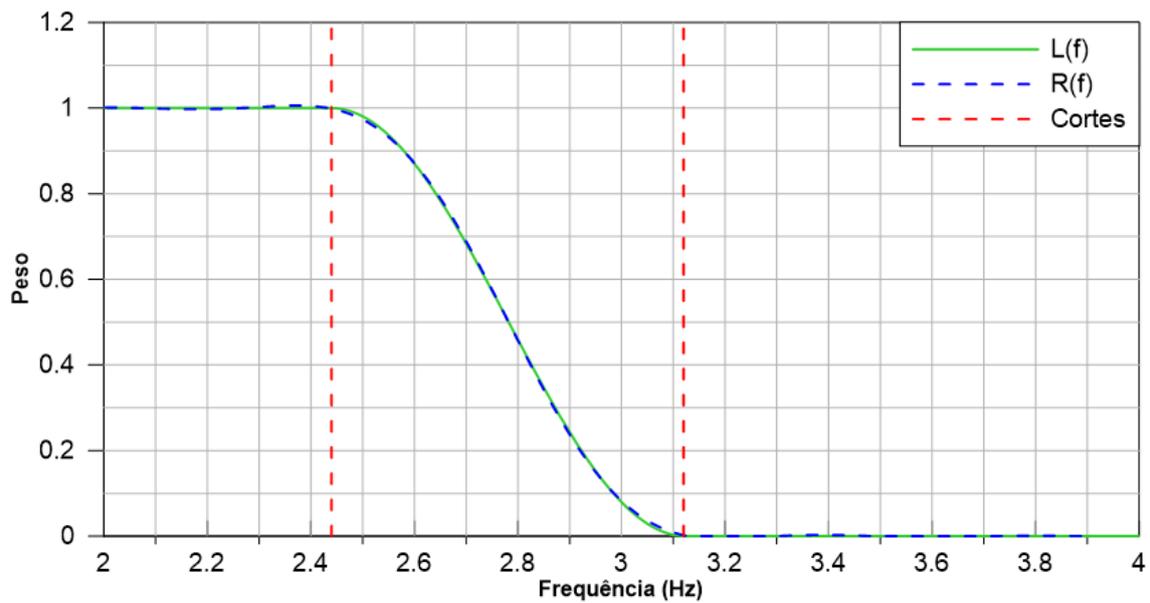


Figura 5.4. Curva de resposta obtida a partir da aplicação do Filtro de Thompson para o teste T4-B2. As linhas verticais indicam as frequências de cortes.

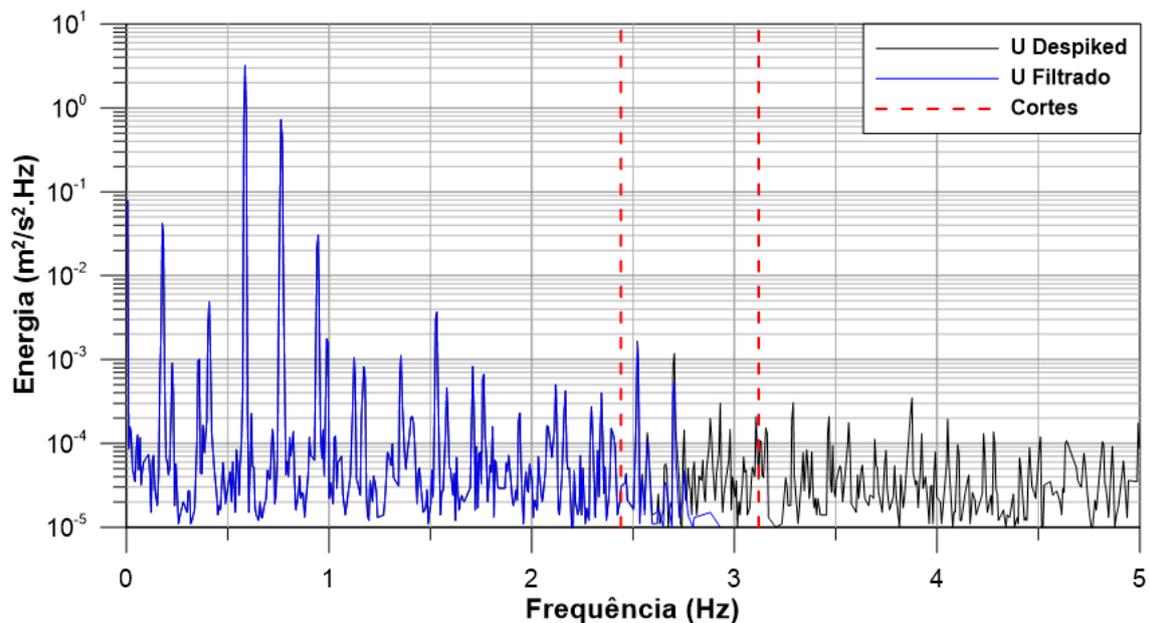


Figura 5.5. Comparação entre a transformada de Fourier do dado sem *spikes* e filtrado para o teste T4-B2. As linhas verticais indicam as frequências de cortes.

V.3. CORREÇÃO DA INCLINAÇÃO DOS ADVs

Na prática, é muito difícil colocar um instrumento na posição exata a que se pretende. Ao contrário dos instrumentos de campo, ADVs para uso em laboratório não possuem bússola para corrigir automaticamente a sua inclinação. No entanto, mesmo pequenos desalinhamentos das sondas distorcem a magnitude e a fase das velocidades medidas, pois cada “componente inclinada” influencia nas demais. A Figura 5.6 mostra um esboço

de um eixo teórico de um ADV inclinado e os erros resultantes nas medições de velocidade. O desalinhamento da sonda influencia não só a magnitude de cada componente de velocidade, mas também a sua fase.

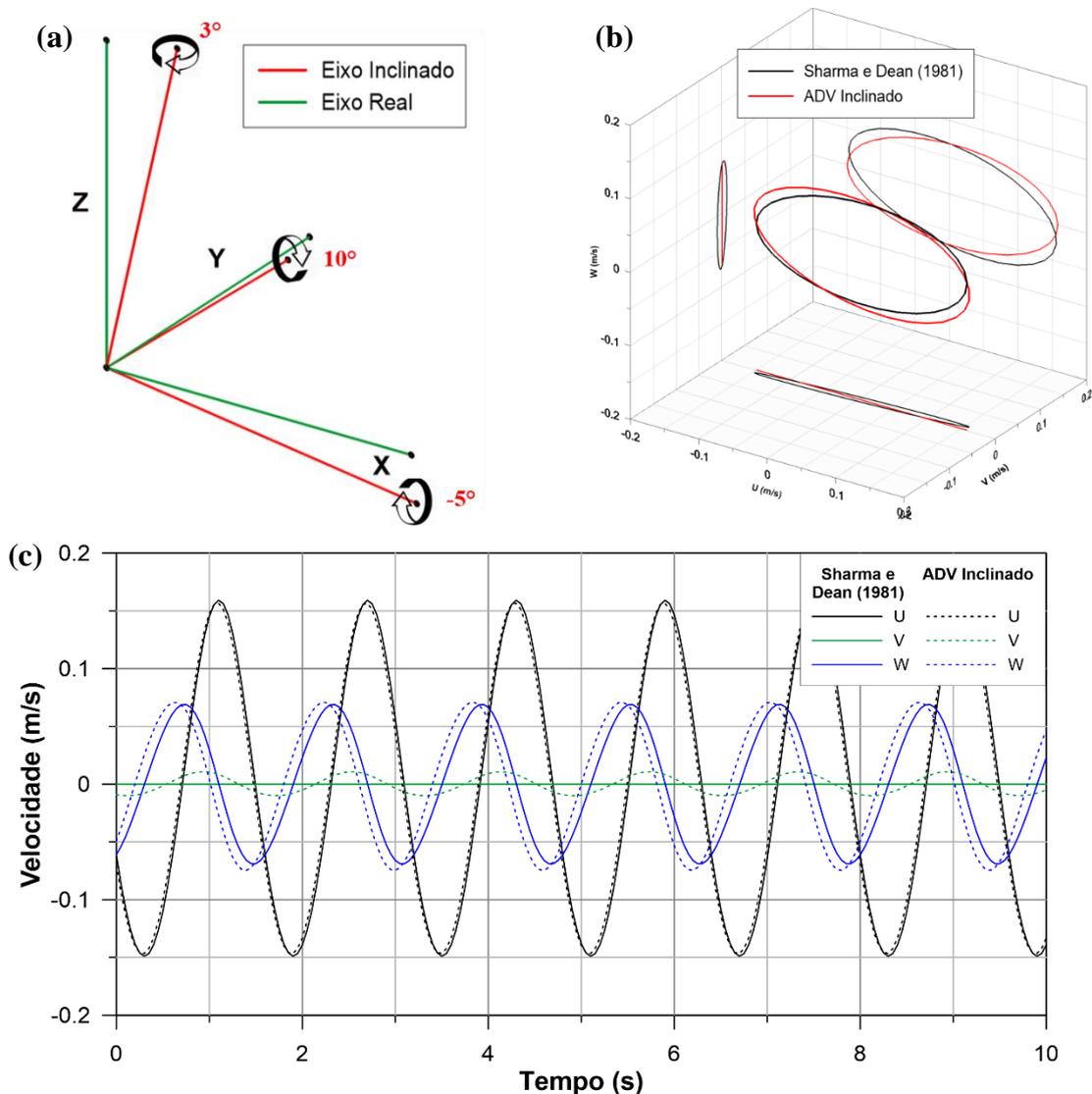


Figura 5.6. Exemplificação teórica de um sistema de coordenadas inclinado: (a) inclinação do sistema de coordenadas; (b) efeitos sobre a órbita de velocidades; (c) efeitos sobre as séries temporais de cada componente.

Neste sentido, a correção do sistema de coordenadas deve ser feita durante o pós-processamento. NEVES *et al.* (2012) desenvolveram um algoritmo matemático que corrige a inclinação do ADV através da matriz de correlação cruzada das três componentes de velocidade medidas. Os autovetores desta matriz indicam a inclinação de cada um dos eixos do ADV. O cálculo dos autovetores é feito com 3 ciclos estáveis de onda, durante um período sem efeitos de reflexão.

Testes com ondas monocromáticas-unidirecionais, realizados periodicamente durante o período experimental, foram utilizados para o cálculo da inclinação de cada ADV e para

definir as correções a serem aplicadas aos testes posteriores. A Figura 5.7 mostra as inclinações dos eixos calculadas para um dos ADVs, através de todos os casos monocromáticos-unidirecionais do dia 15/12/2017. É notável que o eixo muda durante o dia, o que foi um resultado inesperado. A Tabela 5.1 resume algumas estatísticas básicas calculadas para cada ADV, durante o mesmo dia de testes.

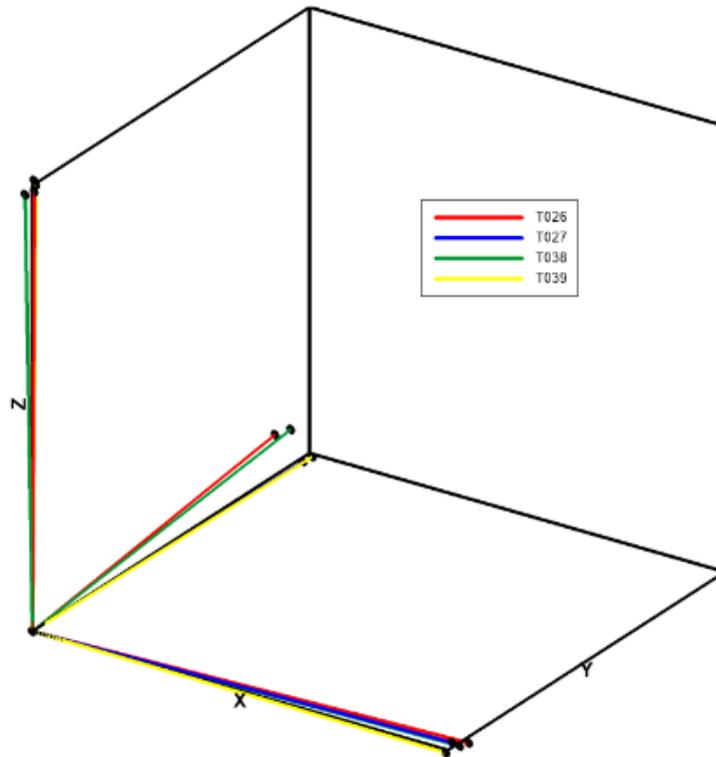


Figura 5.7. Inclinações dos eixos do ADV 2.2.1 calculadas durante um dia de testes (15/12/2017).

Tabela 5.1. Média (μ_D) e desvio padrão (σ_D) da inclinação angular de cada ADV durante o dia 15/12/2017.

Eixo	ADV									
	2.1		2.2		2.3		2.4		2.5	
	μ_D (°)	σ_D (°)	μ_D (°)	σ_D (°)	μ_D (°)	σ_D (°)	μ_D (°)	σ_D (°)	μ_D (°)	σ_D (°)
X	-2.1	2.5	9.3	6.0	3.9	6.9	-2.8	7.7	-12.1	9.4
Y	-1.5	2.6	-1.6	3.4	-2.9	2.8	-3.7	2.9	-0.4	3.2
Z	-0.6	1.3	2.5	4.0	-0.9	0.7	1.7	0.8	-1.0	2.4

Duas razões podem explicar esta mudança de inclinação angular: (i) os ADVs não foram bem fixados e, portanto, mudaram suas posições devido às forças das ondas; (ii) as barras suspensas onde os ADVs foram fixados estavam vibrando por causa da ação das ondas. O último é o mais provável, porque não havia nenhum sinal do movimento do ADVs depois que a bacia foi esvaziada. Entretanto, antes dos testes, observou-se que as barras poderiam vibrar mesmo com pequenas forças atuantes. No entanto, nenhuma solução

prática foi encontrada, sendo o problema aceito como uma incerteza da modelagem física. Mesmo assim, a correção através do método proposto por NEVES *et al.* (2012) foi aplicada a todos os dados.

Alguns casos mostram uma ligeira melhora após esta correção. A Figura 5.8 mostra uma hodógrafa de velocidade do ADV 2.2.5 antes e depois do processo de rotação matemática dos dados. A mudança é mais perceptível através da projeção no plano y-z (v-w), onde se obteve uma pequena correção de eixo. No plano x-y (u-v) é possível também notar uma maior aderência dos dados rotacionados ao modelo analítico.

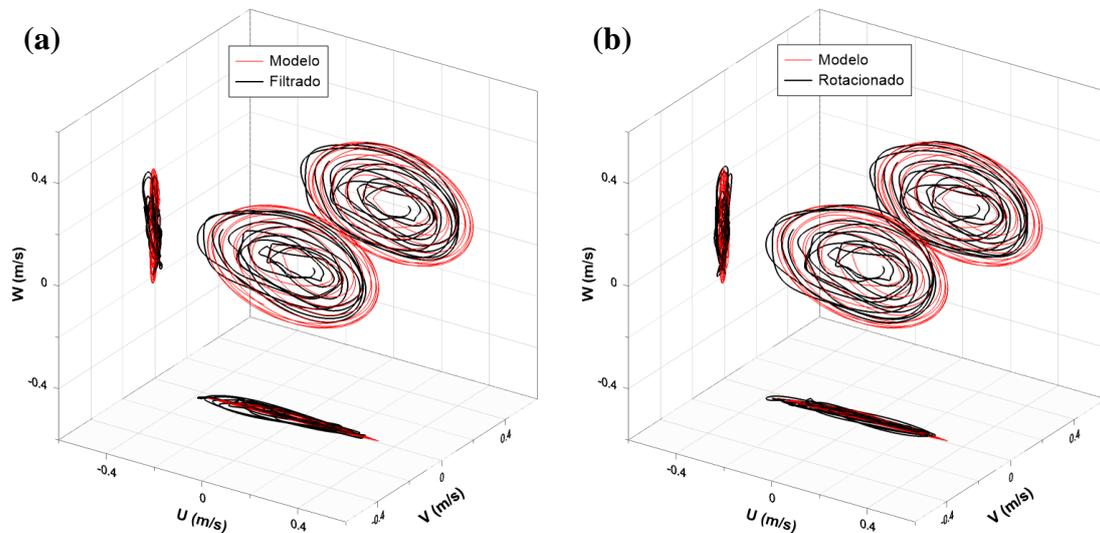


Figura 5.8. Exemplo de rotação do eixo de coordenadas do ADV 2.2.5 para o teste T4-B2: (a) hodógrafa tratada apenas até a etapa do Filtro de Thompson; e (b) hodógrafa filtrada já rotacionada.

V.4. HHT

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) é um método adaptativo desenvolvido por HUANG *et al.* (1998) especificamente para lidar com fenômenos não-estacionários e não-lineares. O termo adaptativo se refere ao fato da função base utilizada para a descrição do fenômeno não ser definida *a priori*, o que resultaria na imposição da representação do fenômeno às características fixas de uma função matemática, independentemente do quão sofisticada esta possa ser.

O método da HHT se resume a dois passos: (i) decomposição do fenômeno através de modos oscilatórios empíricos (EMD – *empirical mode decomposition*), resultando nas funções intrínsecas ao sistema (IMF – *intrinsic mode functions*); e (ii) aplicação da transformada de Hilbert às IMFs. A vantagem da HHT está justamente na junção dessas duas ferramentas. Enquanto a EMD permite a descoberta de oscilações de forma

empírica, sem pré-definir uma função matemática teórica ao fenômeno, a transformada de Hilbert transforma uma função $x(t)$ em outra função $y(t)$, ou seja, sem alterar o domínio da função original.

A seguir, esses passos serão descritos de forma mais detalhada, além de se apresentar algumas evoluções da EMD.

V.4.1. EMD: Empirical Mode Decomposition

A EMD parte do princípio de que todo e qualquer dado oscilatório é composto por um número finito de IMFs com frequências significativamente distintas entre si. Para que uma componente oscilatória seja definida como IMF, deve atender a dois princípios básicos:

- Em toda a extensão da série analisada, o número de extremos (máximos ou mínimos) e o número de cruzamentos no valor zero devem ser iguais ou diferir de no máximo 1;
- Em qualquer ponto da série, o valor médio da envoltória definida a partir dos extremos (máximos e mínimos) deve ser igual a zero.

A partir dessa definição, qualquer série temporal $x(t)$ pode ser decomposta em um número finito de IMFs a partir de um processo de peneiramento iterativo definido por:

$$h_{nk}(t) = h_{n(k-1)}(t) - m_{nk}(t), \quad n, k \geq 1 \quad (5.5)$$

onde n é o número (ou ordem) da IMF; k é o contador do processo iterativo; m é a média da envoltória e $h_{10}(t) = x(t)$. Quando h_{nk} atende à definição da IMF, diz-se que $c_n = h_{nk}$ é a n ésima IMF. c_n é então subtraída da série iterativa inicial, h_{n0} , e o processo se repete com o restante, $h_{(n+1)k} = h_{n0} - c_n$, até que haja um resíduo que seja uma função monotônica ou uma função que tenha apenas 1 extremo de onde não seja mais possível extrair uma IMF. Nesse instante, o resultado da EMD é um conjunto finito de IMFs, mais um resíduo¹¹.

No processo de peneiramento, três critérios são críticos:

¹¹ Um maior detalhamento do processo da EMD pode ser vista na seção 2.2 de HUANG e WU (2008).

- Função de interpolação que define a envoltória: em geral, a função mais utilizada é o spline cúbico (HUANG e WU, 2008), embora outros métodos, como o B-spline também têm sido propostos (CHEN *et al.*, 2006);
- Condição de contorno para o spline cúbico: o processo de interpolação utilizando o spline cúbico demanda pontos adicionais (extrapolações) nas fronteiras da série. DÄTIG e SCHLURMANN (2004) fizeram uma detalhada análise da influência do tipo de condição de contorno e definiram o spline cúbico ‘natural’, onde a segunda derivada da curva é zero, como sendo a mais apropriada para os seus estudos. No entanto, outras condições de contorno também são utilizadas na literatura (LUUKKO *et al.*, 2016; WU e HUANG, 2009);
- Critério de interrupção da iteração: o mais utilizado é o critério de parada S (*S stoppage*), proposto por HUANG *et al.* (2003), que impõe que o número de extremos e de cruzamentos de zero difiram de no máximo 1; e que assim permaneçam por um número ‘S’ de vezes;

O presente trabalho não tem por objetivo analisar em detalhes tais procedimentos. Uma extensa literatura está disponível em CHEN *et al.* (2006), DÄTIG e SCHLURMANN (2004), HUANG *et al.* (2003), HUANG e WU (2008), LUUKKO *et al.* (2016) e WU e HUANG (2009).

A Figura 5.9 ilustra as primeiras envoltórias do processo iterativo, assim como sua média, aplicada à componente de velocidade u do teste T4-B2, após as etapas de (i) eliminação de *spikes*; (ii) filtragem; e (iii) correção da inclinação dos ADVs. A Figura 5.10 exemplifica o resultado final da EMD, de onde foram extraídas 14 IMFs. Na figura, apenas as 5 primeiras IMFs estão apresentadas.

A IMF representa uma componente oscilatória pertencente a um fenômeno, assim como um harmônico determinado pela transformada de Fourier. No entanto, enquanto esta possui amplitude e frequência constantes, a IMF pode ter amplitude e frequência variáveis sendo, portanto, uma componente mais geral e poderosa do que os harmônicos de Fourier.

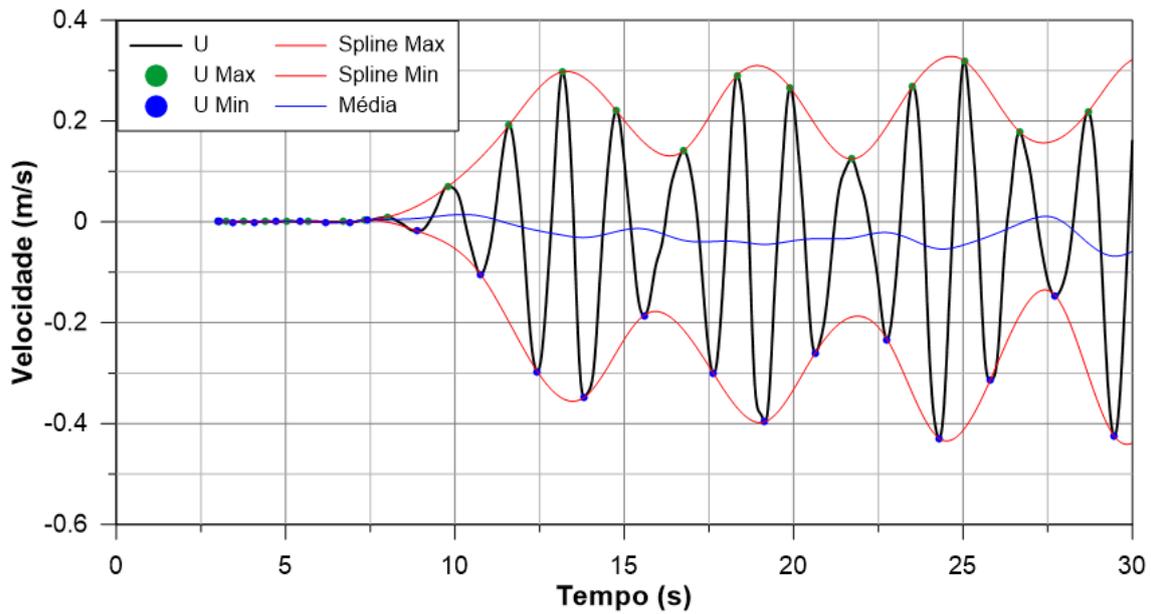


Figura 5.9. Envoltória do teste T4-B2 definida por um spline cúbico e a média da envoltória.

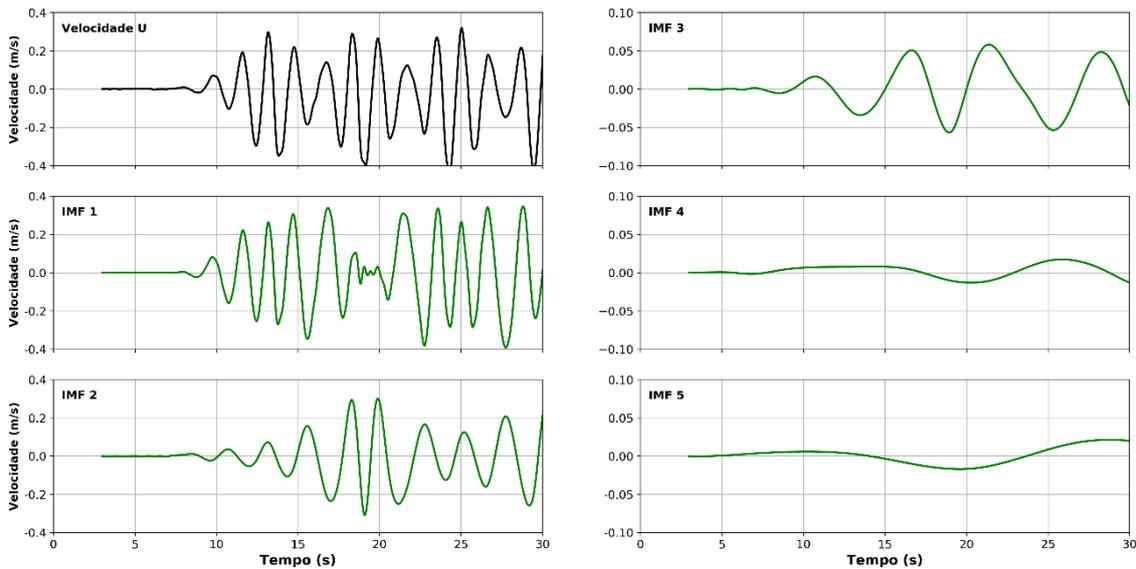


Figura 5.10. Cinco primeiras IMFs resultantes do processo de EMD aplicado à componente de velocidade u do teste T4-B2.

V.4.2. EEMD: Ensemble Empirical Mode Decomposition

Uma das principais desvantagens da EMD consiste no problema de mistura de modos oscilatórios (*mode mixing problem*), que é definido como uma única IMF contendo ondas com escalas de frequência bastante distintas, ou um sinal de escala de frequência semelhante residindo em mais de uma IMF. Nesses casos, a interpretação dos resultados torna-se prejudicada. Na Figura 5.10 é notória a mistura na IMF1, próxima a $t = 20$ s.

Na tentativa de superar essa dificuldade, algumas modificações à EMD foram propostas (TANAKA e MANDIC, 2007; TORRES *et al.*, 2011; WU e HUANG, 2009). Dentre elas, a decomposição conjunta de modos oscilatórios empíricos (EEMD – *Ensemble EMD*) merece destaque, devido à sua posterior evolução, tratada na próxima seção.

A EEMD consiste em um algoritmo semelhante à EMD, mas com a adição de ruído branco, de distribuição Gaussiana, à série original e posterior decomposição da série (original + ruído branco) em IMFs. Esse procedimento é repetido inúmeras vezes, sendo que a cada repetição faz-se uma nova realização aleatória de ruído branco. Após todas as repetições, tira-se a média do conjunto de IMFs obtidas a cada repetição (WU e HUANG, 2009).

A ideia central da EEMD é a de que o ruído branco adicione todas as escalas de frequência de forma uniforme ao longo da série temporal original. Assim, durante o processo de peneiramento as frequências de mesmas escalas se agrupam nas mesmas IMFs. A adição do ruído branco gera, necessariamente, IMFs muito ruidosas. No entanto, se um número suficiente de repetições for feito com um processo aleatório de realizações de ruído branco, espera-se que o cálculo da média entre as IMFs cancele os efeitos indesejáveis da adição do ruído branco.

Segundo WU e HUANG (2009), a magnitude ótima do ruído adicionado é de 20% do desvio padrão da série analisada. COLOMINAS *et al.* (2012) mostraram que esse critério era um bom valor padrão para a maioria dos casos considerados no seu estudo.

As propriedades de filtragem da EEMD não serão discutidas em detalhes nesta seção. Uma extensa quantidade de publicações sobre o assunto existe na literatura (COLOMINAS *et al.*, 2012; FLANDRIN *et al.*, 2004; LUUKKO *et al.*, 2016; RILLING *et al.*, 2003; TORRES *et al.*, 2011; WU e HUANG, 2009).

V.4.3. NA-MEMD: Noise Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition

A EMD e a EEMD são métodos essencialmente unidimensionais, ideais para lidar com variáveis escalares, como uma série temporal de altura de ondas. No entanto, diversos fenômenos na Natureza são multidimensionais. A velocidade orbital de uma onda, por exemplo, é uma grandeza vetorial tridimensional. A aplicação separada da (E)EMD a cada componente da velocidade dificilmente produziria resultados satisfatórios, uma vez

que a natureza empírica desse método ignoraria qualquer interdependência entre as três componentes da velocidade (AHMED *et al.*, 2012).

Com o objetivo de analisar dados vetoriais bidimensionais, RILLING *et al.* (2007) desenvolveram a decomposição bivariada de modos oscilatórios empíricos (BEMD – *bivariate EMD*). Posteriormente, métodos parecidos, capazes de trabalhar com séries vetoriais tridimensionais (TEMD – *trivariate EMD*) e multidimensionais (MEMD – *multivariate EMD*), foram desenvolvidos por REHMAN e MANDIC (2010) e REHMAN e MANDIC (2009), respectivamente.

A MEMD é um algoritmo capaz de extrair componentes rotacionais de dados multidimensionais ou multivariados (múltiplos canais), se existentes nos dados de entrada. A ideia central da MEMD é projetar o dado de entrada multidimensional em ‘n’ dimensões e, em cada dimensão, calcular a envoltória das séries projetadas. Em seguida, tira-se a média das n envoltórias para posterior subtração do dado original, assim como na EMD. O algoritmo proposto por REHMAN e MANDIC (2009) é reproduzido na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Algoritmo da MEMD como proposto por REHMAN e MANDIC (2009).

Algoritmo da MEMD

1. Achar um conjunto de pontos amostrais em uma esfera-(n-1) usando a sequência de Hammersley;
2. Calcular a projeção, denotada por $p_{\theta_v}(t)$, do sinal de entrada $\vec{s}(t)$ ao longo do vetor de direção \vec{x}_{θ_v} , para todo v (todo o conjunto de vetores de direção), dado $\{p_{\theta_v}(t)\}_{v=1}^V$ como o conjunto de projeções;
3. Achar os instantes de tempo $\{t_{\theta_v}^i\}_{v=1}^V$ correspondentes aos máximos do conjunto de projeções $\{p_{\theta_v}(t)\}_{v=1}^V$;
4. Interpolar $[t_{\theta_v}^i, \vec{s}(t_{\theta_v}^i)]$ para obter curvas de envoltória multivariadas $\{\vec{c}_{\theta_v}(t)\}_{v=1}^V$;
5. Para um conjunto V de vetores de direção, a média $\vec{m}(t)$ das curvas de envoltória é calculada como:

$$\vec{m}(t) = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V \vec{c}_{\theta_v}(t) \quad (5.6)$$

6. Extrair $\vec{d}(t)$ usando $\vec{d}(t) = \vec{s}(t) - \vec{m}(t)$. Se $\vec{d}(t)$ atender às condições de parada para uma IMF multivariada, aplicar os passos anteriores a $\vec{s}(t) - \vec{d}(t)$, caso contrário, aplicar a $\vec{d}(t)$.
-

Os 'n' vetores de projeção são calculados pela sequência de Hammersley baseada em quasi-Monte Carlo (NIEDERREITER, 1992) para que haja uma distribuição mais uniforme de projeções sobre a esfera-(n-1), vide a Figura 5.11.

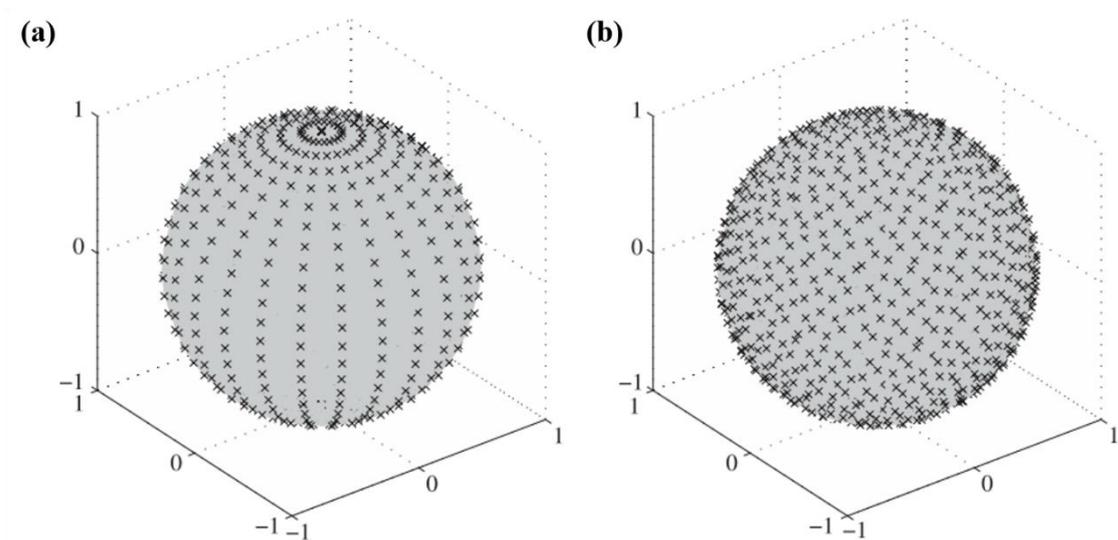


Figura 5.11. Direções de vetores para as projeções de sinais tridimensionais em uma esfera 2, geradas usando (a) sistema de coordenadas esféricas e (b) a sequência de Hammersley com baixa discrepância (adaptado de REHMAN e MANDIC, 2009).

A MEMD possui uma característica muito oportuna para a análise de dados multidimensionais, em que haja a dependência entre as dimensões, como no vetor de velocidade orbital. O algoritmo produz um efeito de alinhamento de modo (*mode-alignment*) dos resultados, de forma que haja o mesmo número de IMFs para todas as dimensões e que IMFs correspondentes (mesma escala de frequência) de cada dimensão tenham o mesmo índice. Essa propriedade facilita a interpretação física dos resultados, uma vez que fenômenos de mesma escala ficarão alinhados nas diversas dimensões.

A Figura 5.12 apresenta o exemplo de REHMAN e MANDIC (2009) onde uma variável sintética de 6 dimensões (colunas) é decomposta empiricamente em 4 IMFs (linhas) pela MEMD. O alinhamento de modo entre as IMFs é nítido.

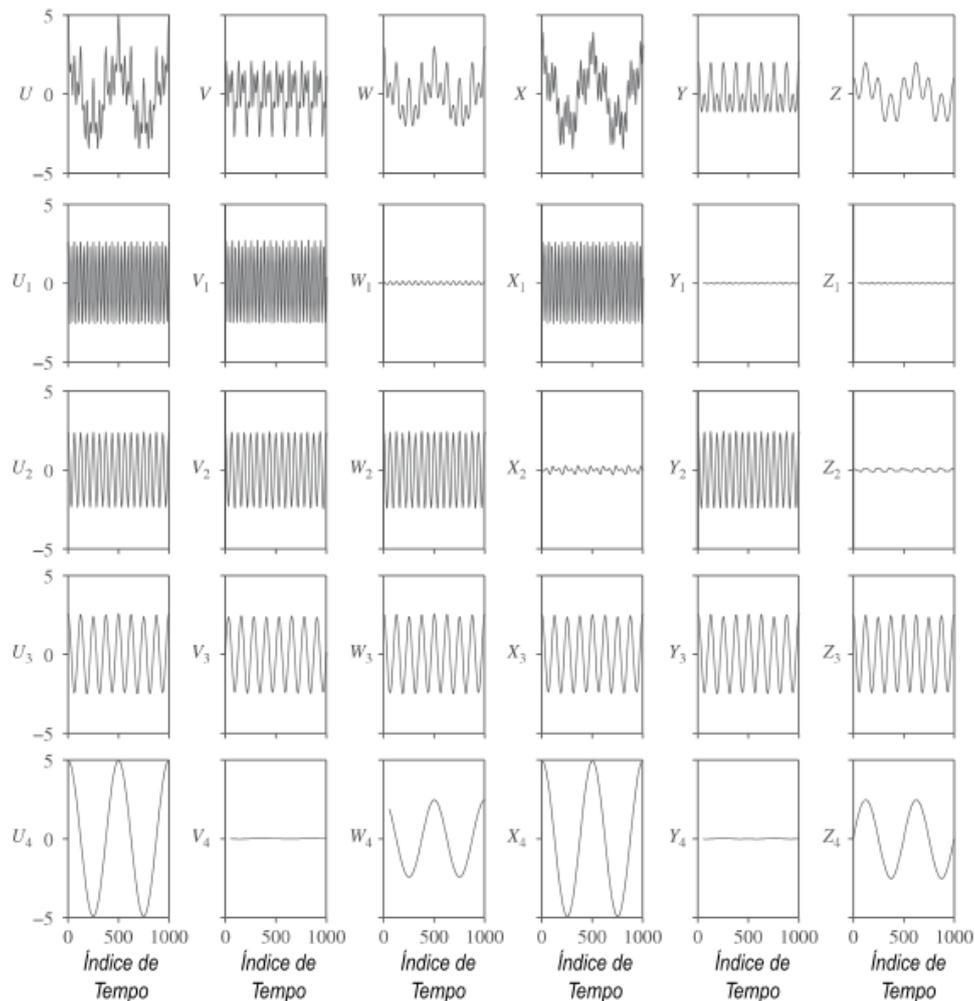


Figura 5.12. Exemplo de alinhamento de modo gerado pela MEMD aplicado a uma série temporal sintética de 6 dimensões: U, V, W, X, Y, Z (adaptado de REHMAN e MANDIC, 2009).

O algoritmo utilizado neste trabalho para a decomposição das séries de velocidade medidas pelos ADVs é o NA-MEMD (*Noise-Assisted MEMD*). Proposto por REHMAN *et al.* (2013), o método é idêntico à MEMD, porém adiciona dimensões matemáticas de ruído aos dados de entrada. Diferente da EEMD, as séries de ruído branco não são adicionadas diretamente aos dados, o que causa, necessariamente, modificações indesejáveis. Com a NA-MEMD, a adição do ruído possui a mesma finalidade de auxiliar a separação do dado em IMFs, mas sem alterar os dados em si. As IMFs geradas nas dimensões de ruído são simplesmente descartadas.

A capacidade da NA-MEMD de analisar ‘n’ dimensões simultaneamente, com a possibilidade de adição de ruído branco para o auxílio da separação das IMFs, inspirou a análise simultânea dos dados dos 5 ADVs, como um único arranjo. Será que a análise conjunta do arranjo de ADV produziria IMFs mais coerentes do que a análise individual? Cada um dos ADVs dentro da bacia mede o mesmo fenômeno de interesse, a onda de

interação subtrativa de 2ª ordem (equivalente à onda de infragravidade). No entanto, devido ao posicionamento distinto, cada ADV mede a onda em uma fase diferente. Pode-se imaginar que cada ADV seja uma dimensão paralela do mesmo fenômeno. Como a MEMD tende a separar IMFs com alinhamento de modo, espera-se que os resultados da análise do arranjo sejam melhores do que a análise de cada ADV separadamente.

Até onde se sabe, a ideia de analisar o arranjo de ADVs é uma metodologia inovadora no campo de medição de ondas, baseada no mesmo princípio de análise de um arranjo de sensores de elevação da superfície livre.

Um código MATLAB do algoritmo MEMD está publicamente disponível em:

- <http://www.commsp.ee.ic.ac.uk/~Mandic/Research/EMD.htm>;

Para fins de otimização, durante esta pesquisa o algoritmo foi traduzido para Python e está publicamente disponível em:

- <https://github.com/mariogrune/MEMD-Python->

V.4.4. Parâmetros utilizados na NA-MEMD

O código da MEMD desenvolvido por REHMAN e MANDIC (2009) assume como argumentos (i) o número de vetores na esfera ($n-1$) para projeção do sinal; e (ii) o tipo de critério de parada na determinação de uma IMF.

Segundo os autores, o número de vetores de projeção deve ser no mínimo o dobro do número de dimensões do sinal. Por exemplo, para a análise de um vetor tridimensional de velocidades, o número mínimo de vetores de projeção deve ser seis. No entanto, notas do código da MEMD afirmam que para que IMFs com sentido físico sejam extraídas, o número de vetores de projeção deve ser significativamente superior ao número de projeções. O código assume como padrão o valor de 64 projeções.

A análise conjunta do arranjo de ADVs determina que o sinal analisado possui 15 dimensões: três para cada instrumento. Portanto, o número mínimo de dimensões é 30. No entanto, os autores não definem o que é um “número significativamente superior” de dimensões. Dado que quanto maior o número de dimensões, maior o esforço computacional para o peneiramento das IMFs, aceitou-se que o valor padrão de 64 projeções fosse adequado para o problema em questão.

Em relação ao critério de parada durante a definição de uma IMF, o passo ‘6’ do algoritmo da MEMD possui a seguinte dificuldade computacional: quão pequena deve ser a média de uma série para que atenda ao critério de média zero da definição teórica da IMF? Caso o limite seja muito pequeno, é comum que o algoritmo da MEMD faça um sobre-empeneiramento (*over-iteration* ou *over-decomposition*), gerando IMFs sem sentido físico.

O código produzido por REHMAN e MANDIC (2009) permite duas opções para o critério de interrupção: (i) o critério S, definido por HUANG *et al.* (2003) e já discutido na seção V.4.1; e (ii) o critério proposto por RILLING *et al.* (2003) que define uma amplitude do modo em análise como sendo $a(t) = (e_{\max}(t) - e_{\min}(t))/2$ e uma função de avaliação $\sigma(t) = |m(t) / a(t)|$, onde e_{\max} e e_{\min} são as envoltórias de máximo e mínimo, e $m(t)$ é a média das envoltórias. A iteração cessa quando $\sigma(t) < \theta_1$ ao longo de uma parcela $(1 - \alpha)$ do tempo total da série, e o restante atenda à condição $\sigma(t) < \theta_2$. Segundo os autores, em geral $\alpha \approx 0,05$, $\theta_1 \approx 0,05$ e $\theta_2 \approx 10\theta_1$. O critério definido por RILLING *et al.* (2003) é tomado como padrão pelo código da MEMD e foi o utilizado neste trabalho com os valores padrões, $\alpha = 0,075$, $\theta_1 = 0,075$ e $\theta_2 = 0,75$, definidos por REHMAN e MANDIC (2009).

Uma vez que a NA-MEMD permite a adição de múltiplas dimensões de ruído, a pergunta natural é: quantas dimensões de ruído devem ser adicionadas e qual deve ser a magnitude de cada dimensão? No presente trabalho, alguns testes foram feitos adicionando-se uma ou três dimensões de ruído. A magnitude para cada caso foi:

- (i) Adição de uma dimensão: baseando-se nos estudos de WU e HUANG (2009) e COLOMINAS *et al.* (2012) a magnitude do ruído branco foi de 20% do desvio padrão do módulo da velocidade;
- (ii) Adição de três dimensões: como a velocidade é uma variável tridimensional, ao invés de se pensar em uma única série temporal de ruído, pode-se imaginar a adição de um orbital 3D de ruído. Neste caso, cada dimensão do ruído adicionado corresponde a 20% da média dos desvios padrões de cada uma das componentes da velocidade.

Após sucessivos testes, observou-se que a análise do arranjo de ADVs com a adição de um ruído tridimensional se manteve mais consistente na produção de melhores resultados. A Figura 5.13 exemplifica a órbita tridimensional de ruído adicionado durante o teste T4-B2. Neste caso os desvios padrões médios das velocidades u , v e w eram de 0,144 m/s;

0,038 m/s; e 0,09 m/s, respectivamente. Sendo assim, o ruído adicionado possui distribuição normal, média zero para todas as três dimensões, e desvio padrão de 0,0288 m/s; 0,008 m/s; 0,018 m/s, respectivamente.

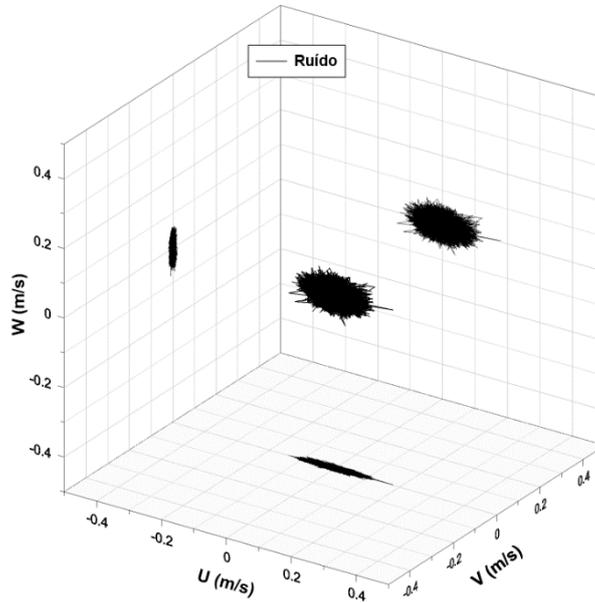


Figura 5.13. Orbita tridimensional de ruído branco adicionado ao processo da NA-MEMD na análise do teste T4-B2.

V.4.5. Transformada de Hilbert

A transformada de Hilbert é válida para todas as funções da classe L^p e é definida pela equação (5.7), onde $y(t)$ corresponde à transformada de Hilbert de uma série temporal $x(t)$ e $P\int$ designa o valor principal de Cauchy da integral singular. Essencialmente, a transformada de Hilbert é a convolução da função $x(t)$ com $1/t$, de forma a enfatizar as propriedades locais de $x(t)$ (HUANG e SHEN, 2014).

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5.7)$$

A partir da transformada de Hilbert, $y(t)$, e da função original, $x(t)$, obtêm-se as expressões analíticas:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t) e^{i\varphi(t)} \quad (5.8)$$

$$a(t) = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad e \quad \varphi(t) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (5.9)$$

onde $i = \sqrt{-1}$, $a(t)$ é a amplitude instantânea, θ é fase, e a frequência instantânea é:

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} \quad (5.10)$$

Portanto, a partir da HHT obtêm-se valores de amplitude e frequência instantâneas para cada IMF, um resultado bem diferente da transformada de Fourier, em que as amplitudes e frequências de cada componente oscilatória são fixas. As equações (5.11) e (5.12) representam a forma de se obter a função original a partir dos valores obtidos após a aplicação das transformadas de Hilbert e Fourier, respectivamente. Fica evidente que a IMF representa uma generalização da expansão de Fourier.

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp \left[i \int \omega_j(t) dt \right] \right\} \quad (5.11)$$

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_{j=1}^n a_j \exp \left[i \omega_j t \right] \right\} \quad (5.12)$$

A capacidade da HHT em reproduzir sistemas não-estacionários fica evidente a partir da apresentação da EMD e suas evoluções. Não tão claro é a afirmação de HUANG *et al.* (1998) sobre a capacidade do método em possibilitar a análise de sistemas não-lineares, uma vez que a própria equação (5.11) diz que o fenômeno é decomposto em uma simples soma linear de IMFs.

A teoria de onda de Stokes se baseia no método de perturbação para representar fenômenos não-lineares que são manifestados com a propagação de ondas esbeltas. Stokes diz que a não-linearidade da onda pode ser representada pela adição de harmônicos da componente principal do fenômeno, em que cada ordem deve ser menor do que a anterior. Tais harmônicos são resultado dos princípios fundamentais da análise de Fourier: que todo fenômeno pode ser representado pelo somatório (linear) de harmônicos (senos e cossenos).

No entanto, o método de perturbação, e portanto a teoria de Stokes, só é válido para ondas de pequenas amplitudes (a), onde $ka \ll 1$, sendo k o número de onda (DEAN e DALRYMPLE, 1991). No entanto, se $ka \approx 1$, o sistema passa a ser altamente não-linear e novos fenômenos como bifurcação (*bifurcations*) e caos se desenvolvem, tornando o método de perturbação inapropriado para o problema (HUANG e SHEN, 2014).

A maneira como a análise de Fourier descreve a não linearidade é através de “distorções harmônicas”. Apesar de matematicamente eficientes em traduzir o problema, tais distorções não apresentam qualquer significado físico. Segundo HUANG e SHEN (2014), a forma correta de se representar as modificações sofridas pelas ondas é através de mudanças de frequência, a qual apenas a HHT é capaz de resolver até o presente momento.

No entanto, ainda que muitos avanços tenham sido feitos desde a proposição dessa nova metodologia, a HHT ainda possui alguns desafios matemáticos para consolidá-la como uma ferramenta confiável, como: (i) critério de parada para o processo de peneiramento (HUANG e WU, 2008); (ii) método de interpolação para a determinação da envoltória (CHEN *et al.*, 2006); (iii) condições de contorno para a definição das envoltórias (DÄTIG e SCHLURMANN, 2004); (iv) problema de mistura de modo (HUANG *et al.*, 2013); dentre outros (HUANG e SHEN, 2014).

Em todo caso, HUANG e SHEN (2014) ressaltam que a análise de Fourier foi inventada em 1807, porém só foi comprovada matematicamente em 1933, com o trabalho de PLANCHEREL (1933). Portanto, em face da história, a HHT é consideravelmente recente e ainda demandará um grande esforço da comunidade científica para sua consolidação como um método sólido de análise de fenômenos da Natureza.

V.5. AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DOS RESULTADOS

Antes da apresentação dos resultados a ser feita no próximo capítulo, é importante estabelecer um método de avaliação da qualidade dos resultados. O objetivo principal do trabalho consiste em extrair as características da onda de interferência subtrativa de 2ª ordem gerada pelas interações não-lineares das ondas Bi-Bis. Dentre as IMFs peneiradas pela NA-MEMD, espera-se que alguma represente o período, a amplitude e a direção da onda subtrativa. As características teóricas dessa onda são dadas pelas equações analíticas de SHARMA e DEAN (1981).

Para comparar os dados teóricos e medidos, fez-se uso da análise visual (qualitativa) e de dois métodos quantitativos de medição da semelhança entre séries temporais: raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*) e deformação dinâmica do tempo (DTW – *Dynamic Time Warping*)

V.5.1. Análise qualitativa

Uma dificuldade adicional dos estudos de velocidades, em relação à análise da elevação da superfície livre, é a tridimensionalidade do vetor velocidade, onde as componentes são dependentes entre si. Visualmente, a análise das órbitas de velocidade é mais propícia do que a avaliação independente de cada uma das séries temporais, entre seus valores teóricos e medidos. A hodógrafa deixa clara a dependência entre as componentes, dando uma visão unificada do fenômeno. Qualquer pequena diferença de fase em uma das componentes horizontais de velocidade, por exemplo, ocasionará a mudança da percepção da direção da onda. Assim, a hodógrafa é uma ferramenta essencial para a avaliação visual das velocidades de uma onda.

A Figura 5.14 exemplifica a forma de representação por série temporal e por hodógrafa de um teste com onda monocromática-unidirecional. As séries medidas e tratadas são comparadas às velocidades calculadas pelas equações de SHARMA e DEAN (1981).

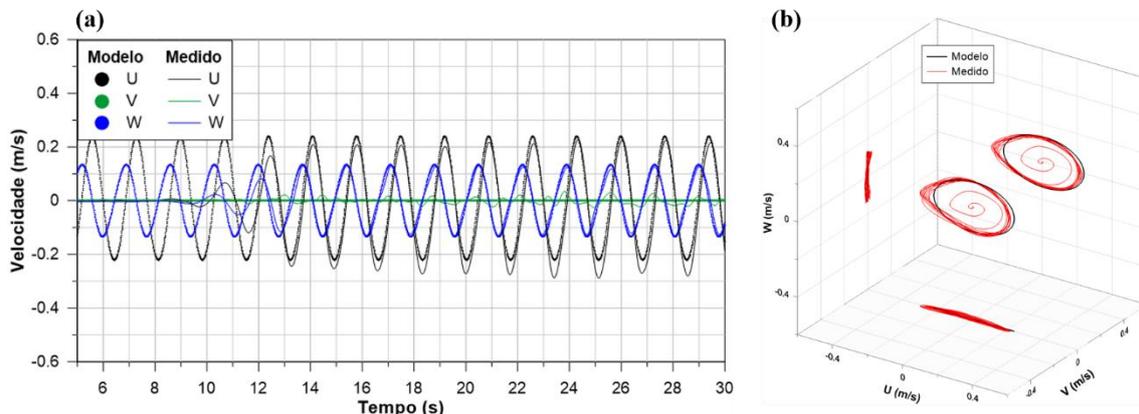


Figura 5.14. Comparação entre velocidades modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas. Representação por (a) série temporal; e (b) hodógrafa.

V.5.2. Avaliação quantitativa

Apesar da hodógrafa ser uma forma simples e direta para a avaliação da semelhança entre as velocidades teóricas e medidas, faz-se necessário a obtenção de um método quantitativo para a avaliação das discrepâncias entre ambas as séries tridimensionais. Para tal, dois métodos foram utilizados:

- Raiz do erro médio quadrático (RMSE – *Root Mean Square Error*)

É um método comumente utilizado para medir as diferenças entre valores observados e modelados. Sua expressão para cada uma das componentes da velocidade é dada por:

$$\text{RMSE}_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (V_{\text{modelo}} - V_{\text{medido}})_k^2}, \quad i=u,v,w \quad (5.13)$$

onde n é o tamanho total da série; k é o índice temporal; V_{modelo} é o valor instantâneo calculado pelas equações analíticas; V_{medido} é o valor medido; e o índice i se refere a cada uma das componentes de velocidade. Para se obter apenas um único valor que represente a discrepância entre as órbitas, utilizou-se a seguinte métrica:

$$\text{RMSE}_{3D} = \sqrt{\text{RMSE}_u^2 + \text{RMSE}_v^2 + \text{RMSE}_w^2} \quad (5.14)$$

Um ajuste perfeito é definido por $\text{RMSE}_{3D} = 0$. Algumas características do RMSE são: (i) o seu valor é bastante influenciado por erros individuais elevados; (ii) não dá uma ideia da “direção” do erro; (iii) é uma boa forma de quantificação do erro total.

É importante ressaltar que, como o cálculo do RMSE é feito “ponto-a-ponto”, qualquer pequeno erro de fase entre uma das componentes das ondas afetará de forma significativa o valor de RMSE_{3D} .

- Deformação dinâmica do tempo (DTW – *Dynamic Time Warping*)

A DTW é uma ferramenta de análise de semelhança entre séries temporais muito utilizada no campo de reconhecimento de voz (SAKOE e CHIBA, 1978). A ideia central do método é achar o menor caminho (ótimo) em uma matriz de custo construída a partir da medição de distância entre cada um dos pontos das séries a serem comparadas.

Uma das propriedades principais do método é ser “imune” a diferenças de fase entre as séries comparadas. Para o trabalho em questão, essa característica possibilita um certo relaxamento em relação a pequenas diferenças de fase que possam existir entre as componentes das velocidades de interação subtrativa calculadas pelas equações de SHARMA e DEAN (1981) e aquelas extraídas a partir da HHT.

Para o cálculo de semelhança entre as órbitas de velocidade foi utilizado o pacote ‘dtw’ disponível na linguagem de programação R (GIORGINO, 2009), que possibilita séries temporais multidimensionais como entrada. Maiores detalhes sobre o método DTW estão disponíveis em CAO e LIU (2016), HYVÄRINEN e OJA (2000), PALIWAL *et al.* (1982) e SHOKOOHI-YEKTA *et al.* (2015).

Para adquirir sensibilidade em relação às magnitudes de ambas formas de quantificação das discrepâncias entre valores medidos e modelados, fez-se um exemplo simples para uma órbita tridimensional formada por funções senos e cossenos. Cada uma das componentes é representada pelas seguintes funções:

$$\begin{aligned} \text{Modelo} & \begin{cases} U = a_u \cos(2\pi ft + \varepsilon) \\ V = a_v \cos(2\pi ft + \varepsilon) \\ W = a_w \sin(2\pi ft + \varepsilon) \end{cases} \\ \text{Alterado} & \begin{cases} U = e_a a_u \cos(2\pi f t e_f + \varepsilon e_\varepsilon) \\ V = e_a a_v \cos(2\pi f t e_f + \varepsilon e_\varepsilon) \\ W = e_a a_w \sin(2\pi f t e_f + \varepsilon e_\varepsilon) \end{cases} \end{aligned} \quad (5.15)$$

onde a_u , a_v e a_w são os valores das amplitudes de cada componente oscilatória (m/s); f é a frequência (Hz); t é o tempo da simulação (s); ε é a fase inicial (rad); e e_a , e_f e e_ε correspondem aos erros sintéticos de amplitude, frequência e fase. Os erros foram introduzidos a cada uma das componentes de forma separada de acordo com a Tabela 5.3. Os valores utilizados para o teste de sensibilidade foram: $a_u = 0,03$ m/s; $a_v = a_u/2$; $a_w = a_u/3$; $f = 0,2$ Hz; e $\varepsilon = 10^\circ$, que correspondem a valores típicos a serem encontrados para as velocidades de interação subtrativa dentro da bacia de ondas. Cinco ciclos foram simulados (25 s).

Tabela 5.3. Erros sintéticos adicionados às componentes de velocidade U, V e W, separadamente.

Caso	e_a	e_f	e_ε	Caso	e_a	e_f	e_ε
0	1.00	1.00	1.00	6	1.30	1.12	1.60
1	1.05	1.02	1.10	7	1.35	1.14	1.70
2	1.10	1.04	1.20	8	1.40	1.16	1.80
3	1.15	1.06	1.30	9	1.45	1.18	1.90
4	1.20	1.08	1.40	10	1.50	1.20	2.00
5	1.25	1.10	1.50				

A Figura 5.15 apresenta a evolução dos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} à medida que os erros sintéticos introduzidos em cada uma das componentes de velocidade aumentam conforme a Tabela 5.3. A Figura 5.16 ilustra as alterações sofridas pelas hodógrafas para modificações apenas na componente horizontal u nos casos 1 e 5. É nítido que pequenas alterações na amplitude, frequência e/ou fase inicial causam mudanças significativas na hodógrafa, mesmo que a contaminação seja apenas em uma componente de velocidade.

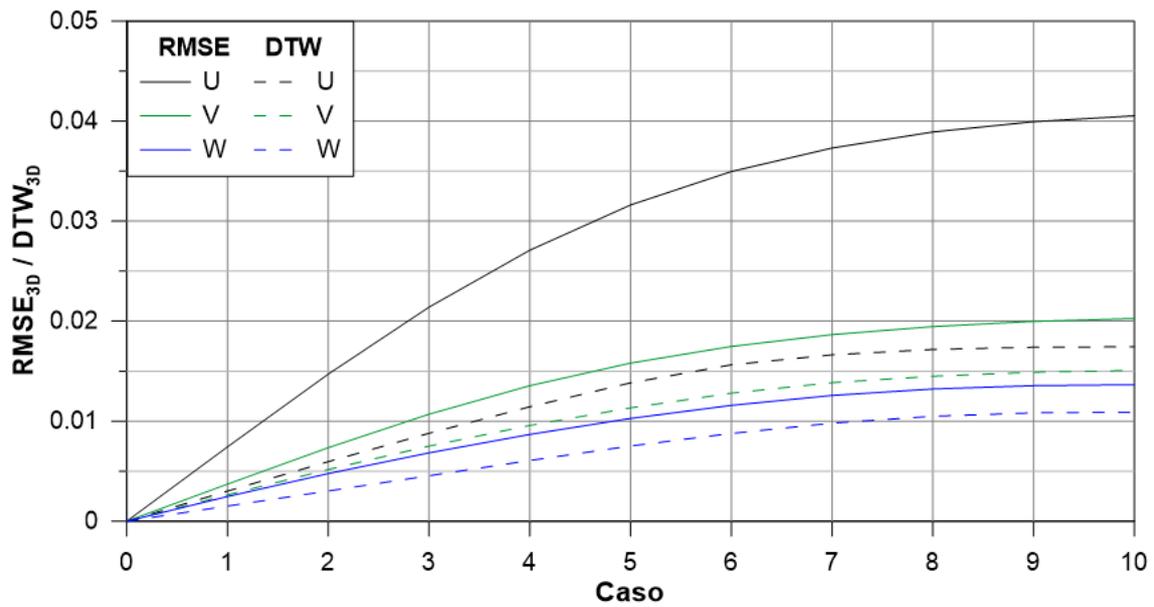


Figura 5.15. Evolução dos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} para os casos da Tabela 5.3.

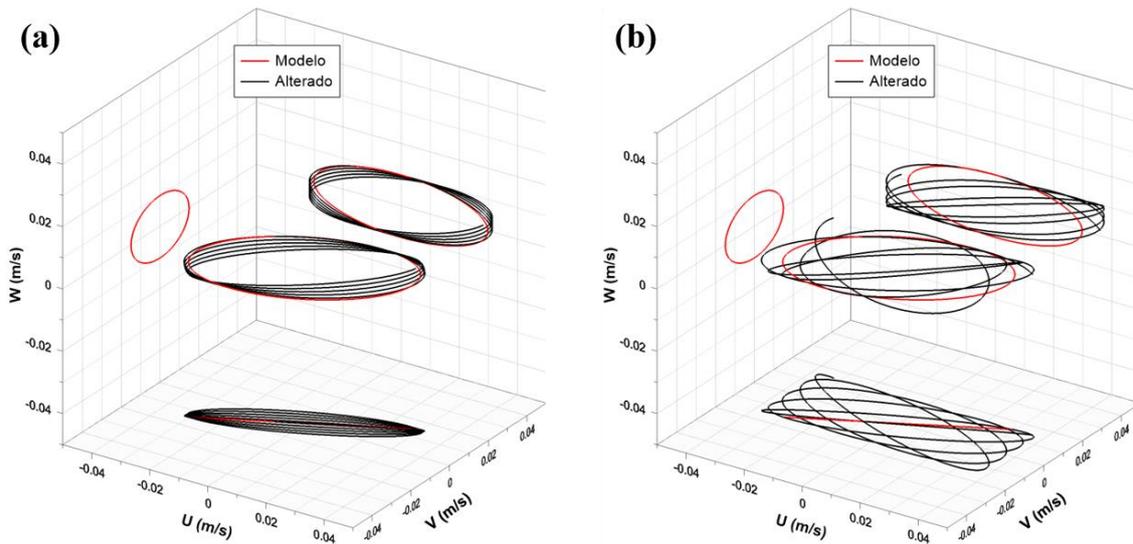


Figura 5.16. Comparação entre as órbitas modeladas e alteradas para os casos 1 e 5. Neste exemplo, os erros foram introduzidos apenas na componente u de velocidade.

V.6. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

Toda a descrição da metodologia de análise feita até aqui se referiu ao tratamento dos dados de velocidade medidos pelos ADVs, principal foco da pesquisa. Com maior brevidade e de forma mais simples, os dados dos dois arranjos de USSs também serão apresentados nos **Capítulos VI e VII**, sendo portanto, indispensável que se faça um comentário sobre a forma de análise.

Os dados de medição da elevação da superfície livre foram analisados a partir do programa WaveLab[®], desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia Hidráulica e Costeira da Universidade de Aalborg. O programa foi desenvolvido especificamente para a aquisição e análise de dados em laboratórios de modelagem física e é utilizado por diversas instituições ao redor do mundo, incluindo o Instituto Ludwig-Franzius.

Um dos pacotes de análise fornecidos pelo WaveLab[®] consiste na análise 3D de dados de elevação de superfície livre. O programa fornece o espectro direcional das ondas e é capaz de separar as oscilações incidentes das refletidas. O cálculo espectral pode ser feito através do Método de Estimativa Espectral Direcional Bayesiano (BDM – *Bayesian Directional Spectral Estimation Method*), desenvolvido por HASHIMOTO e KOBUNE (1989) ou pelo Método de Máxima Verossimilhança (MLM – *Maximum Likelihood Method*), desenvolvido por CAPON (1969) para sísmica e posteriormente inserido na engenharia oceânica por DAVIS e REGIER (1977) e BORGMAN (1985). Em geral, o método BDM apresentou melhores resultados e foi, portanto, escolhido como padrão para a análise da superfície livre geradas pelas Bi-Bis.

Para não sobrecarregar o capítulo de apresentação dos resultados apenas as análises do arranjo 2 serão apresentados, salvo dito o contrário. O arranjo 2 de USSs possui a mesma disposição dos instrumentos que o arranjo de ADVs, possibilitando uma melhor comparação entre os resultados de medição da superfície livre e de velocidades. No **Capítulo VII**, discutem-se algumas diferenças observadas entre os resultados dos dois arranjos de USS.

V.7. AJUSTE DE FASE ENTRE MODELO E MEDIÇÃO

Para que se faça uma comparação temporal razoável entre valores observados e modelados, é necessário que ambas as séries estejam em fase, sejam elas unidimensionais ou multidimensionais. Durante a geração das ondas em laboratório, existe um período de

tempo entre o acionamento do gerador de ondas e a incidência da energia da onda no instrumento. No entanto, na geração de séries temporais por expressões analíticas, esse período de espera é inexistente, de forma que se faz necessário ajustar as fases entre as séries.

Para fazer tal ajuste, o Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear (MMQNL) foi utilizado. Esta é uma técnica matemática que otimiza os parâmetros de uma determinada função de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e modelados pela função.

Neste trabalho, o ajuste de fase para todas as variáveis em questão (elevação e velocidades) foi feito a partir de uma função (p) definida pela soma de duas funções cosseno, utilizando-se um período igual a 5 ciclos da onda de interação subtrativa de 2ª ordem. Para o caso das velocidades, em que as componentes são dependentes entre si, o ajuste foi feito em relação à componente horizontal u, que possui maior magnitude do que as demais componentes.

Na equação (5.16) NM é um nível médio (m ou m/s); H₁ e H₂ são as alturas de cada função cosseno (m ou m/s); e T₁ e T₂ são os períodos (s). Todas essas variáveis foram consideradas como parâmetros ajustáveis, ou seja, valores cujo MMQNL pode modificar em busca da minimização do erro. Os parâmetros k_a, k_b e θ_a, θ_b correspondem aos vetores números de onda e ângulos das ondas de cada teste, e não foram considerados como variáveis durante o ajuste. x e y correspondem às coordenadas de cada ADV (Tabela 4.4).

$$p = NM + \frac{H_1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t + k_a x \cos \theta_a + k_a y \sin \theta_a + p_1\right) + \frac{H_2}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t + k_b x \cos \theta_b + k_b y \sin \theta_b + p_2\right) \quad (5.16)$$

O ajuste de fase das ondas foi feito em relação ao ADV 2.2.1. O conhecimento das coordenadas de cada ADV proporciona o cálculo da série temporal analítica para os demais instrumentos do arranjo. Qualquer aumento do erro de fase entre os demais ADVs evidencia a existência de pequenos erros nas medições da localização (horizontal) dos instrumentos. O ajuste de fase da elevação da superfície livre é diferente daquele para as velocidades, uma vez que os USSs estavam o mais próximo possível dos ADVs, mas ainda assim com um pequeno distanciamento.

Uma vez que o ajuste matemático é feito, tem-se uma aproximação dos parâmetros de onda que foram de fato geradas pelo gerador (amplitude e período). Em geral, o período é muito bem representado, mas pequenas diferenças entre as alturas de ondas requisitadas e efetivamente geradas são comuns (Tabela 5.4).

A Figura 5.17 ilustra a componente horizontal normal ao gerador de ondas (u) com e sem o ajuste de fases. Observa-se que apesar da primeira onda chegar ao ADV com aproximadamente 10 s, a energia da onda só chega aos 13 s de medição. Neste caso tem-se as seguintes diferenças entre parâmetros requisitados e gerados.

Tabela 5.4. Parâmetros das ondas Bi-Bis ajustados pelo MMQNL.

Onda		Amplitude (m/s)			T (s)	ϵ (°)	NM (m)		
		u	v	w			u	v	w
Modelo	a	0,12	0,02	0,09	1,30	-	-0,04	0,00	0,01
	b	0,23	0,00	0,13	1,70	-			
Medido	a	0,12	0,03	0,07	1,31	141,82	0,00	0,00	0,00
	b	0,25	0,02	0,13	1,71	-42,17			

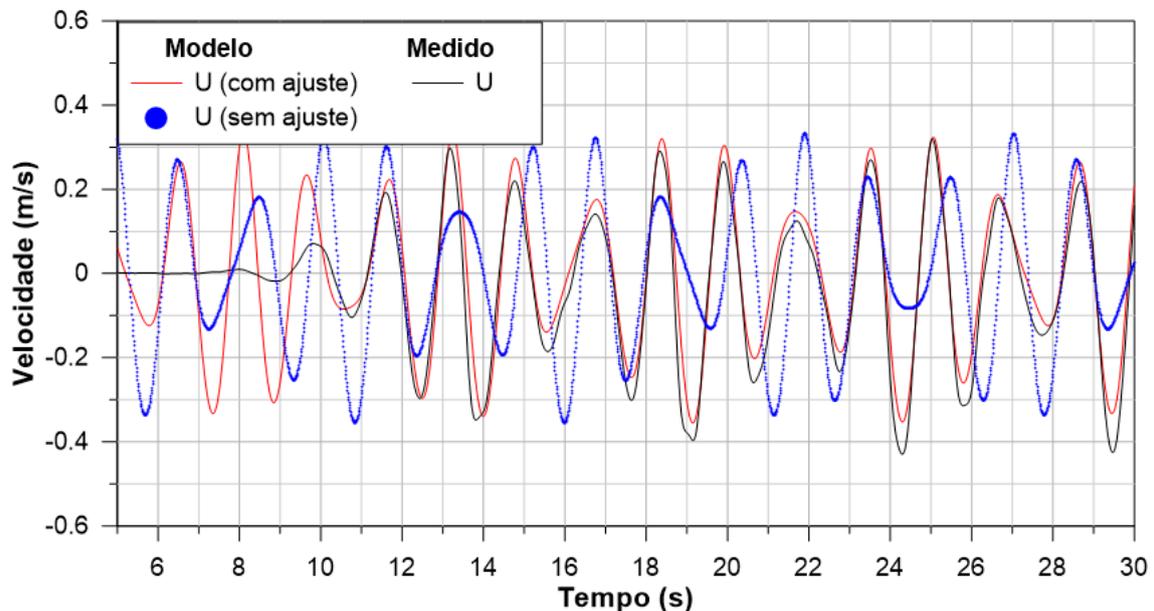


Figura 5.17. MMQNL aplicado para o ajuste de fase entre velocidades medidas e modeladas.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

O **Capítulo V** apresentou a metodologia de análise dos dados, em especial das medições de velocidade feitas pelo arranjo de ADVs. Mostrou-se cada um dos passos utilizados para a limpeza dos dados brutos dos instrumentos e, em maiores detalhes, o método da HHT e da NA-MEMD. Neste capítulo, oito subgrupos representativos, abrangendo 42 testes dentro de um total de 271 testes, são ilustrados. A amostra apresentada foi selecionada de forma a abranger a maior diversidade possível de características das ondas simuladas e posicionamento dos instrumentos de medição, sem que houvesse a repetição de resultados similares.

Ao longo dos capítulos anteriores, o teste T4-B2 foi utilizado para a exemplificação da maioria dos passos de tratamento dos dados. Portanto, este será o primeiro a ter os seus resultados ilustrados. As principais características dos testes apresentados neste capítulo estão resumidas na Tabela 6.1. Os ângulos das ondas ‘a’ e ‘b’ variam de acordo com a Tabela 4.2. A relação completa dos testes pode ser vista na Tabela A1.1 do **Anexo I**.

Apesar da metodologia proposta neste trabalho analisar de forma conjunta o arranjo de ADVs, os resultados são necessariamente fornecidos para cada um dos instrumentos em vez de um único para o arranjo, como na análise espectral de um arranjo de USS. Cada série temporal de uma das três componentes de velocidade de um ADV é decomposta em n IMFs. Devido ao alinhamento de modo proporcionado pela análise do arranjo de ADVs com a MEMD, o número de IMFs é o mesmo para todas as componentes, de todos os 5 ADVs. Espera-se, portanto, que a onda de interação subtrativa esteja representada pela IMF de mesmo índice para todos os ADVs, facilitando a interpretação dos resultados.

Há, portanto, 5 séries temporais da onda subtrativa passíveis de serem exibidas para cada teste. Em busca de uma apresentação mais sucinta e didática dos resultados alcançados, apenas os resultados de um dos ADVs serão expostos para cada teste. O ADV escolhido será sempre aquele que apresentar o menor $RMSE_{3D}$ dentre os demais. Ao final deste capítulo, uma seção é dedicada aos resultados que apresentaram alguma falha e, no **Anexo II**, um exemplo é dado mostrando os resultados para todos os ADVs do arranjo.

Tabela 6.1. Resumo das propriedades das ondas Bi-Bi dos subgrupos selecionados para apresentação de resultados.

Teste	h (m)	d (m)	H_a (m)	H_b (m)	T_a (s)	T_b (s)	T⁺ (s)	T⁻ (s)
T4-B	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	0,74	5,53
T6-B	0,75	0,50	0,10	0,16	1,3	1,7	0,74	5,53
T2-C	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	0,80	3,41
T5-E	0,60	0,35	0,05	0,11	1,6	2,1	0,91	6,72
T1-E	0,60	0,35	0,13	0,13	1,5	2,3	0,91	4,31
T3-A	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	1,1	0,55	-
T7-E3	0,60	0,35	0,10	0,16	1,6	2,1	0,91	6,72
T8-B2*	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	0,74	5,53
T8-C5**	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	2,8	0,89	2,43

* Espectro bimodal baseado nas características do teste T4-B2.

**Espectro bimodal baseado nas características do teste T4-C5.

VI.1. Testes T4-B

A Tabela 6.2 resume as características principais do grupo T4-B. A profundidade é de 0,75 m e os ADVs estão a 0,35 m abaixo da superfície livre. As ondas ‘a’ e ‘b’ possuem 0,10 m e 0,16 m de altura e 1,3 s e 1,7 s de período, respectivamente. O que varia entre os testes do grupo T4-B são os ângulos das ondas primárias. Como proposto no item IV.2, há 3 diferenças de ângulo diferentes ($\Delta\theta = 0^\circ, 10^\circ$ e 30°), onde os pares T4-B2/B4 e T4-B3/B5 possuem o mesmo $\Delta\theta$, porém os ângulos das ondas primárias são diferentes.

Para todos esses testes, a onda de interação subtrativa de 2ª ordem tem período de 5,53 s. A sua direção e a amplitude de cada componente da velocidade (e da superfície livre) depende da combinação de ângulos entre as ondas primárias. A seguir, os resultados obtidos a partir das análises dos arranjos de USS e ADV são apresentados.

Tabela 6.2. Resumo das características dos testes T4-B.

T4-B										
Teste	h (m)	d (m)	H_a (m)	H_b (m)	T_a (s)	T_b (s)	D_a (°)	D_b (°)	T⁺ (s)	T⁻ (s)
T4-B1	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	0	0	0,74	5,53
T4-B2	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	10	0	0,74	5,53
T4-B3	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	30	0	0,74	5,53
T4-B4	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	5	-5	0,74	5,53
T4-B5	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	15	-15	0,74	5,53

VI.1.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.1 ilustra os primeiros 30 s da série de elevação medida pelo USS 1.2.1 durante o teste T4-B2. Os dados plotados não apresentam qualquer tratamento. Nota-se um contraste significativo entre os dados brutos de um USS e de um ADV (Figura 4.11), o que evidencia um dos motivos da preferência dos pesquisadores na medição de elevação da superfície livre em vez de velocidades. Na Figura 6.1 os dados teóricos, calculados pelas equações de SHARMA e DEAN (1981), também estão representados.

A análise direcional do arranjo 2 de USS é ilustrada na Figura 6.2. O tempo completo de simulação (≈ 2 min) foi levado em consideração para o cálculo do espectro direcional. Observa-se que o método BDM foi capaz de extrair as ondas primárias (f_a e f_b), ondas de interação de 2ª (f_a-f_b) e 3ª ordem ($2f_b-f_a$), além de ondas refletidas. Algumas reflexões possuem frequências idênticas à da onda primária f_a e da interação aditiva de 2ª ordem, f_a+f_b . Foram caracterizadas como reflexão, uma vez que suas direções não correspondem às direções teóricas das interações ($\theta_{f_a+f_b} = 6,02^\circ$).

A Tabela 6.3 resume as características principais do espectro total, dos dois sistemas primários presentes nas medições e da componente espectral responsável pela onda de interação subtrativa, f_a-f_b . A estimativa da altura significativa (H_s) de cada partição é calculada como:

$$H_s = 4 \sqrt{\sum_{i,j}^{n,m} d_E(f_i, \theta_j) f_i \Delta f \Delta \theta} \quad (6.1)$$

onde $f_{i=0}$, $f_{i=n}$, $\theta_{j=0}$, $\theta_{j=m}$ são os limites de cada partição espectral definida visualmente pela Figura 6.2; d_E é a densidade de energia em $m^2 \cdot s^2 / rad$ fornecida pelo WaveLab[®]. Ressalta-se que um possível erro foi encontrado nas unidades da densidade de energia do programa. Esse assunto é discutido no **Anexo III**.

As ondas primárias 'a' e 'b' apresentaram valores H_s muito próximos aos valores requeridos. Para este experimento, a altura esperada da onda de interação subtrativa, f_a-f_b , é de 0,010 m com uma direção de $28,16^\circ$ e período de 5,53 s. A análise espectral, portanto, captou de forma adequada o período desta componente, mas subestimou a sua altura e não detectou de forma adequada a sua direção. O relatório completo da análise feita pelo WaveLab[®], incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.3.

Fazendo-se o ajuste das curvas cossenoidais através do MMQNL, obtêm-se as seguintes características das ondas Bi-Bis: $H_a = 0,09$ m, $T_a = 1,31$ s e $H_b = 0,18$ m e $T_b = 1,71$ s.

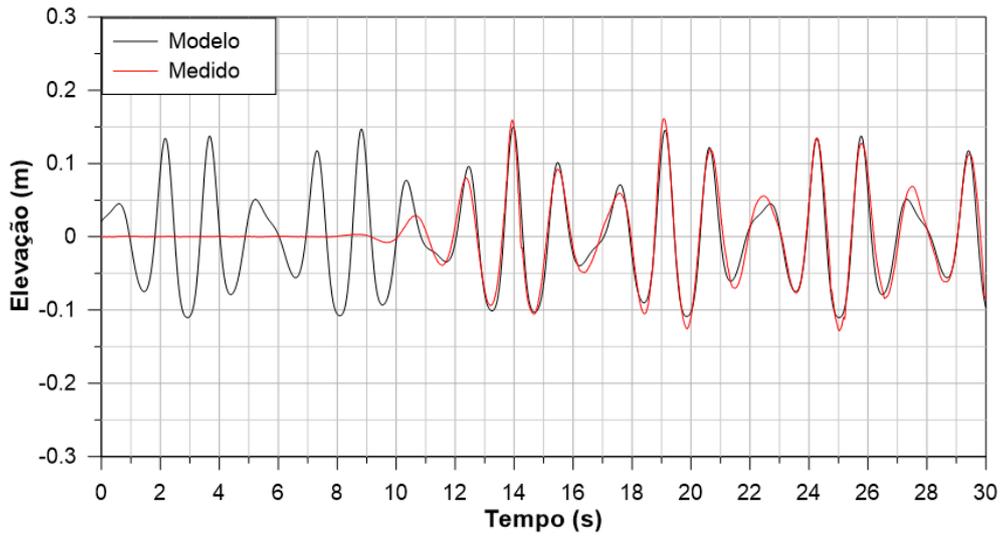


Figura 6.1. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T4-B2.

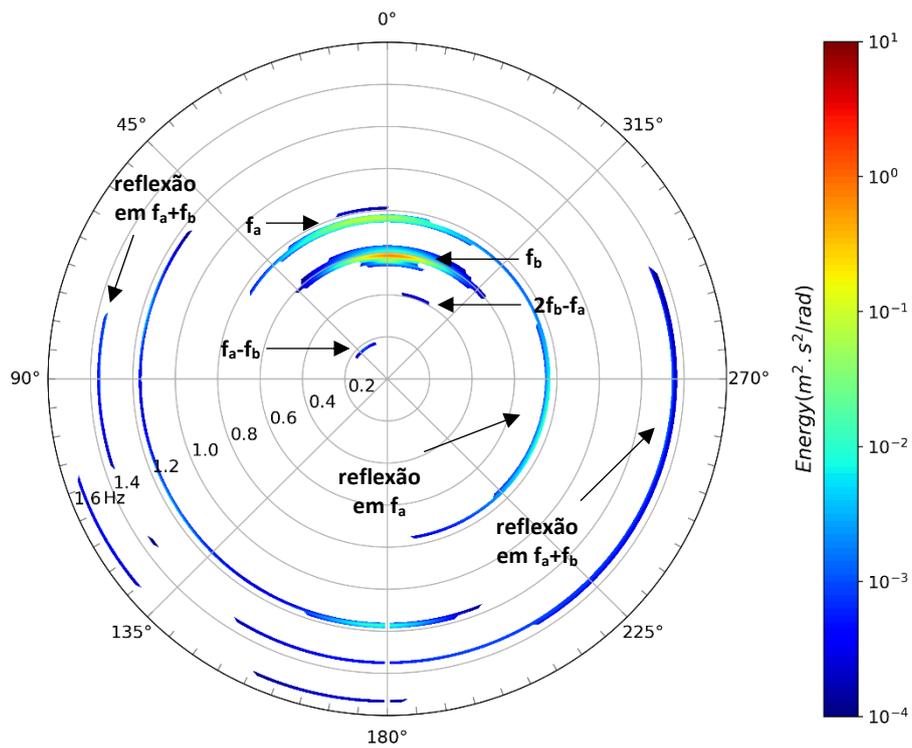


Figura 6.2. Espectro direcional calculado para o teste T4-B2.

Tabela 6.3. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T4-B2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,213	1,71	-1,50
a	0,101	1,30	6,50
b	0,180	1,71	-1,50
Subtrativa	0,005	5,46	37,50

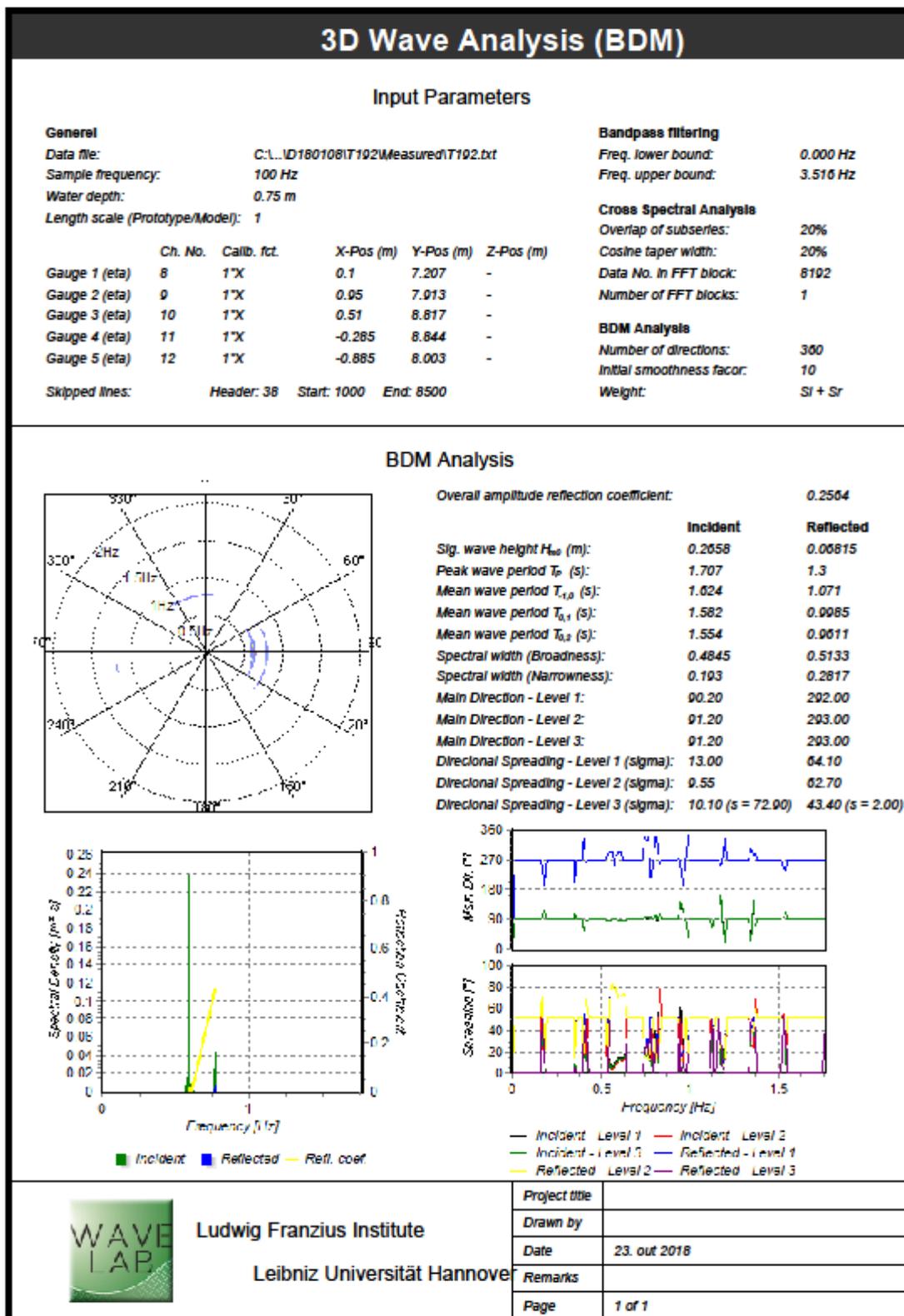


Figura 6.3. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T4-B2.

VI.1.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.4 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T4-B2. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas e modeladas para o ADV 2.2.5 são plotadas nos mesmos gráficos. Nota-se uma boa aderência entre o resultado teórico e observado, que também é expresso pelos baixos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} .

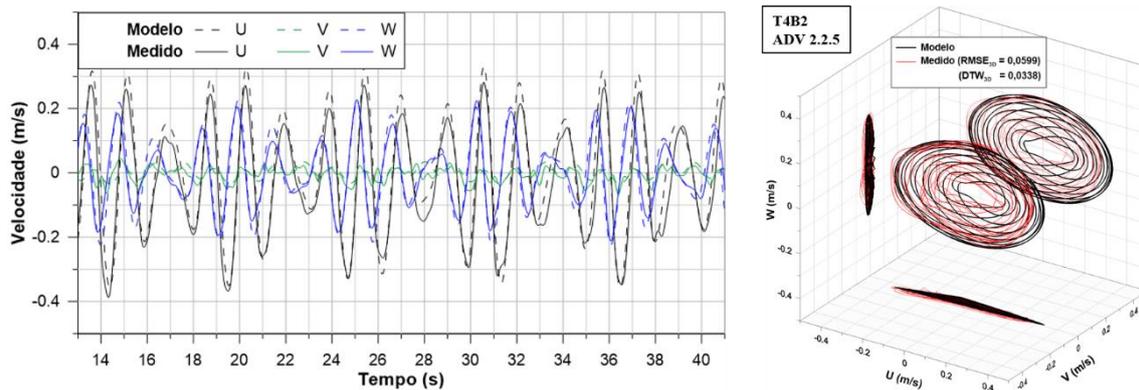


Figura 6.4. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T4-B2.

A aplicação da metodologia proposta neste trabalho aos experimentos da Tabela 6.2 gerou 15 IMFs para os testes T4-B1 a T4-B4 e 16 IMFs para o teste T4-B5. Para melhor visualização, a Figura 6.5 ilustra a transformada de Hilbert apenas das IMFs que representam as ondas primárias (IMFs 6 e 7) e a onda de interferência subtrativa (IMF 9) para o teste T4-B2. As linhas brancas tracejadas representam as frequências teóricas esperadas. O Anexo II apresenta o espectro de Hilbert com todas as IMFs extraídas.

Observa-se que as IMFs 6 e 7 oscilam em torno das frequências esperadas. Essa oscilação é causada pela mistura de modo, uma vez que as ondas primárias possuem frequências próximas. No entanto, como a onda de interferência subtrativa tem uma frequência bastante distinta dos demais fenômenos presentes na medição ($f^- = 0,18$ Hz), sua IMF não sofre mistura de modo e uma linha praticamente horizontal resulta em cima da frequência esperada.

A Figura 6.6 apresenta as hodógrafas das IMFs 6 e 7, que correspondem às ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente. Nota-se que há uma nítida distorção das amplitudes, que fica também evidente na Tabela 6.4, que resume as características de cada IMF ajustadas pelo MMQNL para cada um dos 5 ADVs. A incapacidade da HHT em separar

com precisão os modos correspondentes a cada uma das ondas primárias, tanto em amplitude quanto em período, necessariamente afeta a direção das ondas extraídas.

As velocidades orbitais de baixa frequência extraídas para todos os testes indicados na Tabela 6.2 estão apresentadas nas Figuras 6.7 e 6.8. As hodógrafas teóricas calculadas pelas equações de SHARMA e DEAN (1981) também são plotadas para comparação. Apenas 5 ciclos de onda (≈ 28 s) são ilustrados. É visualmente clara a semelhança entre a teoria e os resultados obtidos pela HHT para a onda interativa de mais baixa frequência. Os valores de RMS_{3D} e DTW_{3D} calculados para cada caso estão identificados em cada um dos gráficos. Seus valores são pequenos, evidenciando a boa qualidade dos resultados.

A Figura 6.7 também apresenta a série temporal das componentes de velocidade para o teste T4-B2. Observa-se que as velocidades horizontais apresentam uma boa aderência de fase em relação à teoria, enquanto que a velocidade vertical, w , possui um pequeno deslocamento de fase. A Tabela 6.5 resume as características da onda de interação subtrativa esperada e observada para cada ADV. Os valores das séries medidas foram obtidos a partir do MMQNL.

Tabela 6.4. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T4-B2.

ADV	Onda	IMF	Amplitude (m/s)			$ vel _{max}$ (m/s)	T (s)	D (°)	
			u	v	w				
Modelo	a	-	0,116	0,020	0,089	0,118	1,30	10,00	
	b	-	0,230	0,000	0,133	0,239	1,70	0,00	
Medido	2.2.1	a	6	0,110	0,027	0,062	0,362	1,31	6,98
		b	7	0,065	0,003	0,037	0,134	1,71	2,99
	2.2.2	a	6	0,092	0,022	0,065	0,311	1,30	4,49
		b	7	0,061	0,005	0,031	0,150	1,71	-5,02
	2.2.3	a	6	0,103	0,019	0,058	0,371	1,31	3,35
		b	7	0,064	0,002	0,027	0,167	1,71	0,19
	2.2.4	a	6	0,109	0,018	0,058	0,380	1,31	4,89
		b	7	0,066	0,003	0,028	0,197	1,71	2,42
	2.2.5	a	6	0,092	0,015	0,071	0,328	1,31	4,02
		b	7	0,058	0,001	0,029	0,159	1,71	0,98

Tabela 6.5. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T4-B2.

ADV	IMF	Amplitude (m/s)			$ vel _{max}$ (m/s)	T (s)			D (°)	
		u	v	w		u	v	w		
Modelo	-	0,028	0,015	0,011	0,031	5,53			28,16	
Medido	2.2.1	9	0,027	0,019	0,012	0,037	5,51	5,60	5,57	38,84
	2.2.2	9	0,027	0,019	0,012	0,039	5,53	5,61	5,55	33,23
	2.2.3	9	0,023	0,017	0,013	0,033	5,47	5,56	5,66	38,43
	2.2.4	9	0,025	0,012	0,012	0,032	5,58	5,40	5,59	26,13
	2.2.5	9	0,026	0,010	0,012	0,035	5,62	5,74	5,49	19,73

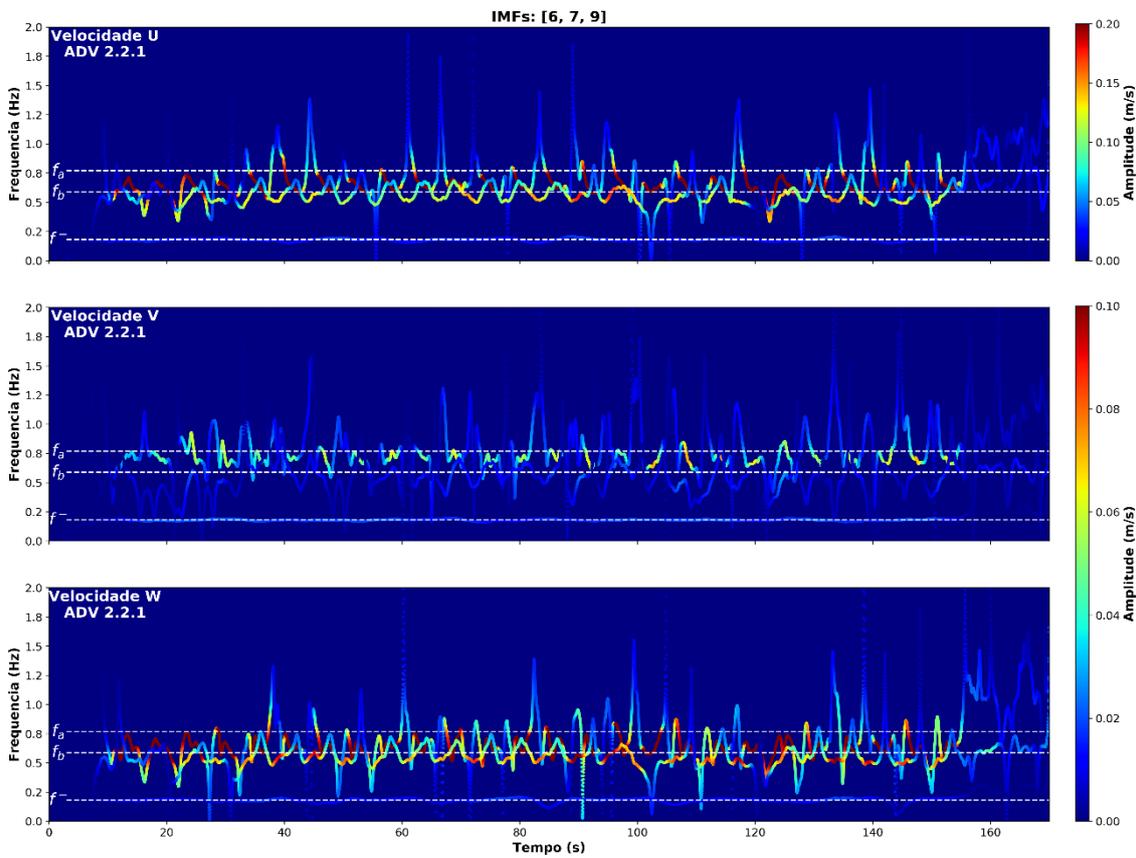


Figura 6.5. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T4-B2. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (9) estão plotadas.

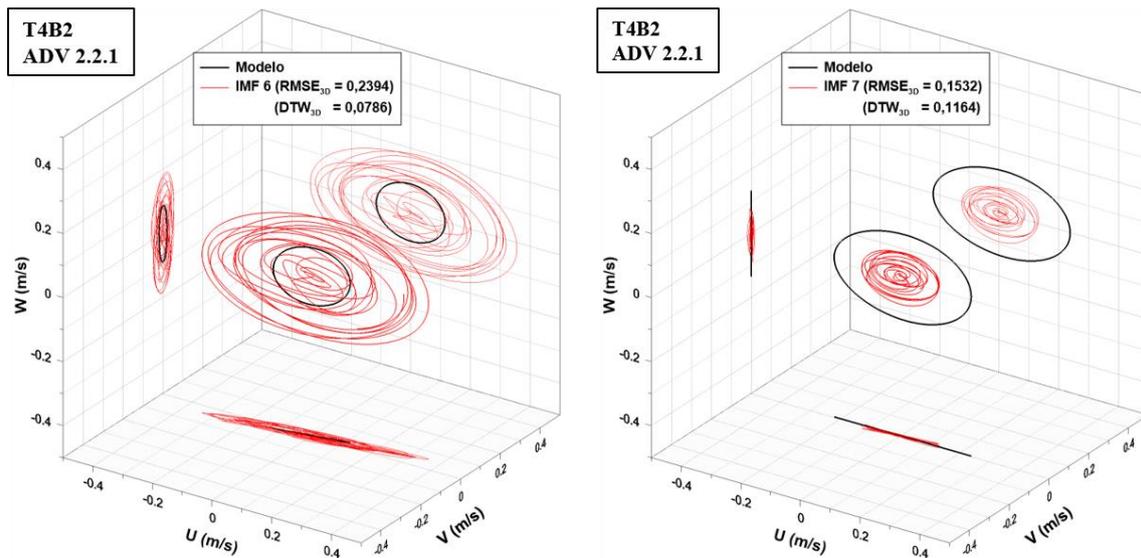


Figura 6.6. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente, do caso T4-B2.

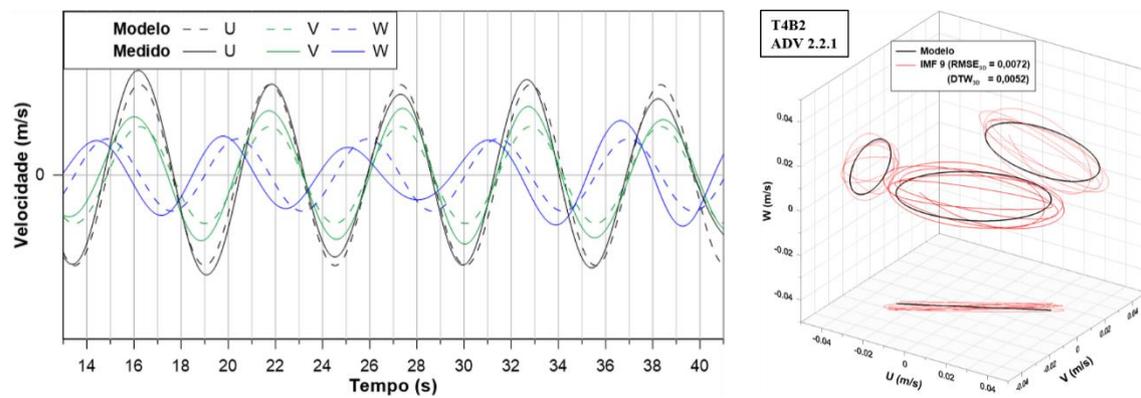


Figura 6.7. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T4-B2.

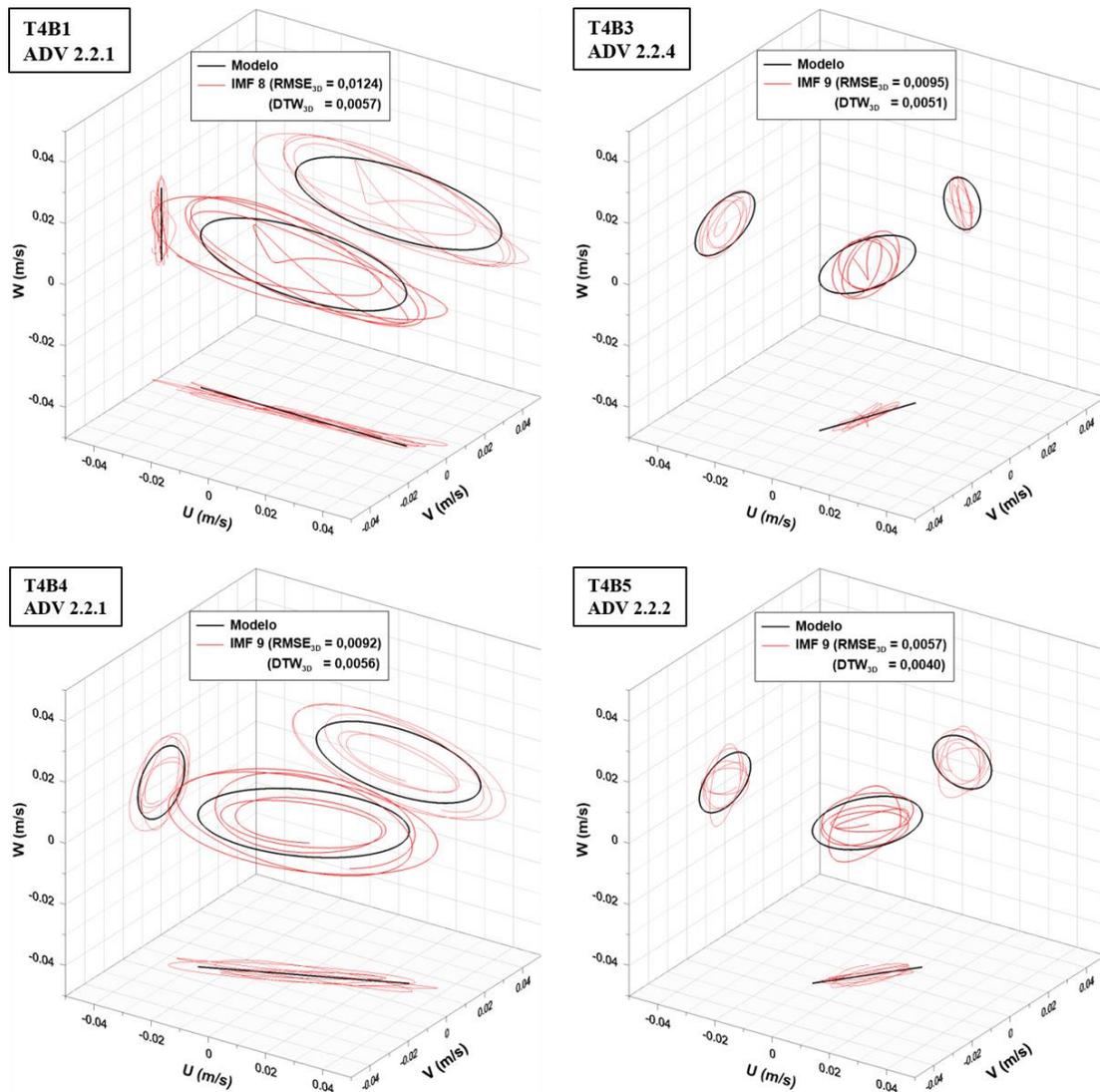


Figura 6.8. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T4-B1, B3, B4 e B5.

VI.2. Testes T6-B

O teste T6-B é uma repetição de T4-B, porém com os ADVs posicionados a uma maior profundidade. A Tabela 6.6 resume suas características principais.

Tabela 6.6. Resumo das características dos testes T6-B.

T6-B										
Teste	h (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	D _a (°)	D _b (°)	T ⁺ (s)	T ⁻ (s)
T6-B1	0,75	0,50	0,10	0,16	1,3	1,7	0	0	0,74	5,53
T6-B2	0,75	0,50	0,10	0,16	1,3	1,7	10	0	0,74	5,53
T6-B3	0,75	0,50	0,10	0,16	1,3	1,7	30	0	0,74	5,53
T6-B4	0,75	0,50	0,10	0,16	1,3	1,7	5	-5	0,74	5,53
T6-B5	0,75	0,50	0,10	0,16	1,3	1,7	15	-15	0,74	5,53

VI.2.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.9 ilustra os primeiros 30 s da série de elevação medida pelo USS 1.2.1 e calculada pelas equações de SHARMA e DEAN (1981) durante o teste T6-B2. A análise direcional do arranjo 2 de USS é ilustrada na Figura 6.10. O tempo completo de simulação (≈ 2 min) foi levado em consideração para o cálculo do espectro direcional.

Observa-se que o método BDM foi capaz de extrair as ondas primárias (f_a e f_b), superharmônicos ($2f_a$), a onda de interação subtrativa de 2ª ordem ($f_a - f_b$), além de ondas refletidas. Algumas reflexões possuem frequências idênticas à da onda primária f_a ; e aos superharmônicos, $2f_a$ e $2f_b$; à interação aditiva de 2ª ordem, $f_a + f_b$; e inclusive à interação subtrativa de 3ª ordem $3f_a - 2f_b$. Tais fenômenos foram caracterizadas como reflexão, uma vez que suas direções não correspondem às direções teóricas das interações.

A Tabela 6.3 resume as características principais do espectro total, dos dois sistemas primários presentes nas medições e da componente espectral responsável pela onda de interação subtrativa, $f_a - f_b$. Os resultados para as ondas primárias são bem similares aos do teste T4-B2, que possui as mesmas características de onda e coluna d'água. Neste experimento, no entanto, a análise espectral captou de forma adequada a direção e o período da componente subtrativa, e melhorou a identificação da sua altura. O relatório completo da análise feita pelo WaveLab[®], incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.11.

Fazendo-se o ajuste das curvas cossenoidais através do MMQNL, tem-se as seguintes características das ondas Bi-Bis: $H_a = 0,09$ m, $T_a = 1,34$ s e $H_b = 0,17$ m e $T_b = 1,72$ s.

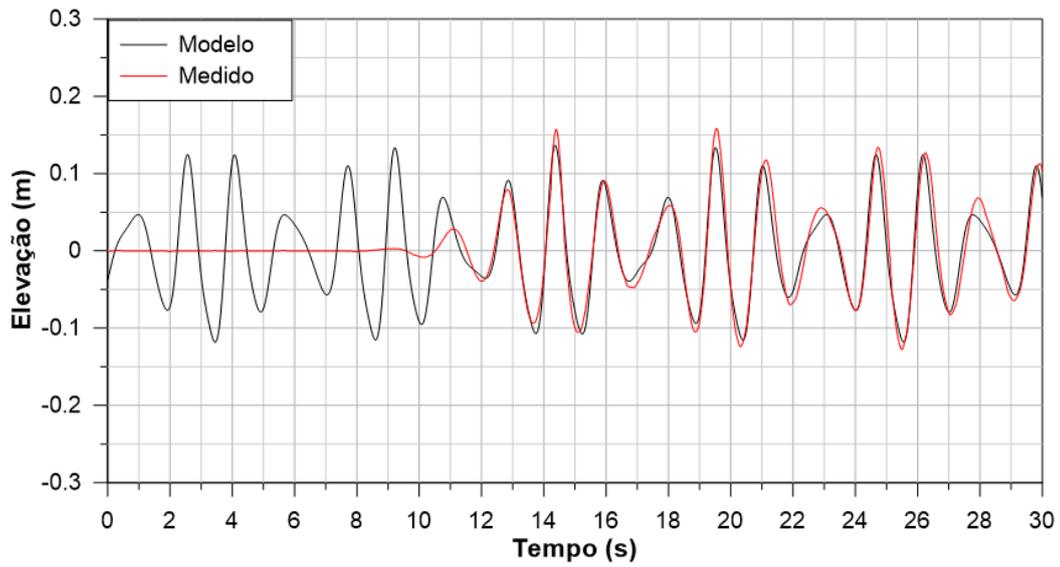


Figura 6.9. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T6-B2.

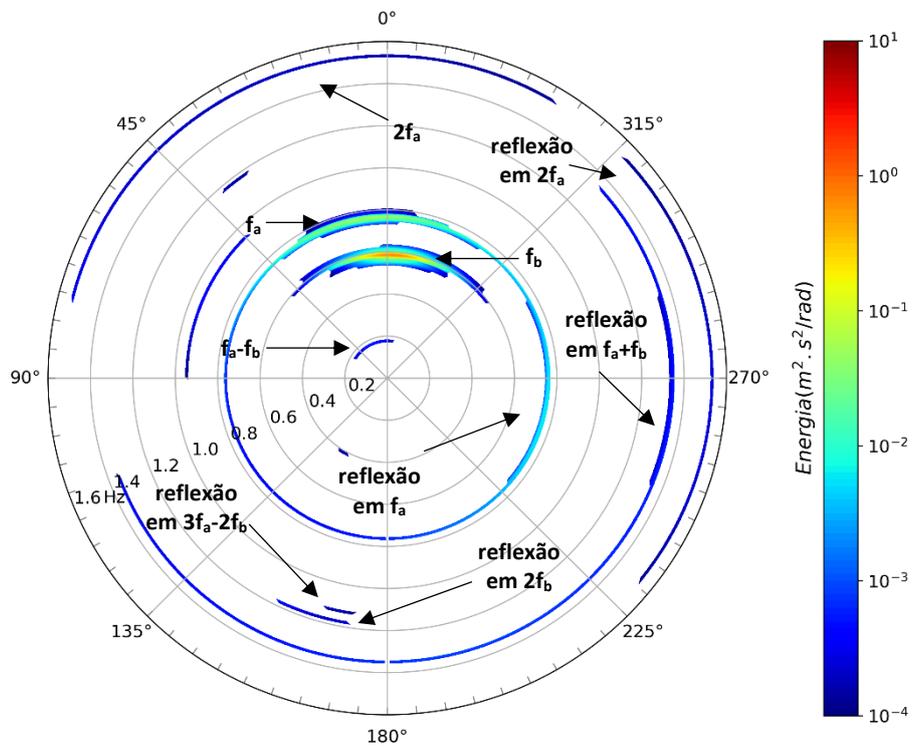


Figura 6.10. Espectro direcional calculado para o teste T6-B2.

Tabela 6.7. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T6-B2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,214	1,71	-2,50
a	0,100	1,30	7,50
b	0,181	1,71	-2,50
Subtrativa	0,013	5,46	25,50

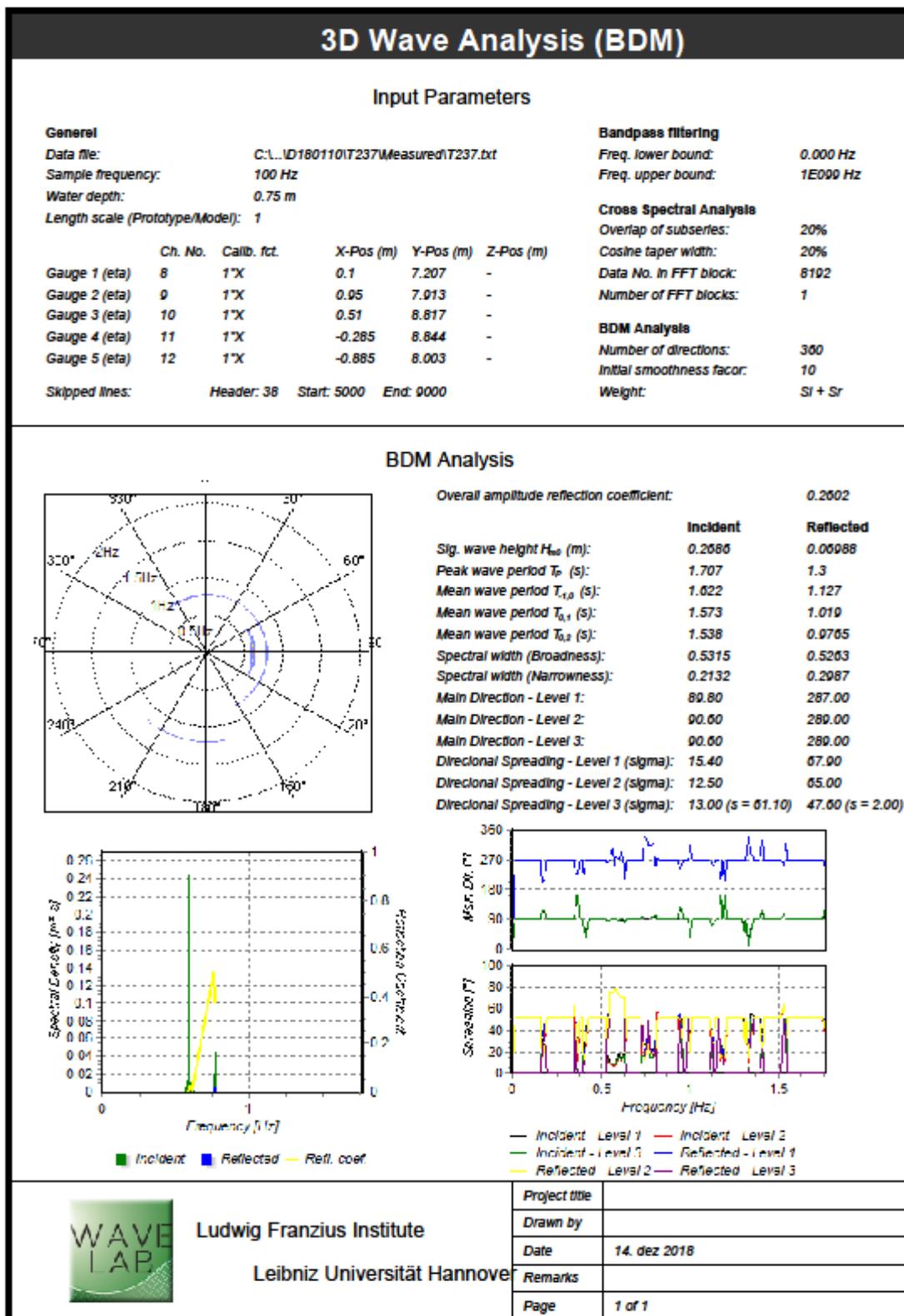


Figura 6.11. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T6-B2.

VI.2.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.12 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T6-B2. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas e modeladas para o ADV 2.2.3 são plotadas nos mesmos gráficos. A comparação entre as hodógrafas do teste T6-B2 (Figura 6.9) e T4-B2 (Figura 6.4) evidencia o reposicionamento vertical dos ADVs, uma vez que a amplitude da velocidade vertical é nitidamente menor neste teste, gerando uma hodógrafa mais achatada. Nota-se, novamente, uma boa aderência entre o resultado teórico e observado, que também é expresso pelos baixos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} .

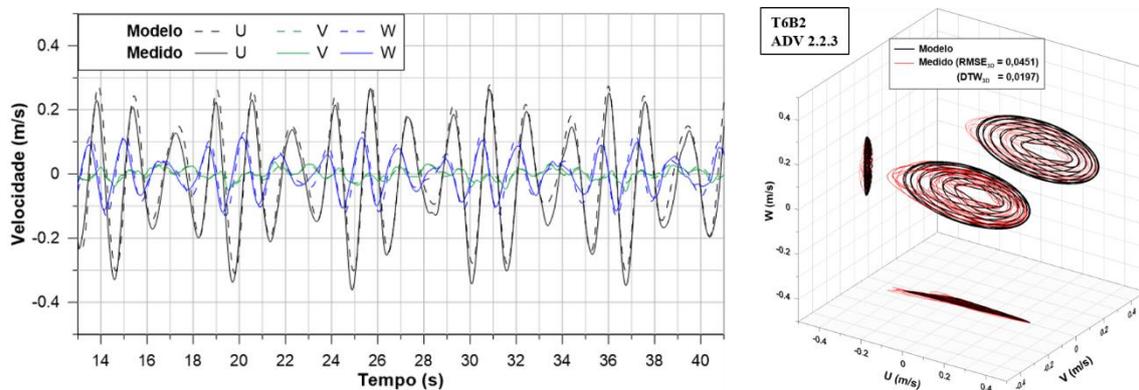


Figura 6.12. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T6-B2.

A Figura 6.13 ilustra a transformada de Hilbert apenas das IMFs que representam as ondas primárias e a onda de interferência subtrativa para o teste T6-B2. Novamente, as IMFs 6, 7 e 9 são aquelas que representam os fenômenos de interesse deste trabalho.

Observa-se que tanto a IMF 6, quanto a IMF 7 oscilam em torno da frequência da onda 'b'. Isso mostra que a mistura de modo para este teste, que também está presente nos demais ADVs do arranjo, foi ainda maior do que o teste T4-B2. As hodógrafas apresentadas na Figura 6.14 deixam claro que as IMFs em questão não são capazes de fornecer uma boa representação das ondas primárias. A Tabela 6.8 resume as características de cada IMF ajustadas pelo MMQNL para cada um dos 5 ADVs.

Já em relação à onda de interação subtrativa, novamente a HHT foi capaz de extrair com uma boa precisão a sua frequência. As velocidades orbitais extraídas para todos os testes do grupo T6-B estão apresentadas na Figura 6.15 e Figura 6.16. Assim como nos testes T4-B, as análises visuais e numéricas (RMS_{3D} e DTW_{3D}) deixam evidente a adequação

entre a teoria e os resultados obtidos pela HHT para a onda interativa de mais baixa frequência.

A Figura 6.15 também apresenta a série temporal das componentes de velocidade para o teste T6-B2. Observa-se que todas as componentes de velocidade apresentam uma boa aderência de fase em relação à teoria. No entanto, a velocidade vertical, w, possui um pequeno erro entre os 20 s e 30 s. A Tabela 6.9 resume as características da onda de interação subtrativa esperada e observada, obtidas a partir do MMQNL, para cada ADV.

Tabela 6.8. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T6-B2.

ADV	Onda	IMF	Amplitude (m/s)			vel _{max} (m/s)	T (s)	D (°)	
			u	v	w				
Modelo	a	-	0,090	0,016	0,051	0,092	1,30	10,00	
	b	-	0,204	0,000	0,080	0,210	1,70	0,00	
Medido	2.2.1	a	6	0,078	0,015	0,032	0,288	1,30	2,84
		b	7	0,013	0,000	0,005	0,034	1,71	1,40
	2.2.2	a	6	0,068	0,016	0,038	0,262	1,30	2,22
		b	7	0,012	0,001	0,005	0,026	1,71	-1,33
	2.2.3	a	6	0,077	0,013	0,034	0,286	1,30	1,81
		b	7	0,013	0,000	0,004	0,033	1,71	0,32
	2.2.4	a	6	0,082	0,008	0,034	0,305	1,31	1,92
		b	7	0,013	0,000	0,004	0,029	1,71	2,56
	2.2.5	a	6	0,072	0,005	0,039	0,275	1,30	-1,09
		b	7	0,011	0,000	0,005	0,023	1,71	-1,08

Tabela 6.9. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T6-B2.

ADV	IMF	Amplitude (m/s)			vel _{max} (m/s)	T (s)			D (°)	
		u	v	w		u	v	w		
Modelo	-	0,026	0,014	0,007	0,030	5,53			28,16	
Medido	2.2.1	9	0,015	0,009	0,004	0,034	5,52	5,60	5,52	31,43
	2.2.2	9	0,014	0,008	0,006	0,028	5,52	5,56	5,63	28,46
	2.2.3	9	0,016	0,010	0,004	0,033	5,57	5,57	5,60	32,64
	2.2.4	9	0,017	0,006	0,003	0,033	5,64	5,65	5,66	19,52
	2.2.5	9	0,019	0,006	0,006	0,040	5,57	5,64	5,74	16,52

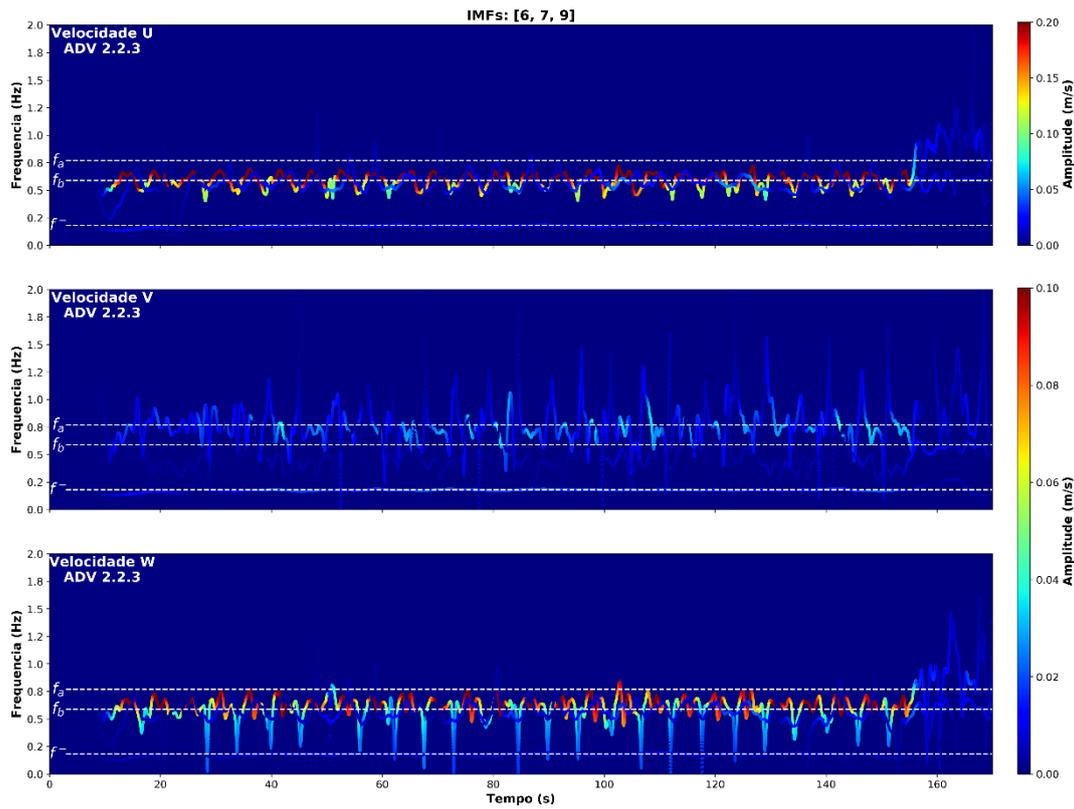


Figura 6.13. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T6-B2. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (9) estão plotadas.

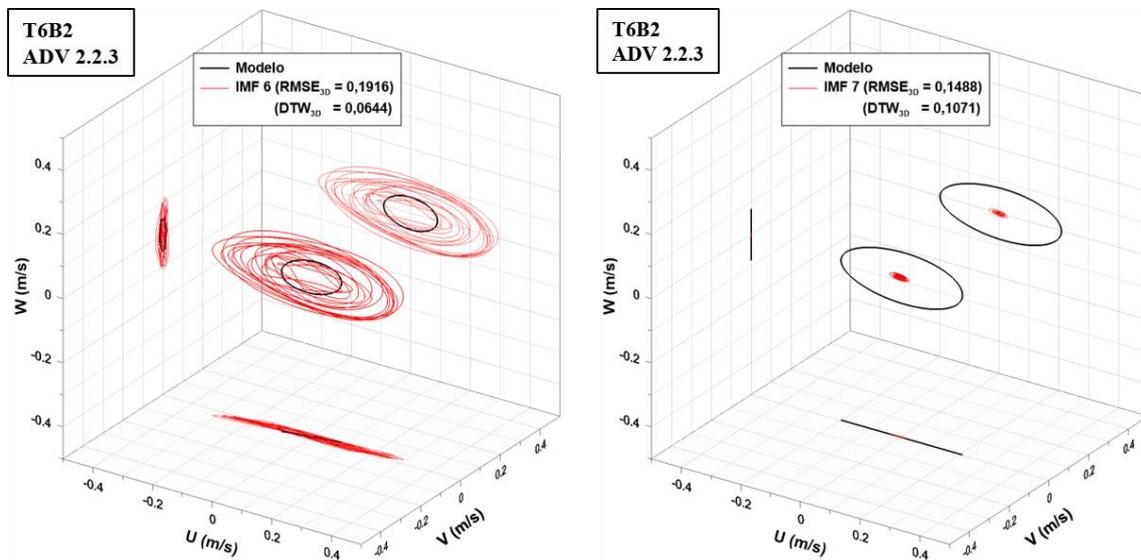


Figura 6.14. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente, do caso T6-B2.

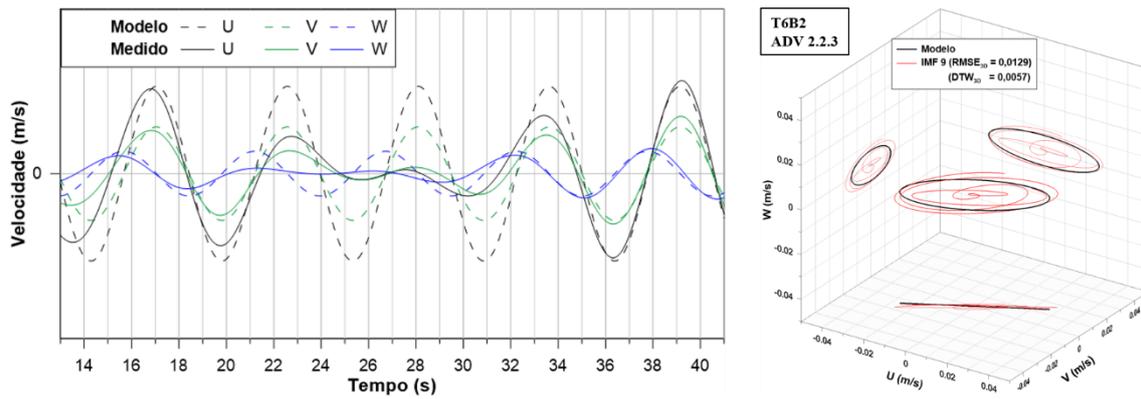


Figura 6.15. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T6-B2.

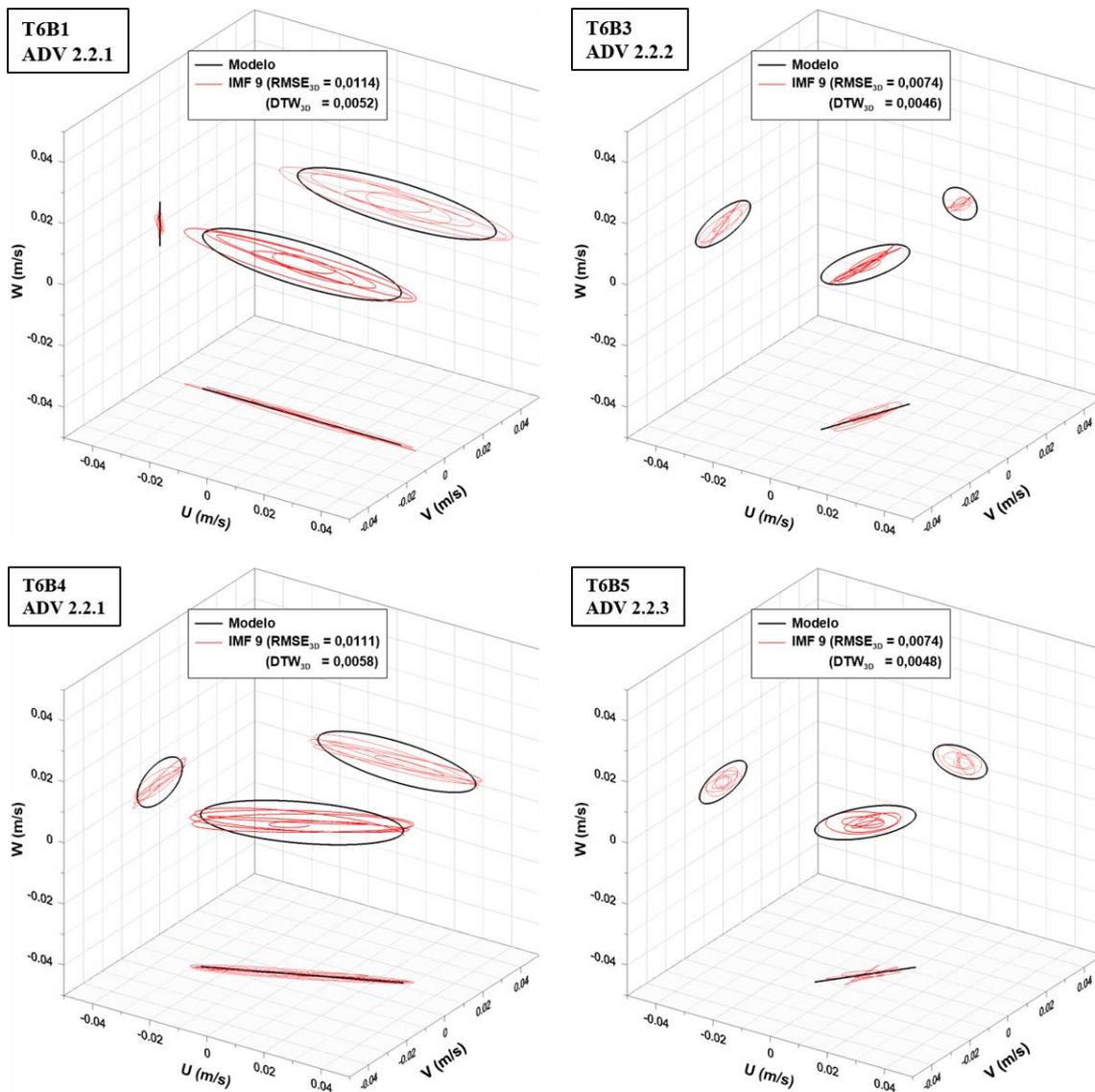


Figura 6.16. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T6-B1, B3, B4 e B5.

VI.3. Testes T2-C

Diferente dos grandes grupos T4 e T6 já exemplificados, o grupo de testes T2 foi feito com uma coluna d'água na bacia de 0,60 m. Os ADVs foram posicionados a uma profundidade de 0,35 m, ou seja, a uma profundidade relativa diferente dos testes anteriormente apresentados.

Os resultados do subgrupo T2-B foram tão satisfatórios quanto dos exemplos T4-B e T6-B, onde as ondas de interação subtrativas foram extraídas com uma boa qualidade, mas as ondas primárias apresentaram mistura de modo entre si. Para exemplificar outro subgrupo de testes, o grupo T2 será aqui representado pelo subgrupo C, em que a diferença de períodos das ondas primárias é, em geral, maior. A Tabela 6.10 resume as principais características desse subgrupo.

Tabela 6.10. Resumo das características dos testes T2-C.

T2-C										
Teste	h (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	D _a (°)	D _b (°)	T ⁺ (s)	T ⁻ (s)
T2-C1	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	0	0	0,80	3,41
T2-C2	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	10	0	0,80	3,41
T2-C3	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	30	0	0,80	3,41
T2-C4	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	5	-5	0,80	3,41
T2-C5	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	15	-15	0,80	3,41

VI.3.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.17 ilustra os primeiros 30 s da série de elevação medida pelo USS 1.2.1 durante o teste T2-C4, além da curva calculada pelas equações de SHARMA e DEAN (1981). A análise direcional do arranjo 2 de USS é ilustrada na Figura 6.18. O tempo completo de simulação (≈ 2 min) foi levado em consideração para o cálculo do espectro direcional.

O método BDM foi capaz de extrair as ondas primárias, a onda de interação subtrativa e ondas refletidas. A Tabela 6.11 resume as características principais dos dois sistemas primários presentes nas medições. Novamente, a onda 'b' apresentou um H_s de 2 cm a mais do que o requerido para o teste. A onda de interação subtrativa de segunda ordem tem, segundo a teoria, uma altura de 0,012 m, período de 3,41 s e direção de 15,57° para as condições simuladas neste teste. Nota-se, portanto, que a análise espectral superestimou esta componente e errou sua direção. Já o período foi bem identificado. O

relatório completo da análise feita pelo WaveLab[®], incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.19.

Fazendo-se o ajuste das curvas cossenoidais através do MMQNL, tem-se as seguintes características das ondas Bi-Bi: $H_a = 0,07$ m, $T_a = 1,29$ s e $H_b = 0,15$ m e $T_b = 2,09$ s.

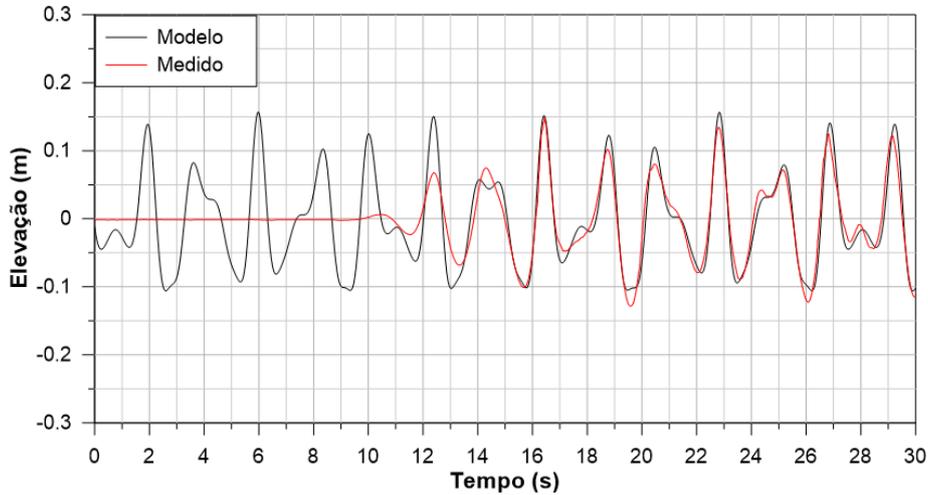


Figura 6.17. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T2-C4.

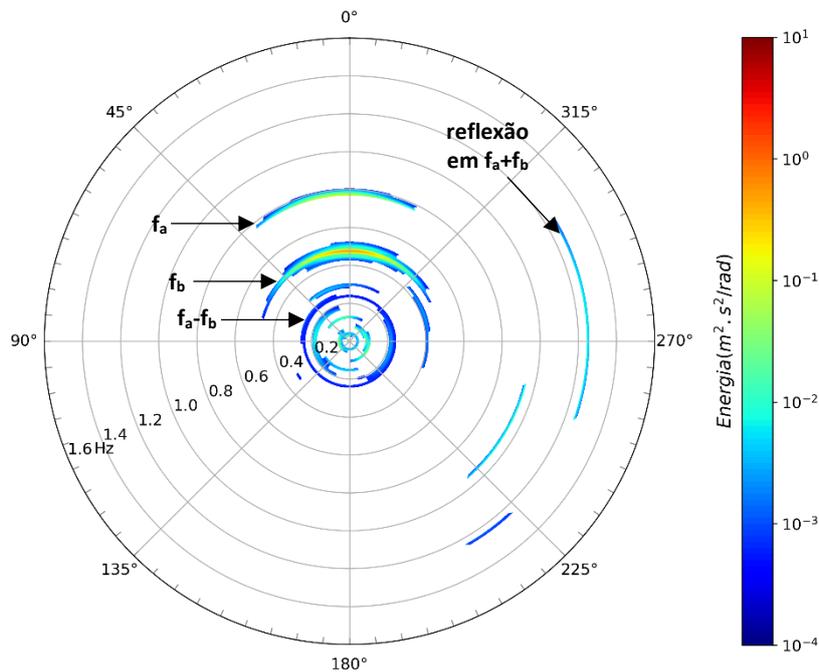


Figura 6.18. Espectro direcional calculado para o teste T2-C4.

Tabela 6.11. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T2-C4.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,239	2,10	-0,50
a	0,101	1,30	4,50
b	0,184	2,10	-0,50
Subtrativa	0,022	3,41	31,50

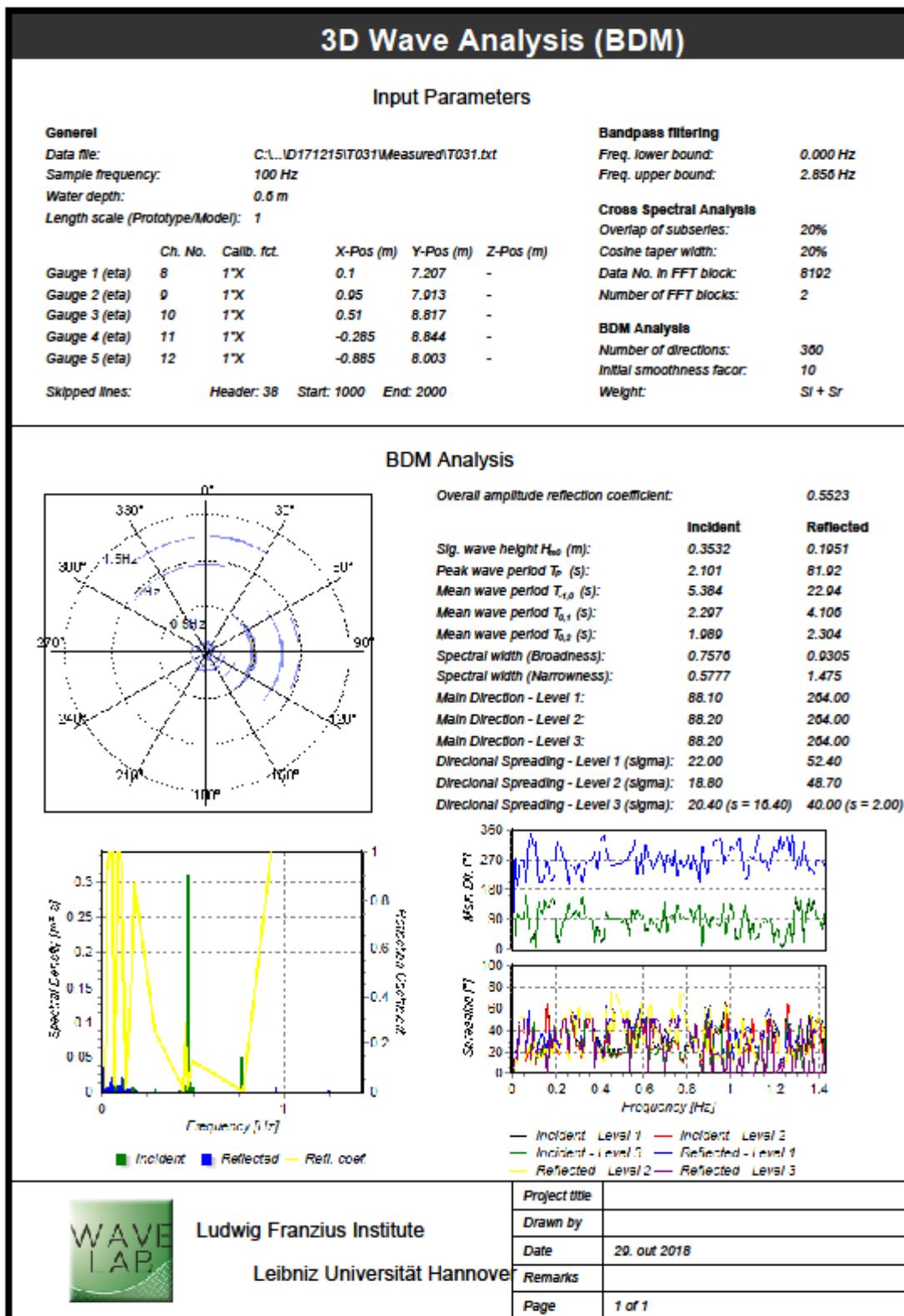


Figura 6.19. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T2-C4.

VI.3.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.20 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T2-C4. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas e modeladas para o ADV 2.2.5 são plotadas nos mesmos gráficos. Nota-se uma boa aderência entre o resultado teórico e observado, que também é expresso pelos pequenos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} .

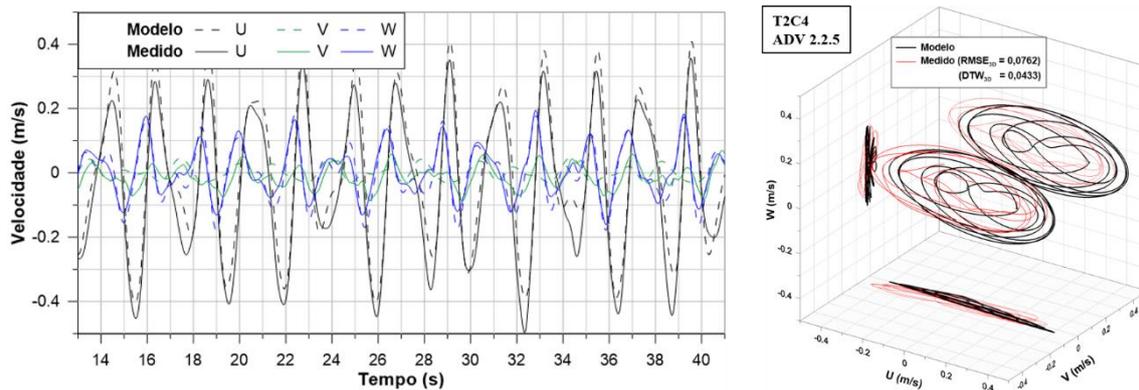


Figura 6.20. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T2-C4.

15 IMFs foram extraídas em todos os testes do subgrupo T2-C, sendo as ondas primárias representadas pelas IMFs 6 e 7 e a onda de interação subtrativa pela IMF 8, ilustradas na Figura 6.21 para o teste T2-C4. Como a diferença de frequência entre as ondas primárias é maior neste caso do que nos testes T4-B2 e T6-B2, nota-se uma melhor separação entre as IMFs 6 e 7. Por outro lado, a IMF 8, que representa a onda de interação subtrativa, apresenta uma pequena oscilação, inexistente para os dois casos anteriormente analisados. Isso ocorre devido à maior proximidade entre as frequências da onda primária 'b' ($f_b = 0,48$ Hz) e da onda interativa ($f^- = 0,29$ Hz), que dificulta a separação entre as IMFs.

A Figura 6.22 apresenta as hodógrafas das IMFs 6 e 7, que correspondem às ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente. Nota-se que a onda 'a' possui uma distorção da sua amplitude, enquanto que a onda 'b' é bem representada pela IMF 7. A Tabela 6.12 resume as características de cada IMF ajustadas pelo MMQNL, para cada um dos 5 ADVs. É notório que no teste T2-C4 o resultado da extração das ondas primárias é melhor do que nos testes T4-B2 e T6-B2. A razão é o maior afastamento entre os seus períodos e, conseqüentemente, na melhor performance do processo de peneiramento da NA-MEMD.

A comparação entre as velocidades orbitais de baixa frequência extraídas e calculadas para todos os testes indicados na Tabela 6.10 estão apresentadas na Figura 6.23 e Figura

6.24. Apenas 5 ciclos de onda (≈ 17 s) são ilustrados. A análise visual indica que as ondas interativas extraídas apresentam um erro em relação à amplitude. No entanto, as direções dos movimentos parecem similares ao esperado. A comparação entre os resultados dos testes T2-C e os dois testes anteriores (T4-B e T6-B) indica a piora dos resultados, o que é atribuído à menor diferença entre o período da onda interativa e da onda primária 'b'.

A Figura 6.23 também apresenta a série temporal das componentes de velocidade para o teste T2-C4. Observa-se que a velocidade horizontal v apresenta uma boa aderência de fase e amplitude em relação à teoria, enquanto que as velocidades u e w possuem um pequeno amortecimento de amplitude e deslocamento de fase. A Tabela 6.13 resume as características da onda de interação subtrativa esperada e observada por cada ADV para o teste T2-C4. Os valores das séries medidas foram obtidos a partir do MMQNL.

Tabela 6.12. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T2-C4.

ADV	Onda	IMF	Amplitude (m/s)			$ vel _{max}$ (m/s)	T (s)	D (°)	
			u	v	w				
Modelo	a	-	0,129	0,011	0,074	0,131	1,30	5,00	
	b	-	0,278	0,024	0,091	0,315	2,10	-5,00	
Medido	2.2.1	a	6	0,082	0,014	0,052	0,153	1,30	9,00
		b	7	0,252	0,023	0,076	0,321	2,11	5,63
	2.2.2	a	6	0,090	0,006	0,043	0,171	1,30	1,93
		b	7	0,239	0,006	0,07	0,301	2,11	-0,94
	2.2.3	a	6	0,079	0,003	0,042	0,142	1,30	0,34
		b	7	0,212	0,026	0,071	0,279	2,10	-6,47
	2.2.4	a	6	0,077	0,012	0,036	0,126	1,30	6,24
		b	7	0,233	0,033	0,075	0,299	2,10	-7,29
	2.2.5	a	6	0,083	0,019	0,04	0,16	1,30	10,29
		b	7	0,248	0,000	0,077	0,303	2,11	0,38

Tabela 6.13. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T2-C4.

ADV	IMF	Amplitude (m/s)			$ vel _{max}$ (m/s)	T (s)			D (°)	
		u	v	w		u	v	w		
Modelo	-	0,053	0,015	0,017	0,055	3,41			15,57	
Medido	2.2.1	8	0,033	0,013	0,006	0,053	3,35	3,39	3,25	20,37
	2.2.2	8	0,035	0,013	0,010	0,044	3,32	3,57	3,46	16,03
	2.2.3	8	0,030	0,009	0,008	0,039	3,36	3,46	3,35	11,73
	2.2.4	8	0,025	0,013	0,007	0,038	3,35	3,51	3,34	19,51
	2.2.5	8	0,026	0,013	0,006	0,037	3,35	3,43	3,30	22,52

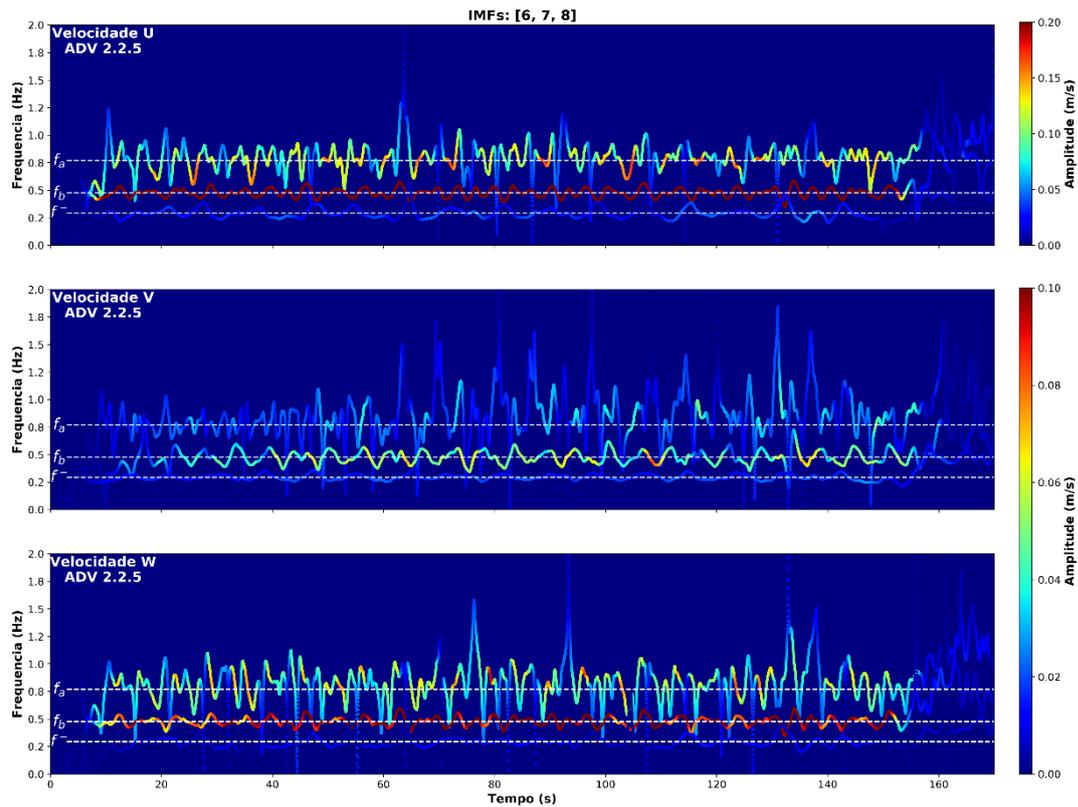


Figura 6.21. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T2-C4. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (8) estão plotadas.

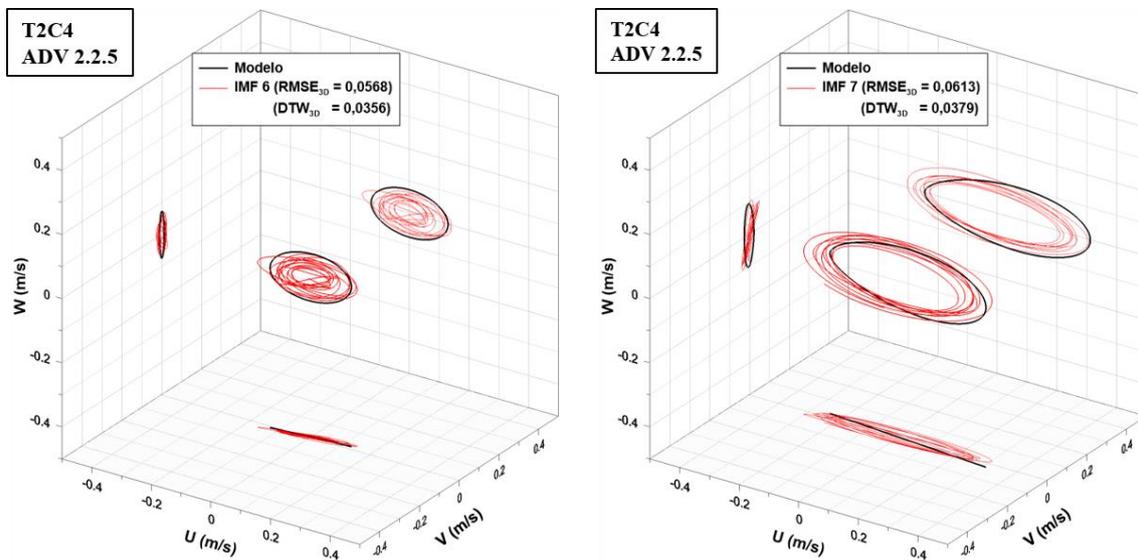


Figura 6.22. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente, do caso T2-C4.

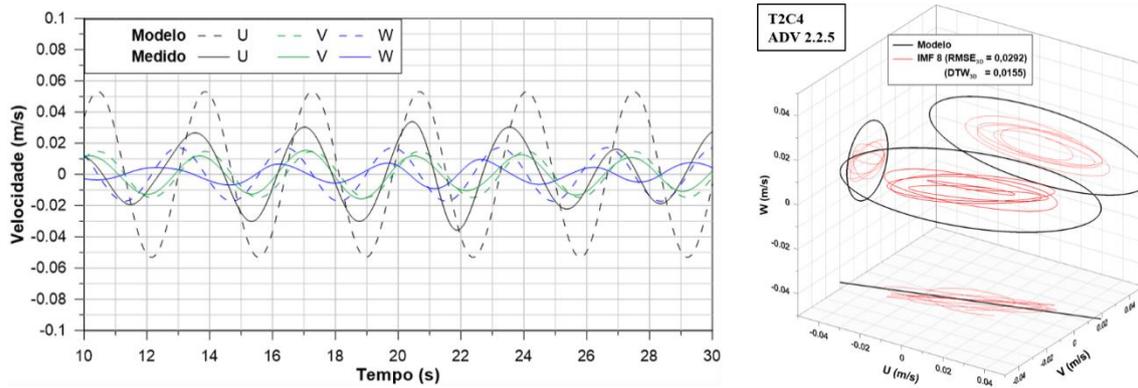


Figura 6.23. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T2-C4.

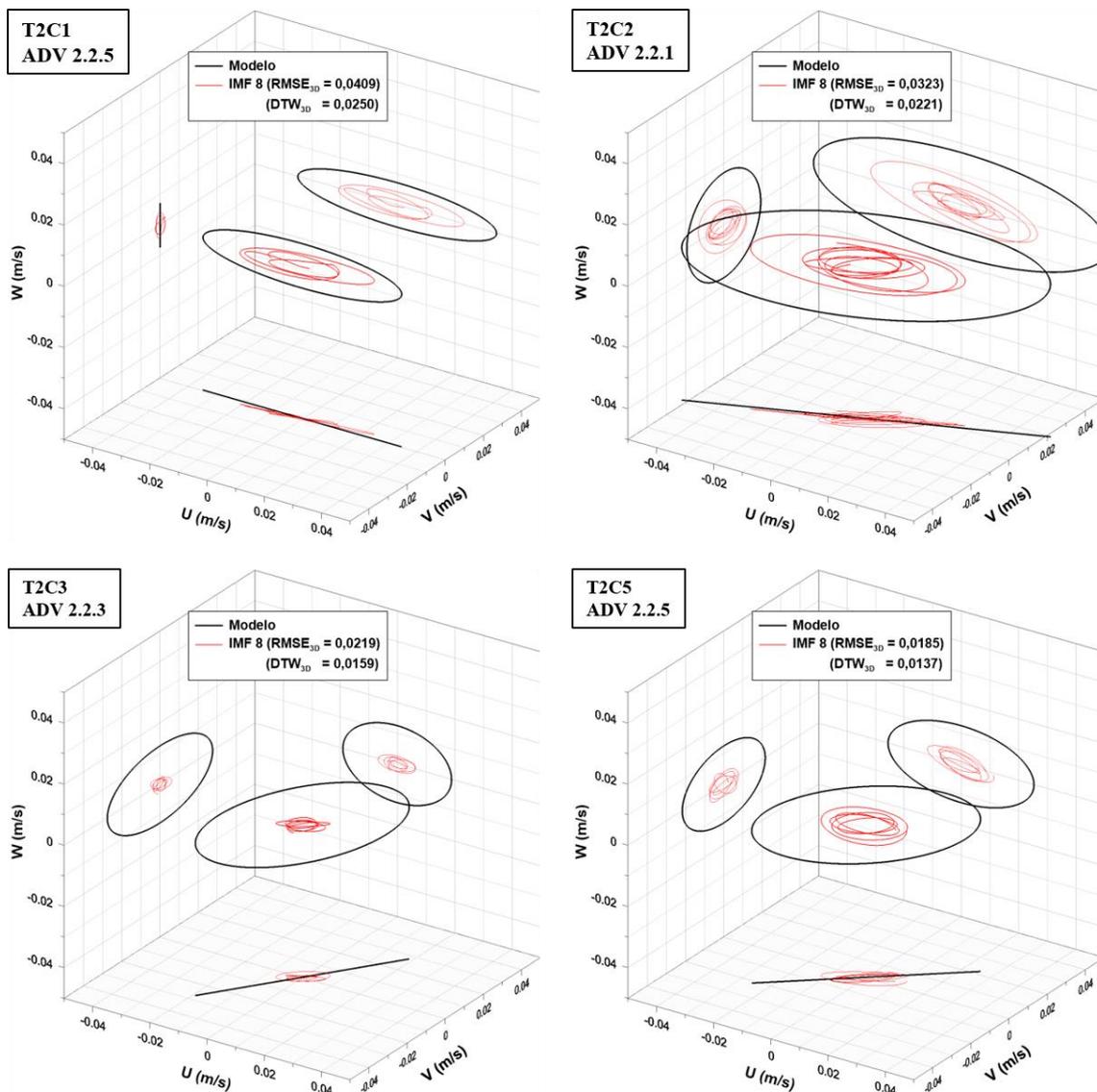


Figura 6.24. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T2-C1, C2, C3 e C5.

VI.4. Testes T5-E

O grupo T5 é uma repetição do grupo T2, porém com ondas menos esbeltas. O objetivo é verificar se a metodologia proposta neste trabalho também é capaz de detectar a onda de interação subtrativa para Bi-Bis “menos não-lineares”.

A Tabela 6.14 resume as características principais do subgrupo T5-E.

Tabela 6.14. Resumo das características dos testes T5-E.

Teste	T5-E									
	h (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	D _a (°)	D _b (°)	T ⁺ (s)	T ⁻ (s)
T5-E1	0,60	0,35	0,05	0,11	1,6	2,1	0	0	0,91	6,72
T5-E2	0,60	0,35	0,05	0,11	1,6	2,1	10	0	0,91	6,72
T5-E3	0,60	0,35	0,05	0,11	1,6	2,1	30	0	0,91	6,72
T5-E4	0,60	0,35	0,05	0,11	1,6	2,1	5	-5	0,91	6,72
T5-E5	0,60	0,35	0,05	0,11	1,6	2,1	15	-15	0,91	6,72

VI.4.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.25 ilustra os primeiros 30 s da série de elevação medida pelo USS 1.2.1 durante o teste T5-E5, além da curva calculada pelas equações de SHARMA e DEAN (1981). A análise direcional do arranjo 2 de USS é ilustrada na Figura 6.26. O tempo completo de simulação (≈ 2 min) foi levado em consideração para o cálculo do espectro direcional.

Diferente dos testes anteriores, o método BDM não foi capaz de detectar a onda de interação subtrativa que, segundo a teoria tem uma altura de 0,002 m, período de 6,72 s e direção de 57,35°. A Tabela 6.16 resume as características principais dos 2 sistemas presentes nas medições. Novamente, os valores calculados de H_s das ondas primárias ‘a’ e ‘b’ ficaram muito próximos ao requerido. A onda ‘b’ apresenta um ângulo significativamente diferente do imposto no gerador. O relatório completo da análise feita pelo WaveLab®, incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.27.

Fazendo-se o ajuste das curvas cossenoidais através do MMQNL, tem-se as seguintes características das ondas Bi-Bis: H_a = 0,05 m, T_a = 1,60 s e H_b = 0,11 m e T_b = 2,10 s.

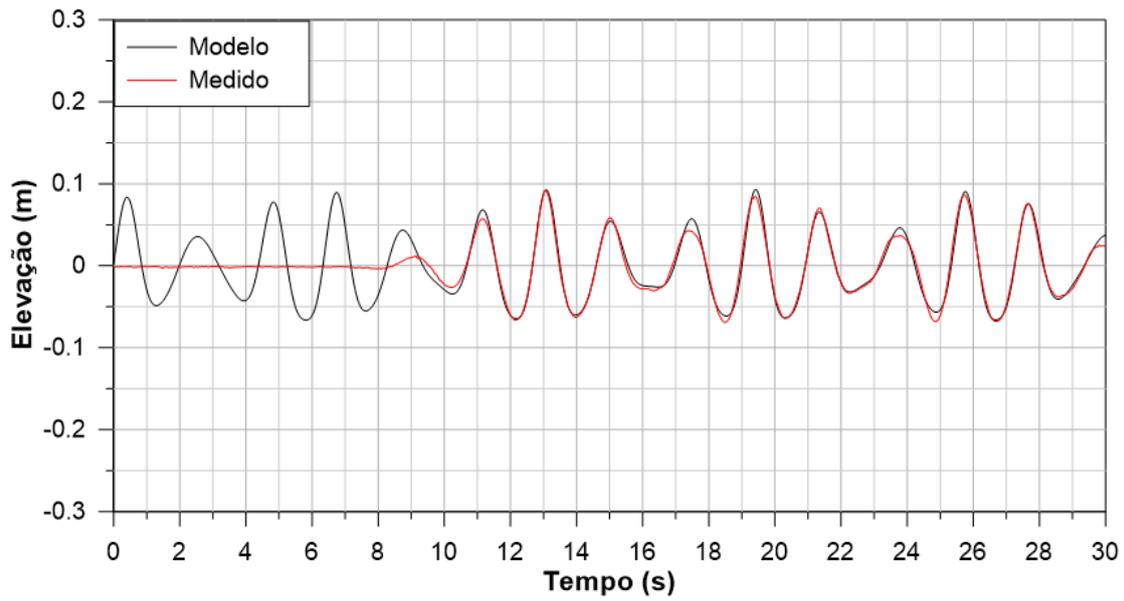


Figura 6.25. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T5-E5.

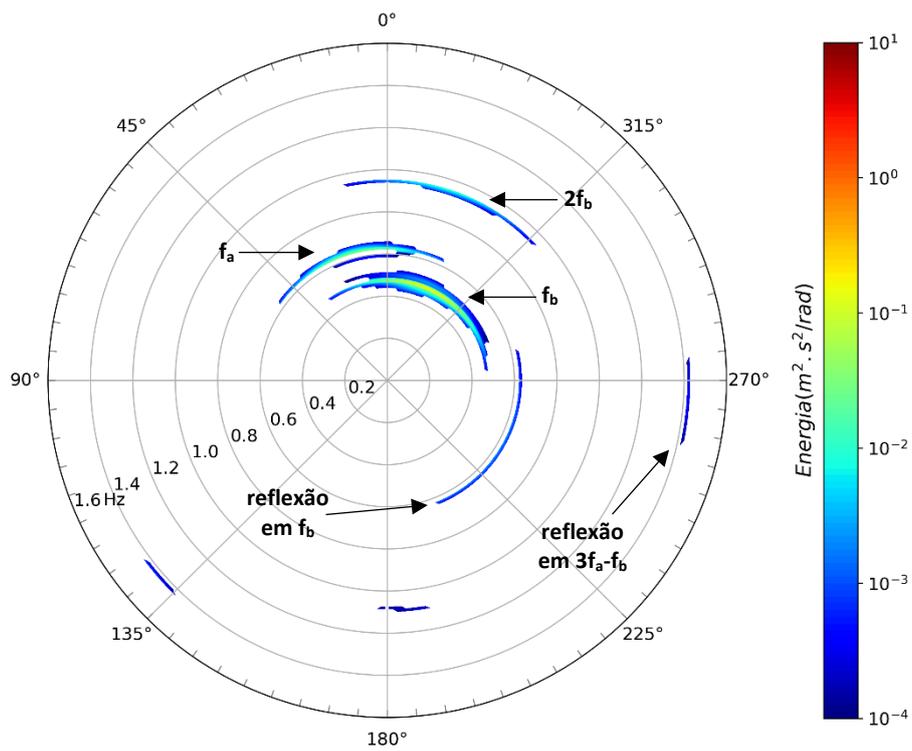


Figura 6.26. Espectro direcional calculado para o teste T5-E5.

Tabela 6.15. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T5-E5.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,117	2,10	-23,50
a	0,054	1,61	13,50
b	0,096	2,10	-23,50
Subtrativa	-	-	-

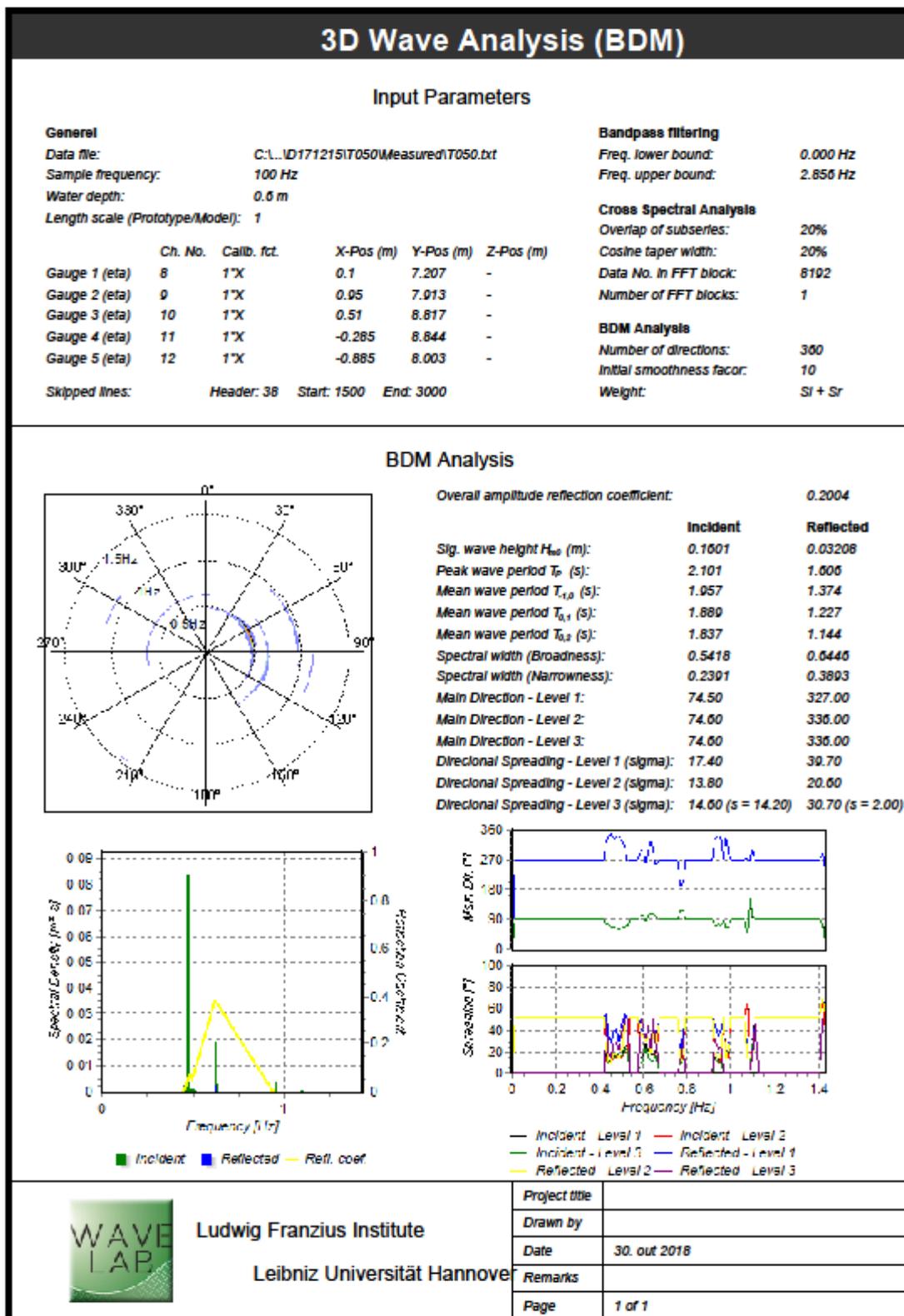


Figura 6.27. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T5-E5.

VI.4.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.28 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T5-E5. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas e modeladas para o ADV 2.2.1 são plotadas nos mesmos gráficos. Nota-se uma boa aderência entre o resultado teórico e observado, que também é expresso pelos baixos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} .

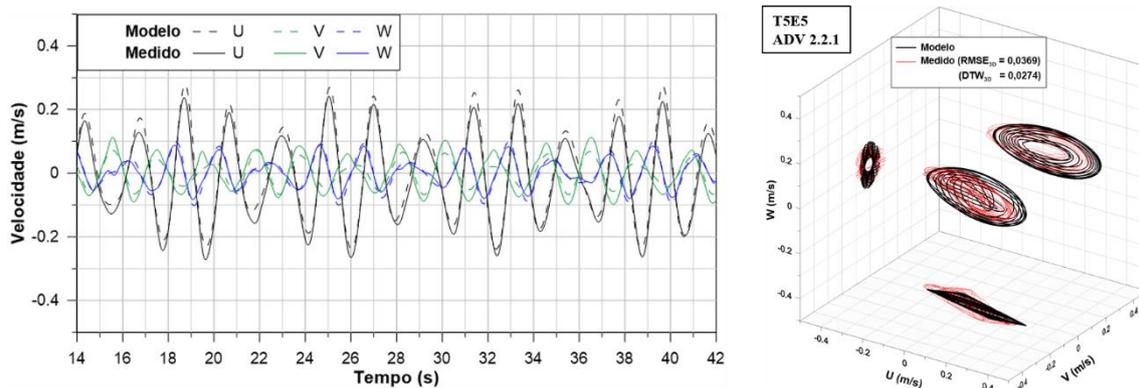


Figura 6.28. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T5-E5.

Foram extraídas 15 IMFs em todos os testes do subgrupo T5-E, exceto para o subgrupo T5-E3, que obteve 16 IMFs. Em todos os casos as ondas primárias são representadas pelas IMFs 6 e 7 e a onda de interação subtrativa pela IMF 9 ou 10 (Figura 6.29), dependendo do teste. Observa-se que o problema de mistura de modo está presente nas IMFs das ondas primárias, mas não na IMF da onda subtrativa.

A Figura 6.30 apresenta as hodógrafas das IMFs 6 e 7, que correspondem às ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente. Nota-se que tanto a onda 'a' quanto a onda 'b' possuem uma alteração da sua amplitude, resultado da mistura de modo. A Tabela 6.16 resume as características de cada IMF ajustadas pelo MMQNL para cada um dos 5 ADVs. Observa-se que o resultado é pior do que o teste anterior (T2-C4), fruto da menor diferença de período entre as ondas primárias.

A comparação entre as velocidades orbitais de baixa frequência extraídas e calculadas para todos os testes indicados na Tabela 6.14 estão apresentadas na Figura 6.31 e Figura 6.32. Apenas 5 ciclos de onda ($\approx 33,6$ s) são ilustrados. A análise visual indica que as amplitudes e direções dos movimentos oscilatórios foram captados de forma adequada, o que se justifica pela aparente inexistência de efeitos de mistura de modo na IMF correspondente.

A Figura 6.31 também apresenta a série temporal das componentes de velocidade para o teste T5-E5. Observa-se que em todas as componentes a amplitude do movimento foi capturada de forma satisfatória. No entanto, as velocidades u e w apresentam pequenos deslocamentos de fase. A Tabela 6.17 resume as características da onda de interação subtrativa esperada e observada pelos ADVs para o teste T5-E5. Os valores das séries medidas foram obtidos a partir do MMQNL. Numericamente, o erro de direção é significativo, mas basta observar os valores das amplitudes de cada componente ou a própria Figura 6.31 para notar que isso só ocorre devido à pequena magnitude do movimento de baixa frequência. Os casos T5-E3 e E5 são muito mais afetados por pequenos erros do que os demais testes do grupo T5.

Tabela 6.16. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T5-E5.

ADV	Onda	IMF	Amplitude (m/s)			vel _{max} (m/s)	T (s)	D (°)	
			u	v	w				
Modelo	a	-	0,074	0,020	0,034	0,078	1,60	15,00	
	b	-	0,185	0,050	0,063	0,209	2,10	-15,00	
Medido	2.2.1	a	6	0,016	0,005	0,008	0,077	1,60	6,50
		b	7	0,170	0,071	0,051	0,242	2,11	-20,14
	2.2.2	a	6	0,018	0,005	0,009	0,072	1,60	6,70
		b	7	0,182	0,048	0,072	0,259	2,10	-11,75
	2.2.3	a	6	0,016	0,003	0,009	0,078	1,60	2,05
		b	7	0,149	0,053	0,057	0,232	2,11	-15,53
	2.2.4	a	6	0,020	0,003	0,011	0,094	1,60	4,52
		b	7	0,136	0,031	0,037	0,200	2,11	-9,47
	2.2.5	a	6	0,022	0,001	0,007	0,099	1,60	0,25
		b	7	0,152	0,047	0,035	0,230	2,10	-14,99

Tabela 6.17. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T5-E5.

ADV	IMF	Amplitude (m/s)			vel _{max} (m/s)	T (s)			D (°)	
		u	v	w		u	v	w		
Modelo	-	0,004	0,006	0,002	0,007	6,72			57,35	
Medido	2.2.1	10	0,004	0,003	0,001	0,015	6,45	6,70	6,85	0,57
	2.2.2	10	0,003	0,005	0,006	0,008	6,77	9,52	8,31	28,16
	2.2.3	10	0,003	0,002	0,002	0,006	8,12	7,09	6,94	2,27
	2.2.4	10	0,003	0,003	0,000	0,006	7,16	6,88	5,57	42,68
	2.2.5	10	0,003	0,004	0,002	0,007	6,44	7,09	6,62	41,02

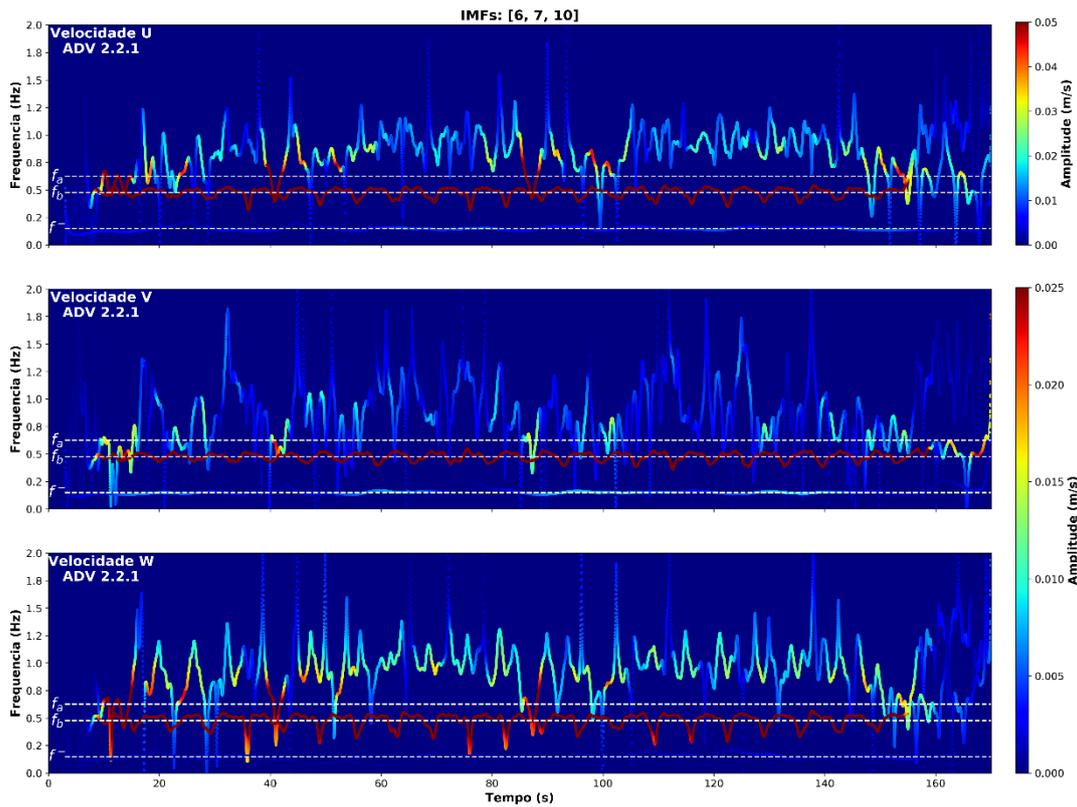


Figura 6.29. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T5-E5. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (10) estão plotadas.

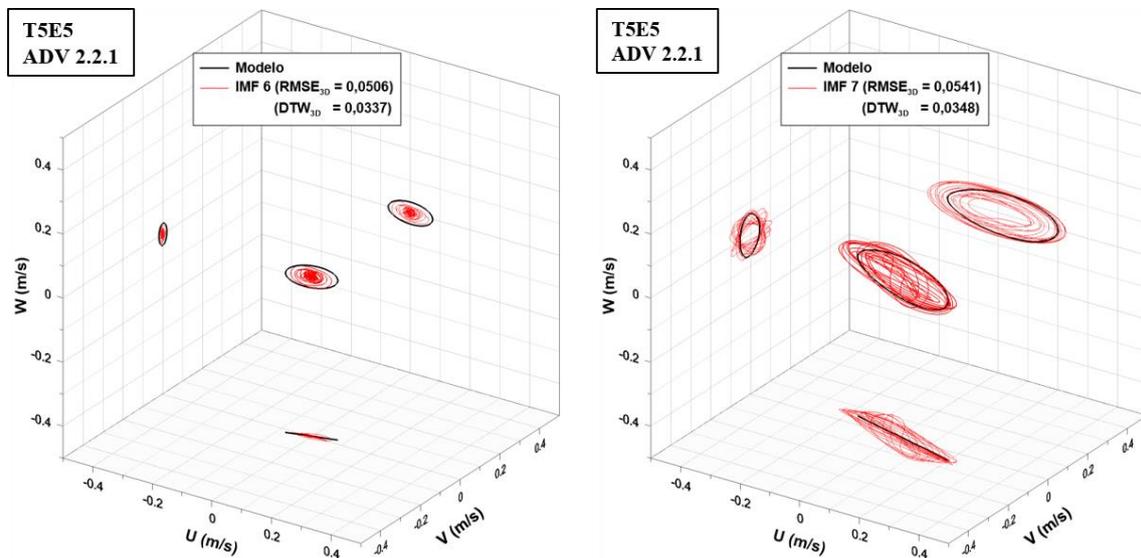


Figura 6.30. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente, do caso T5-E5.

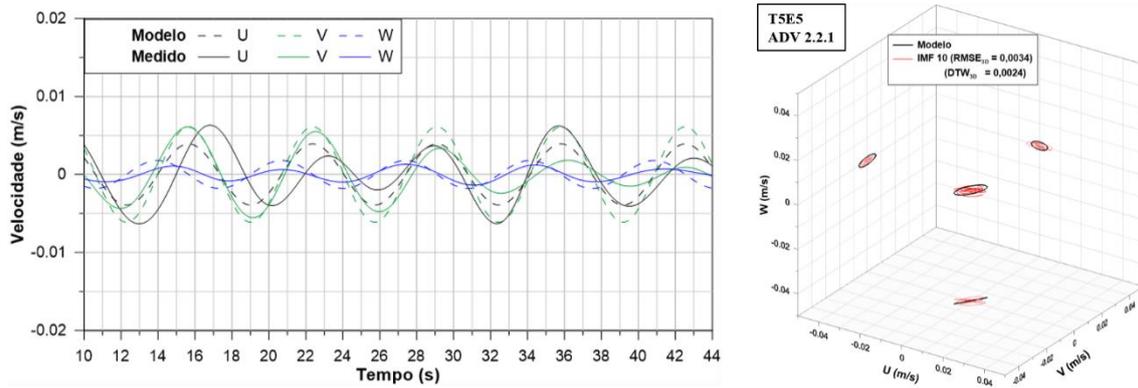


Figura 6.31. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T5-E5.

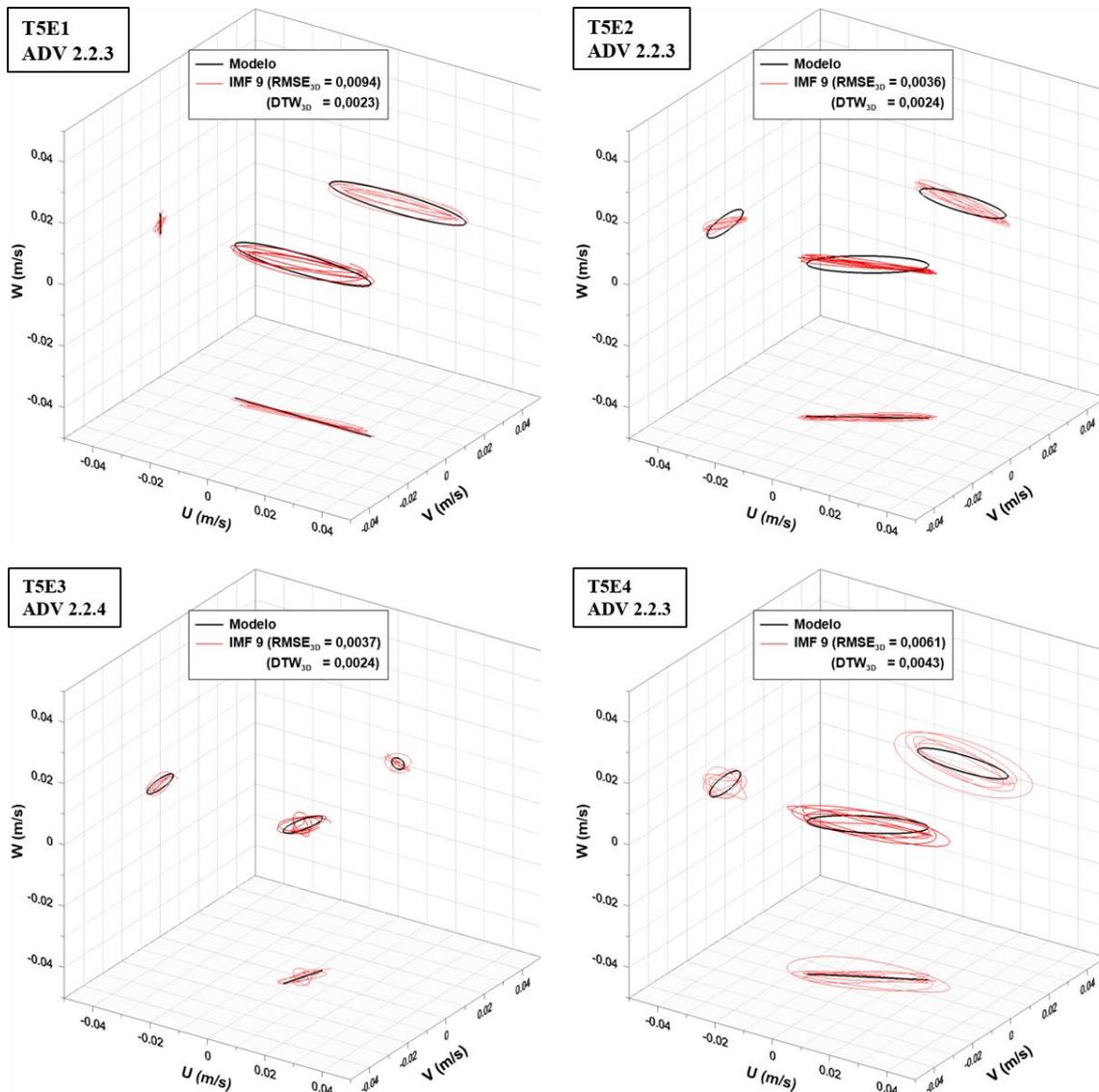


Figura 6.32. Comparação entre hodógrafa modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T5-E1, E2, E3 e E4.

VI.5. Testes T1-E

Nos testes exemplificados até aqui, as ondas primárias apresentam alturas distintas. Nesta seção, um subgrupo do teste T1 é apresentado, onde as ondas ‘a’ e ‘b’ possuem mesma altura, porém períodos e direções diferentes.

A Tabela 6.18 resume as características principais do subgrupo T1-E.

Tabela 6.18. Resumo das características dos testes T1-E.

Teste	T1-E									
	h (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	D _a (°)	D _b (°)	T ⁺ (s)	T ⁻ (s)
T1-E1	0,60	0,35	0,13	0,13	1,5	2,3	0	0	0,91	4,31
T1-E2	0,60	0,35	0,13	0,13	1,5	2,3	10	0	0,91	4,31
T1-E3	0,60	0,35	0,13	0,13	1,5	2,3	30	0	0,91	4,31
T1-E4	0,60	0,35	0,13	0,13	1,5	2,3	5	-5	0,91	4,31
T1-E5	0,60	0,35	0,13	0,13	1,5	2,3	15	-15	0,91	4,31

VI.5.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.33 ilustra os primeiros 30 s da série de elevação medida pelo USS 1.2.1 durante o teste T1-E3, além da curva calculada pelas equações de SHARMA e DEAN (1981). A análise direcional do arranjo 2 de USS é ilustrada na Figura 6.34. O tempo completo de simulação (≈ 2 min) foi levado em consideração para o cálculo do espectro direcional.

Observa-se que o método BDM foi capaz de extrair as ondas primárias, ondas de interação subtrativa de 2^a ($f_a - f_b$) e 3^a ordem ($2f_a - f_b$), e ondas refletidas. Dentre as reflexões, destacam-se aquela com período igual a $2f_b$ e a da onda de interação positiva de 2^a ordem, $f_a + f_b$. A Tabela 6.19 resume as características principais dos dois sistemas presentes nas medições. Novamente, os valores calculados de H_s das ondas primárias ficou muito próximo do requerido. A onda de interação subtrativa $f_a - f_b$ para este teste possui, teoricamente, uma altura de 0,012 m, período de 4,31 s e direção de 60,25°. O método espectral identificou de forma adequada sua altura, mas não captou adequadamente sua direção. O período foi bem identificado. O relatório completo da análise feita pelo WaveLab[®], incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.35.

Fazendo-se o ajuste das curvas cossenoidais através do MMQNL, tem-se as seguintes características das ondas Bi-Bis: $H_a = 0,11$ m, $T_a = 1,50$ s e $H_b = 0,11$ m e $T_b = 2,30$ s.

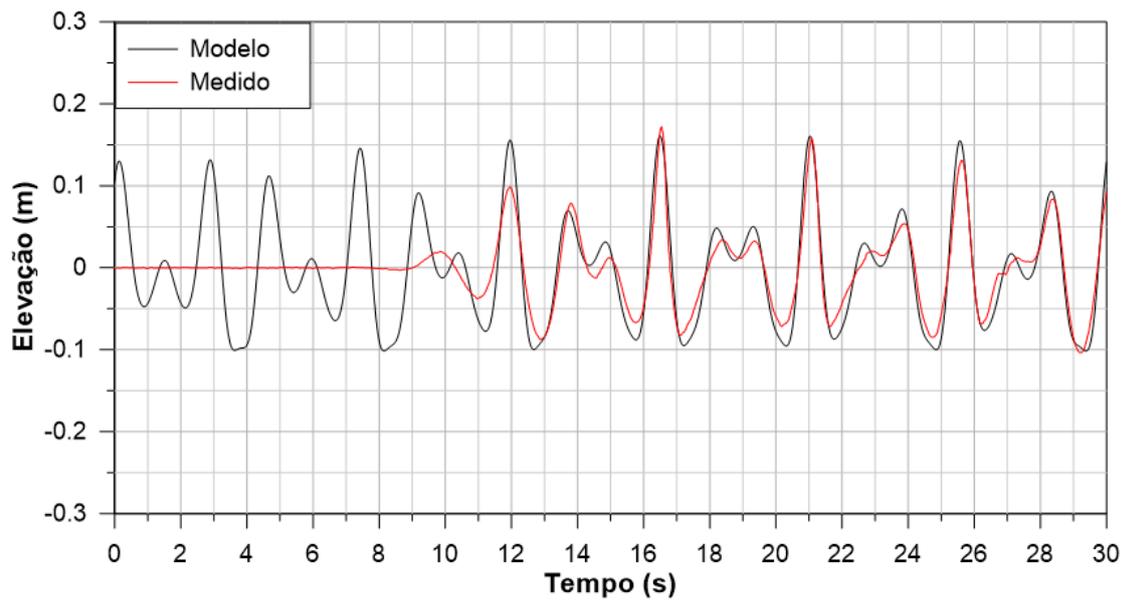


Figura 6.33. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T1-E3.

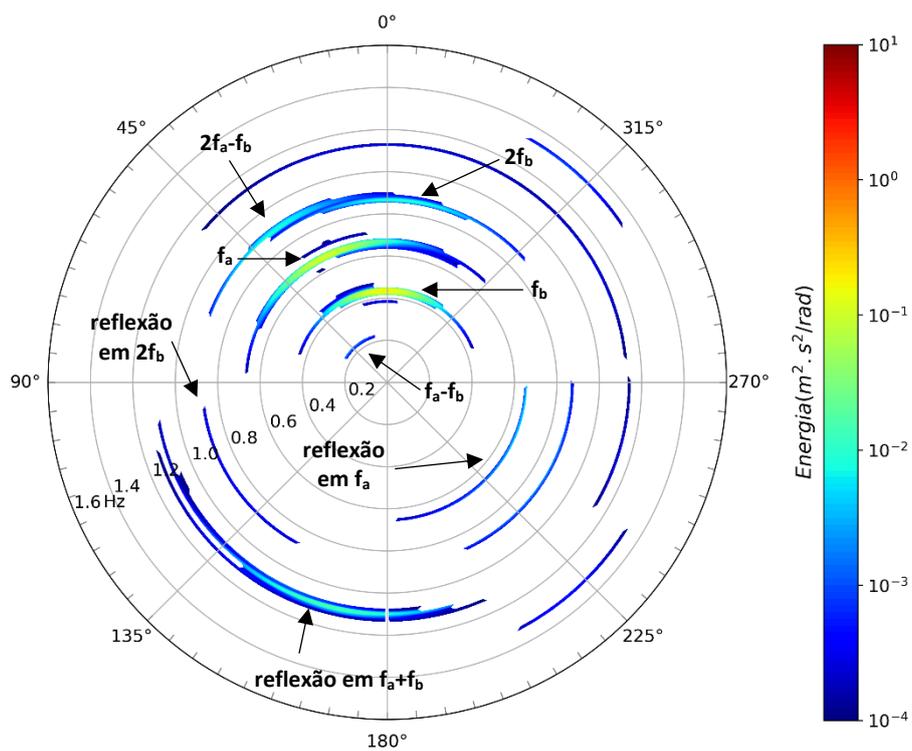


Figura 6.34. Espectro direcional calculado para o teste T1-E3.

Tabela 6.19. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T1-E3.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,184	2,28	1,50
a	0,116	1,51	25,50
b	0,126	2,28	1,50
Subtrativa	0,010	4,31	48,50

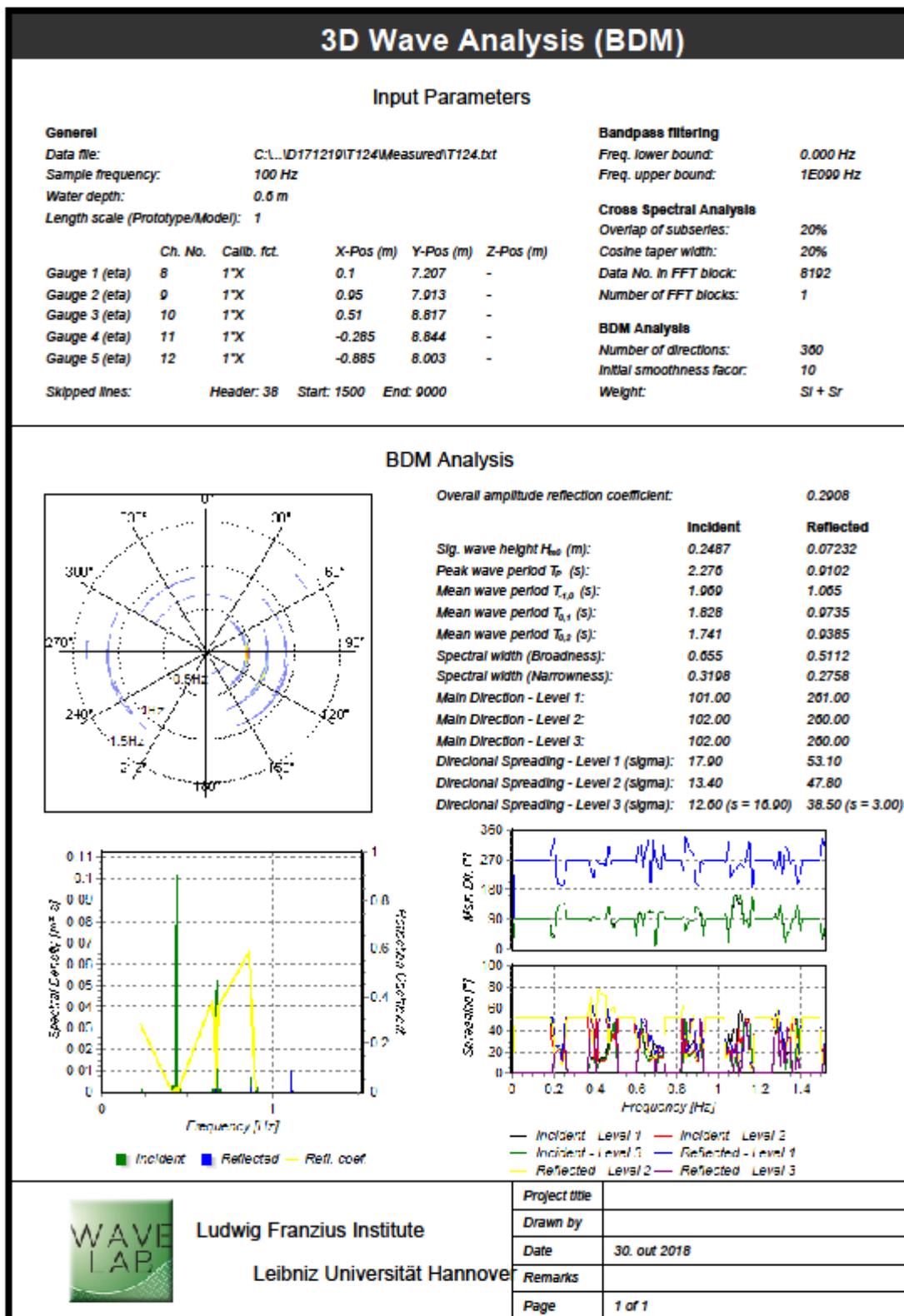


Figura 6.35. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T1-E3.

VI.5.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.36 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T1-E3. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas e modeladas para o ADV 2.2.5 são plotadas nos mesmos gráficos. Nota-se uma boa aderência entre o resultado teórico e observado, que também é expresso pelos baixos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} .

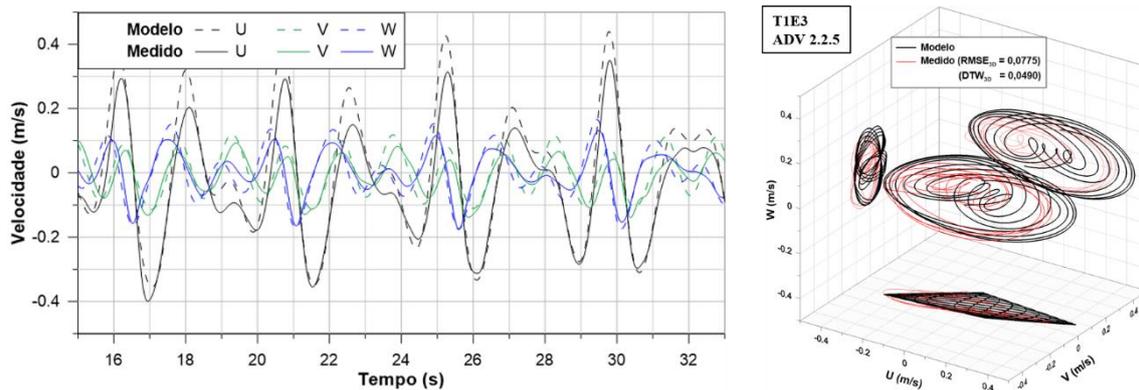


Figura 6.36. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e medidas resultantes das Bi-Bis para o caso T1-E3.

O peneiramento da MEMD gerou 14 IMFs para o teste T1-E1, 15 IMFs para os testes T1-E2/E4/E5 e 16 IMFs para o caso T1-E3. Em todos os casos as ondas primárias são representadas pelas IMFs 6 e 7 e a onda de interação subtrativa pela IMF 8, exceto para o teste T1-E2, em que as ondas ‘a’ e ‘b’ são representadas pelas IMFs 7 e 8, respectivamente, e a onda subtrativa pela IMF 9. A Figura 6.37 ilustra a transformada de Hilbert das IMFs de maior interesse.

A Figura 6.38 apresenta as hodógrafas das IMFs 6 e 7, que correspondem às ondas primárias ‘a’ e ‘b’, respectivamente. Nota-se que tanto a onda ‘a’ quanto a onda ‘b’ possuem um pequeno desvio da sua amplitude, resultado da mistura de modo. No entanto, as direções de cada onda são bem capturadas para alguns ADVs. A Tabela 6.20 resume as características de cada IMF ajustadas pelo MMQNL, para cada um dos 5 ADVs.

A comparação entre as velocidades orbitais de baixa frequência extraídas e calculadas para todos os testes indicados na Tabela 6.18 estão apresentadas na Figura 6.39 e Figura 6.40. Apenas 5 ciclos de onda ($\approx 22,6$ s) são ilustrados. A análise visual indica que as amplitudes e direções dos movimentos oscilatórios foram capturados de forma adequada, com um pior desempenho do teste T1-E5.

A Figura 6.39 também apresenta a série temporal das componentes de velocidade para o teste T1-E3. Observa-se que em todas as componentes a amplitude e a fase do movimento foram capturadas adequadamente. A Tabela 6.21 resume as características da onda de interação subtrativa esperada e observada pelos ADVs para o teste T1-E3. Os valores das séries medidas foram obtidos a partir do MMQNL. Observa-se uma boa aderência entre os valores medidos e modelados em todos os parâmetros da onda de interação subtrativa.

Tabela 6.20. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T1-E3.

ADV	Onda	IMF	Amplitude (m/s)			vel _{max} (m/s)	T (s)	D (°)	
			u	v	w				
Modelo	a	-	0,166	0,096	0,092	0,198	1,50	30,00	
	b	-	0,233	0,000	0,069	0,264	2,30	0,00	
Medido	2.2.1	a	6	0,120	0,066	0,052	0,247	1,51	26,09
		b	7	0,162	0,003	0,038	0,226	2,30	1,61
	2.2.2	a	6	0,141	0,055	0,070	0,235	1,50	20,34
		b	7	0,169	0,009	0,048	0,238	2,30	3,18
	2.2.3	a	6	0,139	0,075	0,071	0,233	1,51	27,38
		b	7	0,177	0,011	0,044	0,222	2,30	-3,04
	2.2.4	a	6	0,130	0,066	0,068	0,235	1,50	25,60
		b	7	0,171	0,008	0,041	0,196	2,31	-2,38
	2.2.5	a	6	0,125	0,056	0,055	0,240	1,50	22,35
		b	7	0,148	0,003	0,044	0,180	2,30	1,69

Tabela 6.21. Parâmetros modelados e medidos da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear: teste T1-E3.

ADV	IMF	Amplitude (m/s)			vel _{max} (m/s)	T (s)			D (°)	
		u	v	w		u	v	w		
Modelo	-	0,017	0,029	0,010	0,033	4,31			60,25	
Medido	2.2.1	8	0,020	0,023	0,009	0,049	4,15	4,28	4,34	49,82
	2.2.2	8	0,016	0,023	0,012	0,043	4,32	4,35	4,26	52,83
	2.2.3	8	0,023	0,023	0,011	0,041	4,59	4,30	4,28	46,53
	2.2.4	8	0,017	0,030	0,011	0,046	4,56	4,35	4,34	58,18
	2.2.5	8	0,019	0,030	0,009	0,044	4,23	4,34	4,22	72,26

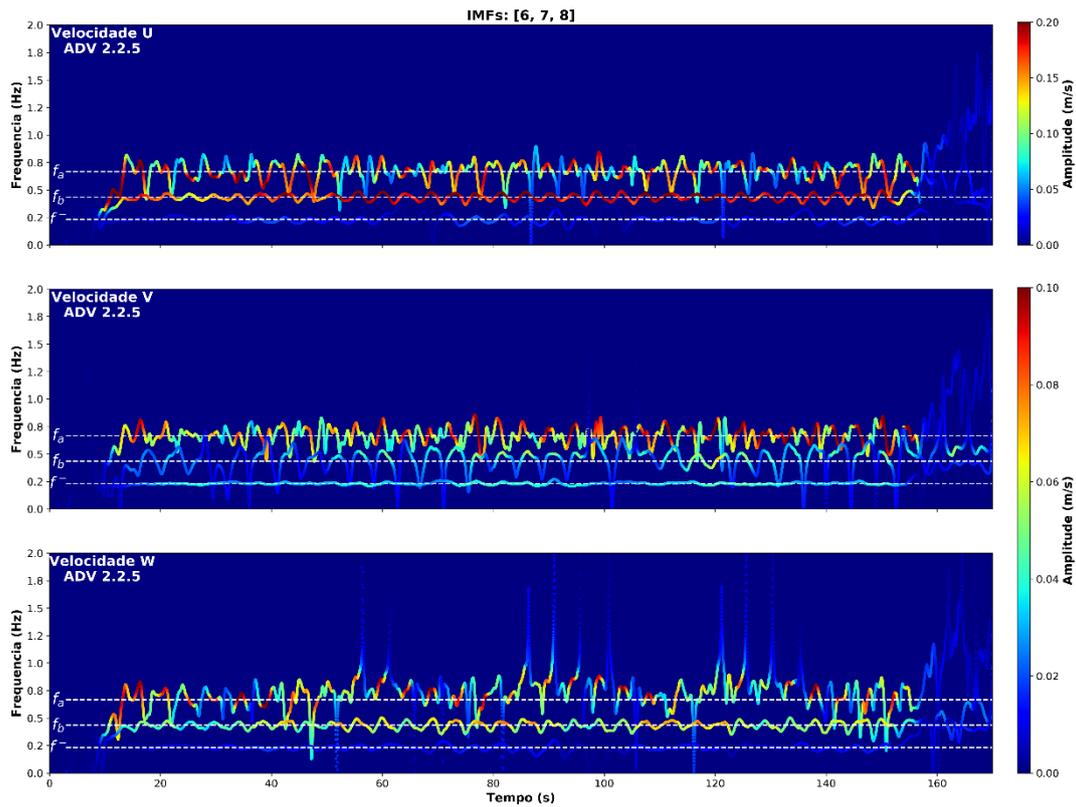


Figura 6.37. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T1-E3. Apenas as IMFs das ondas primárias (6 e 7) e de interação subtrativa (9) estão plotadas.

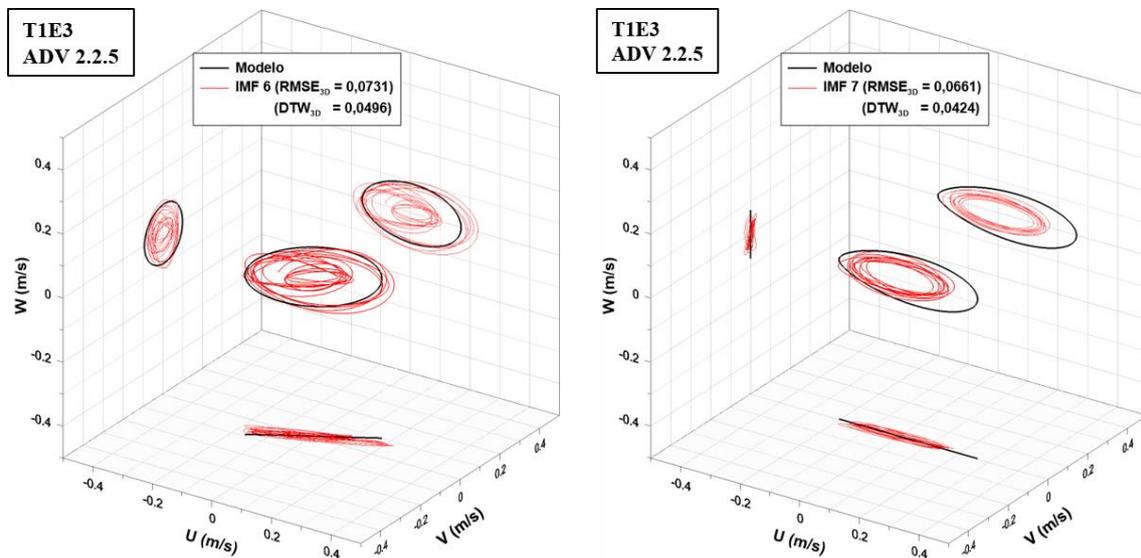


Figura 6.38. Comparação entre hodógrafas modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente, do caso T1-E3.

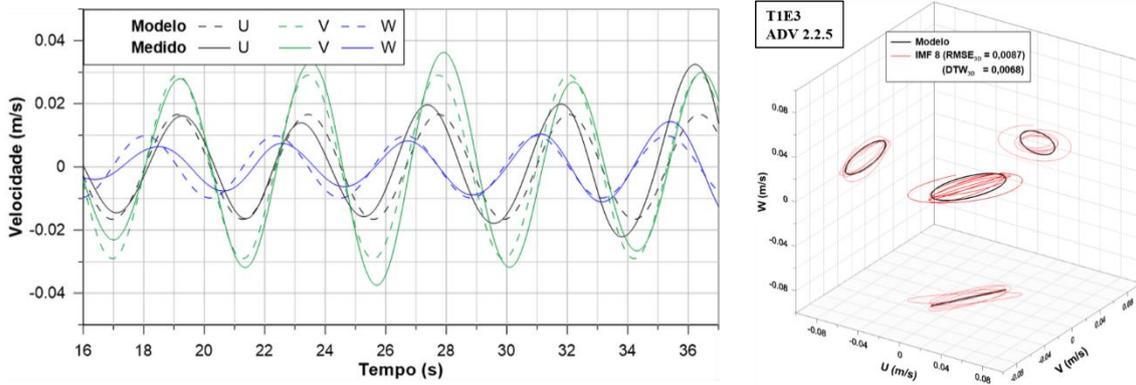


Figura 6.39. Comparação entre as séries temporais e hodógrafa modeladas (SHARMA e DEAN, 1981) e extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T1-E3.

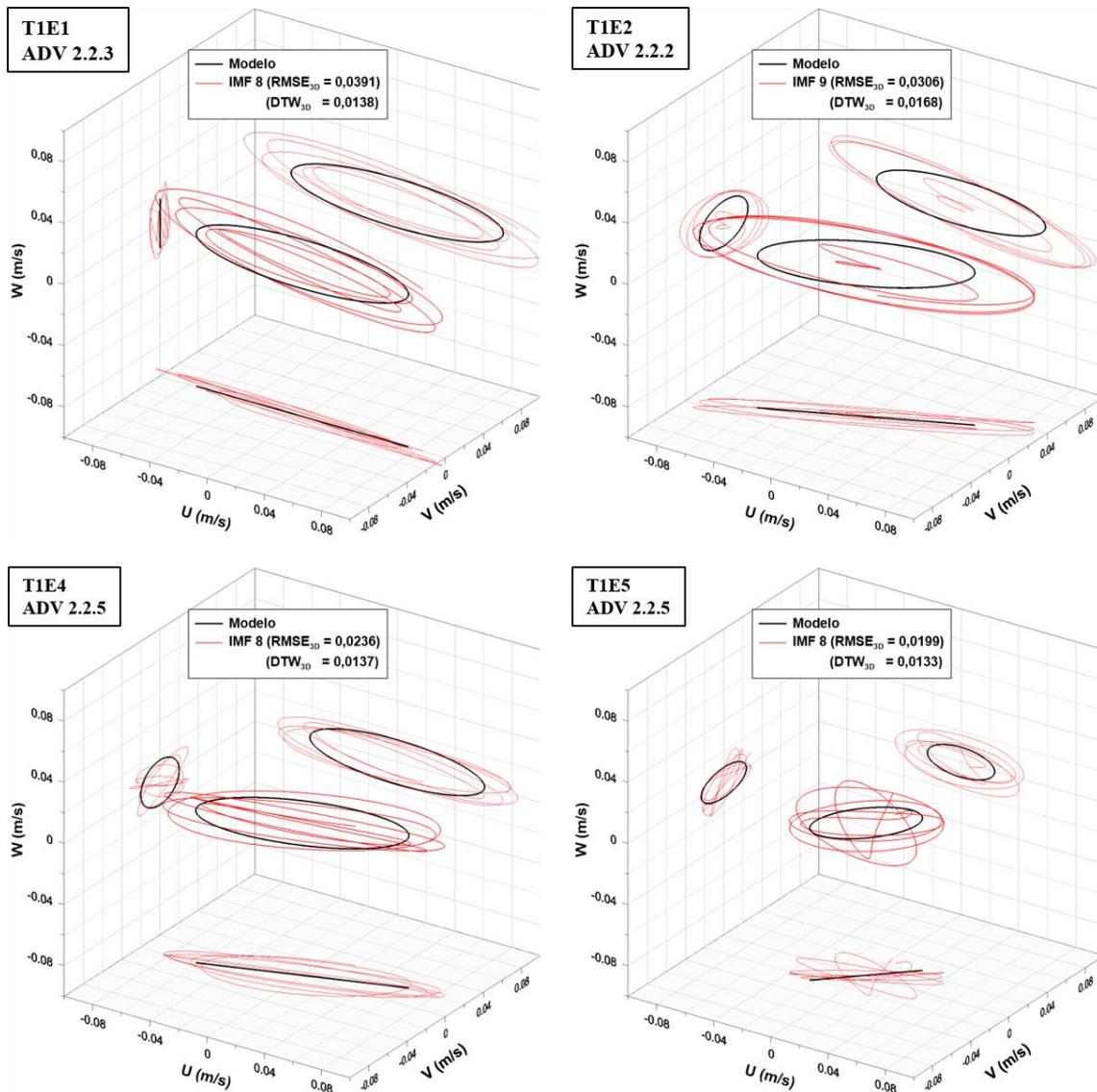


Figura 6.40. Comparação entre hodógrafa modelada (Sharma and Dean, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para os casos T1-E1, E2, E4 e E5.

VI.6. Testes T3-A

O subgrupo A, D e F se caracterizam por possuírem ondas primárias de mesmo período, mas que possam ser não-colineares, como no caso do estudo de DALRYMPLE (1975). Nesta situação, a 2ª ordem de interação gera uma onda estática e que, teoricamente, não produz velocidade hidrodinâmica de baixa frequência.

Para exemplificar a ausência de velocidades de 2ª ordem, o teste T3-A foi escolhido. A Tabela 6.22 resume as principais características deste subgrupo de testes.

Tabela 6.22. Resumo das características dos testes T3-A.

Teste	T3-A									
	h (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	D _a (°)	D _b (°)	T ⁺ (s)	T ⁻ (s)
T3-A1	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	1,1	0	0	0,55	-
T3-A2	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	1,1	10	0	0,55	-
T3-A3	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	1,1	30	0	0,55	-
T3-A4	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	1,1	5	-5	0,55	-
T3-A5	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	1,1	15	-15	0,55	-

VI.6.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.41 ilustra os primeiros 30 s da série de elevação medida pelo USS 1.2.3 durante o teste T3-A2. A análise direcional do arranjo 2 de USS é ilustrada na Figura 6.42. O tempo completo de simulação (≈ 2 min) foi levado em consideração para o cálculo do espectro direcional.

Observa-se que o método BDM não foi capaz de diferenciar o aspecto bidirecional das ondas primárias, além de não detectar qualquer energia na faixa de baixa frequência. A Tabela 6.23 resume as características principais do sistema identificado nas medições. O relatório completo da análise feita pelo WaveLab[®], incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.43.

Para o teste em questão, o MMQNL não converge para uma solução, incapacitando o ajuste de fases entre as séries medida e modelada.

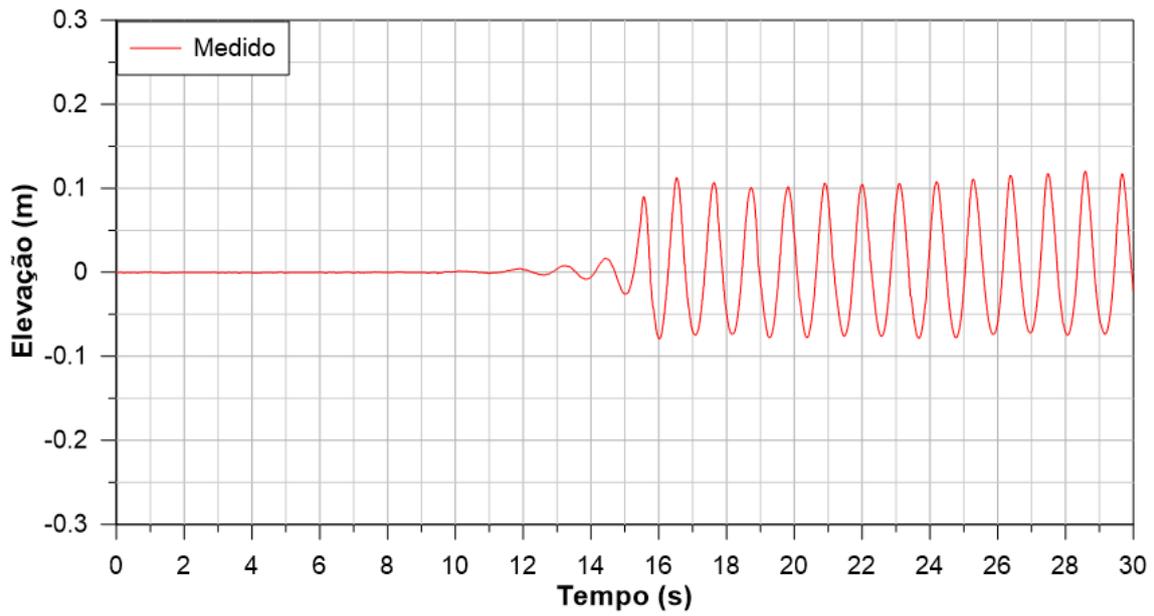


Figura 6.41. Série de elevação do USS 1.2.3 durante os primeiros 30 s de simulação do teste T3-A2.

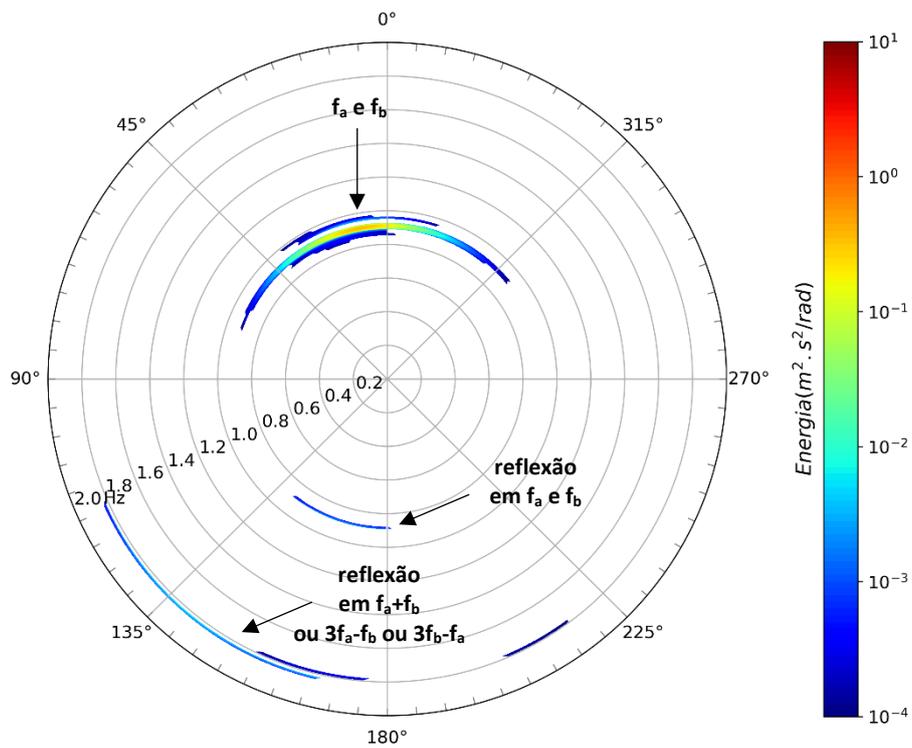


Figura 6.42. Espectro direcional calculado para o teste T3-A2.

Tabela 6.23. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T3-A2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,232	1,09	10,50
a	-	-	-
b	-	-	-
Subtrativa	-	-	-

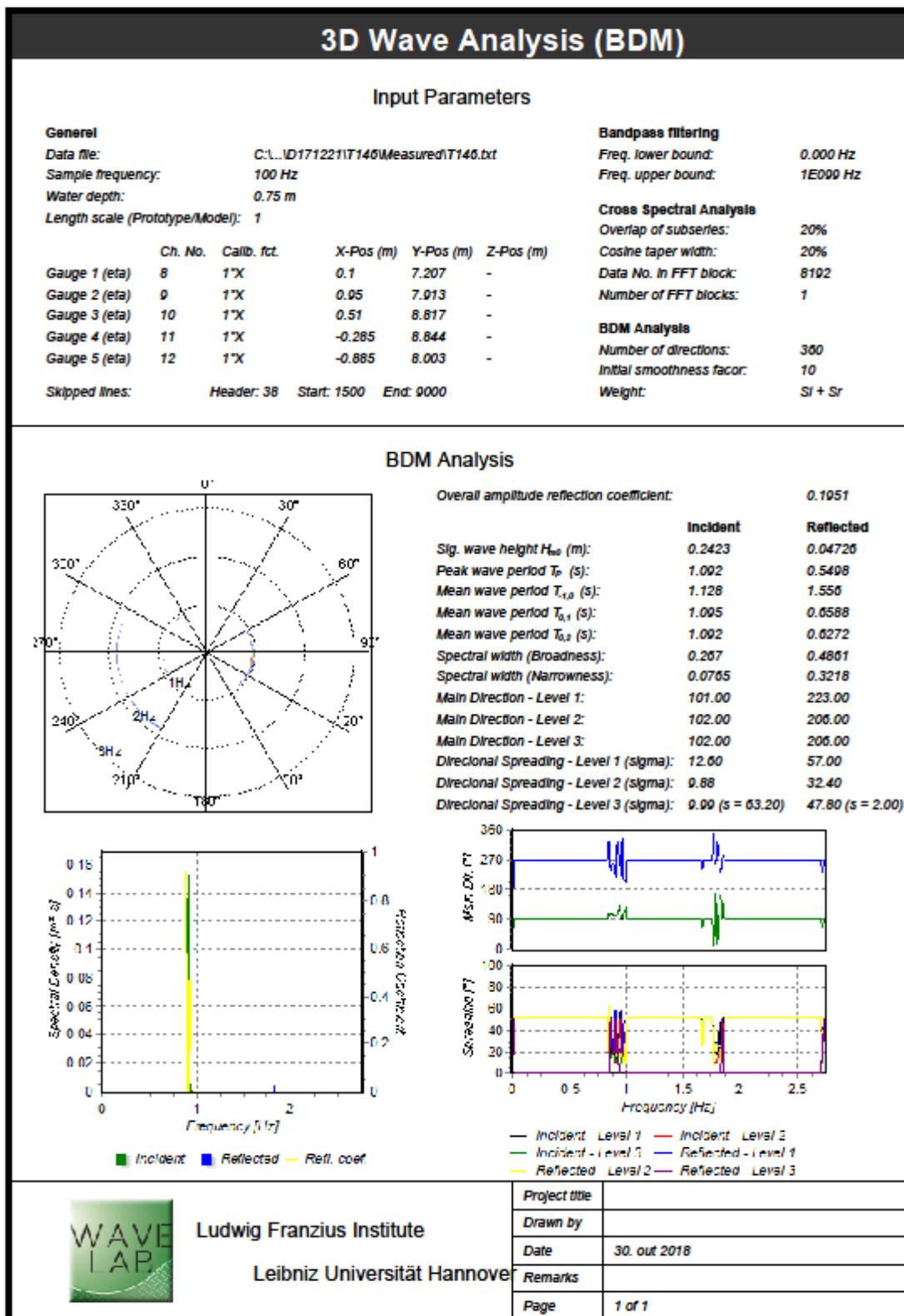


Figura 6.43. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T3-A2.

VI.6.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.44 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T3-A2. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas pelo o ADV 2.2.2 são plotadas nos mesmos gráficos. Não se pode fazer a comparação com os dados modelados, pois o MMQNL não foi capaz de caracterizar a fase de cada onda.

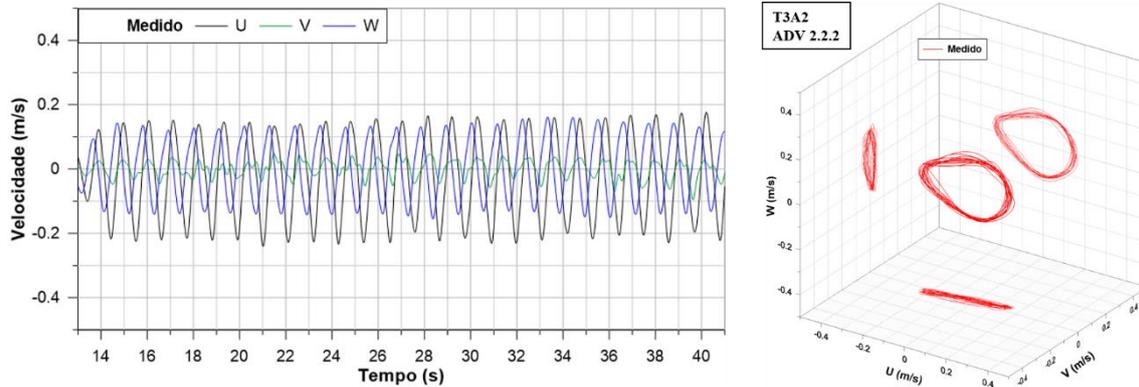


Figura 6.44. Séries temporais e hodógrafa resultantes das Bi-Bis para o caso T3-A2.

O peneiramento da MEMD gerou 14 IMFs para o teste T3-A2 e 15 IMFs para os demais testes do subgrupo T3-A. Como a frequência das ondas primárias é a mesma, o peneiramento da MEMD não apresentou bons resultados. As duas ondas primárias são representadas apenas por uma IMF (6) para todos os casos, exceto para o teste T3-A2, onde as IMFs 5 e 6 oscilam em torno da frequência das ondas ‘a’ e ‘b’. A Figura 6.45 ilustra a transformada de Hilbert das IMFs que estão relacionadas às ondas primárias e todas as outras com período maior que 1,1 s.

É evidente que apesar da MEMD ter separado duas IMFs com a mesma faixa de período, há uma forte mistura de amplitude entre os modos, uma vez que a IMF 5 possui magnitudes elevadas enquanto a amplitude da IMF 6 é quase nula. A Figura 6.46 ilustra as IMFs 5 e 6 e compara com as hodógrafas primárias modeladas. Os erros numéricos não são informados, uma vez que não foi possível fazer o ajuste de fase das ondas Bi-Bi a partir do MMQNL.

A Figura 6.47 apresenta a visualização tridimensional das IMFs 7, 8, 9 e 10 para o ADV 2.2.2. Nota-se que nenhuma apresenta uma característica oscilatória nítida, ou seja, nenhuma onda interativa de baixa frequência aparenta estar presente na bacia em função da propagação das ondas monocromáticas-bidirecionais, como esperado.

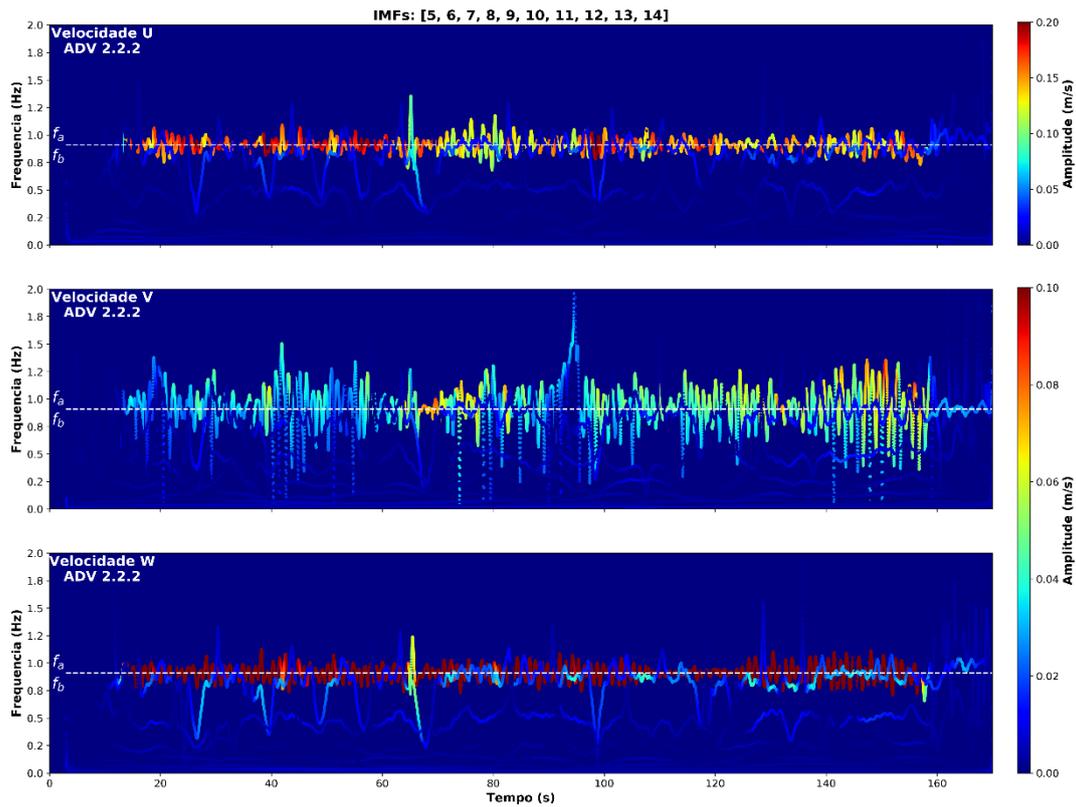


Figura 6.45. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T3-A2. As IMFs das ondas primárias (5 e 6) e todas as demais com frequência inferior são plotadas.

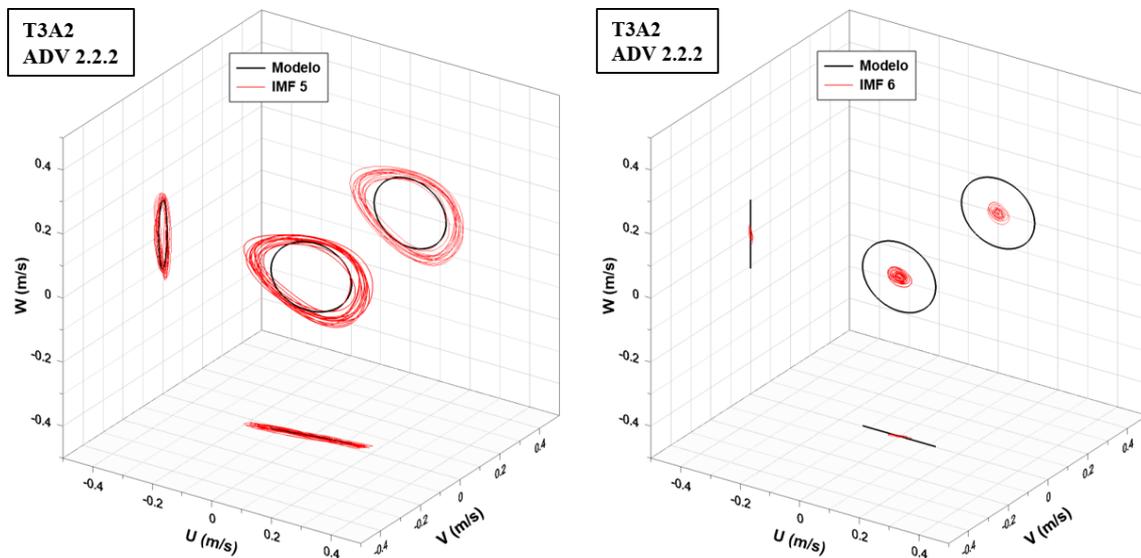


Figura 6.46. Comparação entre hodógrafas modeladas (Sharma e Dean, 1981) e extraídas (HHT) para as ondas primárias 'a' e 'b', respectivamente, do caso T3-A2.

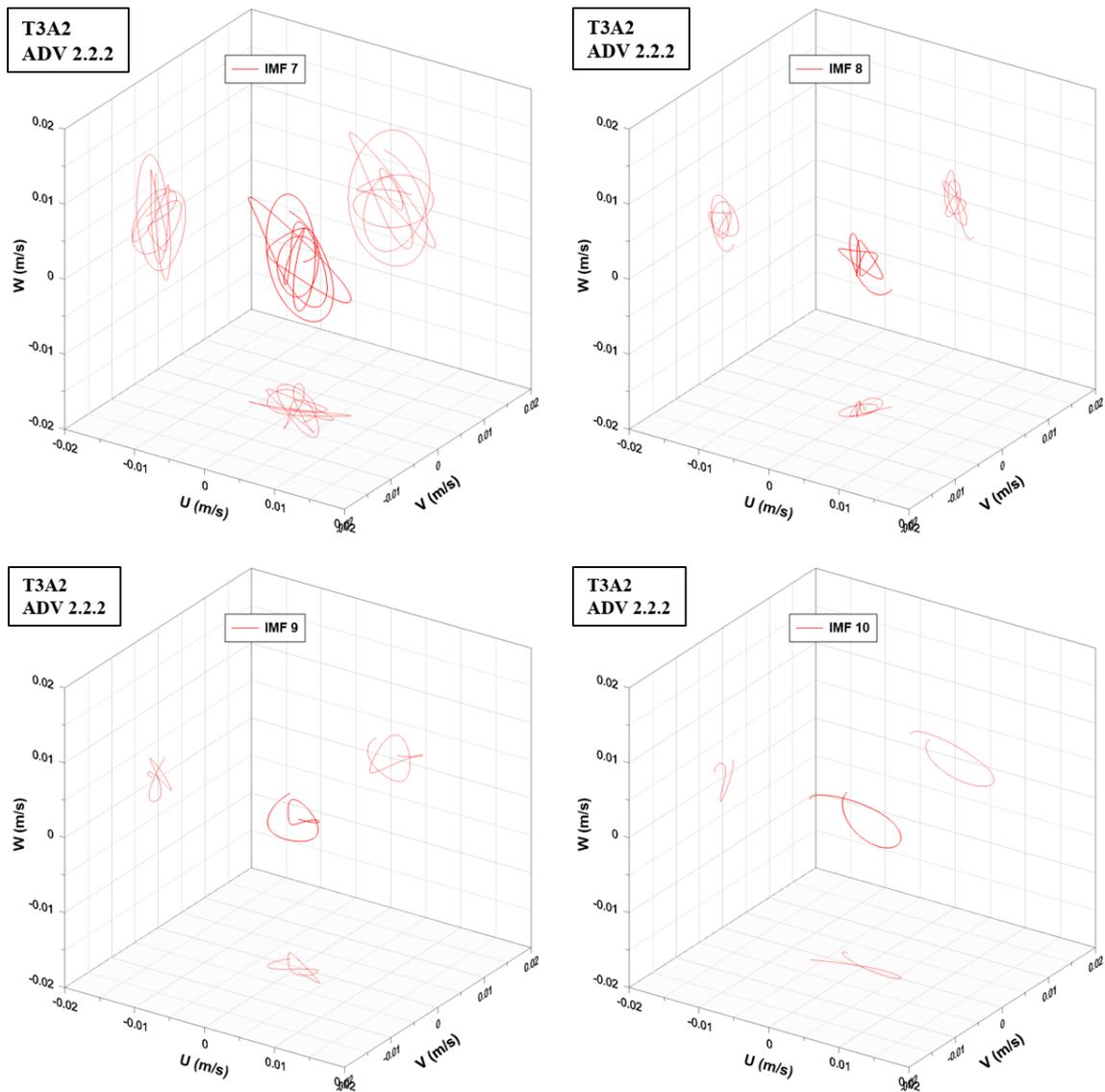


Figura 6.47. IMFs 7, 8, 9 e 10 extraídas do ADV 2.2.2 para o caso T3-A2.

VI.7. Testes T7-E3

O ‘grande’ grupo T7 teve por objetivo fazer repetições de um mesmo teste para posterior avaliação da consistência dos resultados. Dentre os diversos testes executados, o teste T2-E3 foi o escolhido para ser repetido 10 vezes. As características das ondas primárias para este caso estão resumidas na Tabela 6.24. A seleção deste teste se deu pelos seguintes critérios:

- A diferença adequada de períodos entre as ondas primárias, evitando mistura de modo entre a onda de infragravidade e a onda ‘b’, uma vez que o período da onda de interação subtrativa é consideravelmente maior;

- A diferença de ângulo entre as ondas primárias resulta em um ângulo bem distinto da onda de interação subtrativa ($D^- = 72,35^\circ$), o que deveria facilitar a sua identificação.

Tabela 6.24. Resumo das características dos testes T2-E3 (ou T7-E3).

T7-E3 = 10 repetições do teste T2-E3										
Teste	h (m)	d (m)	H_a (m)	H_b (m)	T_a (s)	T_b (s)	D_a (°)	D_b (°)	T⁺ (s)	T⁻ (s)
T2-E3	0,60	0,35	0,10	0,16	1,6	2,1	30	0	0,91	6,72

Antes do início dos testes, achava-se que a onda de interação seria mais facilmente identificada nos casos em que a diferença de ângulo entre as ondas primárias fosse de 30° , apesar da sua menor magnitude em relação aos casos em que $\Delta\theta$ é 0° e 10° . No entanto, a análise de dados mostrou que essa lógica estava equivocada: a maior magnitude da onda de interação subtrativa se mostrou mais relevante no processo de separação das IMFs do que a maior diferença do seu ângulo em relação aos ângulos das ondas primárias. Por outro lado, o fato de se conseguir identificar sucessivamente a onda subtrativa do grupo T7-E3, apenas reforça a consistência metodológica desenvolvida neste trabalho.

VI.7.1. Análise das ondas primárias

Um dos primeiros cuidados a serem tomados durante a realização de experimentos em uma bacia de ondas é a verificação das ondas geradas: será que os parâmetros das ondas geradas são os mesmos dos parâmetros de entrada do programa do gerador de ondas?

A Figura 6.48 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante a sétima repetição do teste T7-E3. As séries temporais das 3 componentes de velocidade e a hodógrafa medidas e modeladas para o ADV 2.2.1 são plotadas nos mesmos gráficos. Apesar da boa aderência entre o resultado teórico e observado e baixos valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} , nota-se que há uma divergência entre os extremos das velocidades. A análise da hodógrafa deixa claro que, no conjunto, as ondas geradas são menores do que as ondas programadas, uma vez que a hodógrafa medida está quase toda contida dentro da hodógrafa teórica.

Essa incompatibilidade é tão comum, que o próprio programa computacional do gerador de ondas possui uma ferramenta de ajuste da altura de onda. O usuário pode inserir a diferença (em porcentagem) entre a altura de onda requerida e medida, para que o

programa faça os ajustes necessários na velocidade de excursão das pás. No entanto, essa calibração não foi feita ao longo dos experimentos.

O ajuste pelo MMQNL (Tabela 6.25) mostra que, em relação ao período, a precisão do batedor para gerar as ondas Bi-Bi é excelente. Em relação às amplitudes, no entanto, nota-se que, em geral, cada componente está ligeiramente menor do que o esperado. A diferença pode ser também uma consequência de erros no posicionamento do eixo do ADV, como discutido no item V.3. No entanto, a visualização da hodógrafa não deixa dúvidas que as ondas geradas possuem amplitudes inferiores ao requisitado.

Tabela 6.25. Parâmetros modelados e medidos das ondas primárias para a sétima repetição do teste T7-E3, ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados Não-Linear.

ADV	Onda	IMF	Amplitude (m/s)			$ vel _{max}$ (m/s)	T (s)	D (°)	
			u	v	w				
Modelo	a	-	0,133	0,077	0,069	0,159	1,60	30,00	
	b	-	0,279	0,000	0,091	0,315	2,10	0,00	
Medido	2.2.1	a	6	0,070	0,024	0,032	0,270	1,60	16,26
		b	7	0,248	0,009	0,062	0,362	2,10	3,18
	2.2.2	a	6	0,067	0,025	0,035	0,257	1,60	15,27
		b	7	0,239	0,025	0,07	0,341	2,10	-4,11
	2.2.3	a	6	0,072	0,028	0,032	0,257	1,60	19,50
		b	7	0,203	0,013	0,059	0,306	2,10	6,13
	2.2.4	a	6	0,059	0,035	0,027	0,248	1,60	24,81
		b	7	0,207	0,029	0,06	0,304	2,10	10,18
	2.2.5	a	6	0,055	0,034	0,025	0,279	1,60	22,13
		b	7	0,240	0,042	0,071	0,354	2,11	11,88

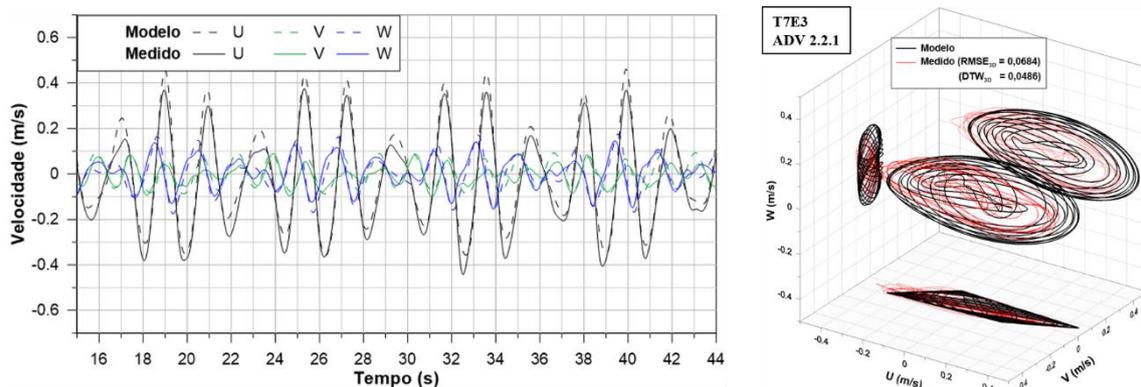


Figura 6.48. Séries temporais e hodógrafa resultantes das Bi-Bis para o caso T7-E3.

A consequência natural da inclinação dos ADVs é provocar uma alteração matemática no ângulo da onda medida. No entanto, mesmo que o ADV esteja inclinado, a diferença de ângulo entre as duas ondas medidas deve permanecer a mesma, uma vez que a mudança

do eixo do instrumento vale para as duas ondas. A análise única do ADV 2.2.1, portanto, indicaria que há um erro considerável em relação ao ângulo da onda ‘a’. Esse erro pode ter duas razões: (i) o batedor não estaria respeitando a diferença de ângulo imposta pelo programa; (ii) a vibração dos ADVs, discutida no item V.3, causaria erros na leitura.

A primeira hipótese pode ser descartada a partir da análise espectral do arranjo 2 de USS (Figura 6.49). As direções de pico calculadas para as ondas ‘a’ e ‘b’ são $4,50^\circ$ e $32,50^\circ$, respectivamente. Portanto, $\Delta\theta = 28^\circ$, o que é suficiente próximo do valor requerido. Para a verificação da segunda hipótese, é necessário, então, analisar o arranjo completo de ADV ao invés da análise de apenas 1 instrumento.

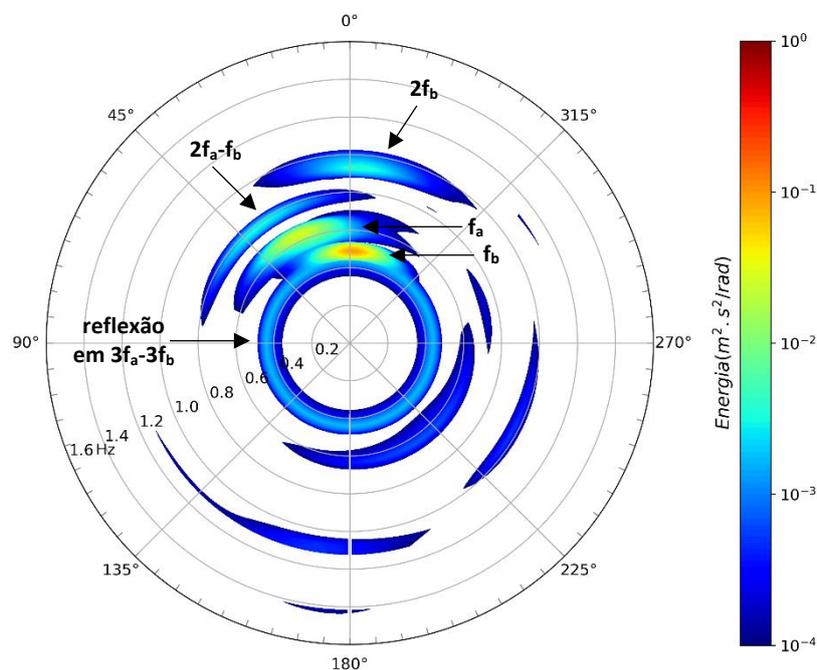


Figura 6.49. Espectro direcional do arranjo 2 de USS, calculado para a sétima repetição do teste T7-E3.

Uma primeira opção para a confrontação entre os cinco ADVs poderia ser feita a partir da comparação entre as amplitudes, direções e períodos das ondas primárias medidas e modeladas ou erros ($RMSE_{3D}$ e DTW_{3D}) calculados. No entanto, caso haja um erro de inclinação em um ADV (mesmo após a aplicação da metodologia de correção), as amplitudes e direções calculadas estarão mascaradas e, portanto, impróprias para efeito de comparação. O período de cada onda primária ajustado pelo MMQNL aos dados medidos foi exatamente igual ao requisitado para todos os ADVs. Portanto, esse critério também não pode ser usado para a comparação entre os instrumentos.

A utilização dos erros $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} seria imprópria, uma vez que o ajuste das fases das ondas ‘a’ e ‘b’ modeladas foram feitas para o ADV 2.2.1. Portanto, qualquer mínimo

erro de posicionamento de um ADV ocasionaria o aumento dos seus valores de $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} .

Um outro critério para avaliar qual ADV possui a melhor qualidade de medição é utilizar a diferença de ângulo calculada entre as ondas primárias. Dado que as inclinações não alteram o valor da diferença do ângulo entre as ondas primárias, qualquer erro de inclinação devem ser consequência dos efeitos da vibração do ADV sobre as velocidades medidas. Portanto, aquele cujo $\Delta\theta$ estiver mais próximo de 28° deve ser aquele que possui os menores efeitos vibratórios. A Figura 6.50 ilustra os diagramas de caixas do valor de $\Delta\theta$ para cada um dos ADVs ao longo das 10 repetições do teste T7-E3. Os limites de cada caixa demarcam os 1º e 3º quartis ($Q1 = 25\%$ e $Q3 = 75\%$); a linha no interior das caixas aponta o 2º quartil ($Q2 = 50\%$ ou mediana); enquanto que os limites inferiores e superiores de cada diagrama correspondem aos *whiskers*, definidos como 1,5 vezes a amplitude interquartil ($Q3 - Q1$) para menos (inferior) ou para mais (superior) de $Q1$ e $Q3$, respectivamente.

Observa-se que os ADVs 2.2.4 e 2.2.5 apresentam os valores mais próximos da diferença de ângulo real. Portanto, devem ser aqueles que possuem as medições com menores efeitos vibratórios e, conseqüentemente, de melhor qualidade. Ressalta-se que essa melhor qualidade não é garantida ao longo de todos os 271 testes, porque pequenos ajustes no arranjo 2 foram feitos ao longo dos dias de experimentos.

A Figura 6.51 confirma essa conclusão, uma vez que os ADVs 2.2.4 e 2.2.5 apresentam os menores valores de DTW_{3D} para a onda de interação subtrativa. Preferiu-se utilizar este parâmetro ao invés do $RMSE_{3D}$, devido à flexibilização do DTW em relação à diferença de fase.

A Tabela 6.26 à Tabela 6.30 exibem os principais parâmetros ajustados para as ondas ‘a’ e ‘b’ para cada um dos 5 ADVs ao longo das 10 repetições do teste T7-E3 em comparação com os parâmetros do modelo de SHARMA e DEAN (1981). Os parâmetros são ajustados, via MMQNL, diretamente pela equação (5.16) aos dados medidos e não a cada IMF correspondente à onda primária separadamente. Por isso os valores da sétima repetição dessas tabelas diferem dos valores da Tabela 6.25. O ajuste a cada IMF introduziria os erros provocados pelo peneiramento da NA-MEMD, que foge ao objetivo no momento.

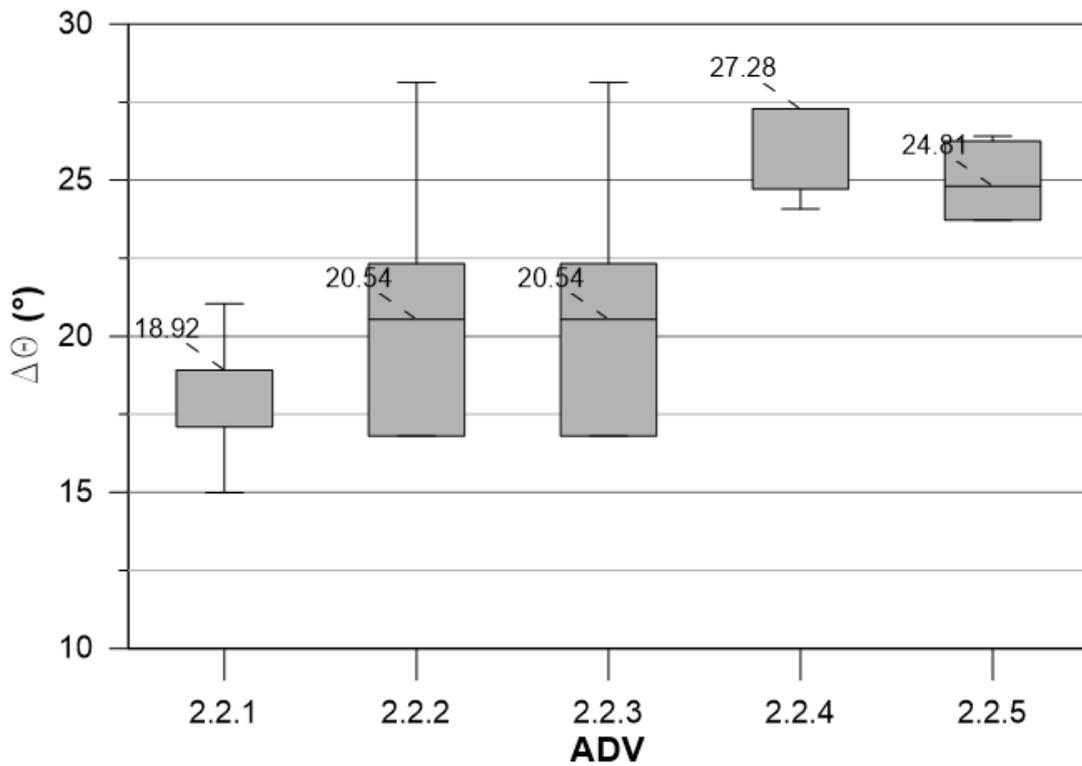


Figura 6.50. Diagrama de caixas da diferença de ângulo entre as ondas primárias ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados.

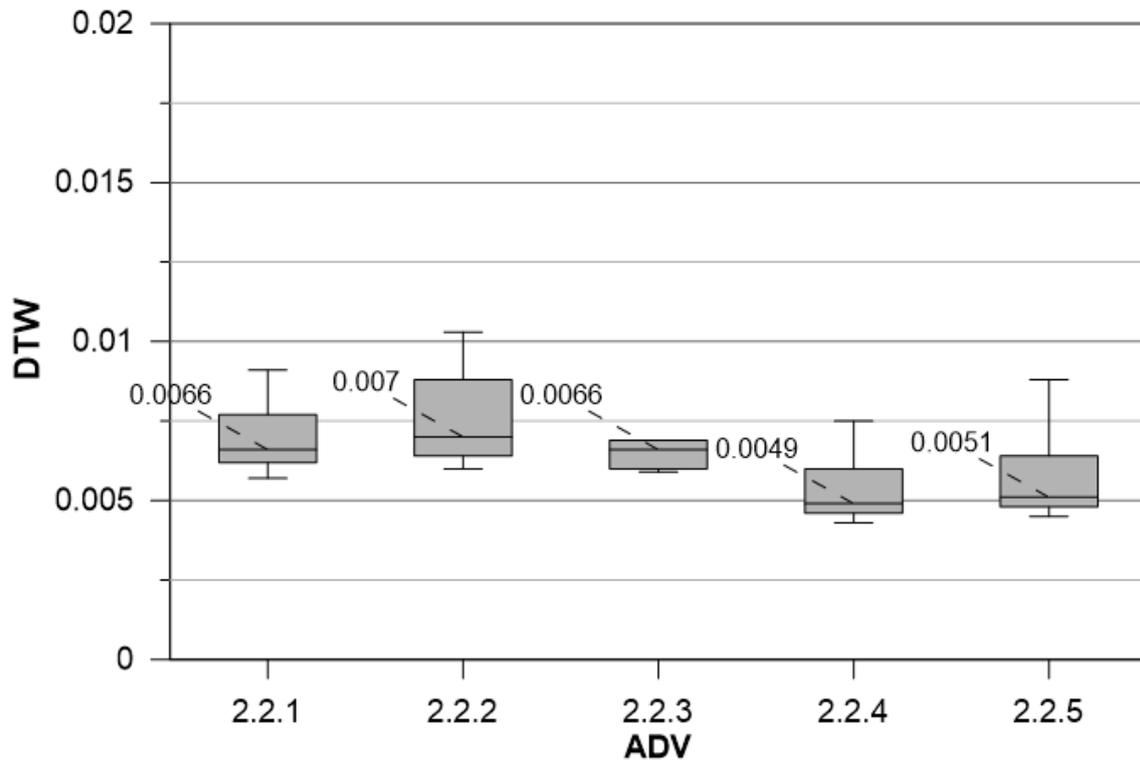


Figura 6.51. Diagramas de caixa dos valores de DTW_{3D} para cada um dos ADVs do arranjo 2 ao longo das 10 repetições do teste T7-E3.

Tabela 6.26. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.1 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	a _a (m/s)			T _a (s)	D _a (°)	a _b (m/s)			T _b (s)	D _b (°)	RMSE	DTW	ΔD (°)
	u	v	w			u	v	w					
Modelo	0,13	0,08	0,07	1,60	31,61	0,28	0,00	0,07	2,10	0,00	0,00	0,00	31,61
1	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,00	0,07	2,10	0,00	0,07	0,05	21,04
2	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,00	0,07	2,10	0,00	0,08	0,05	21,04
3	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,01	0,07	2,10	2,12	0,07	0,05	18,92
4	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,01	0,07	2,10	2,12	0,07	0,05	18,92
5	0,13	0,04	0,06	1,60	17,10	0,27	0,00	0,07	2,10	0,00	0,07	0,05	17,10
6	0,13	0,04	0,06	1,60	17,10	0,27	0,01	0,07	2,10	2,12	0,07	0,05	14,98
7	0,13	0,04	0,06	1,60	17,10	0,27	0,00	0,07	2,10	0,00	0,07	0,05	17,10
8	0,13	0,04	0,06	1,60	17,10	0,27	0,00	0,07	2,10	0,00	0,07	0,05	17,10
9	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,01	0,07	2,10	2,12	0,07	0,05	18,92
10	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,01	0,07	2,10	2,12	0,07	0,05	18,92

Tabela 6.27. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.2 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	a _a (m/s)			T _a (s)	D _a (°)	a _b (m/s)			T _b (s)	D _b (°)	RMSE	DTW	ΔD (°)
	u	v	w			u	v	w					
Modelo	0,13	0,08	0,07	1,60	31,61	0,28	0,00	0,07	2,10	0,00	0,00	0,00	31,61
1	0,12	0,07	0,06	1,60	30,26	0,27	0,01	0,01	2,10	2,12	0,07	0,04	28,14
2	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,28	0,02	0,08	2,10	4,09	0,07	0,05	20,69
3	0,12	0,06	0,06	1,60	26,57	0,27	0,02	0,08	2,10	4,24	0,07	0,05	22,33
4	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,02	0,08	2,10	4,24	0,07	0,05	16,80
5	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,02	0,09	2,10	4,24	0,07	0,05	16,80
6	0,12	0,06	0,06	1,60	26,57	0,27	0,02	0,08	2,10	4,24	0,07	0,05	22,33
7	0,13	0,05	0,06	1,60	21,04	0,27	0,02	0,09	2,10	4,24	0,07	0,05	16,80
8	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,27	0,02	0,08	2,10	4,24	0,07	0,05	20,54
9	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,27	0,02	0,08	2,10	4,24	0,07	0,05	20,54
10	0,12	0,05	0,06	1,60	22,62	0,27	0,02	0,08	2,10	4,24	0,07	0,05	18,38

Tabela 6.28. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.3 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	a _a (m/s)			T _a (s)	D _a (°)	a _b (m/s)			T _b (s)	D _b (°)	RMSE	DTW	ΔD (°)
	u	v	w			u	v	w					
Modelo	0,13	0,08	0,07	1,60	31,61	0,28	0,00	0,07	2,10	0,00	0,00	0,00	31,61
1	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	22,29
2	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	22,29
3	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,07	0,05	22,29
4	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	22,29
5	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	22,29
6	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,07	0,05	22,29
7	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,07	0,05	22,29
8	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	22,29
9	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	22,29
10	0,13	0,06	0,06	1,60	24,78	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,07	0,05	22,29

Tabela 6.29. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.4 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	a _a (m/s)			T _a (s)	D _a (°)	a _b (m/s)			T _b (s)	D _b (°)	RMSE	DTW	ΔD (°)
	u	v	w			u	v	w					
Modelo	0,13	0,08	0,07	1,60	30,00	0,28	0,00	0,07	2,10	0,00	0,00	0,00	30,00
1	0,12	0,06	0,05	1,60	26,57	0,23	0,01	0,07	2,10	2,49	0,08	0,05	24,08
2	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,07	2,10	5,19	0,09	0,05	27,28
3	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,07	2,10	5,19	0,08	0,05	27,28
4	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,03	0,07	2,10	7,77	0,08	0,05	24,71
5	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,06	2,10	5,19	0,08	0,05	27,28
6	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,03	0,07	2,10	7,77	0,08	0,05	24,71
7	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,07	2,10	5,19	0,08	0,05	27,28
8	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,06	2,10	5,19	0,08	0,05	27,28
9	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,07	2,10	5,19	0,08	0,05	27,28
10	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,22	0,02	0,06	2,10	5,19	0,08	0,05	27,28

Tabela 6.30. Parâmetros das ondas primárias calculados para o ADV 2.2.5 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	a _a (m/s)			T _a (s)	D _a (°)	a _b (m/s)			T _b (s)	D _b (°)	RMSE	DTW	ΔD (°)
	u	v	w			u	v	w					
Modelo	0,13	0,08	0,07	1,60	31,61	0,28	0,00	0,07	2,10	0,00	0,00	0,00	31,61
1	0,11	0,06	0,05	1,60	28,61	0,26	0,01	0,07	2,10	2,20	0,07	0,05	26,41
2	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,26	0,03	0,07	2,10	6,58	0,08	0,05	25,89
3	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,08	0,05	23,73
4	0,10	0,07	0,05	1,60	34,99	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,07	0,05	26,25
5	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,07	0,05	23,73
6	0,10	0,07	0,05	1,60	34,99	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,07	0,05	26,25
7	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,07	0,05	23,73
8	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,07	0,05	23,73
9	0,10	0,07	0,05	1,60	34,99	0,25	0,04	0,07	2,10	9,09	0,07	0,05	25,90
10	0,11	0,07	0,05	1,60	32,47	0,26	0,04	0,07	2,10	8,75	0,07	0,05	23,73

VI.7.2. Análise da onda interativa

A Figura 6.52 à Figura 6.56 apresentam uma análise estatística de diagramas de caixa para as principais características da onda de interação subtrativa, extraídas de todos os 5 ADVs durante as 10 repetições. Ressalta-se que os períodos de cada componente de velocidade extraída pela HHT não são necessariamente iguais, uma vez que as IMFs são peneiradas em “escalas de frequência”.

É notável que os resultados dos ADVs 2.2.4 e 2.2.5 são melhores do que os demais instrumentos em todos os três parâmetros (período, amplitude de velocidade e direção), apresentando pequenos desvios entre a oscilação de baixa frequência extraída pela metodologia proposta e o resultado analítico esperado. A larga distribuição de valores de direção nos ADVs 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 é resultado do somatório de pequenos erros na identificação do período, da fase e/ou amplitude de cada componente de velocidade, os quais certamente foram afetados por efeitos não filtrados da vibração das barras de suporte dos instrumentos.

A Tabela 6.31 à Tabela 6.35 apresentam os valores numéricos obtidos para cada teste, além dos parâmetros de semelhança, $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} . Conclui-se, portanto, que a metodologia é consistente para a análise da onda de interação subtrativa gerada pela interação não-linear entre ondas Bi-Bi.

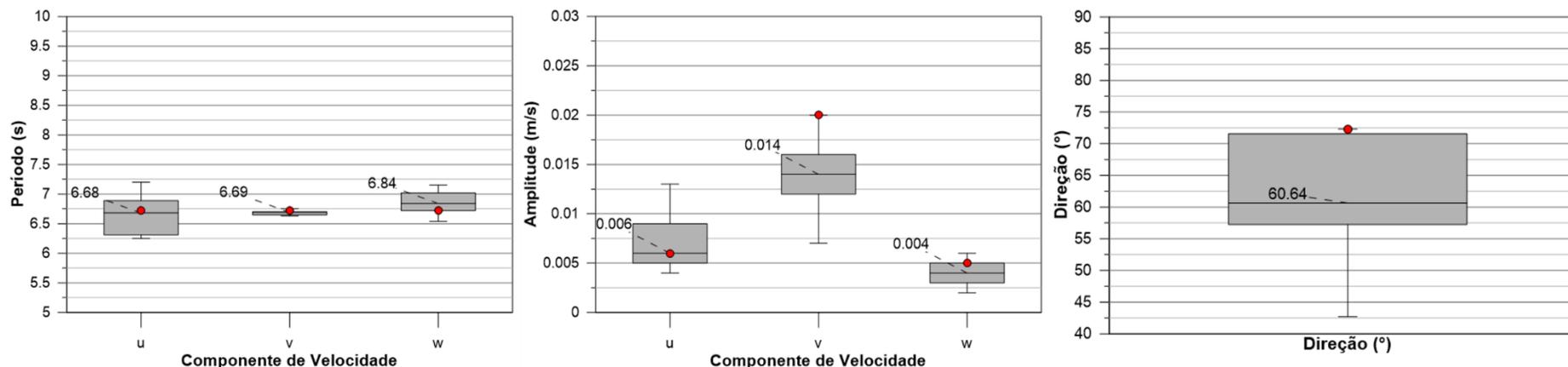


Figura 6.52. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.1. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.

Tabela 6.31. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.1 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	u		v		w		D (°)	RMSE	DTW
	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)			
Modelo	6,72	0,006	6,72	0,020	6,72	0,005	72,35	0	0
1	6,16	0,009	6,61	0,010	6,02	0,003	48,01	0,0123	0,0088
2	6,63	0,009	6,64	0,016	6,67	0,005	60,64	0,0104	0,0077
3	6,60	0,004	6,71	0,007	6,65	0,002	60,26	0,0120	0,0072
4	6,93	0,005	6,71	0,015	6,72	0,006	71,57	0,0075	0,0057
5	6,54	0,009	6,70	0,014	6,50	0,004	57,27	0,0095	0,0066
6	6,14	0,013	6,69	0,012	8,08	0,003	42,71	0,0123	0,0091
7	6,20	0,006	6,69	0,013	6,81	0,004	65,23	0,0087	0,0062
8	5,57	0,005	6,74	0,015	6,77	0,004	71,57	0,0090	0,0066
9	6,60	0,009	6,75	0,014	6,77	0,004	57,27	0,0094	0,0068
10	6,61	0,006	6,67	0,016	6,71	0,003	69,44	0,0082	0,0062

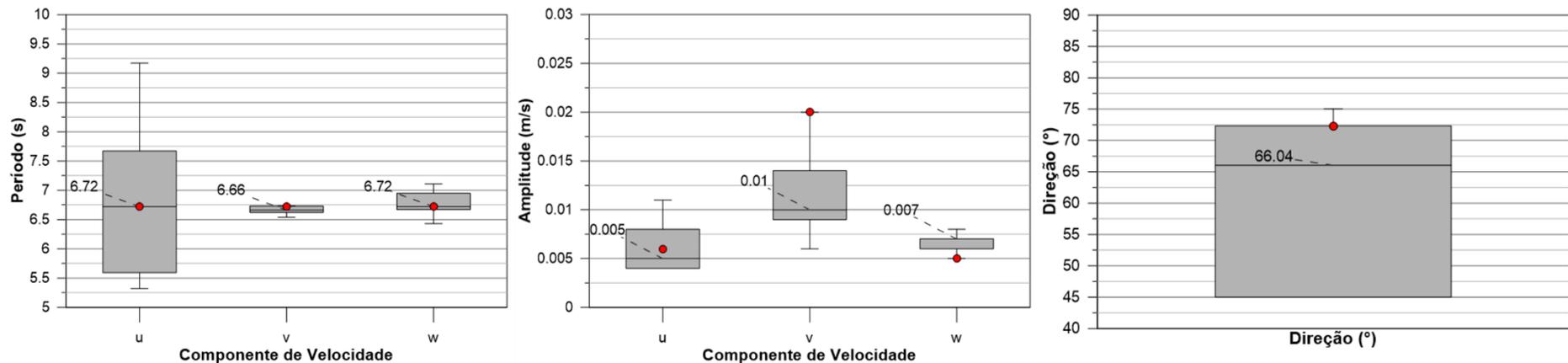


Figura 6.53. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.2. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.

Tabela 6.32. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.2 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	u		v		w		D (°)	RMSE	DTW
	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)			
Modelo	6,72	0,006	6,72	0,02	6,72	0,005	72,35	0	0
1	7,67	0,006	6,54	0,006	6,95	0,007	45,00	0,0131	0,0080
2	7,03	0,004	6,63	0,009	6,64	0,008	66,04	0,0139	0,0088
3	9,17	0,004	7,16	0,008	6,43	0,004	63,43	0,0139	0,0060
4	7,21	0,004	6,73	0,015	6,75	0,007	75,07	0,0110	0,0070
5	8,33	0,005	6,62	0,014	6,67	0,007	70,35	0,0114	0,0066
6	5,32	0,01	6,94	0,01	7,11	0,007	45,00	0,0160	0,0103
7	5,59	0,004	6,66	0,01	6,73	0,008	68,20	0,0111	0,0064
8	5,63	0,011	6,66	0,011	6,72	0,006	45,00	0,0145	0,0089
9	5,52	0,008	6,59	0,01	7,08	0,007	51,34	0,0131	0,0088
10	5,76	0,004	6,7	0,013	6,7	0,007	72,90	0,0106	0,0069

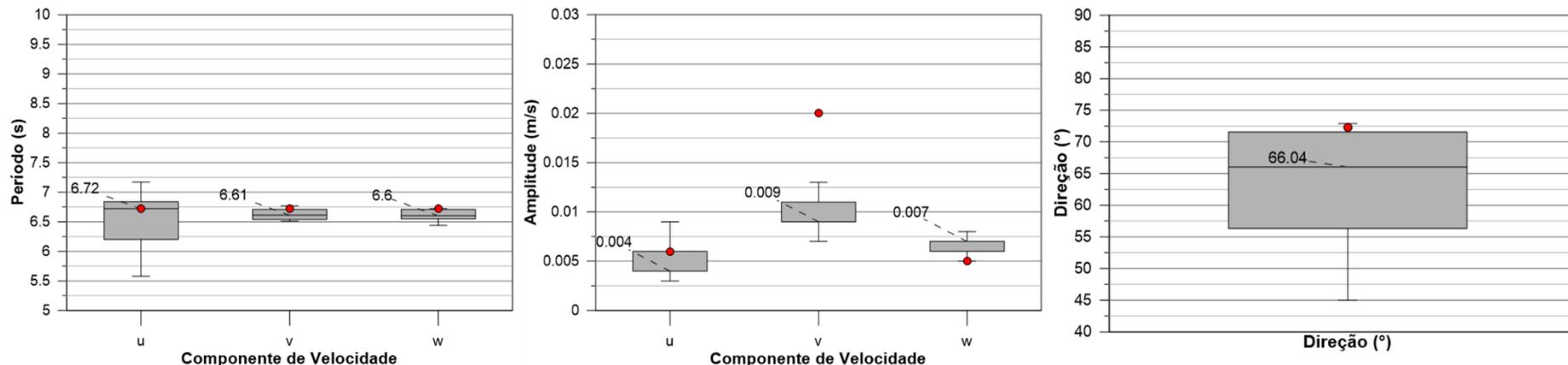


Figura 6.54. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.3. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.

Tabela 6.33. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.3 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	u		v		w		D (°)	RMSE	DTW
	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)			
Modelo	6,72	0,006	6,72	0,02	6,72	0,005	72,35	0	0
1	6,84	0,005	6,63	0,007	6,58	0,006	54,46	0,0129	0,0089
2	6,91	0,004	6,53	0,013	6,56	0,007	72,90	0,0097	0,0066
3	6,2	0,003	6,51	0,005	7,69	0,004	59,04	0,0133	0,0069
4	6,32	0,004	6,61	0,009	6,55	0,008	66,04	0,0103	0,0060
5	6,82	0,003	6,54	0,009	6,60	0,007	71,57	0,0101	0,0059
6	5,65	0,009	6,77	0,009	6,71	0,007	45,00	0,0142	0,0094
7	6,74	0,005	6,64	0,011	6,69	0,006	65,56	0,0095	0,0061
8	7,17	0,004	6,58	0,009	6,44	0,007	66,04	0,0105	0,0069
9	5,58	0,006	6,6	0,009	6,54	0,007	56,31	0,0113	0,0069
10	6,62	0,004	6,71	0,010	6,70	0,008	68,20	0,0100	0,0061

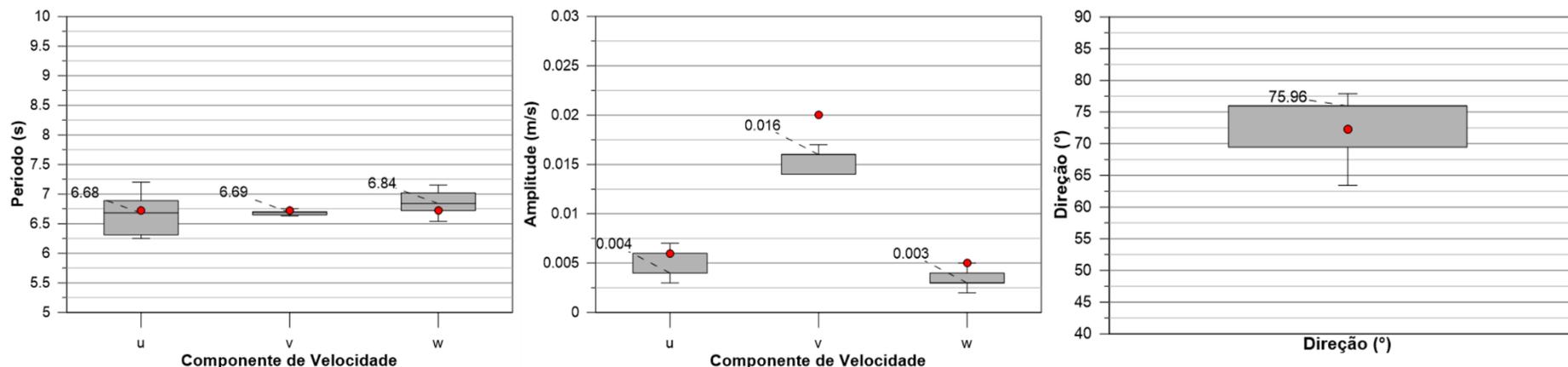


Figura 6.55. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.4. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.

Tabela 6.34. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.4 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	u		v		w		D (°)	RMSE	DTW
	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)			
Modelo	6,72	0,006	6,72	0,020	6,72	0,005	72,35	0	0
1	6,90	0,007	6,63	0,011	7,00	0,004	57,53	0,0099	0,0071
2	7,20	0,004	6,70	0,017	7,03	0,003	76,76	0,0067	0,0047
3	6,31	0,003	6,75	0,008	6,54	0,002	69,44	0,0115	0,0060
4	6,30	0,004	6,65	0,016	6,72	0,003	75,96	0,0062	0,0049
5	6,68	0,004	6,70	0,016	7,02	0,003	75,96	0,0068	0,0043
6	6,25	0,007	6,66	0,014	7,15	0,004	63,44	0,0096	0,0075
7	6,89	0,005	6,66	0,016	6,77	0,003	72,65	0,0062	0,0047
8	6,60	0,004	6,64	0,016	6,84	0,003	75,96	0,0065	0,0046
9	6,80	0,003	6,70	0,014	6,66	0,003	77,91	0,0079	0,0058
10	6,61	0,004	6,69	0,016	6,93	0,003	75,96	0,0066	0,0049

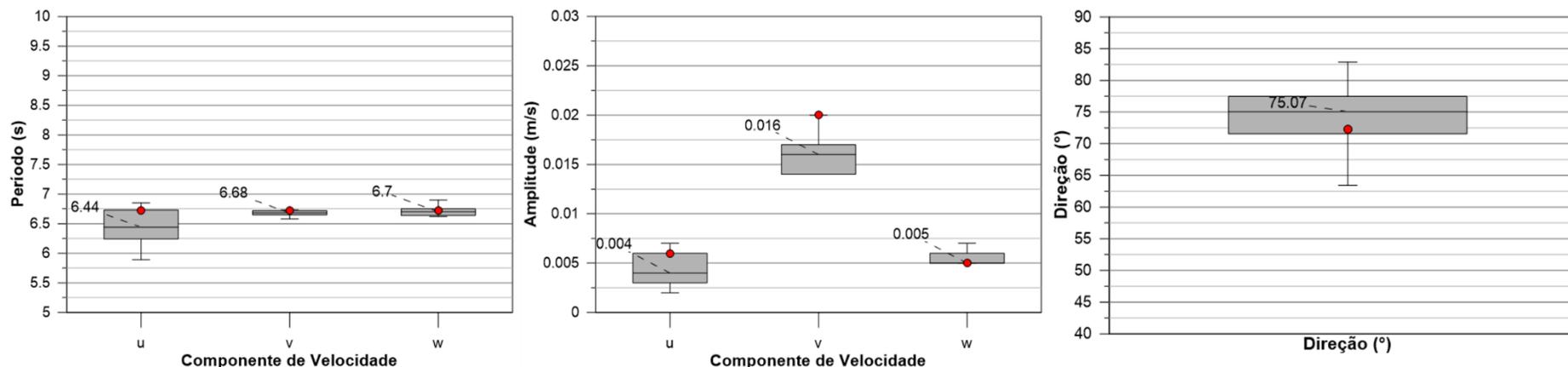


Figura 6.56. Diagramas de caixas dos parâmetros da onda de interação subtrativa ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados para cada uma das 10 repetições para o ADV 2.2.5. Círculos vermelhos indicam os valores teóricos.

Tabela 6.35. Parâmetros da onda de interação subtrativa calculados para o ADV 2.2.5 durante as 10 repetições do teste T7-E3.

Repetição	u		v		w		D (°)	RMSE	DTW
	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)	T (s)	a (m/s)			
Modelo	6,72	0,006	6,72	0,02	6,72	0,005	72,35	0	0
1	5,89	0,005	6,58	0,009	6,62	0,006	60,95	0,0133	0,0088
2	6,76	0,006	6,66	0,018	6,69	0,006	71,57	0,0071	0,0055
3	6,34	0,002	6,73	0,009	6,9	0,003	77,47	0,0116	0,0064
4	6,85	0,004	6,68	0,017	6,75	0,005	76,76	0,0061	0,0048
5	6,44	0,004	6,69	0,015	6,89	0,005	75,07	0,0070	0,0051
6	5,04	0,007	6,66	0,014	6,4	0,007	63,43	0,0141	0,0097
7	6,65	0,005	6,65	0,016	6,7	0,005	72,65	0,0063	0,0045
8	6,73	0,004	6,63	0,016	6,71	0,005	75,96	0,0072	0,0055
9	6,35	0,002	6,73	0,016	6,68	0,005	82,87	0,0072	0,0051
10	6,24	0,003	6,70	0,017	6,64	0,005	79,99	0,0068	0,0051

VI.8. Teste T8-B2

Todos os testes analisados até aqui eram compostos por ondas puramente bicromáticas e bidirecionais. No entanto, a ocorrência de Bi-Bis puras é rara na Natureza, sendo mais comum a intercessão entre dois espectros de diferentes direções e períodos de pico. Aproveitando-se da capacidade do gerador de ondas da Universidade de Hannover de gerar espectros multidirecionais, alguns testes foram feitos com a imposição de espectros bimodais e bidirecionais.

O teste T8-B2 é uma generalização do teste T4-B2, que serviu de exemplo ao longo de todo o trabalho. Os períodos e direções deste teste foram utilizados como parâmetros de pico para a criação de espectros do tipo Jonswap. Em seguida, um espalhamento direcional foi introduzido para cada um dos espectros, simplesmente passando-se uma porcentagem da energia na direção de pico, para as direções imediatamente adjacentes. A Figura 6.57 apresenta o espectro bimodal dado como entrada para o gerador de ondas e a Tabela 6.36 resume as características principais do espectro inserido e faz uma comparação com o teste T4-B2, que serviu de base para o teste T8-B2.

É importante ressaltar que os testes do grupo T8 foram simulados por um tempo total equivalente a 1 mil ondas (relativo à frequência de pico desejada) e com a função de absorção ativa do batedor ligada, de modo a tentar controlar as reflexões dentro da bacia.

Tabela 6.36. Resumo das características do teste T8-B2 e comparação com o T4-B2 (s = espalhamento direcional, em que x% da energia na direção de pico foi espalhada igualmente entre as direções adjacentes).

Teste	Onda	H (m)	T (s)	D (°)	s (%)	h (m)	d (m)		
T4-B2	a	0,10	1,30	10	-	0,75	0,35		
	b	0,16	1,70	0	-				
Teste	Espectro	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	s (%)				
T8-B2	a	0,07	1,33	10	15				
	b	0,15	1,67	0	10				

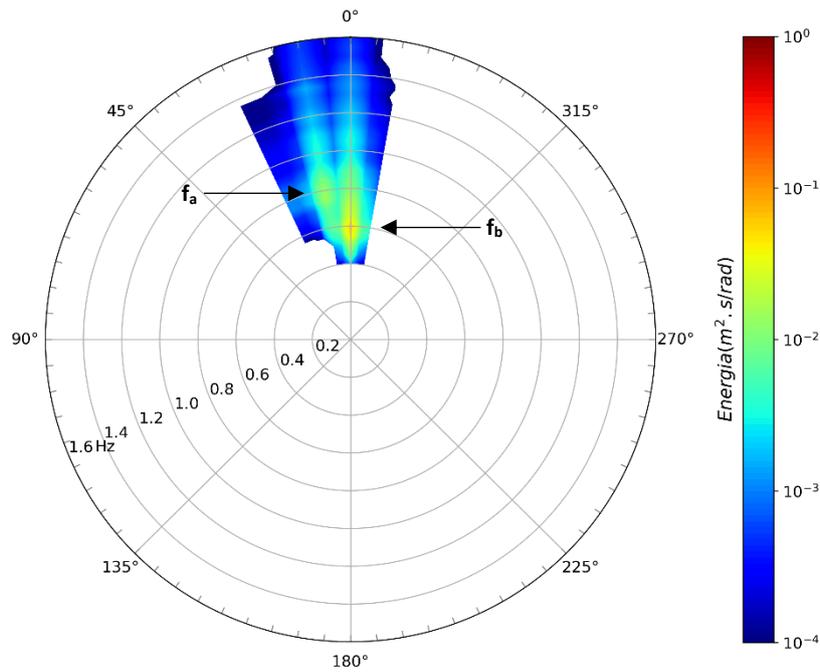


Figura 6.57. Espectro bimodal inserido no programa computacional do gerador de ondas para o teste T8-B2.

VI.8.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.58 ilustra o resultado da análise espectral a partir do arranjo 2 de USS. Todo o período de simulação (≈ 29 min) foi incluído na análise. Nota-se que o aspecto bimodal do espectro não é tão claro, porém, é nítido que para frequências maiores, há um deslocamento do pico do espectro em relação ao ângulo. Na faixa de baixas frequências ($< 0,30$ Hz), há muita energia, o que impossibilita qualquer detecção da onda interativa ($f^- \approx 0,16$ Hz).

A Tabela 6.37 resume as principais características da medição, e o relatório completo da análise feita pelo WaveLab[®], incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.60.

Tabela 6.37. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T8-B2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,115	1,67	-0,50
a	0,054	1,32	5,50
b	0,096	1,67	-0,50
Subtrativa	-	-	-

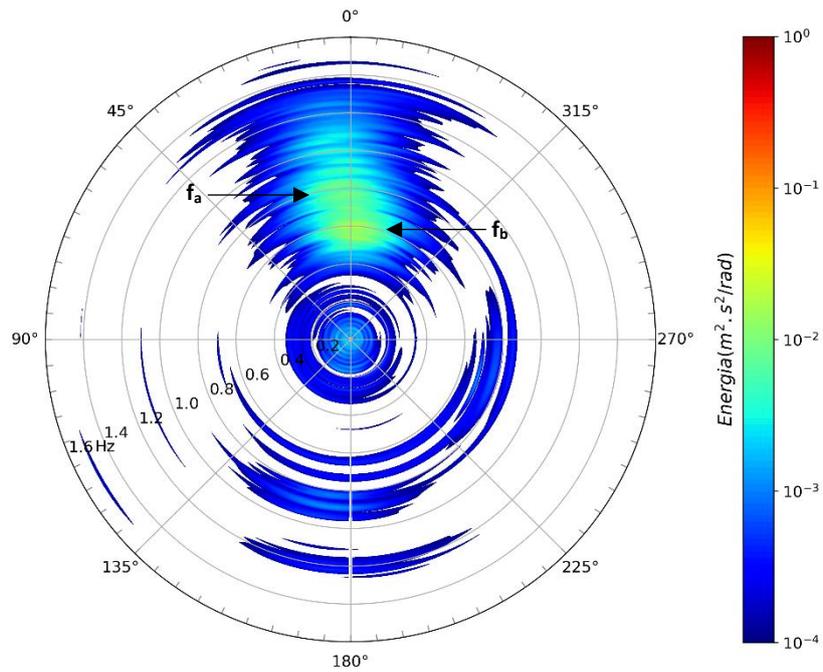


Figura 6.58. Espectro bimodal calculado para o teste T8-B2.

A presença de energia em uma vasta gama de baixa frequência pode ser devido à reflexão dentro da bacia. No entanto, um outro motivo são problemas de medições com os USSs. A Figura 6.59 ilustra as séries temporais dos 5 USSs pertencentes ao arranjo 2. A imagem superior mostra o período completo de medição, enquanto a inferior apresenta os primeiros 200 s. Observa-se que frequentemente alguns instrumentos apresentam problemas nas medições, mudando o seu nível de referência. Em geral, esses erros ocorriam em um par ou trio de instrumentos, simultaneamente. Os motivos deste problema não foram descobertos, mas estiveram presentes em vários testes e, principalmente, nos testes com espectros bimodais, pois eram mais longos.

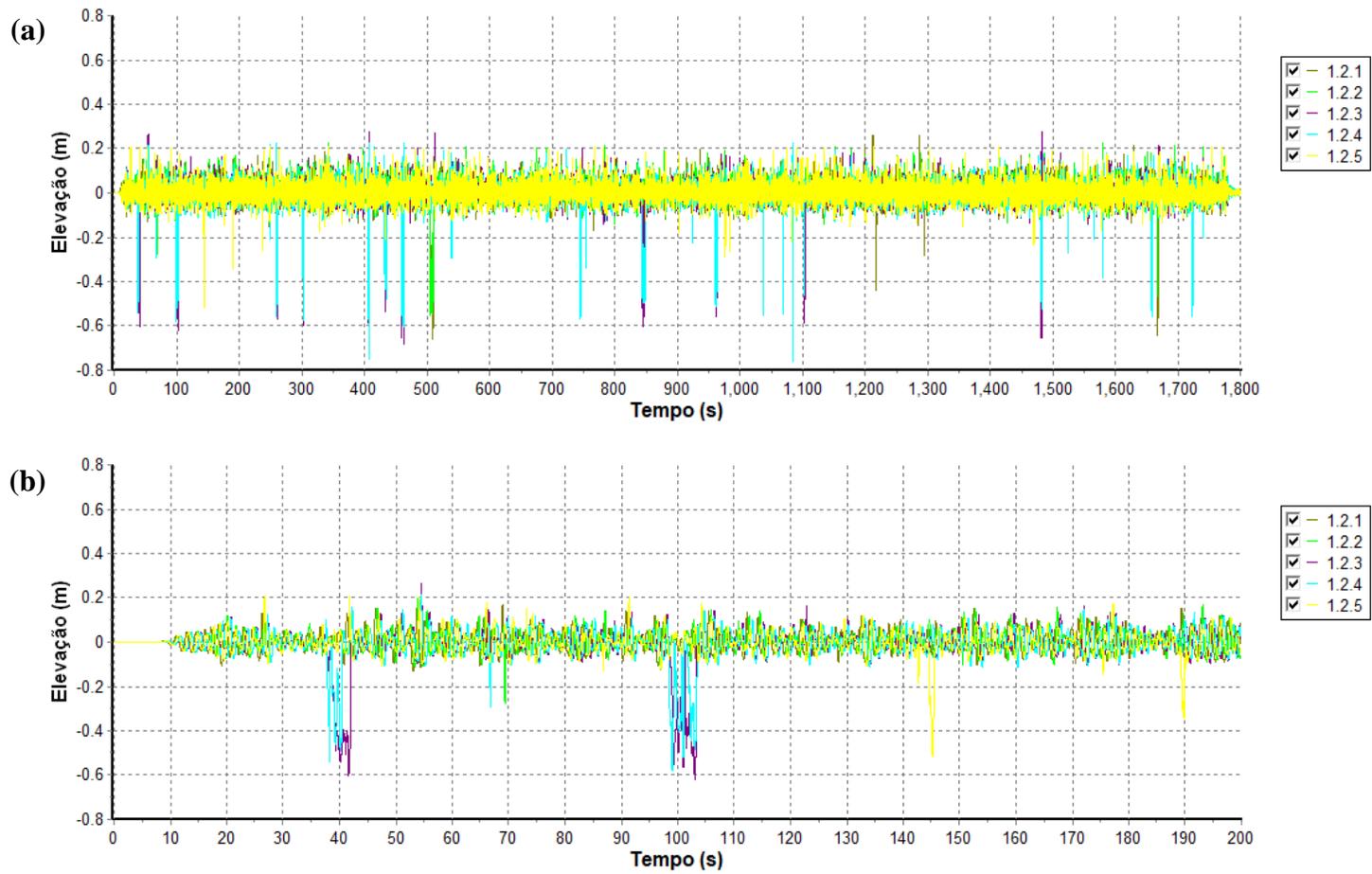


Figura 6.59. Séries temporais dos USSs pertencentes ao arranjo 2 durante o teste T8-B2. (a) período completo de medição; e (b) primeiros 200 s de medição.

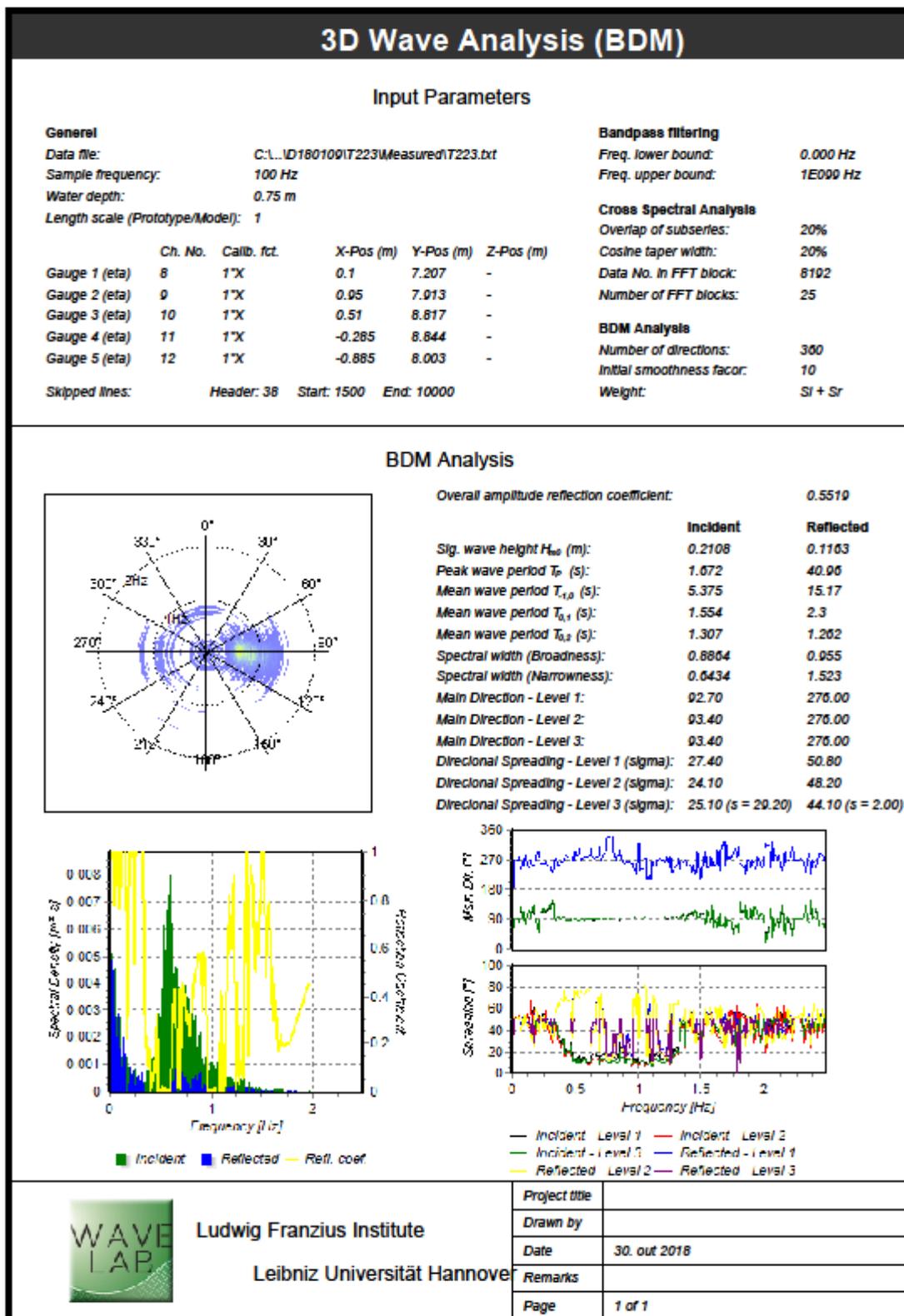


Figura 6.60. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T8-B2.

VI.8.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.61 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T8-B2. As séries temporais das 3 componentes de velocidade são mostradas apenas ao longo do primeiro minuto de medição, junto com a hodógrafa tridimensional para o ADV 2.2.1.

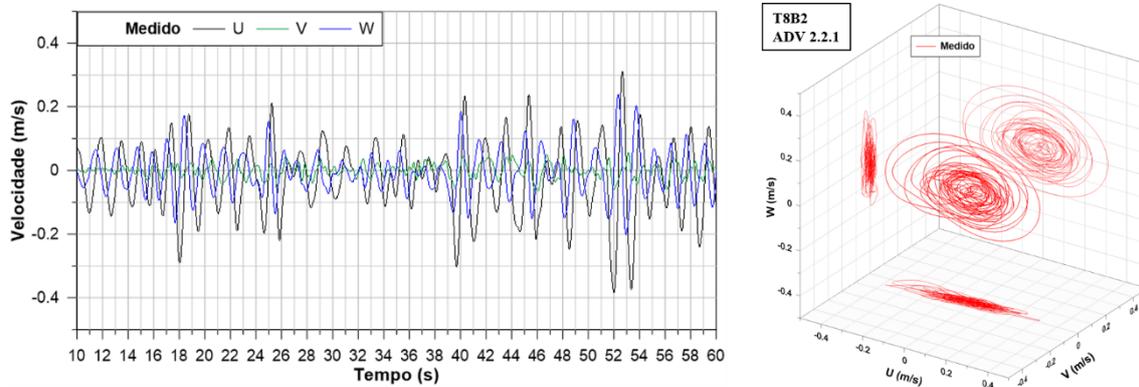


Figura 6.61. Séries temporais e hodógrafa medidas resultantes do espectro bimodal para o caso T8-B2.

Por uma limitação do computador¹² utilizado para a análise, apenas os primeiros 170 s de medição foram utilizados para o processamento da NA-MEMD. Foram geradas 15 IMFs, sendo que, aparentemente, as IMFs 6 e 7 representam as ondas primárias e a IMF 9, a onda de interação subtrativa. A Figura 6.62 ilustra a transformada de Hilbert para as IMFs de número 5 a 10. As linhas brancas tracejadas correspondem aos valores esperados para o caso T4-B2.

Observa-se uma grande mistura de modo entre a maioria das IMFs, tanto de frequência, quanto de amplitude. Ao contrário do caso das Bi-Bis puras, era esperado que o resultado da HHT para um espectro bimodal apresentasse IMFs não muito nítidas. No entanto, a IMF 9 aparenta um comportamento mais suave que as demais e ao redor da frequência subtrativa esperada para o caso T4-B2, sendo um forte indicativo da presença da onda de interação não-linear.

As velocidades orbitais de baixa frequência extraídas para todos os 5 ADVs estão apresentadas na Figura 6.63 e Figura 6.64. As hodógrafas teóricas calculadas pelas equações de SHARMA e DEAN (1981) para o caso de referência T4-B2 também são plotadas a título de comparação. São ilustrados apenas os primeiros 60 s de simulação.

¹² Intel® Core™ i7-6500U CPU @ 2,50 GHz 2,60 GHz; RAM 16,0 GB; processador 64-bits. Tempo de processamento de 170 s: aproximadamente 40 min.

Observa-se que a IMF 9 dos ADVs apresenta um comportamento oscilatório, descrevendo uma órbita tridimensional com alguma semelhança à hodógrafa do caso T4-B2. Esse movimento hidrodinâmico parece ter uma faixa de direção, o que o distingue bastante do caso T3-A2, indicando a presença de uma onda de mais baixa frequência dentro da bacia, que provavelmente não é gerada por reflexões, mas sim interações subtrativas. Acredita-se que essas oscilações não sejam decorrentes de seiches, uma vez que o sistema de absorção ativa estava ativado.

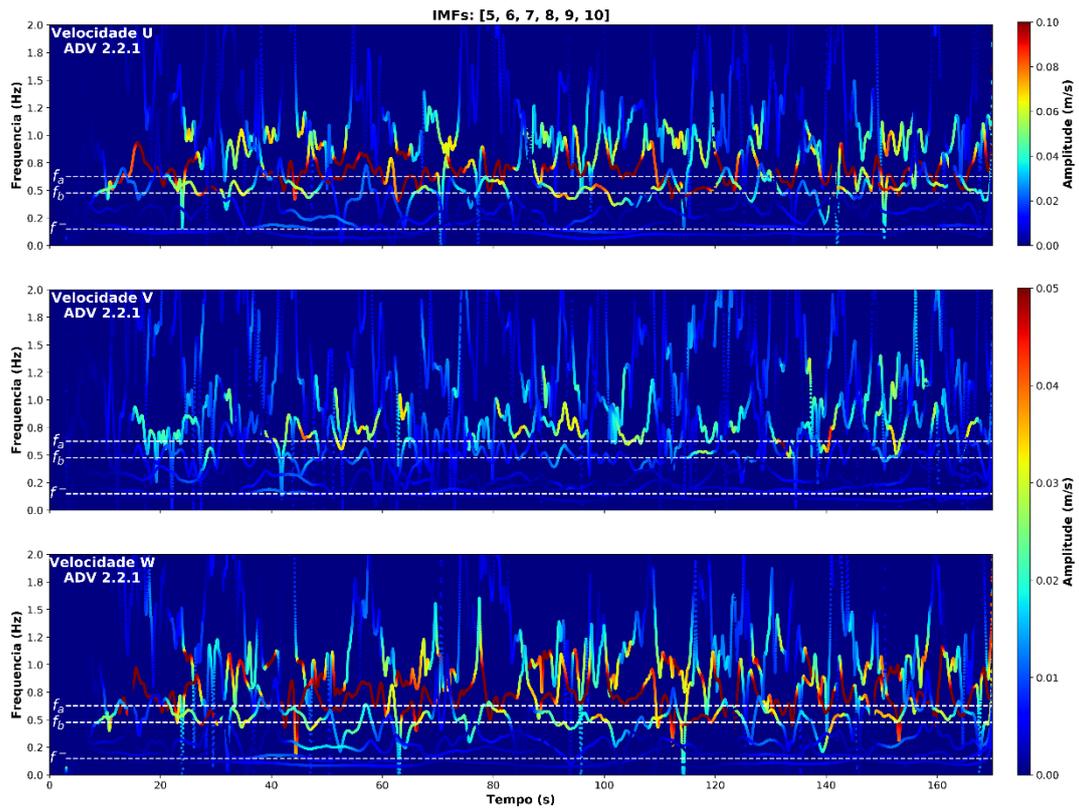


Figura 6.62. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T8-B2. Apenas as IMFs 5 a 10 estão plotadas.

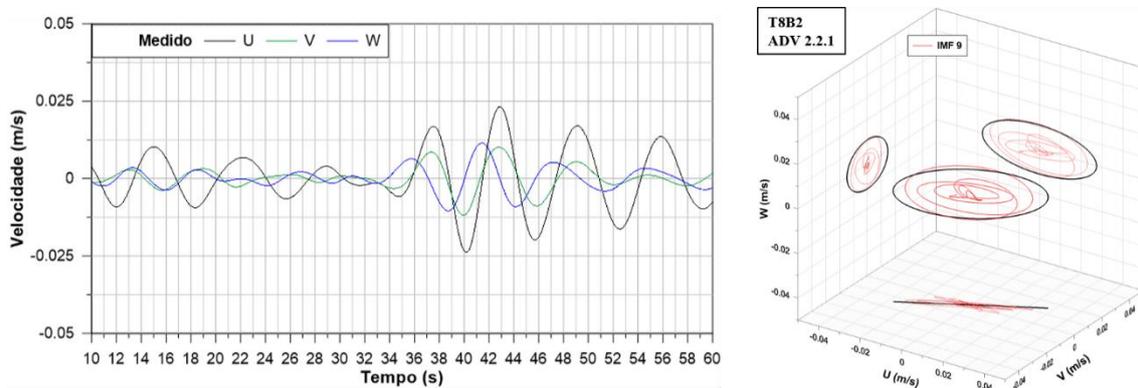


Figura 6.63. Séries temporais e hodógrafa extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T8-B2. A hodógrafa calculada para o caso T4-B2 também é plotada como referência.

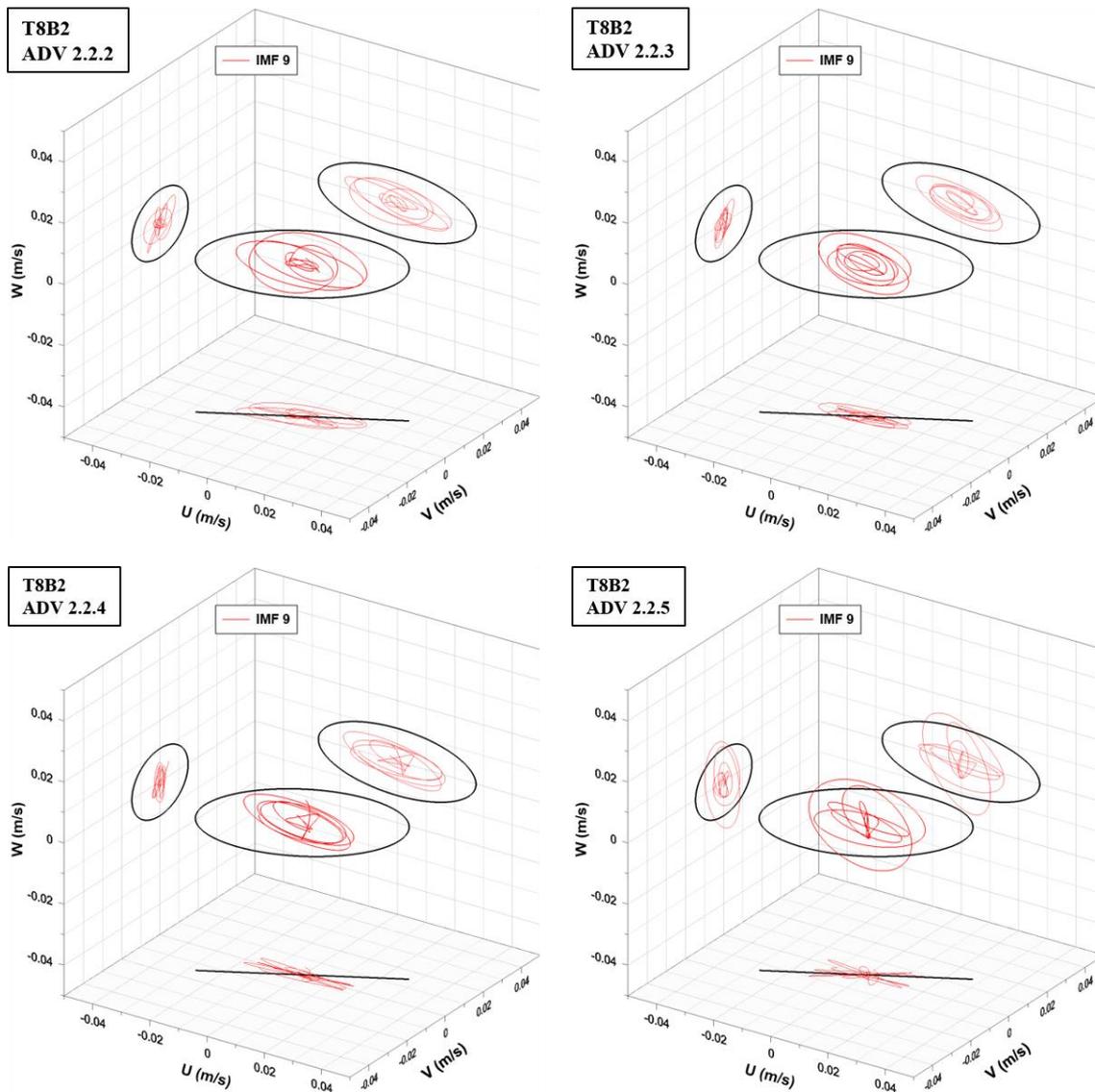


Figura 6.64. Hodógrafas extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelo espectro bimodal do caso T8-B2 para os demais ADVs do arranjo. As hodógrafas calculadas para o caso T4-B2 também são plotadas como referência.

VI.9. Teste T8-C5

Para endossar a possibilidade da análise de mares bimodais a partir da metodologia proposta, um total de 10 testes com geração de ondas espectrais foram simulados (Tabela A1.1). A entrada de dados com as características bimodais no programa do gerador de ondas não é tão simples quanto a imposição de ondas Bi-Bis. O programa demanda o espectro direcional completo, que deve ser criado manualmente.

A posterior comparação entre os espectros de entrada e aqueles que foram de fato gerados, mostrou alguns casos com erros nos espectros dados como entrada ao programa, e outros

onde o gerador de ondas não respeitou o espectro imposto. O teste T8-C5 foi escolhido para exemplificar o segundo problema.

A Figura 6.65 ilustra o espectro bimodal e bidirecional dado como entrada ao programa do gerador de onda. A Tabela 6.38 resume as principais características do espectro imposto no teste T8-C5 e do teste Bi-Bi de referência, T4-C5. Observa-se um pequeno erro em relação ao período da onda ‘b’.

Tabela 6.38. Resumo das características do teste T8-C5 e comparação com o T4-C5 (s = espalhamento direcional, em que x% da energia na direção de pico foi espalhada igualmente entre as direções adjacentes).

Teste	Onda	H (m)	T (s)	D (°)	s (%)	h (m)	d (m)		
T4-C5	a	0,10	1,30	15	-	0,75	0,50		
	b	0,16	2,80	-15	-				
Teste	Espectro	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	s (%)				
T8-C5	a	0,09	1,33	15	15				
	b	0,16	3,00	-15	5				

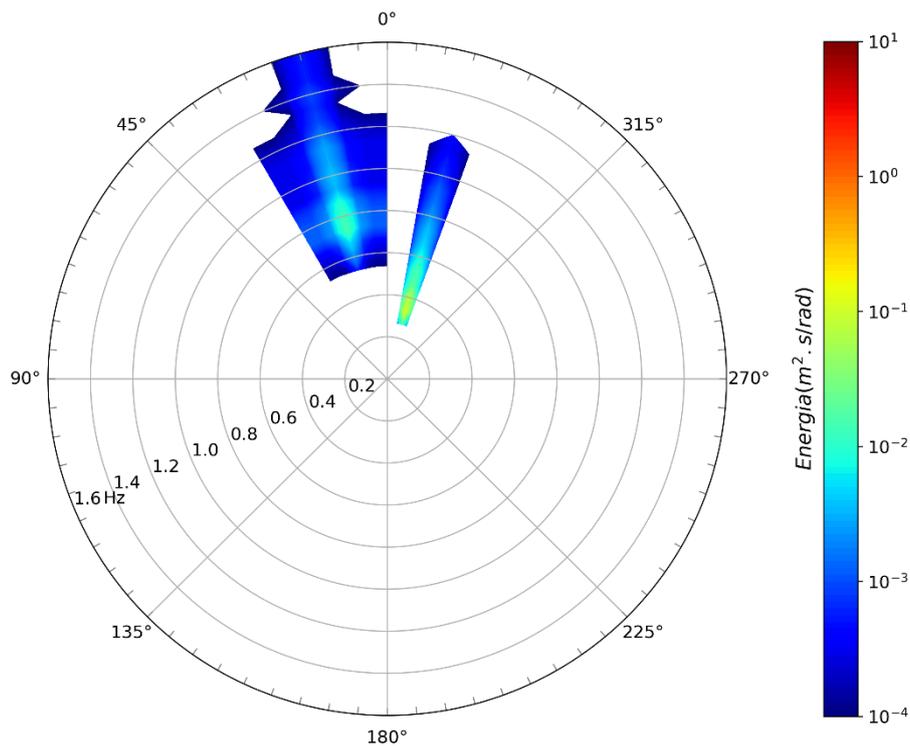


Figura 6.65. Espectro bimodal inserido no programa computacional do gerador de ondas para o teste T8-C5.

VI.9.1. Arranjo 2: USS

A Figura 6.66 ilustra o resultado da análise espectral a partir do arranjo 2 de USS. Apenas os primeiros 3 min ($\approx 10\%$ do período total) foram incluídos na análise devido a

problemas nos instrumentos semelhantes aos mostrados na Figura 6.59. Nota-se um claro aspecto bimodal do espectro, porém, com características diferentes das impostas para o programa de geração de onda. A Tabela 6.39 resume as principais características da análise espectral.

A comparação entre os espectros imposto e medido deixa claro que o gerador de ondas não respeitou os parâmetros requisitados. A onda ‘a’ gerada possui um período bem superior ao requisitado, porém manteve uma precisão adequada em relação a sua altura e ao seu ângulo. A onda ‘b’, por sua vez, não apresentou nenhum parâmetro próximo àqueles dados como entrada ao sistema.

Em relação às ondas de interferência, o resultado não permite a identificação clara das diversas componentes de interação onda-onda. No entanto, é nítido que o arranjo de USS não foi capaz de capturar a onda de interação subtrativa de 2ª ordem, $f_a - f_b$ ($f^- \approx 0,12$ Hz).

O relatório completo da análise feita pelo WaveLab®, incluindo a estimativa do coeficiente de reflexão é reproduzido na Figura 6.67.

Tabela 6.39. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS para o teste T8-C5.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,118	2,00	13,50
a	0,068	2,00	13,50
b	0,058	2,64	2,50
Subtrativa	-	-	-

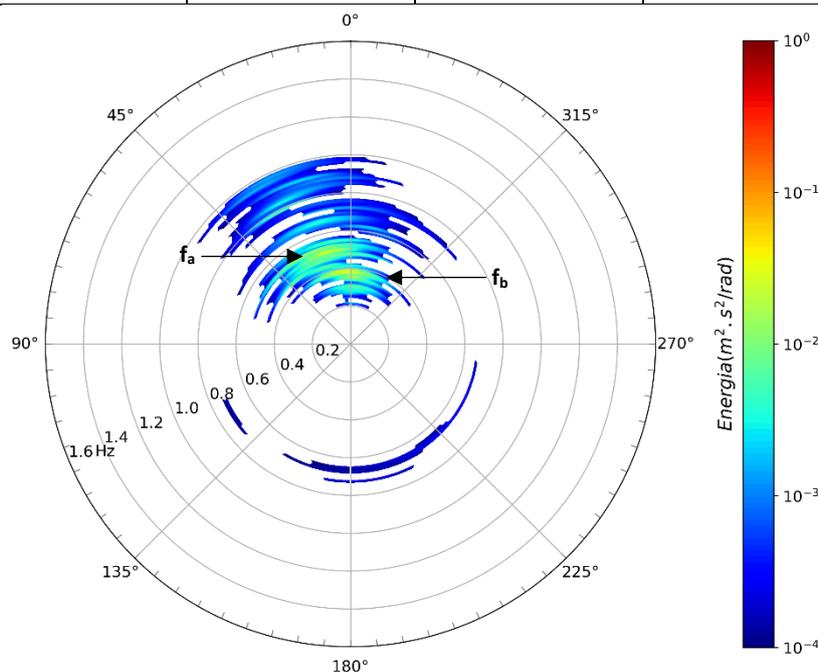


Figura 6.66. Espectro bimodal calculado para o teste T8-C5.

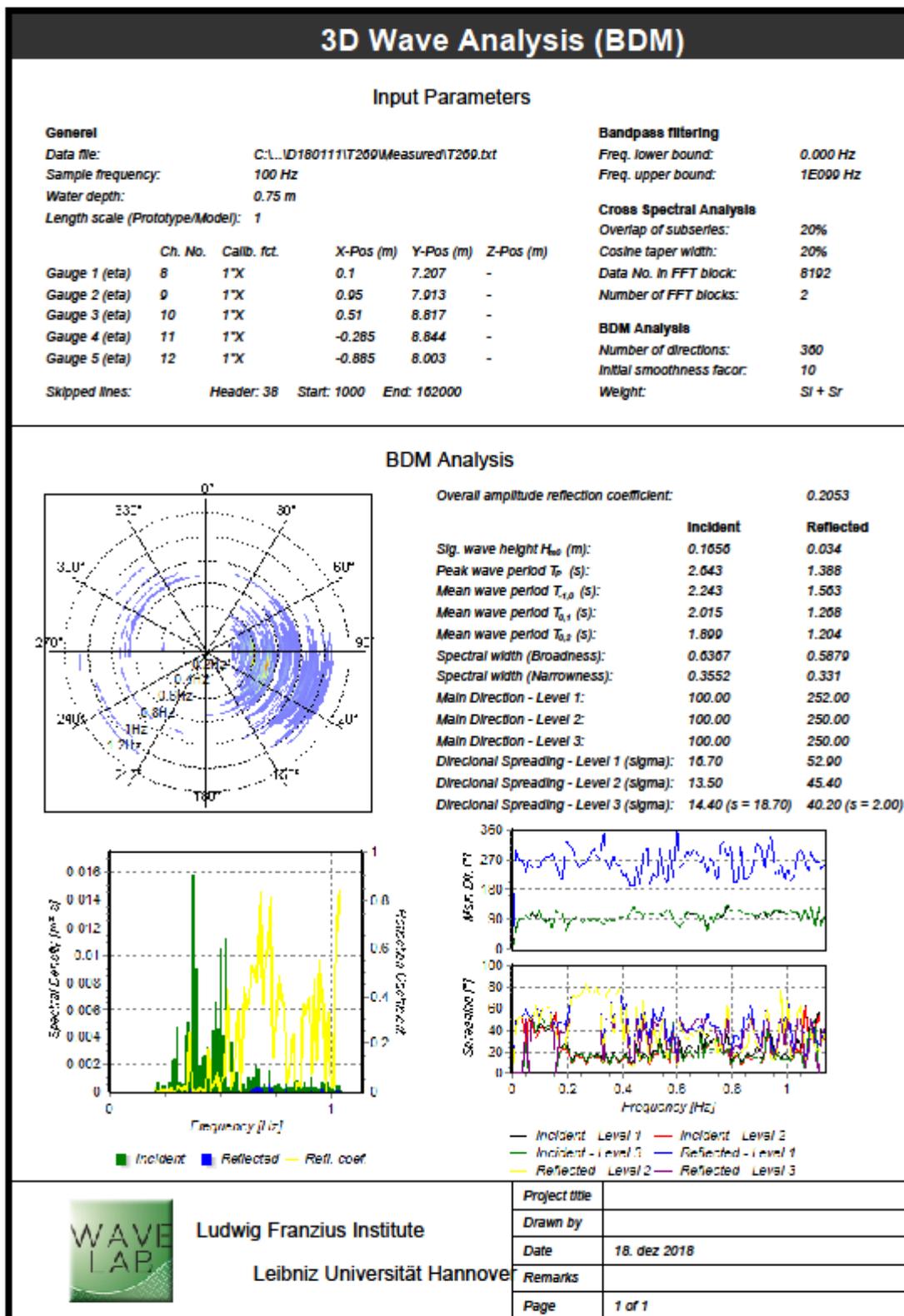


Figura 6.67. Relatório de análise produzido pelo WaveLab® para o teste T8-C5.

VI.9.2. Arranjo 2: ADV

A Figura 6.68 apresenta um exemplo das medições de velocidade durante o teste T8-C5. As séries temporais das 3 componentes de velocidade são mostradas apenas ao longo do primeiro minuto de medição, junto com a hodógrafa tridimensional para o ADV 2.2.4.

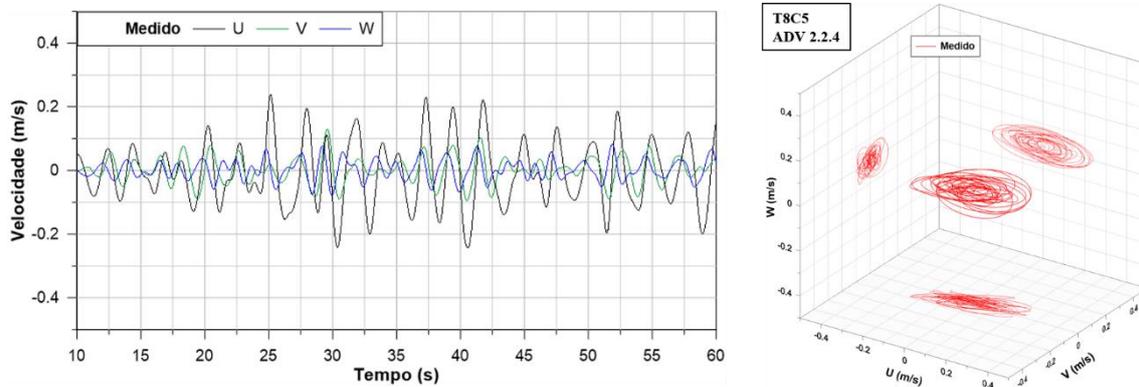


Figura 6.68. Séries temporais e hodógrafa medidas resultantes do espectro bimodal para o caso T8-C5.

Novamente, apenas os primeiros 170 s de medição foram utilizados para o processamento da NA-MEMD. Foram geradas 15 IMFs, sendo que, aparentemente, as IMFs 7 e 8 representam as ondas primárias e a IMF 10, a onda de interação subtrativa. A Figura 6.62 ilustra a transformada de Hilbert para as IMFs de número 5 a 10, extraídas do ADV 2.2.4. As linhas brancas tracejadas correspondem aos valores esperados para o caso de ondas Bi-Bi com as características medidas pelo arranjo 2 de USS e apresentadas na Tabela 6.39.

Observa-se uma grande mistura de modo entre a maioria das IMFs, tanto de frequência, quanto de amplitude. A IMF 10 é aquela que mais se aproxima da frequência esperada ($f \approx 0,12$ Hz), porém com uma amplitude muito pequena

As velocidades orbitais de baixa frequência extraídas para todos os 5 ADVs estão apresentadas na Figura 6.70 e Figura 6.71. As hodógrafas teóricas calculadas pelas equações de SHARMA e DEAN (1981) para o caso de referência da Tabela 6.39 também são plotadas a título de comparação. São ilustrados apenas os primeiros 60 s de simulação. Observa-se que a IMF 10 não representa adequadamente a onda de interação subtrativa de 2ª ordem.

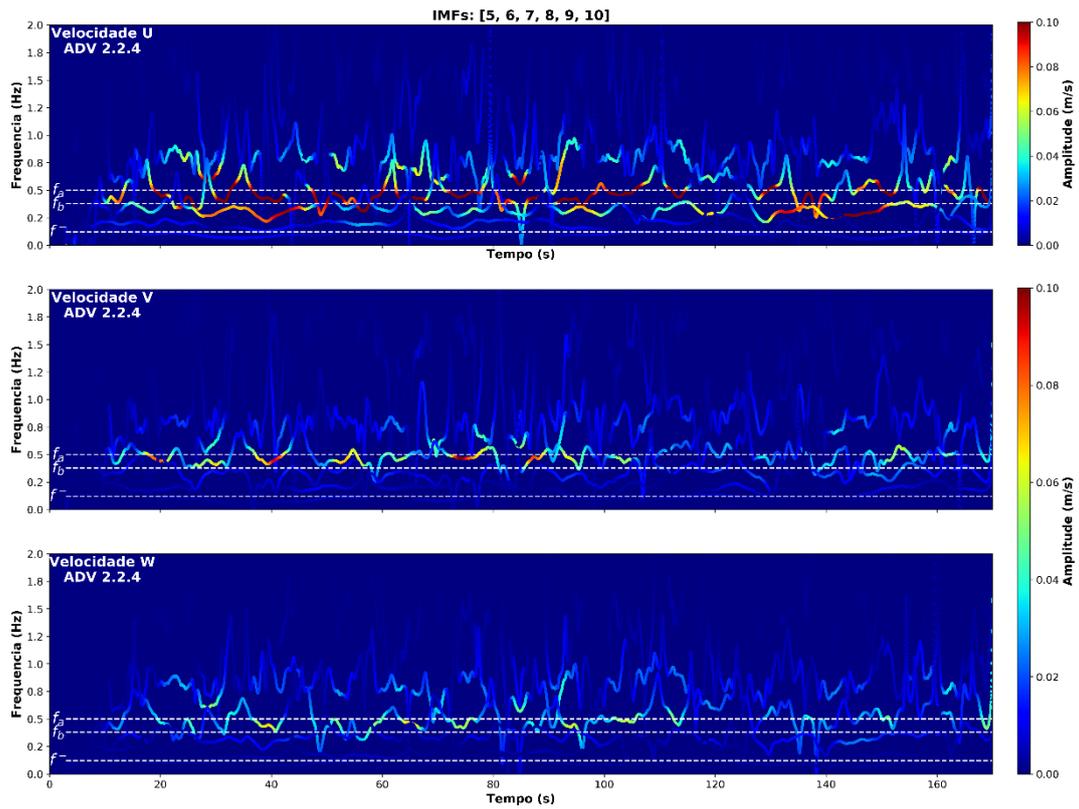


Figura 6.69. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o caso T8-C5. Apenas as IMFs 5 a 10 estão plotadas.

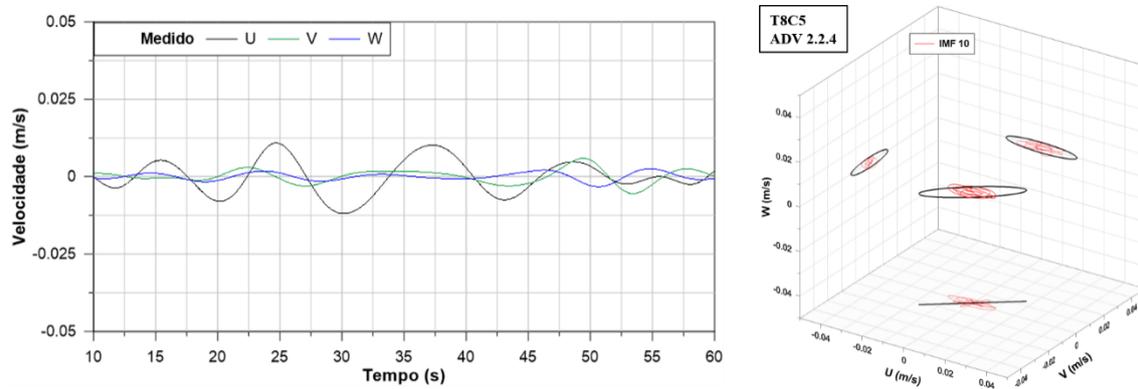


Figura 6.70. Séries temporais e hodógrafa extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o caso T8-C5. A hodógrafa calculada para o caso puramente Bi-Bi também é plotada como referência.

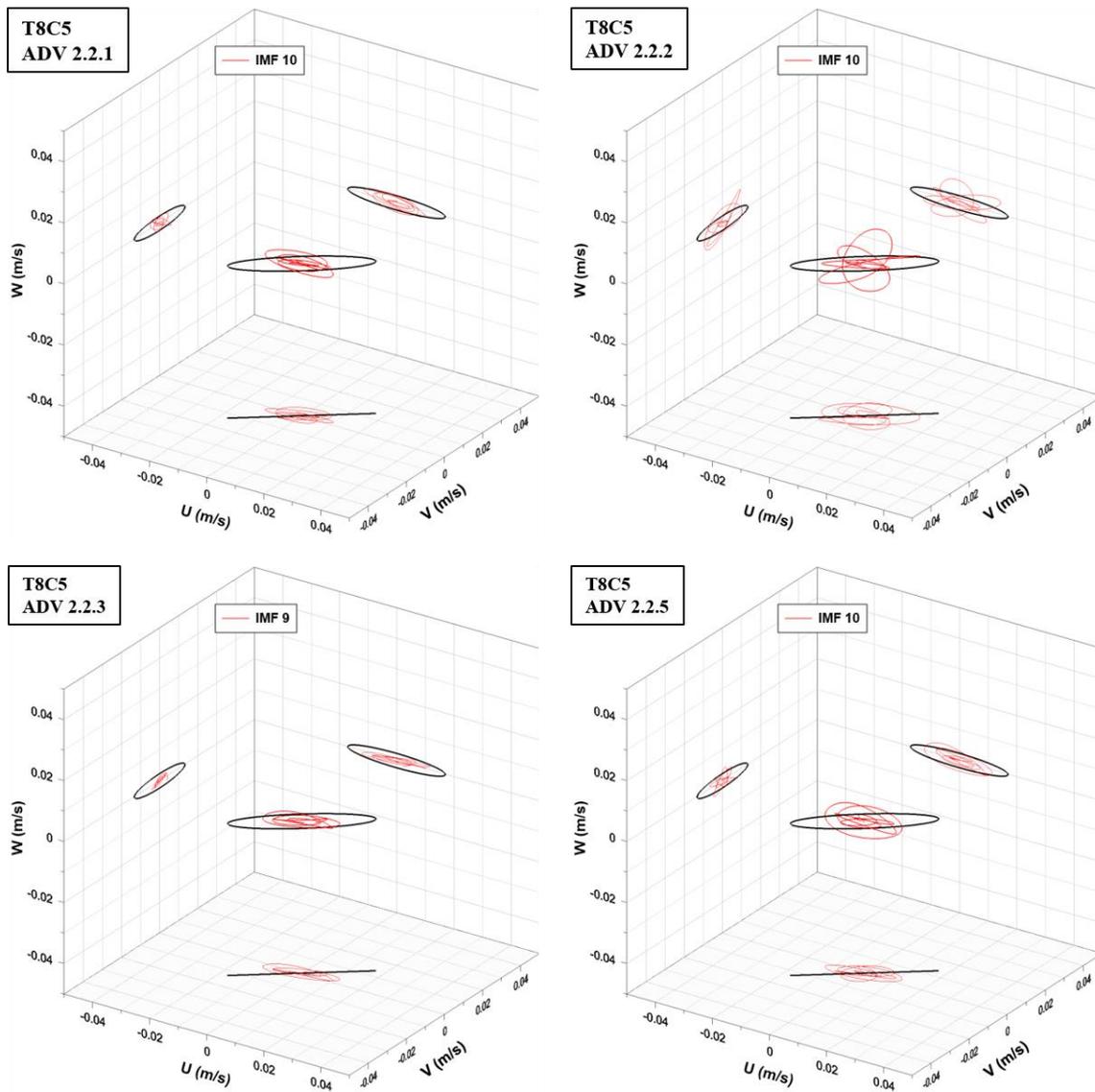


Figura 6.71. Hodógrafas extraídas (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelo espectro bimodal do caso T8-C5 para os demais ADVs do arranjo. As hodógrafas calculadas para o caso puramente Bi-Bi também são plotadas como referência.

CAPÍTULO VII

DISCUSSÃO

No **Capítulo VI**, foram apresentados os resultados mais representativos dos experimentos laboratoriais feitos na bacia 3D do Instituto Ludwig-Franzius. No presente capítulo, uma análise global dos resultados é feita, discutindo-se alguns aspectos positivos e negativos da metodologia proposta neste trabalho. Além disso, o assunto tratado no **Capítulo III** é resgatado, calculando-se as tensões de radiação geradas pelas Bi-Bis simuladas em laboratório, de forma a conectar os temas centrais desta tese: a teoria e as medições das ondas Bi-Bi.

VII.1. SIMULAÇÕES DAS ONDAS BI-BI

A Figura 7.1 e a Figura 7.2 apresentam imagens frontais e laterais dos testes T4-B2 e T4-B3, em que a profundidade da lâmina d'água era de 0,75 m, $H_a = 0,10$ m, $T_a = 1,3$ s, $H_b = 0,16$ m, $T_b = 1,7$ s. Em ambos os testes, $D_b = 0^\circ$. A única diferença entre os testes é o ângulo da onda 'a'. Enquanto em T4-B2, $D_a = 10^\circ$, no teste T4-B3, $D_a = 30^\circ$.

A diferença entre o $\Delta\theta$ produz uma nítida alteração visual no padrão de cristas das ondas Bi-Bi. No primeiro caso, as cristas são longas, porém não se estendem por toda a largura da bacia. Há um desencontro entre cristas sucessivas em determinados locais, que se alterna ao longo do tempo. No segundo caso, as cristas são curtas, deixando evidente a presença de mais de uma onda dentro da bacia.

As imagens das simulações em laboratório remetem às fotografias da Figura 1.3. Todos os casos em que $\Delta\theta = 30^\circ$, aqui exemplificados pelo teste T4-B3, são imediatamente associados às fotografias (a), (b) e (c), onde a presença de mais de uma onda é nítida, e a superposição de cristas e cavados geram formas losangulares, mais facilmente identificadas de imagens aéreas. Já os testes onde $\Delta\theta = 10^\circ$ são associados à fotografia (d), onde a pequena diferença de ângulo entre as duas ondas gera ondas com cristas longas, podendo iludir o observador. No entanto, o desencontro entre cristas, também mais fácil de ser notado por imagens aéreas, deixa evidente a presença de uma superposição de cristas de ondas que se propagam com diferentes direções.



Figura 7.1. Fotografia frontal e lateral do teste T4-B2.

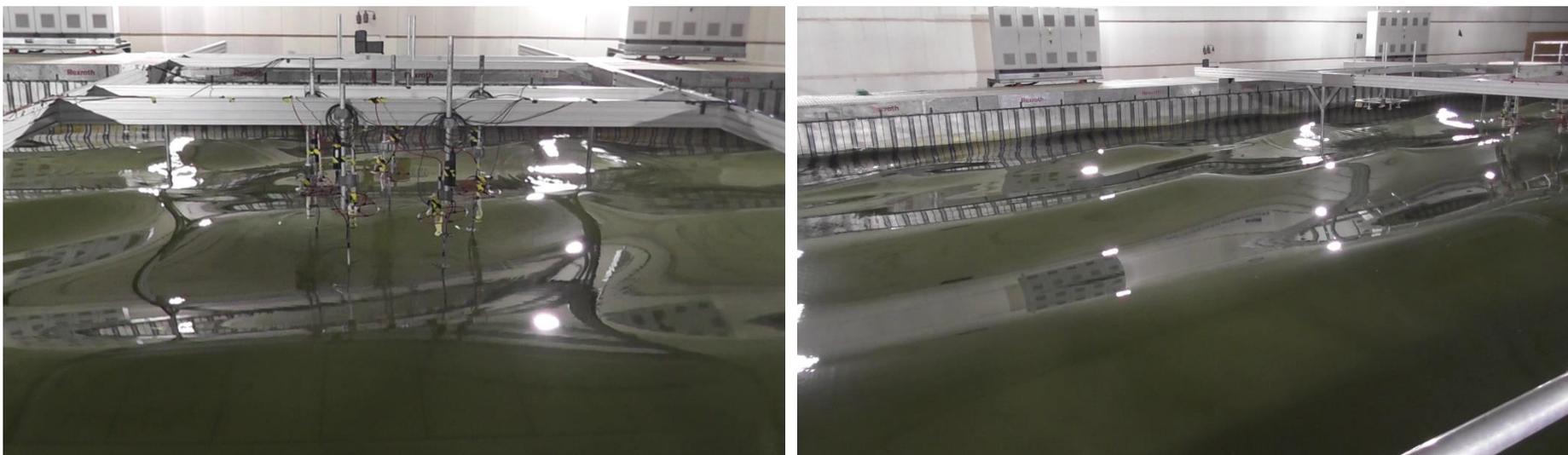


Figura 7.2. Fotografia frontal e lateral do teste T4-B3.

VII.2. MEDIÇÕES DAS ONDAS BI-BI

A metodologia de análise proposta nesta tese tem por objetivo extrair a onda de interação subtrativa de 2ª ordem, resultante das interações não-lineares entre pares de onda, e pode ser resumida em cinco etapas:

- i. Medição das hodógrafas de velocidades a partir de um arranjo de 5 ADVs;
- ii. Retirada de dados espúrios (*spikes*) a partir do método de GORING e NIKORA (2002);
- iii. Filtragem da alta frequência a partir do filtro passa-baixa de THOMPSON (1983);
- iv. Correção da inclinação dos ADVs a partir do método proposto por NEVES *et al.* (2012);
- v. Aplicação da HHT (HUANG *et al.*, 1998) assistida pela NA-MEMD (REHMAN *et al.*, 2013) sobre os dados do arranjo de ADVs.

De forma geral, a metodologia apresentou excelentes resultados para todos os casos em que a frequência da onda de interação subtrativa é suficientemente distinta das frequências das ondas primárias. A seguir, as observações mais relevantes sobre cada uma das etapas são expostas. Sugestões de como melhorar os problemas encontrados também são descritas em cada seção. Pesquisadores interessados em obter os dados brutos medidos para este trabalho e repetir as análises, devem se dirigir ao **Anexo IV**.

VII.2.1. Despiking e Filtragem

Uma das maiores críticas ao uso do ADV é a grande quantidade de ruído presente nos dados de saída do equipamento, o que é compreensível quando suas medições são comparadas com equipamentos de medição da superfície livre (Figura 4.11 e Figura 6.1). Neste trabalho, foi proposta a utilização de um método de retirada de dados espúrios e posterior filtragem das séries de velocidade para eliminar erros de medições e fenômenos fora das escalas de interesse da pesquisa.

A combinação dos métodos de GORING e NIKORA (2002) e THOMPSON (1983) se mostrou uma eficiente metodologia de análise de ADVs. Aliados aos cuidados especiais durante as medições, como o uso da fonte circular para melhor distribuição de material em suspensão na água (Figura 4.7), o processo de tratamento de dados foi capaz de gerar

séries de velocidade suaves (Figura 5.3) e mais adequadas para análises de fenômenos com escalas de magnitudes tão pequenas quanto a das interações não-lineares onda-onda.

VII.2.2. Correção da inclinação

Os ADVs destinados ao uso em laboratório não possuem bússolas para correção da inclinação do equipamento dentro da bacia. Qualquer pequeno erro de posicionamento do instrumento resulta na contaminação mútua entre as três componentes da velocidade medidas (Figura 5.6). Neste trabalho, as medições dos testes foram corrigidas a partir da metodologia proposta por NEVES *et al.* (2012). A inclinação dos ADVs foi determinada a partir do cálculo dos autovetores da matriz de correlação cruzada entre as componentes da velocidade, com o uso de testes recorrentes com apenas uma onda com propagação normal ao batedor.

Apesar de em alguns casos a correção ter melhorado os resultados medidos (Figura 5.8), acredita-se que a vibração das barras de sustentação dos ADVs tenha causado uma contaminação dos dados de medição e, conseqüentemente, prejudicado o cálculo da inclinação dos equipamentos, o que justificaria a mudança de inclinação verificada ao longo de um mesmo dia de testes (Figura 5.7). A Figura 7.3 e Figura 7.4 exemplificam dois casos em que a vibração é nítida, causando fortes deformações nas curvas de velocidade, mesmo antes da incidência de reflexão. A simulação total é de 2 min, mas apenas 15 s na parte inicial da simulação são exibidos.

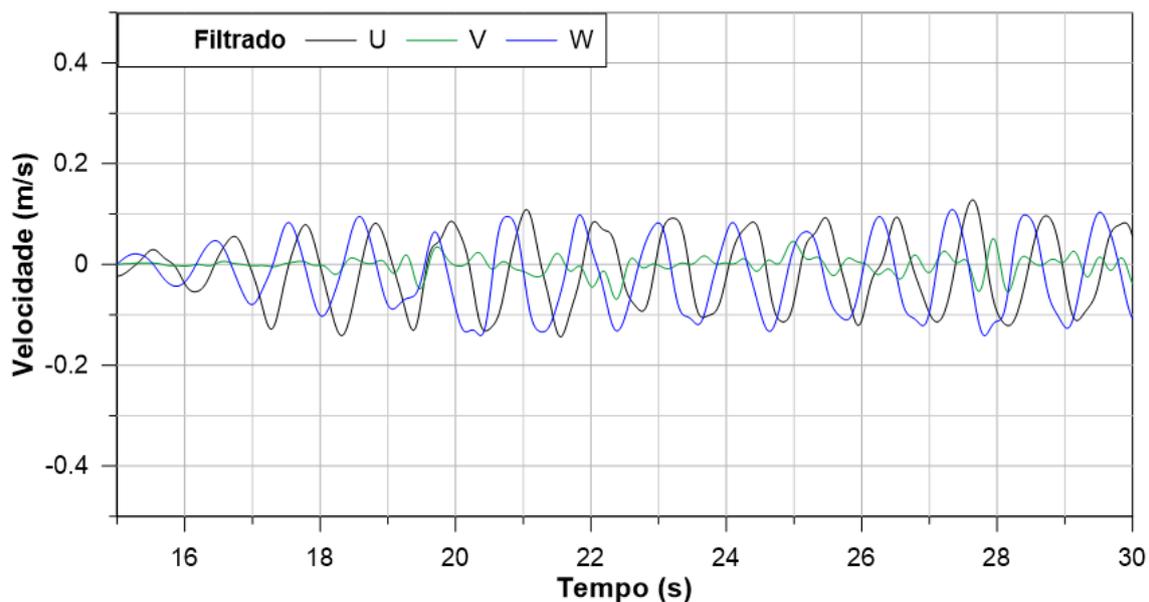


Figura 7.3. Séries temporais filtradas para o caso com uma onda: $H = 0,13$ m; $T = 1,1$ s; $D = 0^\circ$; $h = 0,75$ m; e $d = 0,35$ m.

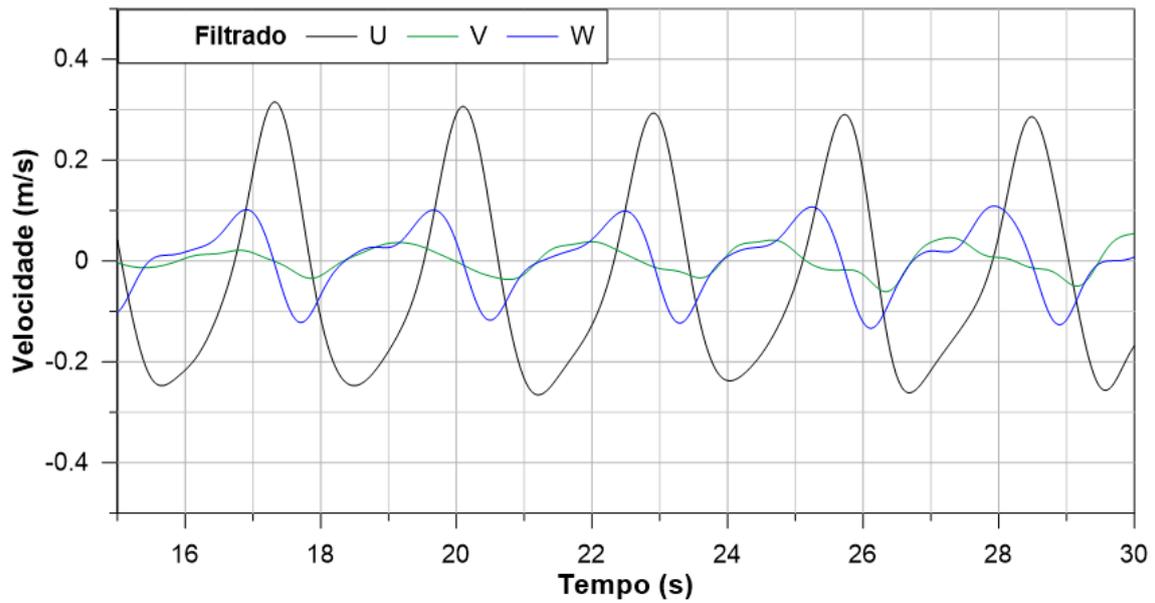


Figura 7.4. Séries temporais filtradas para o caso com uma onda: $H = 0,16$ m; $T = 2,8$ s; $D = 0^\circ$; $h = 0,75$ m; e $d = 0,35$ m.

Para solucionar este problema, sugere-se que uma plataforma seja construída especificamente para o arranjo de ADVs, nos mesmos moldes do acessório metálico já existente e utilizado para o arranjo 1 de USSs, exibido na Figura 7.5. Assegurando-se o posicionamento estático mais preciso dos ADVs, certamente haverá a diminuição da dispersão dos valores de inclinação dos instrumentos calculados e uma melhora na qualidade das medições de velocidade e extração da onda de interação subtrativa.



Figura 7.5. Plataforma metálica destinada à colocação do arranjo 1 de USSs.

VII.2.3. Arranjo de ADV

A ideia de analisar os resultados dos ADVs de forma conjunta em vez de examinar cada ADV separadamente trouxe consistência à metodologia proposta. No **Capítulo IV**, foi dito que resultados preliminares sugeriram que a utilização do arranjo, somada à introdução de um orbital de ruído branco gerou melhores resultados do que a análise com apenas uma ou nenhuma série de ruído ou considerando apenas um ADV.

A Figura 7.6 traz um exemplo da comparação dos resultados do teste T4-B2 para o ADV 2.2.1 obtidos através da análise separada e conjunta dos ADVs, com e sem a introdução de um orbital de ruído. A frequente obtenção de melhores resultados para a análise do arranjo com a introdução de ruído branco trouxe confiabilidade aos resultados gerados para todos os testes realizados.

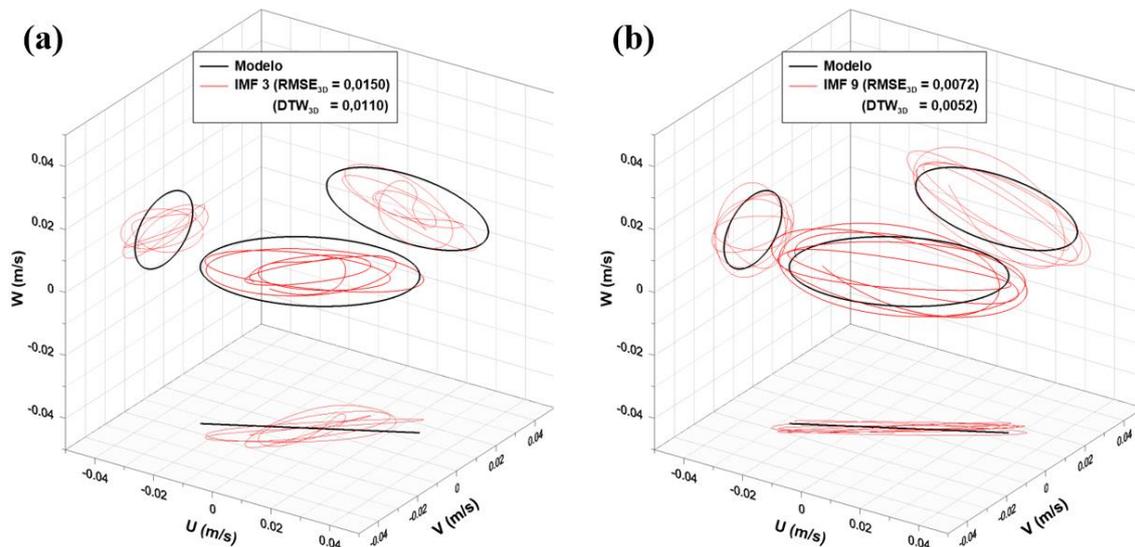


Figura 7.6. Comparação entre a análise de (a) um ADV separadamente sem a introdução de ruído; e (b) arranjo com 5 ADVs e a introdução de um orbital de ruído.

VII.2.4. Profundidade dos ADVs

Um dos objetos de investigação ao longo do trabalho foi verificar qual o efeito do posicionamento dos ADVs em diferentes profundidades sobre os resultados da extração da onda de interação subtrativa de 2ª ordem. Acreditava-se que, devido à diferença da evolução dos perfis de velocidade das ondas primárias e de interação subtrativa (Figura 4.6), fosse mais fácil identificar a onda não-linear a uma profundidade maior.

Dentre todos os experimentos, os ADVs foram posicionados a profundidades de 46,67% (testes T3, T4 e T8), 58,33% (testes T1, T2, T5 e T8) e 66,67% (testes T6 e T8) da coluna d'água. Mais especificamente, o teste T6 é uma repetição do teste T4, com os instrumentos posicionados a uma maior profundidade. Para os testes realizados, não houve nenhuma indicação clara que possa confirmar a hipótese acima. Portanto, presume-se que a profundidade do ADV não seja um critério relevante para a extração da onda de interação subtrativa.

VII.2.5. Mistura de modo: frequência

Quanto mais próximos forem os períodos das ondas, mais ineficiente é o peneiramento da NA-MEMD. Para períodos suficientemente distintos, a IMF correspondente à onda não-linear resultante da Bi-Bi se comporta como uma reta quase horizontal ao longo do tempo no espectro de Hilbert. À medida que a diferença de frequências diminui, a IMF passa a sofrer oscilações resultantes da mistura de modo, até um ponto em que as frequências são tão próximas que pode não haver sequer uma IMF que represente a onda subtrativa de 2ª ordem.

A Figura 7.7 ilustra a transformada de Hilbert das IMFs 5 a 10 da velocidade horizontal u , extraídas do ADV 2.2.1 para os testes T2-B2, T2-C2, T3-C2 e T1-C2. As características principais de cada um dos testes estão resumidas na Tabela 7.1.

Observa-se que para o caso T2-B2, há uma IMF exatamente sobre a frequência esperada sem, praticamente, nenhuma oscilação. No caso T2-C2, a IMF que representa a onda subtrativa passa a ter pequenas oscilações em torno da baixa frequência. O caso T3-C2 é interessante, pois a onda subtrativa possui um período inferior à onda 'b'. Neste caso, nota-se uma grande mistura de modo das IMFs que representam as ondas primárias, sendo que há duas IMFs em torno da frequência da onda 'b'. Já no último teste, não há sequer uma IMF que represente a onda não-linear, que está inteiramente absorvida pela IMF que representa a onda primária 'b'.

De forma geral, verificou-se que a separação em frequência da onda de interação subtrativa de 2ª ordem apresentou bons resultados quando seu período é maior do que o da onda 'b' ($T > T_b > T_a$), com uma diferença de até 0,20 Hz. Entre este valor e 0,18 Hz, a mistura de modo provoca oscilações consideráveis nas IMFs adjacentes, dificultando a interpretação dos resultados. Para ondas com diferenças de frequência menor do que 0,18 Hz, é muito provável que o processo da NA-MEMD não seja capaz de distingui-las. Não

houve nenhum caso em que se obtivesse um bom resultado quando a onda de interação subtrativa possuísse um período menor do que a onda ‘b’ ($T_b > T > T_a$).

Tabela 7.1. Características principais dos testes T2-B2, T2-C2, T3-C2 e T1-C2.

Teste	H (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	T ⁻ (s)	vel _{max} (m/s)
T2-B2	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	1,6	6,93	0,040
T2-C2	0,60	0,35	0,10	0,16	1,3	2,1	3,41	0,055
T3-C2	0,75	0,35	0,13	0,13	1,1	3,0	1,74	0,050
T1-C2	0,60	0,35	0,13	0,13	1,2	2,3	2,51	0,061

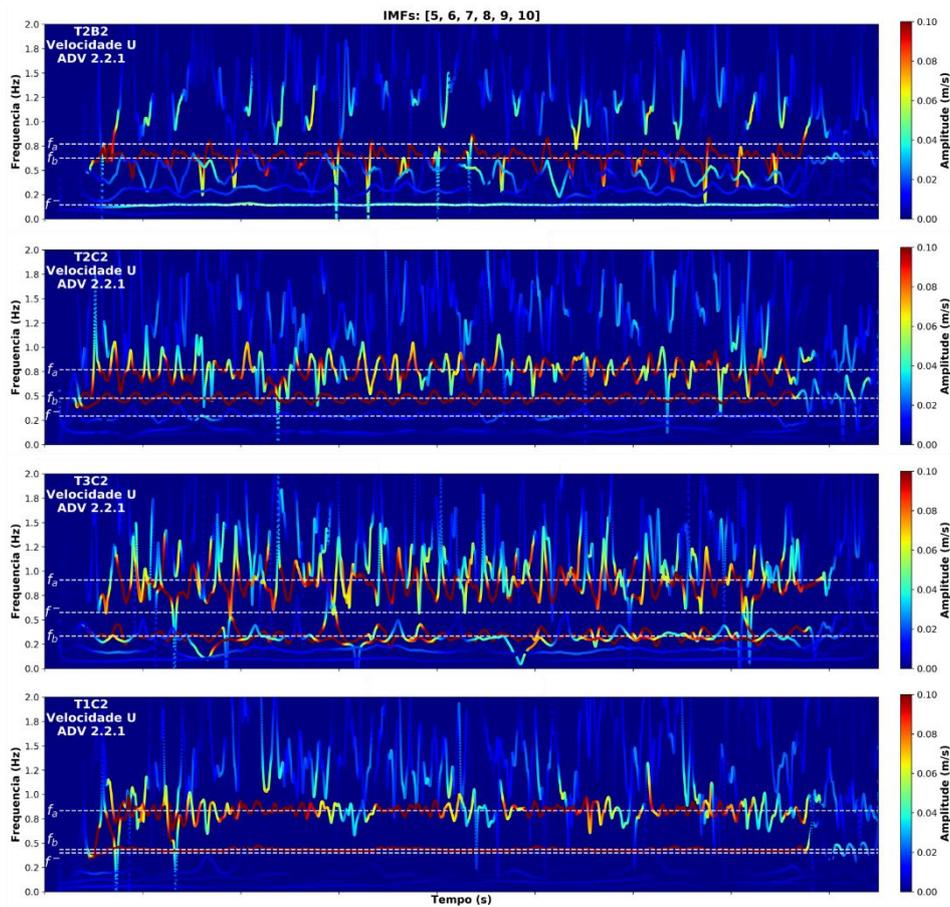


Figura 7.7. Espectro de Hilbert das IMFs 5 a 10 extraídas do ADV 2.2.1 para os testes T2-B2, T2-C2, T3-C2 e T1-C2.

Em nenhum caso de ondas Bi-Bi analisado foi possível identificar uma IMF responsável por representar alguma interação aditiva ou superharmônicos das ondas primárias. Observa-se na Figura 7.7 que a IMF 5 (de maior frequência) apresenta uma grande oscilação, aproximadamente entre 1 Hz e 2 Hz, impossibilitando qualquer associação com interações de alta frequência. Dois podem ser os motivos para a elevada dispersão dos valores de frequência instantânea das IMFs de alta frequência: (i) a mistura de modo entre

as diversas componentes interativas de alta frequência; e (ii) contaminação dos efeitos vibratórios de alta frequência das barras de sustentação do ADVs.

No entanto, em diversos casos de ondas monocromáticas que foram usados para a verificação e correção da inclinação dos instrumentos, foi possível identificar uma IMF representativa do segundo e terceiro superharmônicos da onda primária. A Figura 7.8 apresenta o espectro de Hilbert para o teste anterior ao caso T2-E1. Neste teste, a onda monocromática possuía as seguintes características: $H_a = 0,16$ m, $T_a = 2,10$ s e $D_a = 0,0^\circ$. Apenas as IMFs 5 a 10 estão ilustradas. As IMFs 5, 6 e 7 representam nitidamente as frequências $3f_a$, $2f_a$ e f_a . Ressalta-se que frequências maiores que o terceiro harmônico foram eliminadas pelo filtro de Thompson. A maior oscilação das IMFs 5 e 6 podem ser devido à baixa magnitude dos superharmônicos em relação à frequência principal, f_a , dificultando os seus peneiramentos, ou devido a contaminações dos efeitos vibratórios das barras de sustentação.

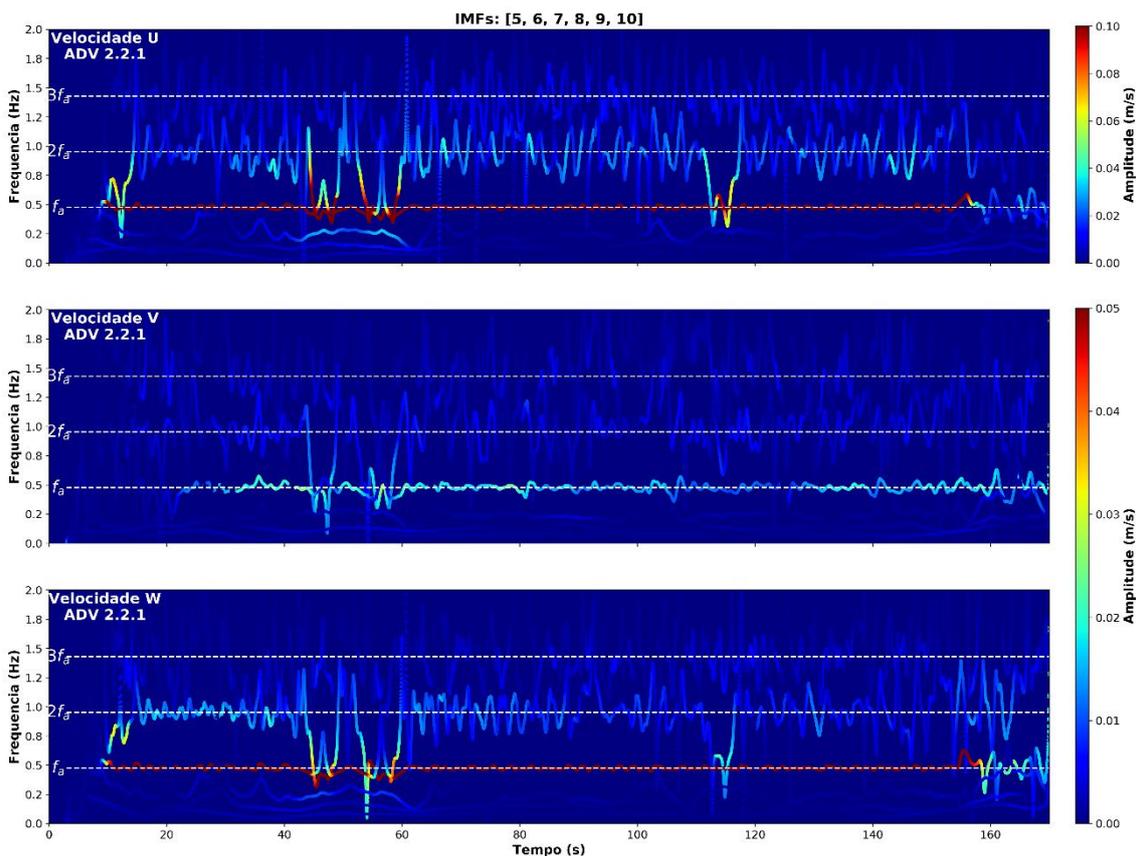


Figura 7.8. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W para o teste monocromático anterior ao caso T2-E1. Apenas as IMFs 5 a 10 estão plotadas.

Um método adotado neste trabalho para melhorar o processo de peneiramento foi aplicar a NA-MEMD ao conjunto de dados fornecido pelos 5 ADVs do arranjo em vez de analisar

separadamente cada ADV. No entanto, o código da NA-MEMD apresenta um série de parâmetros que não foram testados e que devem, portanto, ser foco de futuras investigações, dentre as quais, destacam-se a avaliação de: (i) método de interpolação dos extremos da série; (ii) critério de parada para a determinação de uma IMF; (iii) número de projeções usadas; (iv) número de dimensões de ruído branco utilizados e (v) desvio padrão do ruído.

VII.2.6. Mistura de modo: amplitude

Além da mistura em frequência, casos como os testes T4-B2, T6-B2 e T2-C4 evidenciaram que as amplitudes das IMFs também podem sofrer mistura de modo. Esse problema ficou evidente na comparação entre hodógrafas extraídas pela NA-MEMD e calculadas analiticamente, seja para as ondas primárias (Figura 6.6 e Figura 6.14) ou de interação subtrativa (Figura 6.23 e Figura 6.24).

Recentemente, HUANG *et al.* (2016) desenvolveram a Análise Espectral Holo-Hilbert (HNSA – *Holo-Hilbert Spectral Analysis*), uma evolução da HHT desenvolvida especificamente para tratar do problema da mistura de modo no âmbito da amplitude. Segundo os autores, fenômenos não-lineares são formados por modulações em frequência e amplitude. As modulações em frequência são resultado da soma linear de escalas diferentes de frequência e podem ser resolvidas por métodos espectrais tradicionais ou pela HHT. No entanto, as modulações de amplitude são resultado de processos não-lineares multiplicativos, que apenas a HNSA pode solucionar.

Observando-se a equação (3.8), é fácil visualizar o problema. A 2ª ordem da elevação da superfície livre é resultante da soma das componentes de interação aditiva (alta frequência) e subtrativa (baixa frequência). No entanto, a magnitude de cada componente é resultado da multiplicação de parâmetros das duas ondas primárias. Portanto, enquanto no âmbito da frequência tem-se a soma ou diferença de diferentes escalas (IMFs), no âmbito da amplitude de cada escala de frequência tem-se a multiplicação de variáveis.

Os resultados apresentados no **Capítulo VI** deixam claro que a mistura de modo em amplitude é mais sensível do que a mistura de modo em frequência. Isso evidencia que a separação das amplitudes entre as IMFs ainda não está tão bem tratada na NA-MEMD quanto a separação em frequência.

A HHSA não foi implementada na metodologia deste trabalho, mas é considerada o próximo passo a ser seguido em futuras pesquisas sobre as análises das ondas Bi-Bi.

VII.2.7. Onda monocromática-bidirecional

Segundo a teoria de DALRYMPLE (1975) e as equações de SHARMA e DEAN (1981), ondas cruzadas de mesmo período geram uma onda estática em 2ª ordem que não causa oscilações hidrodinâmicas de baixa frequência. Os testes T3-A2, e seus equivalentes, confirmam tal fenômeno, uma vez que nenhuma oscilação de longo período foi encontrada tanto na análise da superfície livre, quanto das velocidades.

VII.2.8. Espectros bimodais

Aproximadamente 95% dos testes realizados neste trabalho foram formados por ondas puramente bicromáticas e bidirecionais. No entanto, o que é mais comum na Natureza são espectros bimodais, onde diversas frequências e direções estão presentes.

Testes como o T8-B2 mostram que é possível que haja a identificação da onda não-linear de baixa frequência a partir da aplicação da HHT auxiliada pela NA-MEMD. Apesar de bons resultados terem sido obtidos para este teste, outros casos bimodais não foram conclusivos, como o T8-C5, de modo que a aplicação da metodologia proposta a casos mais reais deve ser fruto de futuras investigações.

VII.2.9. Superfície livre x velocidade

Em praticamente todos os testes em que a HHT foi capaz de separar uma única IMF para a onda de interação subtrativa de 2ª ordem, os resultados foram condizentes aos obtidos a partir de técnicas tradicionais aplicadas aos arranjos de USSs. No entanto, a análise das órbitas de velocidade trouxe uma informação mais precisa sobre o movimento oscilatório dessa onda não-linear, com uma determinação clara da sua amplitude, período e direção ao longo do tempo.

O caso T5-E5 é emblemático, pois confirma uma suspeita levantada no início do trabalho, de que devido às baixas alturas e maiores períodos da onda de interação subtrativa, a sua detecção é mais fácil a partir da medição das velocidades em vez da superfície livre. Neste teste, as ondas primárias eram menos esbeltas do que os demais testes e, conseqüentemente, a onda não-linear tinha uma altura menor. Enquanto a metodologia proposta neste trabalho foi capaz de extrair todas as propriedades da onda não-linear

(Figura 6.31), a aplicação do método BDM ao arranjo de USS não detectou qualquer energia em baixa frequência (Figura 6.26).

É inquestionável, no entanto, que o método tradicional foi capaz de extrair uma série de outras ondas não-lineares de diversas ordens e reflexões, enquanto a HHT só conseguiu extrair as ondas primárias e a onda subtrativa de 2ª ordem. Porém, há de se considerar que o método BDM para a análise de um arranjo de USS já é bem consolidado na literatura, enquanto a HHT é ainda muito recente.

VII.2.10. Superfície livre: arranjo 1 x arranjo 2

Apesar das medições dos arranjos de USS não serem o foco deste trabalho, a análise espectral da superfície livre consiste no método mais comum de análise de ondas na Engenharia Costeira. Portanto, é interessante tecer alguns comentários sobre algumas características dos resultados extraídos por este método.

Em todos os casos exemplificados no **Capítulo VI**, apresentou-se os resultados da análise espectral para o arranjo 2. Escolheu-se este arranjo, pois o seu posicionamento é semelhante ao arranjo de ADVs, facilitando a comparação direta entre os resultados extraídos pelo método convencional e aquele proposto neste trabalho. No entanto, é interessante observar se teria havido alguma diferença entre os resultados dos dois arranjos de USSs.

As diferenças principais entre os arranjos 1 e 2 são o número de instrumentos e o distanciamento entre os USSs. Como se pode observar na Figura 4.2, o arranjo 1 possui 6 instrumentos (tipo CERC-6), sendo que os 5 USSs externos pertencem a um círculo de 0,45 m de raio. As distâncias mínima e máxima entre um par de USS são de 0,44 m e 0,85 m. O arranjo 2 é formado 5 USSs (tipo CERC-5), sobre um círculo de raio 0,90 m, onde as distâncias mínima e máxima entre dois instrumentos são de 0,80 m e 1,84 m.

Para esta comparação, o teste T4-B3 é utilizado. Suas características principais são resumidas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2. Resumo das características do teste T4-B3.

T4-B3										
Teste	h (m)	d (m)	H_a (m)	H_b (m)	T_a (s)	T_b (s)	D_a (°)	D_b (°)	T⁺ (s)	T⁻ (s)
T4-B3	0,75	0,35	0,10	0,16	1,3	1,7	30	0	0,74	5,53

A Figura 7.9 apresenta o espectro direcional calculado para o arranjo 1. Nota-se a presença das ondas primárias, além do segundo harmônico da onda 'b' e a interação aditiva f_a+f_b . Dentre as reflexões identificadas, destaca-se aquela com frequência idêntica a esta interação aditiva de 2ª ordem.

O espectro direcional do arranjo 2 é ilustrado na Figura 7.10. É nítida a maior quantidade de informação extraída das medições, principalmente em relação às interações subtrativas que apresentam maiores comprimentos de onda do que as interações aditivas. Até fenômenos de 5ª ordem foram identificados ($3f_a - 2f_b$). Ressalta-se que, apesar da onda de interação subtrativa de 2ª ordem, $f_a - f_b$, ter sido identificada, seu ângulo não foi capturado corretamente.

A Tabela 7.3 e a Tabela 7.4 exibem as características teóricas das ondas de interação aditiva e subtrativa. Cada célula contém os valores de frequência (em Hz), comprimento de onda (em m) e ângulo de propagação (em °), respectivamente.

O resultado do teste T4-B3 mostra a importância de se planejar adequadamente o posicionamento dos instrumentos de medição de acordo com as características de onda simuladas e com a escala do fenômeno de interesse. Ressalta-se que para o presente trabalho, tinha-se maior interesse sobre as interações subtrativas de 2ª ordem que, na maioria dos testes, possuía comprimentos de onda maiores do que as duas ondas primárias. Apesar de não se ter tido a oportunidade de alterar o raio de medição do arranjo de ADVs, a presente análise é um indício de que a escolha das dimensões do arranjo 2 foi acertada.

Tabela 7.3. Valores de frequência (Hz), comprimento (m) e ângulo (°) das interações aditivas do teste T4-B3, respectivamente.

Interações Aditivas		f_b	$2f_b$	$3f_b$
		0,59 / 3,81 / 0,00	1,18 / 1,91 / 0,00	1,76 / 1,27 / 0,00
f_a	0,77 / 2,52 / 30,00	1,36 / 1,57 / 18,14	1,95 / 1,12 / 12,88	2,53 / 0,87 / 9,96
$2f_a$	1,54 / 1,26 / 30,00	2,13 / 0,97 / 22,68	2,71 / 0,78 / 18,14	3,30 / 0,65 / 15,07
$3f_a$	2,31 / 0,84 / 30,00	2,90 / 0,70 / 24,72	3,48 / 0,60 / 20,94	4,07 / 0,52 / 18,14

Tabela 7.4. Valores de frequência (Hz), comprimento (m) e ângulo (°) das interações subtrativas do teste T4-B3, respectivamente.

Interações Subtrativas		f_b	$2f_b$	$3f_b$
		0,59 / 3,81 / 0,00	1,18 / 1,91 / 0,00	1,76 / 1,27 / 0,00
f_a	0,77 / 2,52 / 30,00	0,18 / 4,66 / 67,65	0,41 / 3,72 / -47,70	1,00 / 2,06 / -24,15
$2f_a$	1,54 / 1,26 / 30,00	0,95 / 1,72 / 43,02	0,36 / 2,33 / 67,65	0,23 / 2,44 / -76,00
$3f_a$	2,31 / 0,84 / 30,00	1,72 / 1,03 / 37,75	1,13 / 1,28 / 49,49	0,54 / 1,55 / 67,65

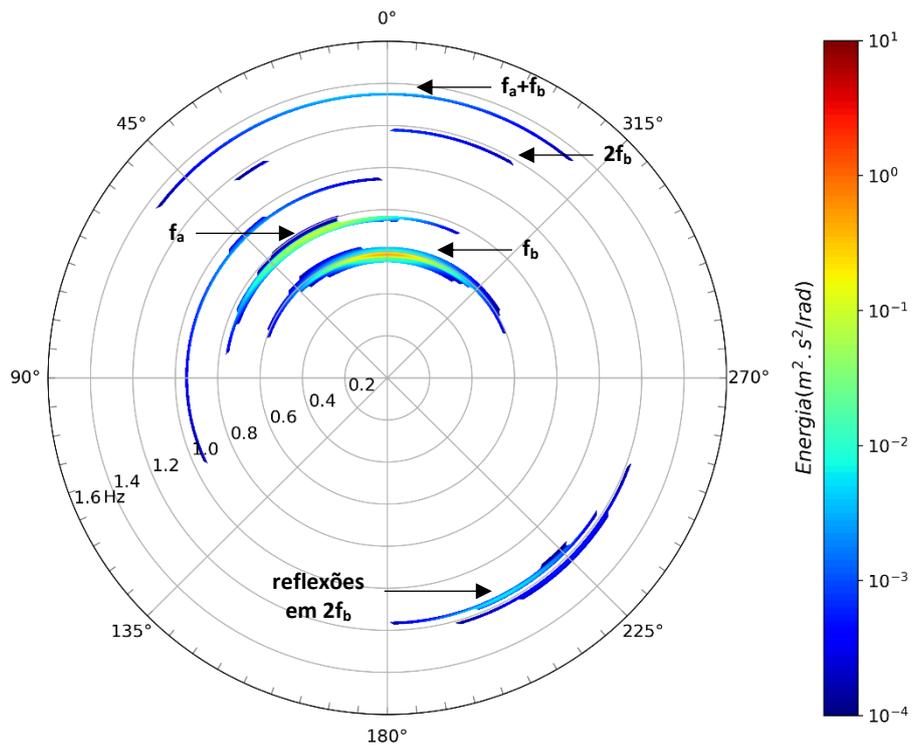


Figura 7.9. Espectro direcional calculado para o arranjo 1 de USS durante o teste T4-B3.

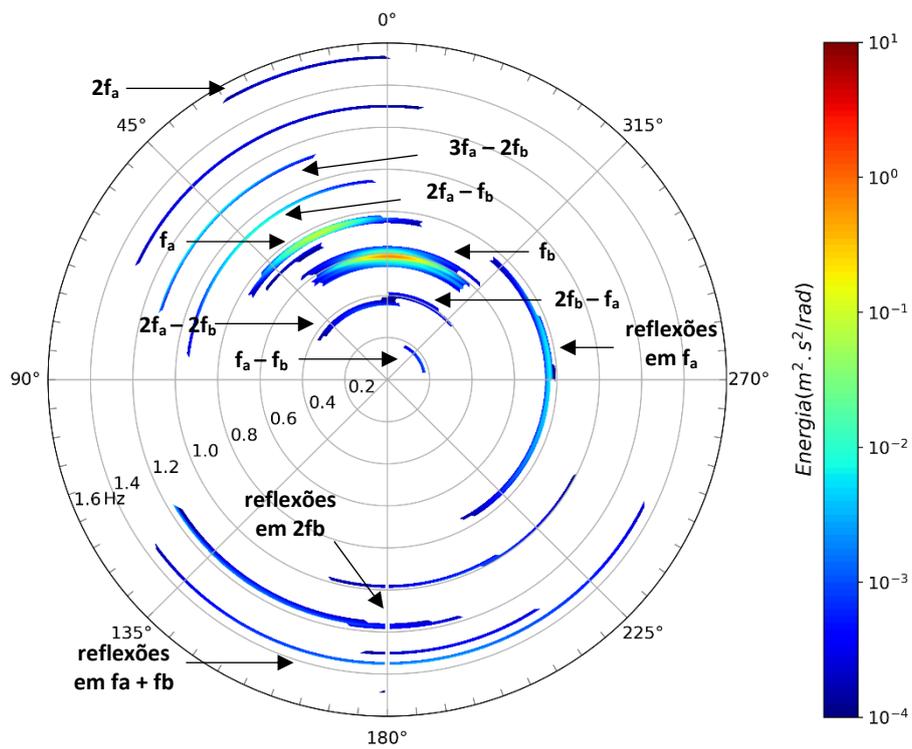


Figura 7.10. Espectro direcional calculado para o arranjo 2 de USS durante o teste T4-B3.

VII.2.11. Superfície livre: CERC-6 x CERC-5

Dentro de um arranjo, o posicionamento individual dos instrumentos pode ser feito de várias formas distintas (PANICKER e BORGMAN, 1970). Nesta seção, o arranjo 1 é utilizado para comparação entre a utilização de 6 USSs (tipo CERC-6) e 5 instrumentos (CERC-5), onde o USS central foi ignorado.

O teste T2-E4 foi selecionado para a comparação. Suas características principais são resumidas na Tabela 7.5.

Tabela 7.5. Resumo das características do teste T2-E4.

T2-E4										
Teste	h (m)	d (m)	H _a (m)	H _b (m)	T _a (s)	T _b (s)	D _a (°)	D _b (°)	T ⁺ (s)	T ⁻ (s)
T2-E4	0,60	0,35	0,10	0,16	1,6	2,1	5	-5	0,91	6,72

Comparando-se a Figura 7.11 com a Figura 7.12, nota-se que os resultados do espectro direcional utilizando-se 6 ou 5 USSs são muito similares. Todas as ondas primárias e interações identificadas pelo arranjo tipo CERC-6 foram também capturadas pelo arranjo tipo CERC-5. A única diferença foi a aparente melhora na identificação de reflexões.

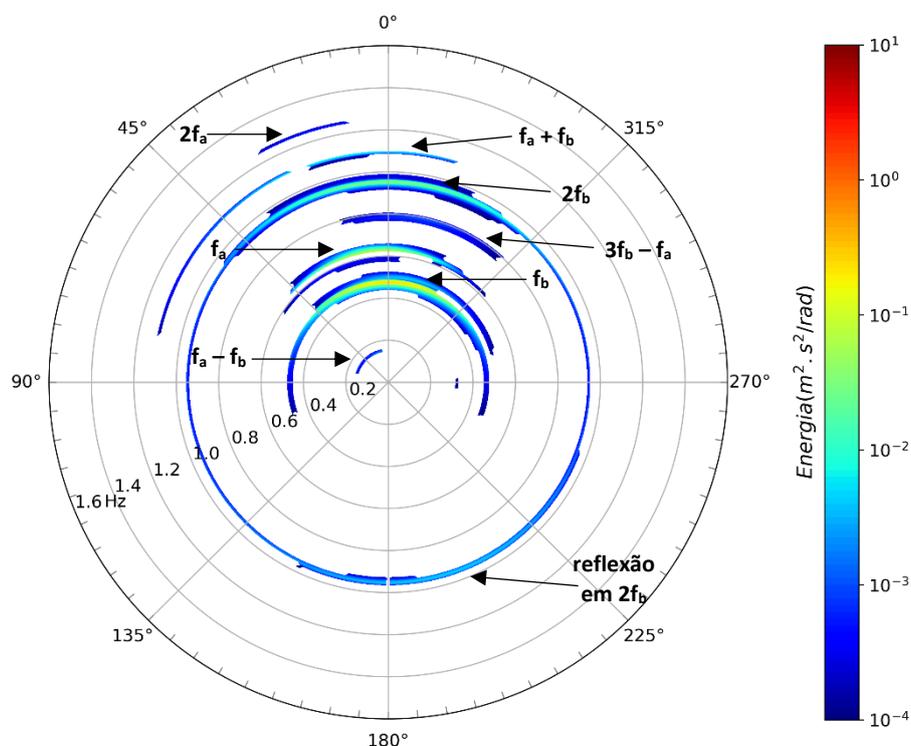


Figura 7.11. Espectro direcional calculado para o arranjo 1 de USS durante o teste T2-E4 para uma configuração tipo CERC-5.

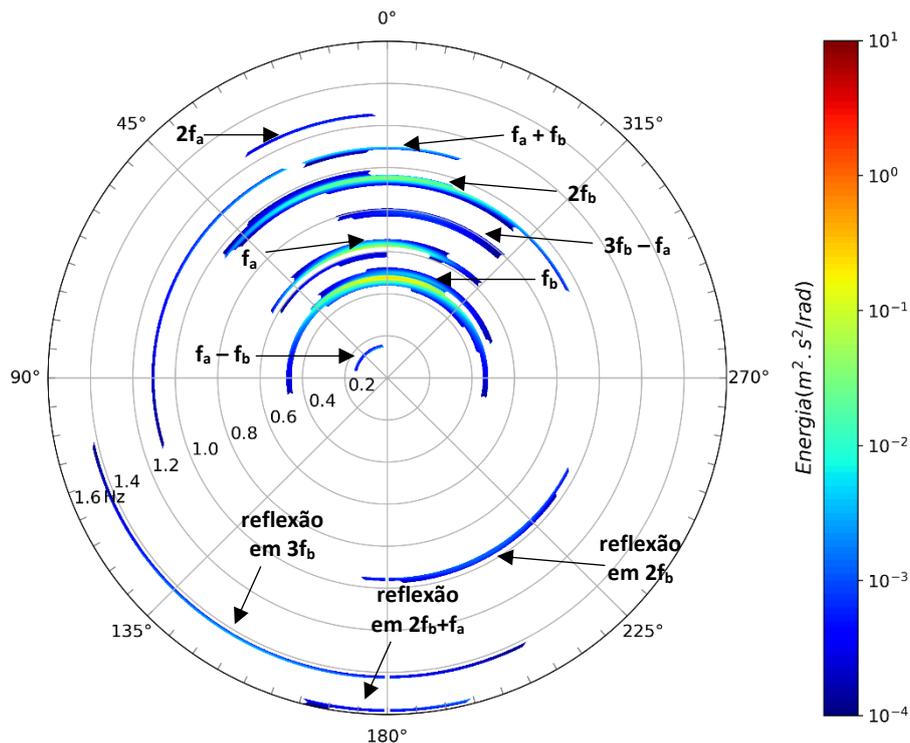


Figura 7.12. Espectro direcional calculado para o arranjo 1 de USS durante o teste T2-E4 para uma configuração tipo CERC-6.

VII.3. TEORIA DAS ONDAS BI-BI

No **Capítulo III**, a teoria das ondas Bi-Bi foi desenvolvida, culminando na exposição das equações das tensões de radiação associadas, com uma discussão sobre a forma de promediação temporal dos termos de interação onda-onda. Apesar da tensão de radiação ser uma grandeza de grande relevância na hidrodinâmica de corpos d'água sob ação de ondas, não se pode medi-la diretamente, mas apenas os seus efeitos, como a onda de infragravidade, a corrente longitudinal, entre outros.

Nesta seção, as características das tensões de radiação e da onda não-linear de baixa frequência serão exploradas de forma numérica, através da simulação computacional da bacia 3D do Instituto Ludwig-Franzius. Um programa em linguagem Python foi desenvolvido para subsidiar tais análises. Todos os cálculos são feitos considerando-se a solução para os termos promediados considerada a mais adequada no **Capítulo III**, ou seja, ausência de promediação e eliminação dos termos de interação aditiva.

Assim como foi feito ao longo de todo o trabalho, o experimento T4-B2 servirá de base para o estudo numérico.

VII.3.1. Nível médio

A equação (3.9) permite o cálculo do nível médio da água para qualquer combinação de ângulo e período entre ondas Bi-Bi. A Figura 7.13 mostra a curva contínua que descreve a elevação média máxima e mínima do nível d'água para todas as combinações possíveis de diferença angular entre as ondas de 1,3 s e 1,7 s em qualquer ponto da bacia.

Observa-se que a sobre-elevação e o rebaixamento são mais significativos para situações de ondas colineares, como já identificado por NWOGU (1995), ou se propagando em sentidos opostos. Ao redor de 45° e 60° de diferença de ângulos, os efeitos no nível médio da água são mínimos.

Nas seções VI.1.1 e VI.2.1, mostrou-se que a análise do arranjo 2 de USS através do método BDM resultou em uma altura significativa de 0,005 m e 0,013 m para a onda de baixa frequência no teste T4-B2 e T6-B2, que possuem as mesmas condições de ondas Bi-Bi. A partir da Figura 7.13, nota-se que a altura da onda não-linear para uma diferença de 10° entre as ondas primárias é de 0,010 m, estando bem próxima das observações em laboratório.

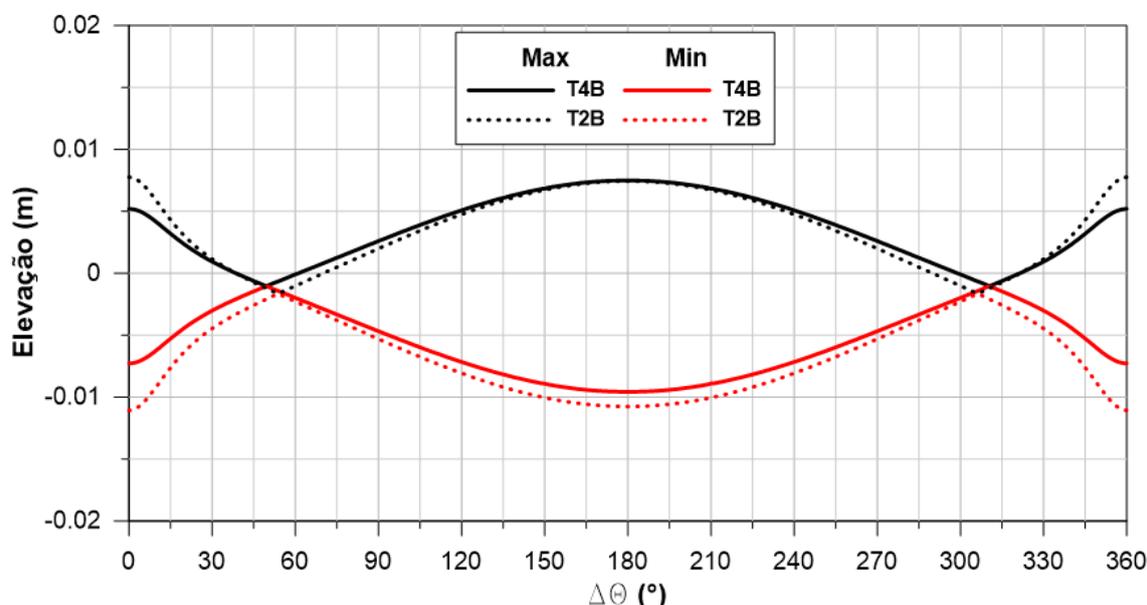


Figura 7.13. Sobre-elevação e rebaixamento do nível médio em função da propagação das ondas Bi-Bi do caso T4B e T2B.

A Figura 7.14 mostra uma imagem instantânea da onda de interação subtrativa gerada pelas ondas Bi-Bi dentro da bacia numérica, para o caso T4-B2. Se o tempo é permitido variar, a característica progressiva da onda da infragravidade torna-se evidente, assim

como mostrado pelas hodógrafas de velocidade da seção VI.1.2, onde o tempo está intrínseco ao gráfico.

As curvas da Figura 7.13 e a imagem instantânea do nível médio da água na Figura 7.14 são úteis para entender o que acontece com a onda de infragravidade em casos reais, com a incidência de ondas Bi-Bi sobre a costa: à medida que a refração e o empinamento afetam as ondas primárias, elas tendem a se propagar em ângulos menores em relação às isóbatas de profundidade em água mais rasas. A onda aprisionada de baixa frequência aumenta rapidamente a sua altura (Figura 7.13), enquanto muda a sua direção de propagação de acordo com a diferença dos vetores do número de onda das ondas primárias (Figura 3.2). Qualquer ligeira diferença de ângulos entre as ondas ‘a’ e ‘b’ (vide III.1.3), a onda de infragravidade se propagará em uma direção que não é igual a nenhuma das ondas primárias.

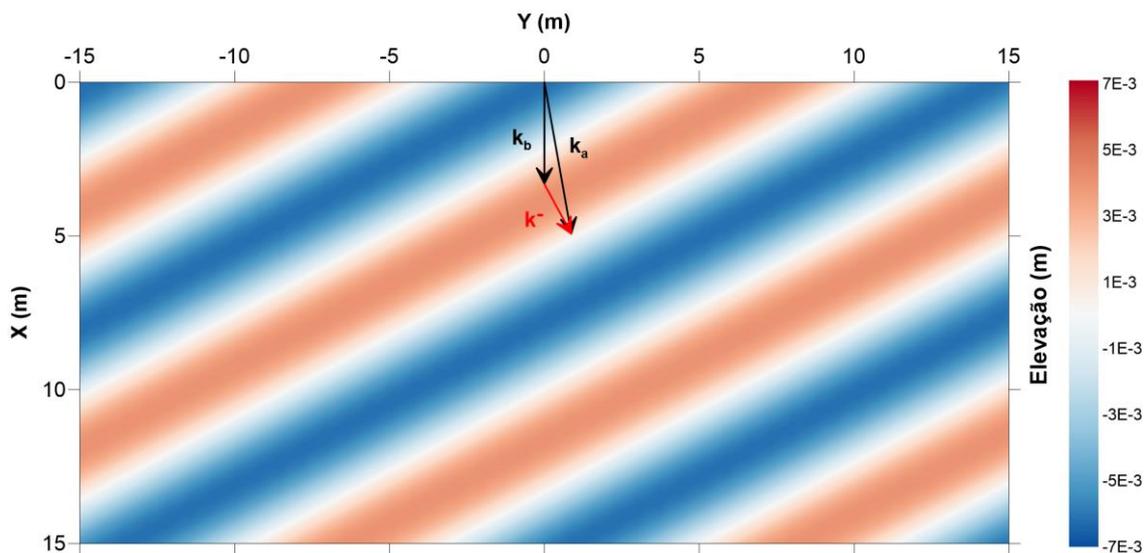


Figura 7.14. Onda de interação subtrativa gerada pelo teste T4-B2.

VII.3.2. Tensão de radiação

Uma análise detalhada das expressões (3.17) a (3.19) demonstra a importância da diferença do ângulo entre as ondas primárias sobre a tensão de radiação. Para a análise do tensor, o Círculo de Mohr foi utilizado.

A Figura 7.15 mostra os círculos de Mohr do tensor de tensão resultantes de diferentes combinações de direções para as ondas do grupo T4-B, com períodos de 1,3 s e 1,7 s. Os círculos coloridos representam os casos T4-B1, B2 e B3. O diâmetro do círculo de Mohr

é máximo quando ambas as ondas se propagam na mesma direção. Enquanto a diferença do ângulo aumenta, o diâmetro do círculo de Mohr diminui até um valor mínimo em $\Delta\theta = 180^\circ$, de onde volta a aumentar até que ambas as ondas sejam colineares.

Com o aumento de $\Delta\theta$, o centro do círculo se desloca para a esquerda até um mínimo em torno de 30° . O centro do círculo possui valor de abscissa máximo por volta de uma diferença de 90° entre as ondas primárias. Nota-se, portanto, que o campo de tensão de radiação de ondas Bi-Bi depende fortemente da combinação de ângulo, além da diferença de períodos, entre as ondas primárias.

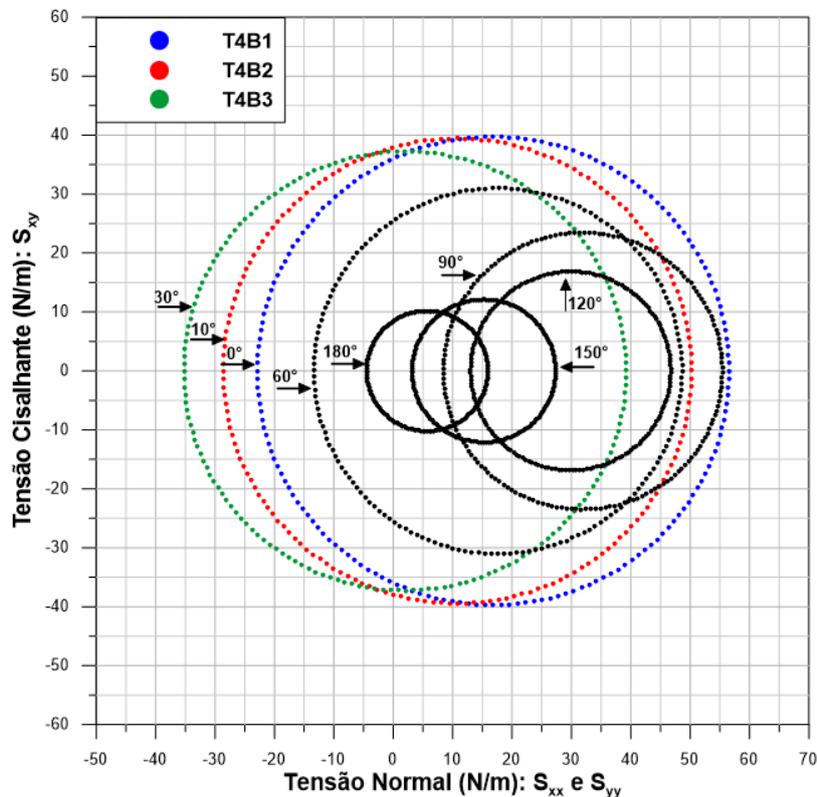


Figura 7.15. Círculo de Mohr para diferentes combinações de ângulos entre as ondas ‘a’ e ‘b’.

A Figura 7.16 mostra o campo de tensão de radiação para cada uma das três componentes do tensor de tensão (S_{xx} , S_{xy} e S_{yy}), para o teste T4-B2. Observa-se que as componentes do tensor seguem um padrão espacial semelhante ao da onda de interação subtrativa que, assim como esta, se desloca no tempo como uma onda progressiva. Quando o termo não-linear subtrativo é também ignorado, fazendo-se apenas a soma linear das tensões de radiação geradas pelas ondas primárias – como sugerido por BATTJES (1972), não há qualquer variação espacial de nenhuma das componentes de tensão ($S_{xx} = 36,97 \text{ N/m}$; $S_{xy} = 1,23 \text{ N/m}$; e $S_{yy} = 7,90 \text{ N/m}$) e, conseqüentemente, não há geração de quantidade de movimento pelas ondas fora da zona de surfe.

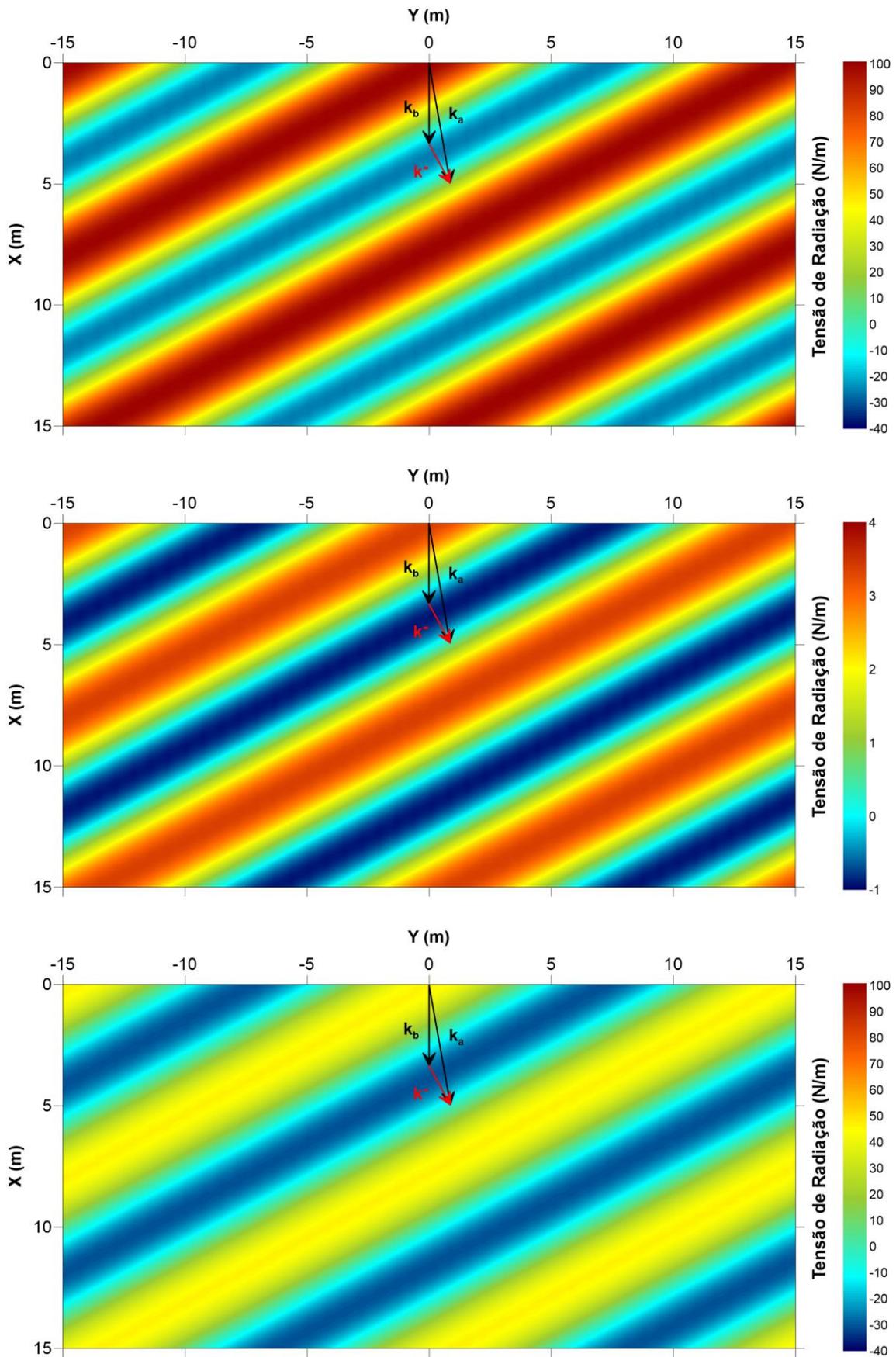


Figura 7.16. Campo de tensão de radiação das componentes S_{xx} , S_{xy} e S_{yy} , respectivamente, para o teste T4-B2.

VII.3.3. Quantidade de movimento

Como evidenciado pela equação (3.16), são os gradientes espaciais da tensão de radiação os responsáveis por gerar correntes hidrodinâmicas, e não a tensão de radiação em si. LONGUET-HIGGINS e STEWART (1964) mostraram que sob a aproximação de ondas de incidência oblíqua à costa, uma corrente longitudinal é gerada dentro da zona de arrebenção devido à variação transversal à praia da componente S_{xy} . No entanto, fora da zona de arrebenção, como a componente de cisalhamento permanece constante, nenhuma corrente é gerada.

HSU *et al.* (2006) investigaram a influência da direcionalidade da onda incidente nas tensões de radiação e nos seus efeitos sobre a sobre-elevação e rebaixamento do nível médio. Posteriormente, SHI e KIRBY (2008) e HSU e LAN (2009) fizeram algumas correções ao trabalho original, e verificaram que ondas oblíquas não eram capazes de produzir circulações fora da zona de arrebenção. Entretanto, nenhum deles considerou os efeitos de dois sistemas de onda diferentes atingindo a costa simultaneamente.

Utilizando-se as equações (3.9) e (3.17) a (3.19) no termo da equação (3.16) que corresponde à força hidrodinâmica gerada pela tensão de radiação, pode-se calcular o equilíbrio entre a onda de infragravidade e a variação espacial das tensões de radiação para os casos simulados na bacia 3D. Como garantiu-se não haver arrebenção de ondas durante os experimentos, a bacia experimental é análoga a uma região fora da zona de arrebenção.

A Figura 7.17 mostra o campo de aceleração gerado pelas ondas Bi-Bi durante um instante do teste T4-B2, com $\Delta\theta$ de 10° . As Figuras 7.18 e 7.19 ilustram a série temporal das acelerações horizontais calculadas para o ponto de medição do ADV 2.2.1. As velocidades da onda de interação subtrativa modeladas e extraídas (IMF 9) na seção VI.1.2 também são ilustradas.

Observa-se que mesmo fora da zona de arrebenção, existe um fluxo oscilatório de quantidade de movimento, o que significa que ondas Bi-Bi podem gerar pulsos de correntes, que tem um período oscilatório igual ao período da onda de interação subtrativa, como medido em laboratório por FOWLER e DALRYMPLE (1990). Esses pulsos de corrente podem gerar o “efeito de pulso de onda” (*wave pumping effect*) sobre a concentração de sedimentos em suspensão, como descrito por O’HARA MURRAY *et*

al. (2012). Naturalmente, a direção da aceleração gerada é idêntica à direção da onda de interferência subtrativa, que neste caso é de $28,16^\circ$.

Esses resultados sugerem a importância de se considerar os termos não lineares em modelos numéricos quando dois ou mais sistemas de onda incidem sobre a costa.

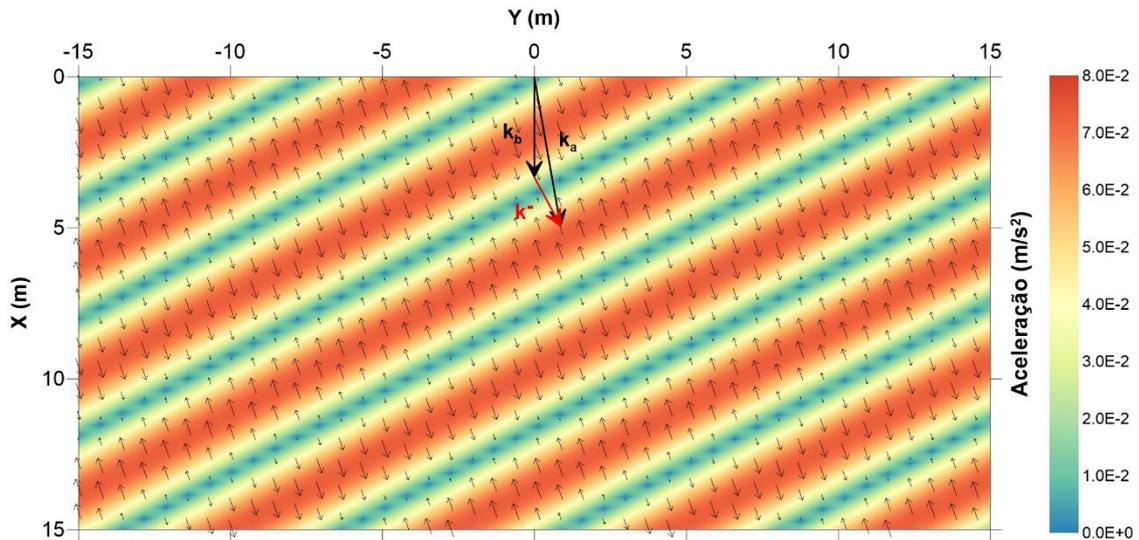


Figura 7.17. Aceleração resultante da ação de ondas Bi-Bi do teste T4-B2.

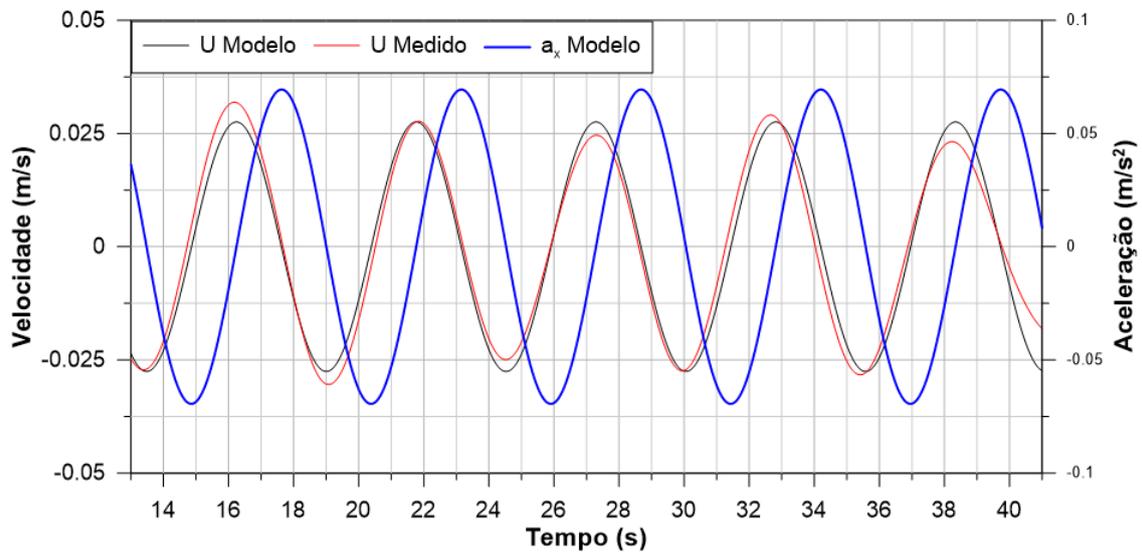


Figura 7.18. Série temporal da aceleração no eixo x resultante da ação de ondas Bi-Bi do teste T4-B2.

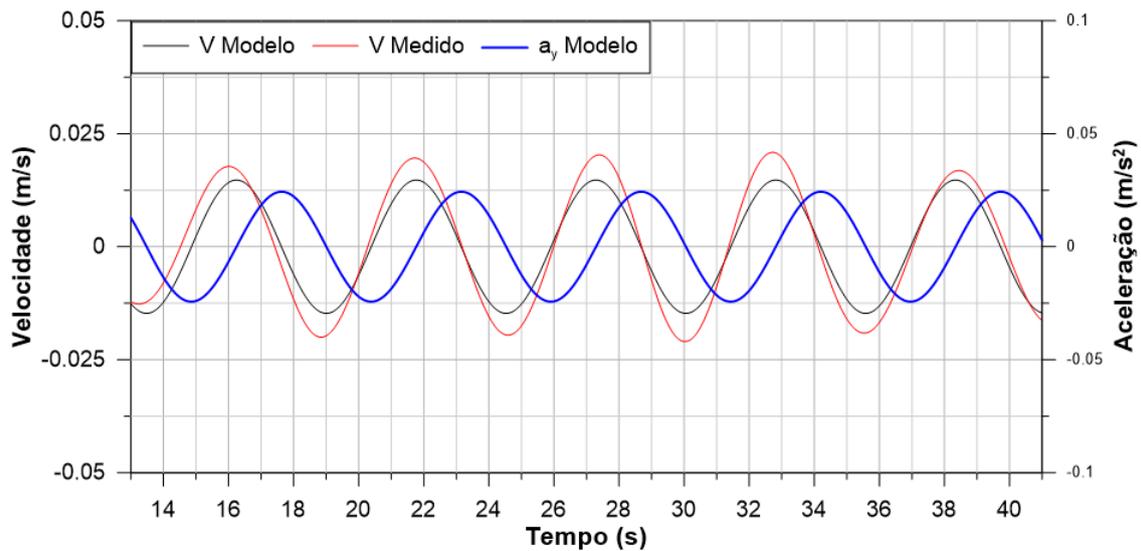


Figura 7.19. Série temporal da aceleração no eixo y resultante da ação de ondas Bi-Bi do teste T4-B2.

VII.3.4. O caso bimodal na foz do Rio Doce

No **Capítulo I** apresentou-se um exemplo de um espectro bimodal atingindo a costa do Espírito Santo no dia 07/07/2018. Nessa data, o sistema mais energético era proveniente de Sul (180°), enquanto um segundo sistema se aproximava de Leste (90°), como mostrado na Figura 1.2. Qual seria o efeito dessa Bi-Bi sobre a hidrodinâmica local? A seguir, é feito um exemplo prático com esse caso real. Efeitos de empinamento e refração das ondas são considerados na simulação para propagação em batimetria com inclinação constante.

A boia responsável pela medição se encontrava a 200 m de profundidade e, portanto, em uma região de águas profundas para ambos sistemas. As características de cada onda são dadas pela Tabela 1.2. Traçando-se uma linha perpendicular à costa na região da foz do Rio Doce, a isóbata de 200 m se encontra a uma distância de aproximadamente 38 km, segundo dados das cartas náuticas: DHN – 1300 DA PONTA CUMURUXATIBA AO RIO DOCE; e DHN – 1401 DO RIO DOCE AO CABO DE SÃO TOMÉ.

A profundidade limite para a aplicabilidade da 2ª ordem da teoria de Stokes para a onda de maior período é de 13 m, a uma distância de 4 km da costa. Optou-se por apresentar os resultados apenas em uma região de 1 km^2 , onde as profundidades variam de 15 m a 13 m. Foi suposta uma variação linear da profundidade no sentido transversal à costa entre a região de águas profundas e a isóbata de 15 m (declividade de $-0,0056 \text{ m/m}$) e

entre as isóbatas de 15 m e 13 m (declividade de -0,002 m/m). Variações longitudinais da batimetria foram descartadas.

Na Figura 7.20, o eixo das ordenadas corresponde à isóbata de 15 m. Nessa região, ambas as ondas já foram modificadas pelos fenômenos de empinamento e refração. Suas características são exibidas na Tabela 7.6. Nota-se que $\Delta\theta$ foi reduzido de 90° em águas profundas para $45,17^\circ$ na isóbata de 15 m e que as alturas das ondas foram reduzidas devido aos coeficientes de empinamento e refração, como discutido no item III.1.3.

Tabela 7.6. Características do sistema Bi-Bi simulado no dia 07/07/2018 em uma região próxima à foz do Rio Doce, Espírito Santo. Ângulos em azimute.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	L (m)	k (rad.m⁻¹)	h (m)
a	1,44	11,2	98,80	124,9	0,050	15,00
b	1,71	13,5	143,97	154,7	0,041	

A Figura 7.21 representa a elevação total da superfície livre, sob influência das ondas Bi-Bi. O padrão alternado da elevação da superfície livre, tanto na transversal quanto na longitudinal, é o responsável pelos padrões losangulares observados na Figura 1.1, e correspondentes ao que foi visto também em laboratório, na Figura 7.2. A Figura 7.22 mostra a onda de infragravidade gerada pelas Bi-Bis, que possui 65,7 s de período e uma direção de $52,37^\circ$ no ponto de coordenada (0,0). À medida que as ondas primárias se propagam para águas mais rasas, o ângulo de propagação da onda de infragravidade diminuirá em relação à normal à costa.

Sobre o nível médio são plotados os vetores de aceleração hidrodinâmica horizontal gerados pelos efeitos não-lineares. Nota-se que a aceleração é zero nas regiões de máximos e mínimos da onda de infragravidade, e possui o seu maior valor ($0,008 \text{ m/s}^2$) nas zonas de maior gradiente de elevação da superfície livre.

O módulo da aceleração calculada nesta simulação pode ser pequeno o suficiente para ser desconsiderado. No entanto, deve-se ressaltar que o local de simulação ainda se encontra a uma distância de 4 km da costa, a 13 m de profundidade, onde as alturas das ondas primárias ainda estão reduzidas, em uma região de $0,5 < kh < 0,8$ (Figura 3.3). Além disso, a diferença de ângulo entre as ondas primárias é de, aproximadamente, 45° . De acordo com a Figura 7.13, esse $\Delta\theta$ é uma região de baixas alturas da onda de infragravidade. À medida que o sistema avança para águas mais rasas, o empinamento e a refração atuam sobre as ondas primárias e, conseqüentemente, aumentam a influência

da onda de infragravidade. Próximo à zona de arrebentação, as magnitudes das acelerações certamente se tornam mais significativas, tornando a onda de infragravidade um importante agente hidrodinâmico costeiro.

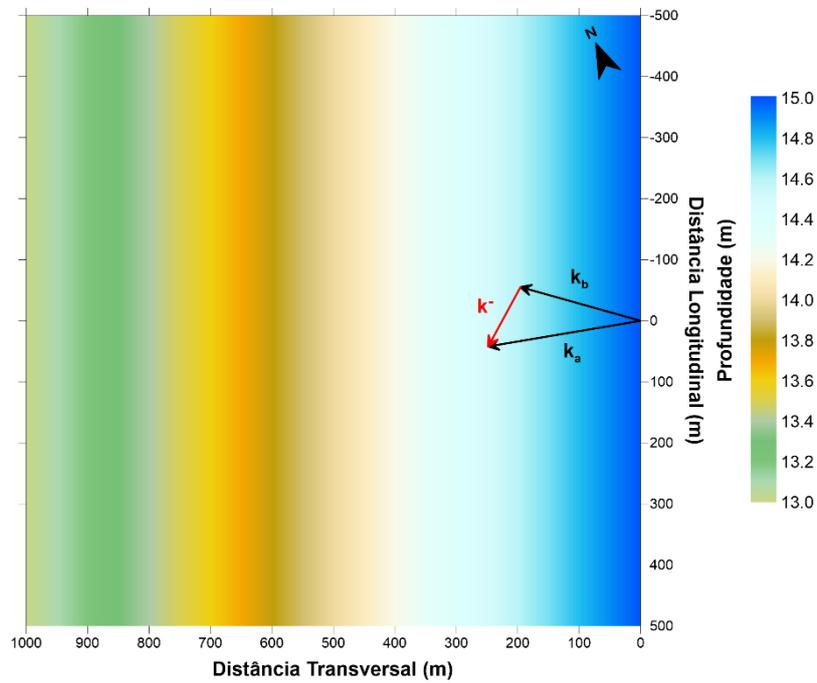


Figura 7.20. Profundidades ao longo de uma área 1 km², a 4 km da costa.

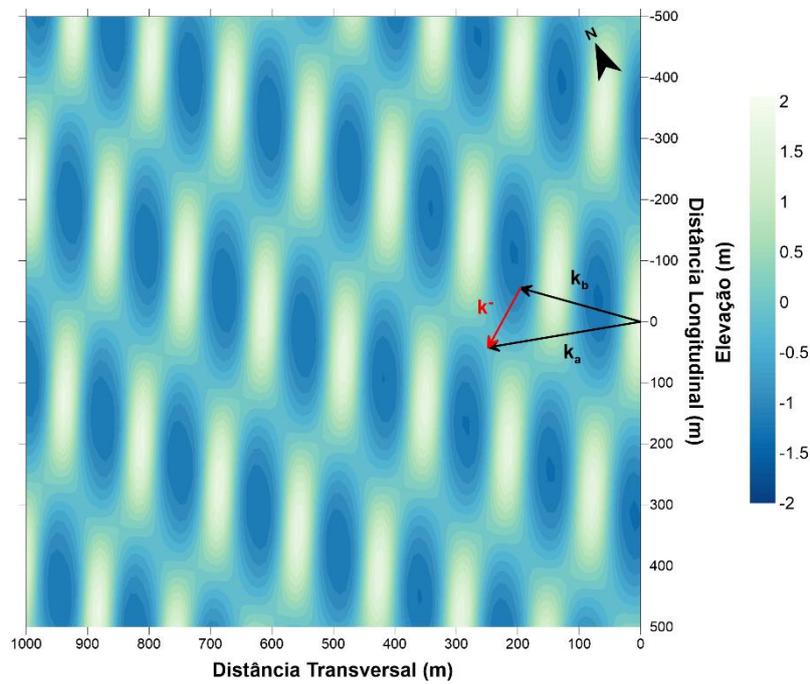


Figura 7.21. Elevação da superfície livre ao longo de uma área 1 km², a 4 km da costa.

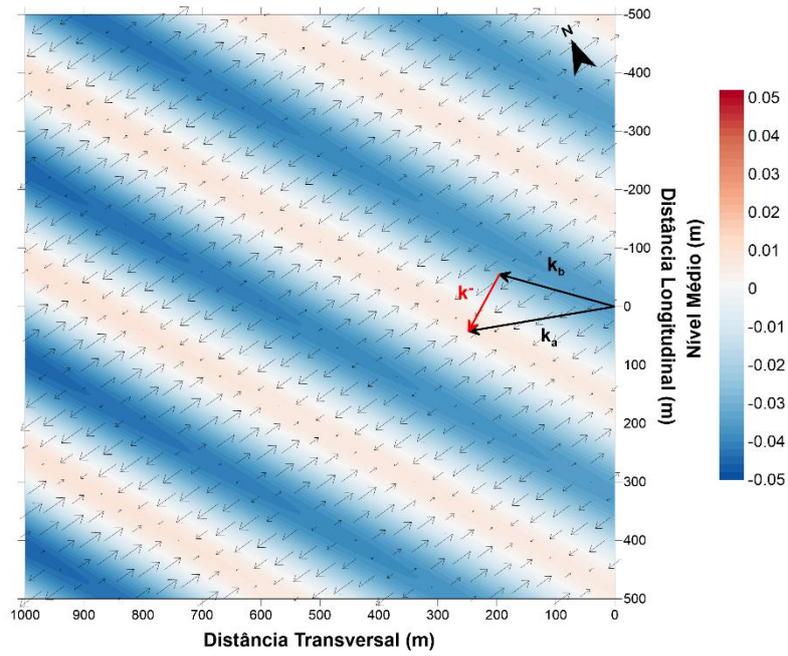


Figura 7.22. Nível médio e campo de acelerações gerados pelas ondas Bi-Bi ao longo de uma área 1km^2 , a 4 km da costa.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÃO

Estados de mar multimodais e multidirecionais são a condição essencial e necessária para a formação de grupos de ondas bidimensionais, que resultam da interação entre trens de ondas primárias, cada um com seu próprio período, altura e direção de propagação. Espectros bimodais ocorrem com grande frequência ao redor do mundo. Podem ser gerados pela mudança de comportamento dos ventos do sistema meteorológico que os forma, ou mesmo pela simples superposição da propagação de espectros não correlatos, que foram gerados em tempos e/ou locais diferentes do oceano.

Desde a década de 1950, sabe-se que a propagação de duas ondas de características distintas no mesmo meio gera uma onda aprisionada, de longo período e com uma altura bem inferior às ondas primárias, tornando-a imperceptível aos olhos humanos, mas com efeitos notáveis sobre a costa. A chamada onda de infragravidade é, hoje, considerada de grande relevância para fenômenos hidrodinâmicos costeiros, seja por interferir nos processos morfológicos ou causar ressonância em estruturas costeiras e portuárias.

A presença de qualquer onda na água pode ser identificada pelo deslocamento da superfície livre ou pelas velocidades (orbitais) geradas pelo movimento oscilatório. Devido à maior facilidade de medição da superfície livre, a maioria dos métodos de análise de dados na Engenharia Costeira fundamenta-se na ‘altura de onda’. Como consequência, fórmulas empíricas e analíticas, desenvolvidas por décadas, demandam essa variável como parâmetro de entrada, gerando uma retroalimentação contínua e difícil de ser interrompida. No entanto, para um grão de areia no leito de uma praia, pilares de pontes e aerogeradores, dutos e emissários submarinos ou uma estrutura de proteção costeira, o que importa não é a altura da onda incidente, mas sim a força ou aceleração de impacto, que pode ser mais facilmente estimada a partir do campo de velocidades.

O avanço tecnológico dos instrumentos de medição acústica possibilita, nos dias atuais, que as velocidades hidrodinâmicas sejam capturadas de forma precisa e com mínima interferência no escoamento. No entanto, devido à sensibilidade dos sensores, os dados de saída apresentam muito ruído e demandam um processo metodológico criterioso para sua utilização, o que volta a induzir a preferência dos pesquisadores pelos instrumentos de medição de superfície livre. Mas basta olhar o comportamento e diversidade das

hodógrafas de velocidade, que se nota a maior riqueza de seus dados em comparação com a elevação da superfície livre.

Aliada à medição das alturas de onda, a Transformada de Fourier se consolidou como o principal método de análise de dados na Engenharia Costeira. Uma grave limitação desse método é presumir que os fenômenos observados possuem amplitudes e frequências constantes ao longo do período de medição, o que não é real na maioria dos casos observados no oceano. Portanto as variações temporais das ondas não são captadas adequadamente pela Análise de Fourier. Em termos espaciais, as alterações sofridas pelas ondas devido à propagação sobre um meio variável (*e.g.* bancos de areia e recifes de coral) são explicadas pela excitação de harmônicos da frequência fundamental da onda. Assim é feito, pois a Transformada de Fourier só é capaz de subdividir um fenômeno em séries de senos ou cossenos com um período fundamental e seus harmônicos. Essa é uma aproximação matemática aceitável, porém pode ser irreal, pois *a priori* não se sabe quantos harmônicos reter.

Recentemente, métodos adaptativos surgiram na literatura com o objetivo de superar as limitações impostas pelos métodos clássicos da análise de Fourier. A Transformada de Hilbert-Huang é uma dessas ferramentas que permite a análise de processos não-estacionários e não-lineares. Sua essência está baseada em um método de decomposição empírica da variável em análise (elevação ou velocidade, por exemplo), que evita a necessidade de se impor uma função matemática ao fenômeno observado, permitindo que os dados “falem por si”. A posterior aplicação da Transformada de Hilbert fornece como resultado a variação temporal da amplitude e frequência de cada componente do fenômeno.

Neste trabalho utilizou-se a Transformada de Hilbert-Huang para a detecção da onda de interação subtrativa de 2ª ordem (comumente denominada de onda de infragravidade) gerada a partir da interação não-linear de ondas bicromáticas e bidirecionais produzidas em uma bacia tridimensional de ondas. As análises foram feitas sobre medições de velocidade de um arranjo composto por 5 ADVs. Para auxiliar o processo de decomposição em funções de modo intrínsecos (IMFs), fez-se uso da NA-MEMD, método descrito no **Capítulo V**, que possibilitou a análise conjunta das 15 dimensões produzidas pelo arranjo. A análise tradicional de Fourier também foi aplicada aos dados de elevação da superfície livre medidos por dois arranjos de USSs.

Os resultados mostraram que a HHT, subsidiada pela NA-MEMD e por um rigoroso processo de pré-tratamento dos dados, é capaz de extrair as principais características da onda de interação subtrativa – amplitude, período e direção, com boa precisão. Melhores resultados da separação das IMFs em escalas de frequência são obtidos quanto maior é o distanciamento entre as frequências das ondas de interesse. Acredita-se que a qualidade dos resultados possa melhorar significativamente com a construção de um suporte metálico para o arranjo de ADVs, evitando as vibrações de alta frequência das barras de sustentação dos instrumentos, que causam efeitos sobre as velocidades medidas mesmo após a passagem de um filtro numérico passa-baixa.

A mistura de amplitude entre as IMFs mostrou ser um problema mais sensível do que a mistura em frequência. Na maioria dos casos apresentados, mesmo não havendo uma clara mistura de frequência entre as IMFs, houve uma mistura de amplitude entre as ondas primárias ou entre uma das ondas primárias e a onda de interação subtrativa. Tal mistura afetou significativamente a direção das ondas detectadas pela metodologia proposta. Dado que a velocidade é uma grandeza tridimensional, qualquer componente afetada pela mistura de amplitude, danifica o resultado da direção da velocidade. Acredita-se que a aplicação da HHTSA, uma recente evolução da HHT destinada ao problema em questão, possa melhorar consideravelmente os resultados.

Além da interação subtrativa de 2ª ordem, outras interações não-lineares onda-onda não foram identificadas. Acredita-se que os efeitos das vibrações de alta frequência dos suportes dos ADVs sejam os principais responsáveis por impossibilitar a associação das IMFs de mais alta frequência às demais interações onda-onda. No entanto, a proximidade das frequências das interações aditivas e de mais alta ordem pode naturalmente dificultar o processo de peneiramento da NA-MEMD. Superharmônicos de 2ª e 3ª ordem das ondas primárias foram identificados apenas em testes com ondas monocromáticas.

Testes com espectros bimodais também foram analisados. Observou-se que o gerador de ondas não respeitou, em diversos casos, os parâmetros espectrais impostos. Defeitos no programa computacional podem existir, mas erros de manipulação do programa também foram identificados. Mesmo assim, alguns casos puderam ser analisados e mostraram que a metodologia também pode ser aplicada a casos mais reais. No entanto, mais estudos são necessários para uma melhor consolidação da metodologia.

A análise tradicional espectral feita sobre os arranjos de USSs mostrou que o método BDM foi capaz de identificar com boa precisão as ondas Bi-Bi. Além das ondas primárias, diversas ondas de interação não-linear, sejam elas incidentes ou refletidas, também foram identificadas. A comparação entre os dois arranjos de medição, mostrou que o diâmetro do arranjo é uma variável importante a ser considerada durante o planejamento dos testes. Aquele de maior diâmetro foi mais adequado para detectar as ondas de interação subtrativa, que em geral possuem maiores comprimentos do que as interações aditivas. A comparação dos resultados entre um arranjo com 5 e outro com 6 USSs mostrou uma ligeira melhora na determinação das ondas refletidas com um maior número de instrumentos.

De forma geral, ficou evidente que a análise espectral das medições de superfície livre foi mais capaz em determinar a vasta quantidade de fenômenos de interação onda-onda, especialmente as interações aditivas e reflexões dentro da bacia. No entanto, a aplicação da HHT sobre as medições das órbitas de velocidade se mostrou muito eficiente na detecção da interação subtrativa de 2ª ordem, fenômeno de maior interesse neste trabalho. Em alguns casos onde a onda subtrativa possuía uma altura muito reduzida, apenas a HHT foi capaz de detectá-la. Em face da história, a Transformada de Hilbert-Huang é muito recente quando comparada à Transformada de Fourier. Acredita-se que futuras pesquisas possam, em breve, modernizar a HHT e transformá-la em um método sólido e robusto para a análise de ondas.

Neste trabalho, também se deu ênfase ao estudo matemático dos efeitos das ondas bicromáticas e bidirecionais sobre a hidrodinâmica. As equações para a tensão de radiação resultante da propagação de ondas Bi-Bi foram desenvolvidas pela primeira vez. Mostrou-se que os termos de promediação temporal possuem um problema de escala temporal a ser analisado caso a caso. De forma geral, para simulações 2DH de ondas com diferença de direção menor que 90° , é suficiente desconsiderar os termos da interação aditiva por completo e ignorar a promediação temporal dos termos da interação subtrativa. Em 2ª ordem, o decaimento da interação subtrativa ao longo da coluna d'água é muito inferior ao da interação aditiva, tornando aquela mais relevante em modelos numéricos promediados na coluna d'água. Os resultados da aplicação destas equações aos casos simulados em laboratório mostraram-se coerentes.

Para casos em que a diferença de ângulo é maior que 90° , o comportamento do perfil de velocidades se inverte, tendo a interação aditiva um decaimento menor do que a interação

subtrativa. No entanto, as magnitudes de ambas interações tendem a ser muito pequenas. Os resultados numéricos aqui apresentados foram meramente ilustrativos. Há a necessidade de se adimensionalizar as equações do tensor de tensão de radiação para se obter uma conclusão mais abrangente.

Ademais, ressalta-se que projetos de Engenharia Costeira tendem a desconsiderar a atuação de sistemas bimodais sobre a região costeira. Muitos modelos numéricos se restringem à computação da hidrossedimentologia baseada na incidência de apenas uma onda, o que pode não ser adequado em muitos casos. As interações não-lineares geram fenômenos hidrodinâmicos significativos e que não devem ser desprezados na prática da Engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAGAARD, T.; GREENWOOD, B., 2008, “Infragravity wave contribution to surf zone sediment transport - The role of advection”, *Marine Geology*, v. 251, n. 1–2, pp. 1–14.
- AHMED, M. U.; REHMAN, N.; LOONEY, D. *et al.*, 2012, “Dynamical complexity of human responses: A multivariate data-adaptive framework”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*.
- ALSINA, J. M; PADILLA, E. M; CÁCERES, I., 2016, “Sediment transport and beach profile evolution induced by bi-chromatic wave groups with different group periods”, *Coastal Engineering Proceedings*, v.114, pp. 325-340.
- ARDHUIN, F.; GUALTIERI, L.; STUTZMANN, E., 2015, “How ocean waves rock the Earth: Two mechanisms explain microseisms with periods 3 to 300 s”, *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 3, pp. 765–772.
- BATTJES, J. A., 1972, “Radiation stresses in short-crested waves”, *Journal of Marine Research*, v. 30, pp. 56–64.
- BERTIN, X.; OLABARRIETA, M., 2016, “Relevance of infragravity waves in a wave-dominated inlet”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 121, n. 8, pp. 5418–5435.
- BERTIN, X.; DE BAKKER, A.; VAN DONGEREN, A. *et al.*, 2018, “Infragravity waves: from driving mechanisms to impacts”, *Earth-Science Reviews*, v. 177, pp. 774-799.
- BORGMAN, L. E., 1985, “Maximum-Entropy and Data-Adaptive Procedures in the Investigation of Ocean Waves”, In: Smith, C. R., Grandy, W. T. (eds), *Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Inverse Problems*, chapter 21, Dordrecht: Springer Netherlands, p.p 429-442.
- BOUDET, L.; COINTE, R.; MOLIN, B., 1991, “Nonlinear propagation of bichromatic wave trains”, *6th IWWWFB*, Woods Hole, Mass, USA.
- BOWEN, A. J., 1969, “Rip currents: 1. Theoretical investigations”, *Journal of Geophysical Research*, v. 74, n. 23, pp. 5467–5478.
- BOWEN, A. J., 1972, “Edge Waves and the Littoral Environment”, *Coastal Engineering Proceedings*, pp. 1313-1320, Vancouver, Canada.
- BOWEN, A. J; INMAN, D. L., 1971, “Edge waves and crescentic bars”, *Journal of Geophysical Research*, v. 76, n. 36, pp. 8662–8671.
- BRANNER, J. C., 1990, “The Origin of Beach Cusps”, *The Journal of Geology*, v. 8, n. 6, p. 481–484.
- CAO, D.; LIU, J., 2016, “Research on dynamic time warping multivariate time series similarity matching based on shape feature and inclination angle”, *Journal of Cloud Computing*, v. 5, n. 1.
- CAPON, J., 1969, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis”, *Proceedings of the IEEE*, v. 57, n. 8, p. 1408–1418.
- CHANSON, H., 2008, “Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) in the Field and in Laboratory: Practical Experiences”, *Experiences and Challenges in Sewers*:

Measurements and Hydrodynamics, pp. 49–66, Bouguenais, France.

CHEN, Q.; HUANG, N.; RIEMENSCHNEIDER, S. *et al.*, 2006, “A B-spline approach for empirical mode decompositions”, *Advances in Computational Mathematics*, v.24, n.1-4, pp. 171-195.

CHERITON, O. M.; STORLAZZI, C. D.; ROSENBERGER, K. J., 2016, “Observations of wave transformation over a fringing coral reef and the importance of low-frequency waves and offshore water levels to runup, overwash, and coastal flooding”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 121, n. 5, p. 3121–3140.

COLOMINAS, M. A.; SCHLOTTHAUER, G.; TORRES, M. E. *et al.*, 2012, “Noise-assisted EMD Methods in Action”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, v. 04, n. 04, pp. 1250025.

CONDE, J. M. P.; FORTES, C. J.; DIDIER, E. *et al.*, 2013, “Physical Modelling of Bichromatic Wave Propagation and Wave Breaking in a Wave Flume”, *Proceeding of the 6th International Short Course/Conference of Applied Coastal Research*, Lisbon, Portugal.

CONDE, J. M. P.; NEVES, C. F.; FORTES, C. J. E. M. *et al.*, 2014a, “Experimental Wave Breaking Velocity Characterization for Monochromatic, Bichromatic and Irregular Waves”, *Coastalab*, Varna, Bulgaria.

CONDE, J. M. P.; LEMOS, R.; FORTES, C. J., 2014b, “Comparison between Time, Spectral and Wavelet Analysis on Wave Breaking and Propagation”, *Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress*, Porto, Portugal.

CRAIG, R. G. A.; LOADMAN, C.; CLEMENT, B. *et al.*, 2011, “Characterization and testing of a new bistatic profiling acoustic Doppler velocimeter: The Vectrino-II”, *10th Working Conference on Current, Waves and Turbulence Measurement*, pp. 246–252, California, USA.

DALRYMPLE, R. A., 1975, “A mechanism for rip current generation on an open coast”, *Journal. Geophysical Research*, v. 80, n. 24, pp. 3485–3487.

DALRYMPLE, R. A.; LANAN, G. A., 1976, “Beach cusps formed by intersecting waves”, *Geological Society of America Bulletin*, v. 87, n. 1, pp. 57–60.

DALRYMPLE, R. A.; MACMAHAN, J. H.; RENIERS, A. J. H. M. *et al.*, 2011, “Rip Currents”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 43, n. 1, pp. 551–581.

DÄTIG, M.; SCHLURMANN, T., 2004, “Performance and limitations of the Hilbert-Huang transformation (HHT) with an application to irregular water waves”, *Ocean Engineering*, v. 31, n. 14–15, pp. 1783–1834.

DAVIS, R. E.; REGIER, L. A., 1977, “Methods for Estimating Directional Wave Spectra from Multi-Element Arrays”, *Journal of Marine Research*, v. 35, n. 3, pp. 453–478.

DE SOUZA E SILVA, M. G., 2013, *Análise de Processos Hidrossedimentológicos em Escoamentos com Superfície Livre: Trecho do Projeto de Irrigação Iuiú no Rio São Francisco*, M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A., 1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., v. 2.

- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A., 2004, *Coastal processes with engineering applications*, Cambridge University Press.
- DONOHO, D. L.; JOHNSTONE, I. M., 1994, “Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage”, *Biometrika*, v. 81, n. 3, pp. 425.
- DORRESTEIN, R., 1961, “On the deviation of the average pressure at a fixed point in a moving fluid from its “hydrostatic” value”, *Applied Scientific Research*, v. 10, n. 1, pp. 384–392.
- FEDDERSEN, F., 2004, “Effect of wave directional spread on the radiation stress: Comparing theory and observations”, *Coastal Engineering*, v. 51, pp. 473–481.
- FLANDRIN, P.; RILLING, G.; GONCALVES, P., 2004, “Empirical mode decomposition as a filter bank”, *IEEE Signal Processing Letters*, v. 11, n. 2, p. 112–114.
- FOWLER, R. E.; DALRYMPLE, R. A., 1990, “Wave Group Forced Nearshore Circulation”, *Coastal Engineering Proceedings*, v.1, n.22, pp. 729–742, New York, EUA.
- GALLAGHER, B., 1971, “Generation of surf beat by non-linear wave interactions”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 49, n. 1, pp. 1–20.
- GARNIER, R.; ORTEGA-SÁNCHEZ, M.; LOSADA, M. A.; FALQUÉS, A.; DODD, N., 2010, “Beach cusps and inner surf zone processes: growth or destruction? A case study of Trafalgar Beach (Cádiz, Spain)”, *Scientia Marina*, v. 74, n. 3, pp. 539–553.
- GENG, X.; BOUFADEL, M. C., 2015, “Numerical study of solute transport in shallow beach aquifers subjected to waves and tides”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 120, n. 2, pp. 1409–1428.
- GIORGINO, T., 2009, “Computing and Visualizing Dynamic Time Warping Alignments in R: The dtw Package”, *Journal of Statistical Software*, v. 31, n. 7, pp. 1–24.
- GODA, Y. 1976, “On Wave Groups”, *Behaviour of Off-Shore Structures*, pp. 115–128.
- GORING, D. G.; NIKORA, V. I., 2002, “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 1, pp. 117–126.
- GUZA, R.T.; INMAN, D. L., 1975, “Edge waves and beach cusps”, *Journal of Geophysical Research*, v. 80, n. 21, pp. 2997–3012.
- HASHIMOTO, N.; KOBUNE, K., 1989, “Directional Spectrum Estimation from a Bayesian Approach”, *Coastal Engineering Proceedings*, n. 21.
- HERBERS, T. H. C.; ELGAR, S.; GUZA, R. T. *et al.*, 1995, “Infragravity-Frequency (0.005–0.05 Hz) Motions on the Shelf. Part II: Free Waves”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 25, n. 6, pp. 1063–1079.
- HOLLAND, K. T., HOLMAN, R. A., 1996, “Field observations of beach cusps and swash motions”, *Marine Geology*, v. 134, pp. 77–93.
- HSU, T. W.; HSU, J. R. C.; WENG, W. K. *et al.*, 2006, “Wave setup and setdown generated by obliquely incident waves”, *Coastal Engineering*, v. 53, n. 10, pp. 865–877.
- HSU, T. W.; LAN, Y., 2009, “Reply to “Discussion of wave setup and setdown generated by obliquely incident waves” by F. Shi and J.T. Kirby”, *Coastal Engineering*, v. 56, n. 3, pp. 382–383.

- HUANG, N. E.; SHEN, Z.; LONG, S. R. *et al.*, 1998, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis”, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 454, n. 1971, pp. 903–995.
- HUANG, N. E.; WU, M. L. C.; LONG, S. R. *et al.*, 2003, “A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis”, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 459, n. 2037, pp. 2317–2345.
- HUANG, N. E.; WU, Z., 2008, “A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies”, *Reviews of Geophysics*, v. 46, n. 2.
- HUANG, N. E.; YOUNG, V.; LO, M. *et al.*, 2013, “The Uniqueness of the Instantaneous Frequency Based on Intrinsic Mode Function”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, v. 05, n. 03, pp. 1350011.
- HUANG, N. E.; SHEN, S. S. P., 2014, *Hilbert Huang Transform and Its Applications*, v. 16, 2 ed.
- HUANG, N. E.; HU, K.; YANG, A. C. C. *et al.*, 2016, “On Holo-Hilbert spectral analysis: a full informational spectral representation for nonlinear and non-stationary data”, *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*.
- HUNTLEY, D. A.; BOWEN, A. J., 1973, “Field Observations of Edge Waves”, *Nature*, v. 243, n. 5403, pp. 160–162.
- HUNTLEY, D. A.; BOWEN, A. J., 1978, “Beach Cusps and Edge Waves”, *Coastal Engineering 1978*.
- HUNTLEY, D. A.; GUZA, R. T.; THORNTON, E. B., 1981, “Field observations of surf beat: 1. Progressive edge waves”, *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n. C7, pp. 6451–6466.
- HYVÄRINEN, A.; OJA, E., 2000, “Independent component analysis: algorithms and applications”, *Neural Networks*, v. 13, n. 4–5, pp. 411–430.
- INCH, K.; DAVIDSON, M.; MASSELINK, G. *et al.*, 2017, “Observations of nearshore infragravity wave dynamics under high energy swell and wind-wave conditions”, *Continental Shelf Research*, v. 138, p. 19–31.
- INMAN, D. L.; TAIT, R. J.; NORDSTROM, C. E., 1971, “Mixing in the surf zone”, *Journal of Geophysical Research*, v. 76, n. 15, pp. 3493–3514.
- ISLAM, M. R.; ZHU, D. Z., 2013, “Kernel density–based algorithm for despiking ADV data”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 7, pp. 785–739.
- JANSSEN, T. T., 2003, “Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom”, *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. C8, pp. 3252.
- KLINGHAMMER, C.; LOMONACO TONDA, P.; HIGUERA CAUBILLA, P., 2012, “Design Optimization for a Passive Mesh Screen Wave Absorber for the CCOB”, *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 33, pp. 36.
- KOMAR, P. D., 1976, *Beach Processes and Sedimentation*, New Jersey, Prentice-Hall.
- LANE, S. N.; BIRON, P. M.; BRADBROOK, K. F. *et al.*, 1998, “Three-dimensional

- measurement of river channel flow processes using acoustic doppler velocimetry”, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 23, n. 13, pp. 1247–1267.
- LEE, C.; JUNG, J.; HALLER, M. C., 2010, “Asymmetry in Directional Spreading Function of Random Waves due to Refraction”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 136, n. 1, pp. 1-9.
- LI, L.; BARRY, D. A., 2000, “Wave-induced beach groundwater flow”, *Advances in Water Resources*, v. 23, n. 4, pp. 325–337.
- LIU, M.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N., 2002, “Evaluation of ADV Measurements in Bubbly Two-Phase Flows”, *Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, pp. 1-10.
- LOHRMANN, A.; CABRERA, R.; KRAUS, N., 1994, “Acoustic-doppler velocimeter (ADV) for laboratory use”, *Fundamentals and advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, pp. 351-365.
- LONGUET-HIGGINS, M. S., 1950, “A Theory of the Origin of Microseisms”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 243, n. 857, pp. 1–35, 27.
- LONGUET-HIGGINS, M. S., 1983, “Wave Set-Up, Percolation and Undertow in the Surf Zone”, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 390, n. 1799, pp. 283–291.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W., 1960, “Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 8, n. 04, pp. 565.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W., 1961, “The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 10, n. 04, pp. 529.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W., 1962, “Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to surf beats”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 13, n. 04, pp. 481.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W., 1964, “Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications”, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 11, n. 4, pp. 529–562.
- LUNDGREN, H., 1963, “Wave thrust and wave energy level”, *Proceedings of the 10th Congress International Association Hydraulic Research*, pp. 147–151, London, England.
- LUUKKO, P. J. J.; HELSKE, J.; RÄSÄNEN, E., 2016, “Introducing libeemd: a program package for performing the ensemble empirical mode decomposition”, *Computational Statistics*, v. 31, n. 2, pp. 545–557.
- MADSEN, P. A; FUHRMAN, D. R., 2006, “Third-order theory for bichromatic bi-directional water waves”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 557, pp. 369.
- MADSEN, P. A; FUHRMAN, D. R., 2012, “Third-order theory for multi-directional irregular waves”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 698, pp. 304–334.
- MEI, C. C., 1973, “A note on the averaged momentum balance in two-dimensional water waves”, *Journal of Marine Research*, v. 31, n. 2, pp. 97–104.

- MELO, E.; ALVES, J. H. G. M.; JORDEN, V. *et al.*, 1995, “Instrumental Confirmation of the Arrival of North Atlantic Swell to the Ceará Coast”, *International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries - COPEDEC IV*, v. 3, pp. 1984–1996.
- MOURA, T. G. R.; NEVES, C. F.; TELLES, J. C. F., 2011, “Applying Bivariate HHT to Horizontal Velocities of Multi-Directional Waves”, *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 32.
- MUNK, W. H., 1949, “Surf beats”, *American Geophysical Union*, v. 30, n. 6, pp. 849–854.
- NEVES, C. F., 1979, *Um Modelo Numérico para a Refração de Ondas Monocromáticas*, M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- NEVES, C. F.; ENDRES, L. M.; FORTES, J. *et al.*, 2012, “The use of ADV in wave flumes: getting more information about waves”, *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 33, pp. 1–15.
- NIEDERREITER, H., 1992, *Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA.
- NOGUEIRA, I. C. M., 2014, *Caracterização do Clima de Ondas na Bacia do Espírito Santo Através de Modelagem Numérica*, M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- NOSE, T.; BABANIN, A.; EWANS, K., 2016, “Directional Analysis and Potential for Spectral Modelling of Infragravity Waves”, *35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, v. 7, pp. V007T06A091.
- NOSE, T.; BABANIN, A.; EWANS, K., 2017, “In situ observations of infragravity wave directionality at nearshore coastal sites”, *Ocean Science Discussions*, pp. 1–29.
- NWOGU, O., 1993, “Alternative Form of Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 119, n. 6, pp. 618–638.
- NWOGU, O., 1995, “Nonlinear evolution of directional wave spectra in shallow water”, *Coastal Engineering Proceedings*, n. 24, pp. 467.
- O’HARA MURRAY, R. B.; HODGSON, D. M.; THORNE, P. D., 2012, “Wave groups and sediment resuspension processes over evolving sandy bedforms”, *Continental Shelf Research*, v. 46, pp. 16–30.
- O’DEA, A.; HALLER, M. C., 2015, “Effect of Asymmetric Directional Spreading on the Total Radiation Stress”, *Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, v. 141, n. 6, pp. 6015004.
- PALIWAL, K.; AGARWAL, A.; SINHA, S., 1982, “A modification over Sakoe and Chiba’s dynamic time warping algorithm for isolated word recognition”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 1259–1261.
- PANICKER, N. N.; BORGMAN, L. E., 1970, “Directional Spectra From Wave-Gage Arrays”, *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, pp. 117–136.
- PARENTE, C. E.; NOGUEIRA, I. C. M.; MARTINS, R. P. *et al.*, 2015, “Climatologia de Ondas”, In: Martins, R. P., Grossmann-Matheson, G. S., editores. *Meteorologia e oceanografia*, Rio de Janeiro: Elsevier. *Habitats*, v. 2. pp. 55–96.

- PHILLIPS, O. M., 1960, “On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude Part 1. The elementary interactions”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 9, n. 02, pp. 193–217.
- PLANCHEREL, M., 1933, “Sur les Formules de Réciprocité du Type de Fourier”, *Journal of the London Mathematical Society*, v. s1-8, n. 3, pp. 220–226.
- PRUSZAK, Z.; RÓZYNSKI, G.; SZMYTKIEWICZ, M.; SKAJA, M., 2007, “Field Observation of Edge Waves and Beach Cusps on the South Baltic Sea Coast”, *Journal of Coastal Research*, v. 234, pp. 846–860.
- RAPIZO, H.; BABANIN, A. V.; SCHULZ, E. *et al.*, 2015, “Observation of wind-waves from a moored buoy in the Southern Ocean”, *Ocean Dynamics*, v. 65, n. 9–10, pp. 1275–1288.
- RASCH, M.; NIELSEN, J.; NIELSEN, N., 1993, “Variations of Spacings between Beach Cusps discussed in relation to Edge Wave Theory”, *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, v. 93, n. 1, pp. 49–55.
- REHMAN, N. U.; MANDIC, D. P., 2009, “Multivariate empirical mode decomposition”, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 466, n. 2117, pp. 1291–1302.
- REHMAN, N. U.; MANDIC, D. P., 2010, “Empirical mode decomposition for trivariate signals”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 58, n. 3 PART 1, pp. 1059–1068.
- REHMAN, N. U.; PARK, C.; HUANG, N. E. *et al.*, 2013, “EMD via MEMD: Multivariate Noise-Aided Computation of Standard EMD”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, v. 05, n. 02, pp. 1350007.
- RENIERS, A. J. H. M.; VAN DONGEREN, A. R.; BATTJES, J. A., *et al.*, 2002, Linear modeling of infragravity waves during Delilah”, *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. C10.
- RENIERS, A. J. H. M.; GROENEWEGEN, M. J.; EWANS, K. C. *et al.*, 2010, “Estimation of infragravity waves at intermediate water depth”, *Coastal Engineering*, v. 57, n. 1, pp. 52–61.
- RILLING, G.; FLANDRIN, P.; GONÇALVÉS, P., 2003, “On empirical mode decomposition and its algorithms”, *IEEE-EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing*, v. 3, pp. 8–11.
- RILLING, G.; FLANDRIN, P.; GONÇALVÉS, P. *et al.*, 2007, “Bivariate Empirical Mode Decomposition”, *IEEE Signal Processing Letters*, v. 14, n. 12, pp. 936–939.
- ROELVINK, D.; RENIERS, A.; VAN DONGEREN, A. *et al.*, 2009, “Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands”, *Coastal Engineering*, v. 56, n. 11–12, pp. 1133–1152.
- RUSELLO, P. J., 2009, *A practical primer for pulse coherent instruments*, Technical Note TN-027, Nortek AS.
- SAKOE, H.; CHIBA, S., 1978, “Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, v. 26, n. 1, pp. 43–49.
- SAND, S. E., 1982, “Long waves in directional seas”, *Coastal Engineering*, v. 6, n. 3, pp.

195–208.

SHARMA, J. N.; DEAN, R. G., 1981, “Second-Order Directional Seas and Associated Wave Forces”, *Society of Petroleum Engineers Journal*, v. 21, n. 01, pp. 129–140.

SHI, F.; KIRBY, J. T., 2008, “Discussion of “Wave setup and setdown generated by obliquely incident waves” by T.-W. Hsu et al., *Coastal Engineering*, 53, 865–877, 2006”, *Coastal Engineering*, v. 55, n. 12, pp. 1247–1249.

SHOKOOHI-YEKTA, M.; WANG, J.; KEOGH, E., 2015, “On the Non-Trivial Generalization of Dynamic Time Warping to the Multi-Dimensional Case”, *Proceedings of the 2015 SIAM International Conference on Data Mining*, pp. 289–297.

SILVA, G. N., 1992, *Variação de Longo Período do Nível Médio do Mar: Causas, Consequências e Metodologia de Análise*, M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SMIT, P. B.; BLAND, R.; JANSSEN, T. T. *et al.*, 2016, “Remote sensing of nearshore wave interference”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 121, n. 5, pp. 3409–3421.

STOKES, G. G., 1847, “On the Theory of Oscillatory Waves”, *Mathematical and Physical Papers vol.1*, Cambridge University Press, pp. 197–229.

SZMYTKIEWICZ, P.; RÓZYNSKI, G., 2016, “Infragravity Waves at a Dissipative Shore with Multiple Bars: Recent Evidence”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 142, n. 5, pp. 04016007-1-04016007-15.

TANAKA, T.; MANDIC, D. P., 2007, “Complex Empirical Mode Decomposition”, *IEEE Signal Processing Letters*, v. 14, n. 2, pp. 101–104.

THOMAS, R. E.; SCHINDFESSEL, L.; MCLELLAND, S. J. *et al.*, 2017, “Bias in mean velocities and noise in variances and covariances measured using a multistatic acoustic profiler: the Nortek Vectrino Profiler”, *Measurement Science and Technology*, v. 28, n. 7, pp. 075302.

THOMPSON, R. O R Y., 1983, “Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 13, n. 6, pp. 1077–1083.

TORRES, M. E.; COLOMINAS, M. A.; SCHLOTTHAUER, G. *et al.*, 2011, “A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*.

TUCKER, M. J., 1950, “Surf Beats: Sea Waves of 1 to 5 Min. Period”, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 202, n. 1071, pp. 565–573.

VOULGARIS, G.; TROWBRIDGE, J. H., 1998, “Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 15, n. 1, pp. 272–289.

WAHL, T. L., 2003, “Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129, n. 6, pp. 484–487.

WU, Z.; HUANG, N. E., 2009, “Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, v. 01, n. 01, pp. 1–41.

XIE, M., 2012, “Three-dimensional numerical modelling of the wave-induced rip currents under irregular bathymetry”, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, v. 24, n. 6, pp. 864–872.

YOUNG, A. P.; ADAMS, P. N.; O'REILLY, W. C. *et al.*, 2011, “Coastal cliff ground motions from local ocean swell and infragravity waves in southern California”, *Journal of Geophysical Research*, v. 116, n. C9, pp. C09007.

ZHANG, J.; CHEN, L., 1999, “General third-order solutions for irregular waves in deep water”, *Journal of Engineering Mechanics*, v. 125, n. 7, pp. 768-779.

ANEXO I

CARACTERÍSTICAS DOS TESTES

Tabela A1.1. Características das ondas Bi-Bi simuladas em cada grupo de teste (H_a e H_b → altura de onda; T_a e T_b → período de onda; L_a e L_b → comprimento de onda; D_a e D_b → direção de onda; h → coluna d'água; d → profundidade dos ADVs; e # Teste → número sequencial dos testes realizados). O asterisco a esquerda dos testes identifica aqueles cujos resultados foram apresentados no Capítulo VI.

Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
T1-A1	0,13	1,2	2,12	0	0,13	1,2	2,12	0	0,60	0,35	098	19/12/2017
T1-A2	0,13	1,2	2,12	10	0,13	1,2	2,12	0	0,60	0,35	099	19/12/2017
T1-A3	0,13	1,2	2,12	30	0,13	1,2	2,12	0	0,60	0,35	100	19/12/2017
T1-A4	0,13	1,2	2,12	5	0,13	1,2	2,12	-5	0,60	0,35	101	19/12/2017
T1-A5	0,13	1,2	2,12	15	0,13	1,2	2,12	-15	0,60	0,35	102	19/12/2017
T1-B1	0,13	1,2	2,12	0	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	104	19/12/2017
T1-B2	0,13	1,2	2,12	10	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	105	19/12/2017
T1-B3	0,13	1,2	2,12	30	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	106	19/12/2017
T1-B4	0,13	1,2	2,12	5	0,13	1,5	2,99	-5	0,60	0,35	108	19/12/2017
T1-B5	0,13	1,2	2,12	15	0,13	1,5	2,99	-15	0,60	0,35	109	19/12/2017
T1-C1	0,13	1,2	2,12	0	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	111	19/12/2017
T1-C2	0,13	1,2	2,12	10	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	112	19/12/2017
T1-C3	0,13	1,2	2,12	30	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	113	19/12/2017
T1-C4	0,13	1,2	2,12	5	0,13	2,3	5,15	-5	0,60	0,35	114	19/12/2017
T1-C5	0,13	1,2	2,12	15	0,13	2,3	5,15	-15	0,60	0,35	115	19/12/2017
T1-D1	0,13	1,5	2,99	0	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	116	19/12/2017
T1-D2	0,13	1,5	2,99	10	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	117	19/12/2017
T1-D3	0,13	1,5	2,99	30	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	118	19/12/2017
T1-D4	0,13	1,5	2,99	5	0,13	1,5	2,99	-5	0,60	0,35	119	19/12/2017
T1-D5	0,13	1,5	2,99	15	0,13	1,5	2,99	-15	0,60	0,35	120	19/12/2017
* T1-E1	0,13	1,5	2,99	0	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	121	19/12/2017

	Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
*	T1-E2	0,13	1,5	2,99	10	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	122	19/12/2017
*	T1-E3	0,13	1,5	2,99	30	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	124	19/12/2017
*	T1-E4	0,13	1,5	2,99	5	0,13	2,3	5,15	-5	0,60	0,35	125	19/12/2017
*	T1-E5	0,13	1,5	2,99	15	0,13	2,3	5,15	-15	0,60	0,35	126	19/12/2017
	T1-F1	0,13	2,3	5,15	0	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	127	19/12/2017
	T1-F2	0,13	2,3	5,15	10	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	128	19/12/2017
	T1-F3	0,13	2,3	5,15	30	0,13	2,3	5,15	0	0,60	0,35	129	19/12/2017
	T1-F4	0,13	2,3	5,15	5	0,13	2,3	5,15	-5	0,60	0,35	130	19/12/2017
	T1-F5	0,13	2,3	5,15	15	0,13	2,3	5,15	-15	0,60	0,35	131	19/12/2017
	T2-A1	0,10	1,3	2,42	0	0,16	1,3	2,42	0	0,60	0,35	055	18/12/2017
	T2-A2	0,10	1,3	2,42	10	0,16	1,3	2,42	0	0,60	0,35	056	18/12/2017
	T2-A3	0,10	1,3	2,42	30	0,16	1,3	2,42	0	0,60	0,35	057	18/12/2017
	T2-A4	0,10	1,3	2,42	5	0,16	1,3	2,42	-5	0,60	0,35	058	18/12/2017
	T2-A5	0,10	1,3	2,42	15	0,16	1,3	2,42	-15	0,60	0,35	059	18/12/2017
	T2-B1	0,10	1,3	2,42	0	0,16	1,6	3,27	0	0,60	0,35	065	18/12/2017
	T2-B2	0,10	1,3	2,42	10	0,16	1,6	3,27	0	0,60	0,35	066	18/12/2017
	T2-B3	0,10	1,3	2,42	30	0,16	1,6	3,27	0	0,60	0,35	067	18/12/2017
	T2-B4	0,10	1,3	2,42	5	0,16	1,6	3,27	-5	0,60	0,35	068	18/12/2017
	T2-B5	0,10	1,3	2,42	15	0,16	1,6	3,27	-15	0,60	0,35	069	18/12/2017
*	T2-C1	0,10	1,3	2,42	0	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	028	15/12/2017
*	T2-C2	0,10	1,3	2,42	10	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	029	15/12/2017
*	T2-C3	0,10	1,3	2,42	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	030	15/12/2017
*	T2-C4	0,10	1,3	2,42	5	0,16	2,1	4,63	-5	0,60	0,35	031	15/12/2017
*	T2-C5	0,10	1,3	2,42	15	0,16	2,1	4,63	-15	0,60	0,35	032	15/12/2017
	T2-D1	0,10	1,6	3,27	0	0,16	1,6	3,27	0	0,60	0,35	075	18/12/2017
	T2-D2	0,10	1,6	3,27	10	0,16	1,6	3,27	0	0,60	0,35	076	18/12/2017
	T2-D3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	1,6	3,27	0	0,60	0,35	077	18/12/2017

Teste	H _a (m)	T _a (s)	L _a (m)	D _a (°)	H _b (m)	T _b (s)	L _b (m)	D _b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
T2-D4	0,10	1,6	3,27	5	0,16	1,6	3,27	-5	0,60	0,35	078	18/12/2017
T2-D5	0,10	1,6	3,27	15	0,16	1,6	3,27	-15	0,60	0,35	079	18/12/2017
T2-E1	0,10	1,6	3,27	0	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	040	15/12/2017
T2-E2	0,10	1,6	3,27	10	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	041	15/12/2017
T2-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	042	15/12/2017
T2-E4	0,10	1,6	3,27	5	0,16	2,1	4,63	-5	0,60	0,35	043	15/12/2017
T2-E5	0,10	1,6	3,27	15	0,16	2,1	4,63	-15	0,60	0,35	044	15/12/2017
T2-F1	0,10	2,1	4,63	0	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	085	18/12/2017
T2-F2	0,10	2,1	4,63	10	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	086	18/12/2017
T2-F3	0,10	2,1	4,63	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	087	18/12/2017
T2-F4	0,10	2,1	4,63	5	0,16	2,1	4,63	-5	0,60	0,35	088	18/12/2017
T2-F5	0,10	2,1	4,63	15	0,16	2,1	4,63	-15	0,60	0,35	089	18/12/2017
T3-A1	0,13	1,1	1,87	0	0,13	1,1	1,87	0	0,75	0,35	145	21/12/2017
T3-A2	0,13	1,1	1,87	10	0,13	1,1	1,87	0	0,75	0,35	146	21/12/2017
T3-A3	0,13	1,1	1,87	30	0,13	1,1	1,87	0	0,75	0,35	147	21/12/2017
T3-A4	0,13	1,1	1,87	5	0,13	1,1	1,87	-5	0,75	0,35	148	21/12/2017
T3-A5	0,13	1,1	1,87	15	0,13	1,1	1,87	-15	0,75	0,35	149	21/12/2017
T3-B1	0,13	1,1	1,87	0	0,13	2,1	5,04	0	0,75	0,35	151	21/12/2017
T3-B2	0,13	1,1	1,87	10	0,13	2,1	5,04	0	0,75	0,35	152	21/12/2017
T3-B3	0,13	1,1	1,87	30	0,13	2,1	5,04	0	0,75	0,35	153	21/12/2017
T3-B4	0,13	1,1	1,87	5	0,13	2,1	5,04	-5	0,75	0,35	154	21/12/2017
T3-B5	0,13	1,1	1,87	15	0,13	2,1	5,04	-15	0,75	0,35	155	21/12/2017
T3-C1	0,13	1,1	1,87	0	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	158	21/12/2017
T3-C2	0,13	1,1	1,87	10	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	159	21/12/2017
T3-C3	0,13	1,1	1,87	30	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	160	21/12/2017
T3-C4	0,13	1,1	1,87	5	0,13	3,0	7,68	-5	0,75	0,35	161	21/12/2017
T3-C5	0,13	1,1	1,87	15	0,13	3,0	7,68	-15	0,75	0,35	162	21/12/2017

*

Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
T3-D1	0,13	2,1	5,04	0	0,13	2,1	5,04	0	0,75	0,35	163	21/12/2017
T3-D2	0,13	2,1	5,04	10	0,13	2,1	5,04	0	0,75	0,35	164	21/12/2017
T3-D3	0,13	2,1	5,04	30	0,13	2,1	5,04	0	0,75	0,35	165	21/12/2017
T3-D4	0,13	2,1	5,04	5	0,13	2,1	5,04	-5	0,75	0,35	166	21/12/2017
T3-D5	0,13	2,1	5,04	15	0,13	2,1	5,04	-15	0,75	0,35	167	21/12/2017
T3-E1	0,13	2,1	5,04	0	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	171	08/01/2018
T3-E2	0,13	2,1	5,04	10	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	172	08/01/2018
T3-E3	0,13	2,1	5,04	30	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	173	08/01/2018
T3-E4	0,13	2,1	5,04	5	0,13	3,0	7,68	-5	0,75	0,35	174	08/01/2018
T3-E5	0,13	2,1	5,04	15	0,13	3,0	7,68	-15	0,75	0,35	176	08/01/2018
T3-F1	0,13	3,0	7,68	0	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	177	08/01/2018
T3-F2	0,13	3,0	7,68	10	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	178	08/01/2018
T3-F3	0,13	3,0	7,68	30	0,13	3,0	7,68	0	0,75	0,35	179	08/01/2018
T3-F4	0,13	3,0	7,68	5	0,13	3,0	7,68	-5	0,75	0,35	180	08/01/2018
T3-F5	0,13	3,0	7,68	15	0,13	3,0	7,68	-15	0,75	0,35	181	08/01/2018
T4-A1	0,10	1,3	2,52	0	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	185	08/01/2018
T4-A2	0,10	1,3	2,52	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	186	08/01/2018
T4-A3	0,10	1,3	2,52	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	187	08/01/2018
T4-A4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	1,7	3,81	-5	0,75	0,35	188	08/01/2018
T4-A5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	1,7	3,81	-15	0,75	0,35	189	08/01/2018
* T4-B1	0,10	1,3	2,52	0	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	191	08/01/2018
* T4-B2	0,10	1,3	2,52	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	192	08/01/2018
* T4-B3	0,10	1,3	2,52	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	193	08/01/2018
* T4-B4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	1,7	3,81	-5	0,75	0,35	194	08/01/2018
* T4-B5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	1,7	3,81	-15	0,75	0,35	195	08/01/2018
T4-C1	0,10	1,3	2,52	0	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	197	08/01/2018
T4-C2	0,10	1,3	2,52	10	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	198	08/01/2018

Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
T4-C3	0,10	1,3	2,52	30	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	201	09/01/2018
T4-C4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,35	202	09/01/2018
T4-C5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,35	204	09/01/2018
T4-D1	0,10	1,7	3,81	0	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	205	09/01/2018
T4-D2	0,10	1,7	3,81	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	206	09/01/2018
T4-D3	0,10	1,7	3,81	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	207	09/01/2018
T4-D4	0,10	1,7	3,81	5	0,16	1,7	3,81	-5	0,75	0,35	208	09/01/2018
T4-D5	0,10	1,7	3,81	15	0,16	1,7	3,81	-15	0,75	0,35	209	09/01/2018
T4-E1	0,10	1,7	3,81	0	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	210	09/01/2018
T4-E2	0,10	1,7	3,81	10	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	211	09/01/2018
T4-E3	0,10	1,7	3,81	30	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	212	09/01/2018
T4-E4	0,10	1,7	3,81	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,35	213	09/01/2018
T4-E5	0,10	1,7	3,81	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,35	214	09/01/2018
T4-F1	0,10	2,8	7,11	0	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	215	09/01/2018
T4-F2	0,10	2,8	7,11	10	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	216	09/01/2018
T4-F3	0,10	2,8	7,11	30	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,35	217	09/01/2018
T4-F4	0,10	2,8	7,11	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,35	218	09/01/2018
T4-F5	0,10	2,8	7,11	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,35	219	09/01/2018
T5-A1	0,05	1,3	2,42	0	0,11	1,3	2,42	0	0,60	0,35	-	-
T5-A2	0,05	1,3	2,42	10	0,11	1,3	2,42	0	0,60	0,35	060	18/12/2017
T5-A3	0,05	1,3	2,42	30	0,11	1,3	2,42	0	0,60	0,35	061	18/12/2017
T5-A4	0,05	1,3	2,42	5	0,11	1,3	2,42	-5	0,60	0,35	062	18/12/2017
T5-A5	0,05	1,3	2,42	15	0,11	1,3	2,42	-15	0,60	0,35	063	18/12/2017
T5-B1	0,05	1,3	2,42	0	0,11	1,6	3,27	0	0,60	0,35	065	18/12/2017
T5-B2	0,05	1,3	2,42	10	0,11	1,6	3,27	0	0,60	0,35	066	18/12/2017
T5-B3	0,05	1,3	2,42	30	0,11	1,6	3,27	0	0,60	0,35	067	18/12/2017
T5-B4	0,05	1,3	2,42	5	0,11	1,6	3,27	-5	0,60	0,35	068	18/12/2017

	Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
	T5-B5	0,05	1,3	2,42	15	0,11	1,6	3,27	-15	0,60	0,35	069	18/12/2017
	T5-C1	0,05	1,3	2,42	0	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	033	15/12/2017
	T5-C2	0,05	1,3	2,42	10	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	034	15/12/2017
	T5-C3	0,05	1,3	2,42	30	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	035	15/12/2017
	T5-C4	0,05	1,3	2,42	5	0,11	2,1	4,63	-5	0,60	0,35	036	15/12/2017
	T5-C5	0,05	1,3	2,42	15	0,11	2,1	4,63	-15	0,60	0,35	037	15/12/2017
	T5-D1	0,05	1,6	3,27	0	0,11	1,6	3,27	0	0,60	0,35	080	18/12/2017
	T5-D2	0,05	1,6	3,27	10	0,11	1,6	3,27	0	0,60	0,35	081	18/12/2017
	T5-D3	0,05	1,6	3,27	30	0,11	1,6	3,27	0	0,60	0,35	082	18/12/2017
	T5-D4	0,05	1,6	3,27	5	0,11	1,6	3,27	-5	0,60	0,35	083	18/12/2017
	T5-D5	0,05	1,6	3,27	15	0,11	1,6	3,27	-15	0,60	0,35	084	18/12/2017
*	T5-E1	0,05	1,6	3,27	0	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	045	15/12/2017
*	T5-E2	0,05	1,6	3,27	10	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	046	15/12/2017
*	T5-E3	0,05	1,6	3,27	30	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	047	15/12/2017
*	T5-E4	0,05	1,6	3,27	5	0,11	2,1	4,63	-5	0,60	0,35	049	15/12/2017
*	T5-E5	0,05	1,6	3,27	15	0,11	2,1	4,63	-15	0,60	0,35	050	15/12/2017
	T5-F1	0,05	2,1	4,63	0	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	090	18/12/2017
	T5-F2	0,05	2,1	4,63	10	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	092	18/12/2017
	T5-F3	0,05	2,1	4,63	30	0,11	2,1	4,63	0	0,60	0,35	093	18/12/2017
	T5-F4	0,05	2,1	4,63	5	0,11	2,1	4,63	-5	0,60	0,35	094	18/12/2017
	T5-F5	0,05	2,1	4,63	15	0,11	2,1	4,63	-15	0,60	0,35	095	18/12/2017
	T6-A1	0,10	1,3	2,52	0	0,16	1,3	2,52	0	0,75	0,50	229	10/01/2018
	T6-A2	0,10	1,3	2,52	10	0,16	1,3	2,52	0	0,75	0,50	230	10/01/2018
	T6-A3	0,10	1,3	2,52	30	0,16	1,3	2,52	0	0,75	0,50	231	10/01/2018
	T6-A4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	1,3	2,52	-5	0,75	0,50	233	10/01/2018
	T6-A5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	1,3	2,52	-15	0,75	0,50	234	10/01/2018
*	T6-B1	0,10	1,3	2,52	0	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	236	10/01/2018

	Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
*	T6-B2	0,10	1,3	2,52	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	237	10/01/2018
*	T6-B3	0,10	1,3	2,52	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	238	10/01/2018
*	T6-B4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	1,7	3,81	-5	0,75	0,50	239	10/01/2018
*	T6-B5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	1,7	3,81	-15	0,75	0,50	240	10/01/2018
	T6-C1	0,10	1,3	2,52	0	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	243	10/01/2018
	T6-C2	0,10	1,3	2,52	10	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	244	10/01/2018
	T6-C3	0,10	1,3	2,52	30	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	245	10/01/2018
	T6-C4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,50	246	10/01/2018
	T6-C5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,50	247	10/01/2018
	T6-D1	0,10	1,7	3,81	0	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	251	11/01/2018
	T6-D2	0,10	1,7	3,81	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	252	11/01/2018
	T6-D3	0,10	1,7	3,81	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	253	11/01/2018
	T6-D4	0,10	1,7	3,81	5	0,16	1,7	3,81	-5	0,75	0,50	254	11/01/2018
	T6-D5	0,10	1,7	3,81	15	0,16	1,7	3,81	-15	0,75	0,50	255	11/01/2018
	T6-E1	0,10	1,7	3,81	0	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	256	11/01/2018
	T6-E2	0,10	1,7	3,81	10	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	257	11/01/2018
	T6-E3	0,10	1,7	3,81	30	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	258	11/01/2018
	T6-E4	0,10	1,7	3,81	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,50	259	11/01/2018
	T6-E5	0,10	1,7	3,81	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,50	260	11/01/2018
	T6-F1	0,10	2,8	7,11	0	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	262	11/01/2018
	T6-F2	0,10	2,8	7,11	10	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	263	11/01/2018
	T6-F3	0,10	2,8	7,11	30	0,16	2,8	7,11	0	0,75	0,50	264	11/01/2018
	T6-F4	0,10	2,8	7,11	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,50	265	11/01/2018
	T6-F5	0,10	2,8	7,11	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,50	266	11/01/2018
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	132	19/12/2017
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	133	19/12/2017
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	134	19/12/2017

	Teste	H_a (m)	T_a (s)	L_a (m)	D_a (°)	H_b (m)	T_b (s)	L_b (m)	D_b (°)	h (m)	d (m)	# Teste	Data
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	135	19/12/2017
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	136	19/12/2017
*	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	137	19/12/2017
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	138	19/12/2017
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	139	19/12/2017
	T7-E3	0,10	1,6	3,27	30	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	140	19/12/2017
	T8-B3a	0,13	1,2	2,12	30	0,13	1,5	2,99	0	0,60	0,35	141	20/12/2017
	T8-E2	0,10	1,6	3,27	10	0,16	2,1	4,63	0	0,60	0,35	142	20/12/2017
	T8-D5a	0,13	2,1	5,04	15	0,13	2,1	5,04	-15	0,75	0,35	221	09/01/2018
	T8-C4	0,10	1,3	2,52	5	0,16	2,8	7,11	-5	0,75	0,35	222	09/01/2018
*	T8-B2a	0,10	1,3	2,52	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	223	09/01/2018
	T8-B3b	0,10	1,3	2,52	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,35	224	09/01/2018
	T8-D5b	0,13	2,1	5,04	15	0,13	2,1	5,04	-15	0,75	0,50	268	11/01/2018
*	T8-C5	0,10	1,3	2,52	15	0,16	2,8	7,11	-15	0,75	0,50	269	11/01/2018
	T8-B2b	0,10	1,3	2,52	10	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	270	11/01/2018
	T8-B3c	0,10	1,3	2,52	30	0,16	1,7	3,81	0	0,75	0,50	271	11/01/2018

ANEXO II

TESTE T4-B2

Durante a apresentação dos resultados no **Capítulo VI** algumas simplificações foram feitas para que não houvesse um excesso de informação no capítulo, tornando a leitura menos exautiva e de mais fácil compreensão. Tais simplificações foram: (i) exibição apenas dos 30 s iniciais de séries temporais; (ii) apresentação apenas das IMFs correspondentes às ondas primárias e da onda de interação subtrativa de 2ª ordem; e (iii) apresentação do espectro de Hilbert e da órbita tridimensional apenas do ADV que apresentou o menor índice $RMSE_{3D}$.

Este **Anexo II** tem como objetivo apresentar os resultados, de apenas um dos testes, de uma forma menos simplificada, para que o leitor tenha uma visão mais abrangente do processo de análise dos dados. Como foi feito ao longo de todo o trabalho, o teste T4-B2 foi utilizado para exemplificação.

A Figura A2.1 apresenta a série temporal completa de elevação do USS 1.2.1. Ressalta-se que nenhum tratamento de dados foi feito para as séries de elevação. A Figura A2.2 ilustra a série temporal de velocidade do ADV 2.2.1 bruta. A metodologia de tratamento dos dados proposta neste trabalho envolve a retirada dos *spikes* (Figura A2.3); a passagem de um filtro passa-baixa (Figura A2.4); e a posterior correção do eixo de inclinação do instrumento (Figura A2.5). A Figura A2.6 exhibe a hodógrafa final do ADV 2.2.1, a qual será submetida ao processo da HHT, junto aos demais ADVs do arranjo.

Da Figura A2.7 à Figura A2.11 o espectro de Hilbert de todas as IMFs extraídas pela NAMED são expostas. As linhas brancas tracejadas, que correspondem às frequências teóricas esperadas, auxiliam na identificação visual de quais IMFs representam as frequências de interesse. Em todos os testes com ondas Bi-Bi analisados, as IMFs com frequências maiores que as frequências das ondas primárias apresentaram oscilações muito elevadas, possivelmente devido às vibrações das barras de suporte. Isso impossibilitou sua associação a uma onda de interação aditiva ou a um superharmônico das ondas primárias. Em relação às IMFs de mais baixa frequência, aquela que representa a onda de interação subtrativa se destacou, na maioria dos casos, pela sua maior amplitude e pela sua proximidade com a frequência esperada. Por sua vez, as IMFs das ondas primárias foram facilmente identificadas devido as suas amplitudes significativamente superiores às demais IMFs.

Uma vez detectada a IMF correspondente à onda de interação subtrativa (IMF 9 para o teste T4-B2), prosseguiu-se com a construção dos gráficos de suas séries temporais e hodógrafas. A Figura A2.12 apresenta a série temporal completa da IMF 9 extraída do ADV 2.2.1. Da Figura A2.13 à Figura A2.17 são exibidas as hodógrafas medidas e modeladas ao longo de todo o período da simulação.

Os cálculos do $RMSE_{3D}$ e DTW_{3D} só levaram em consideração um período igual a 5 ciclos da onda de interação subtrativa, devido aos possíveis efeitos posteriores de reflexão. O ADV que apresentou o menor valor de $RMSE_{3D}$ foi o escolhido para a apresentação dos resultados no **Capítulo VI**. No entanto, nota-se que os demais instrumentos do conjunto também apresentam bons resultados.

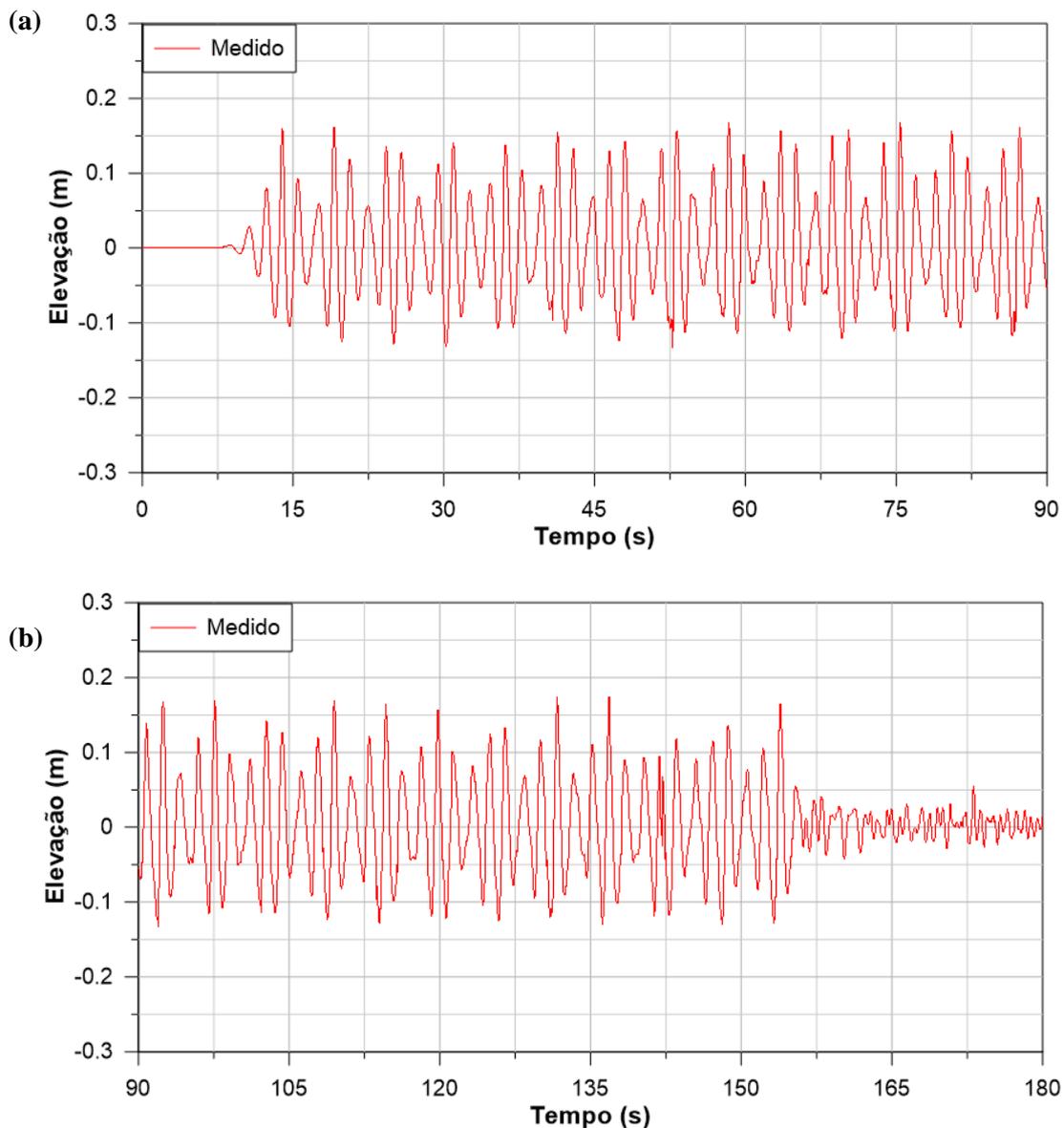


Figura A2.1. Série de elevação do USS 1.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.

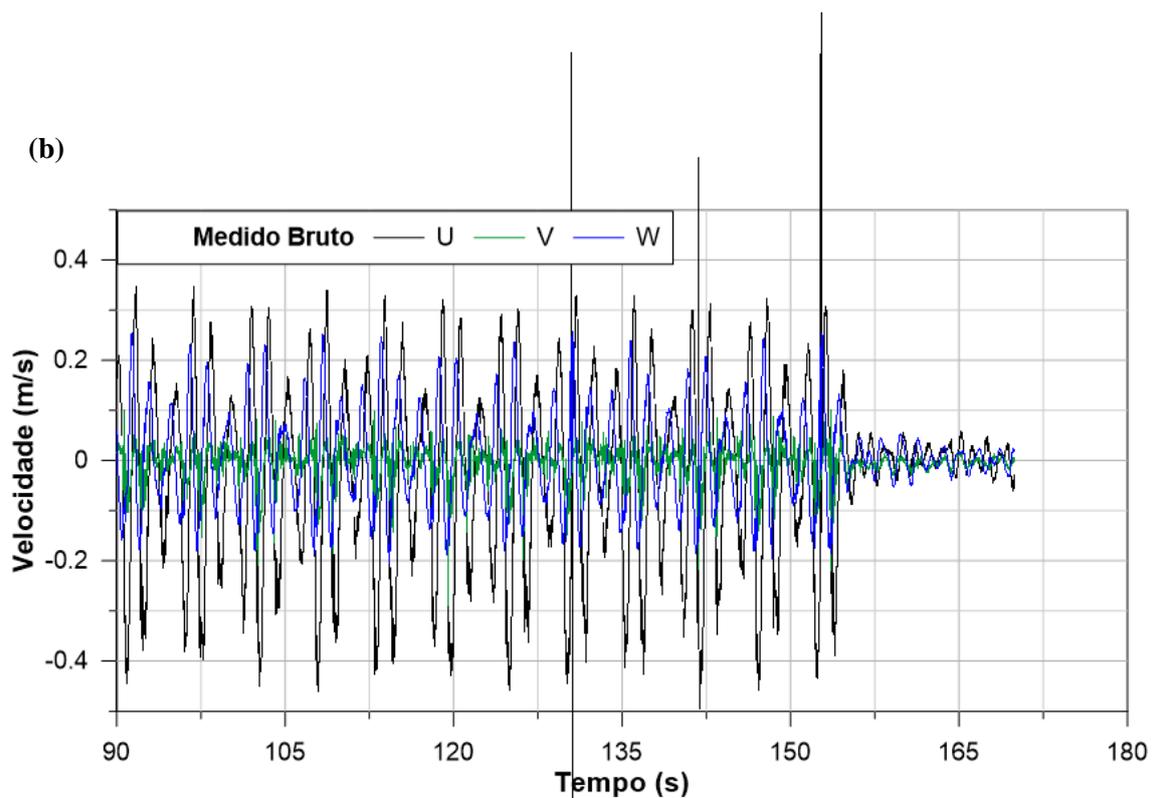
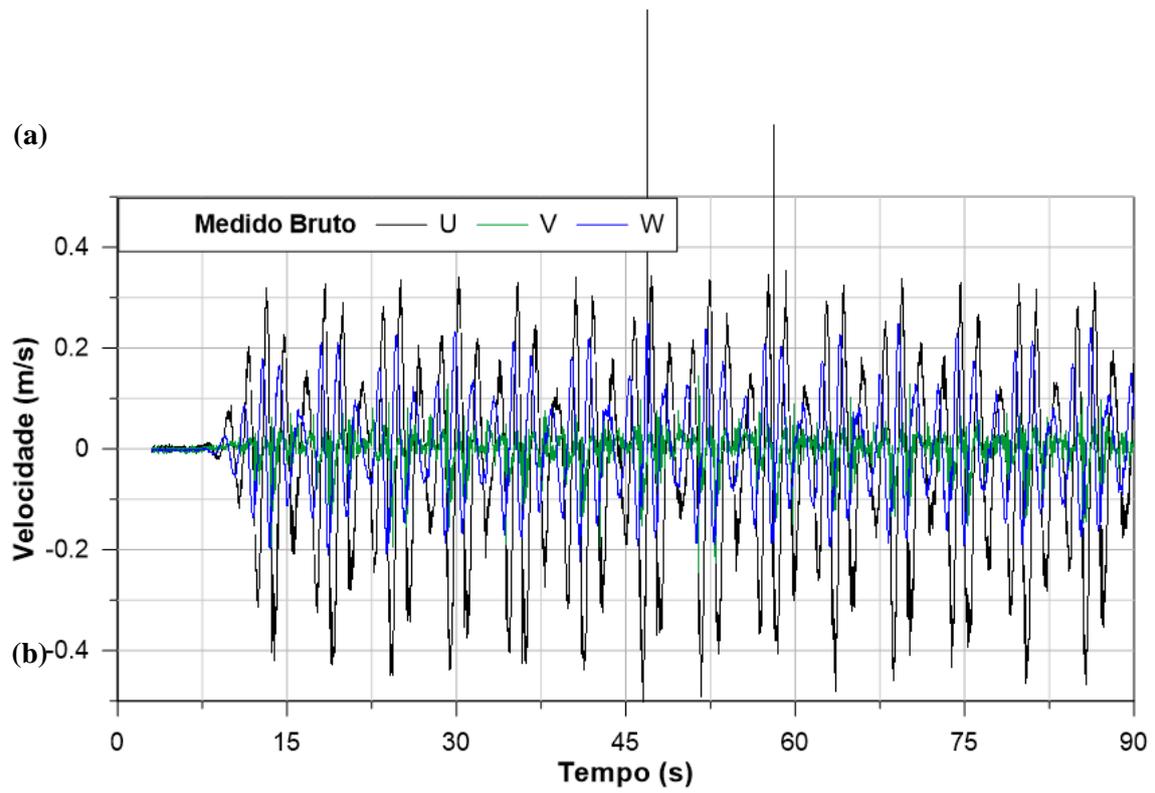


Figura A2.2. Séries de velocidade bruta do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.

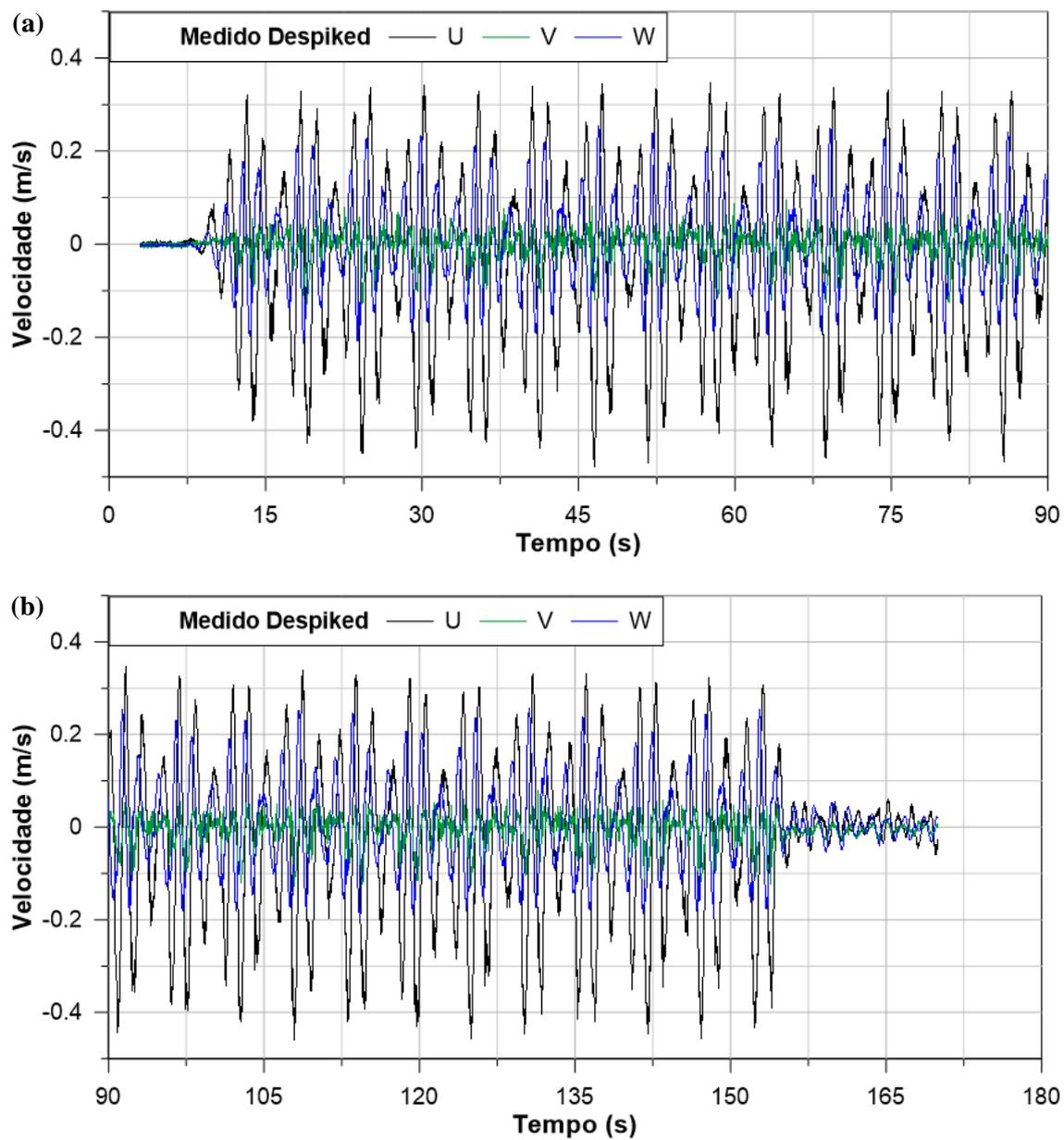


Figura A2.3. Séries de velocidade sem spikes do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.

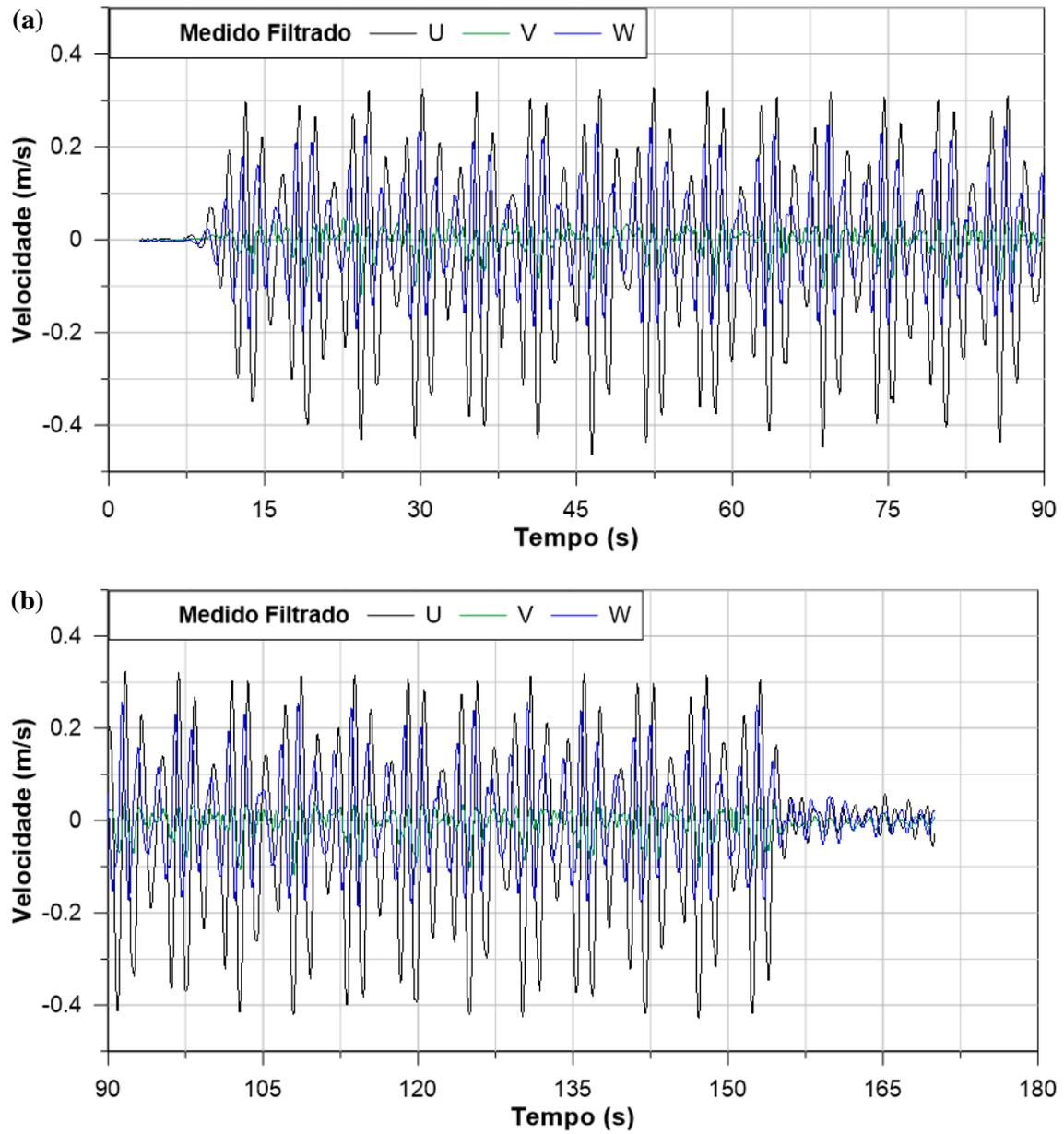


Figura A2.4. Séries de velocidade filtrada do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.

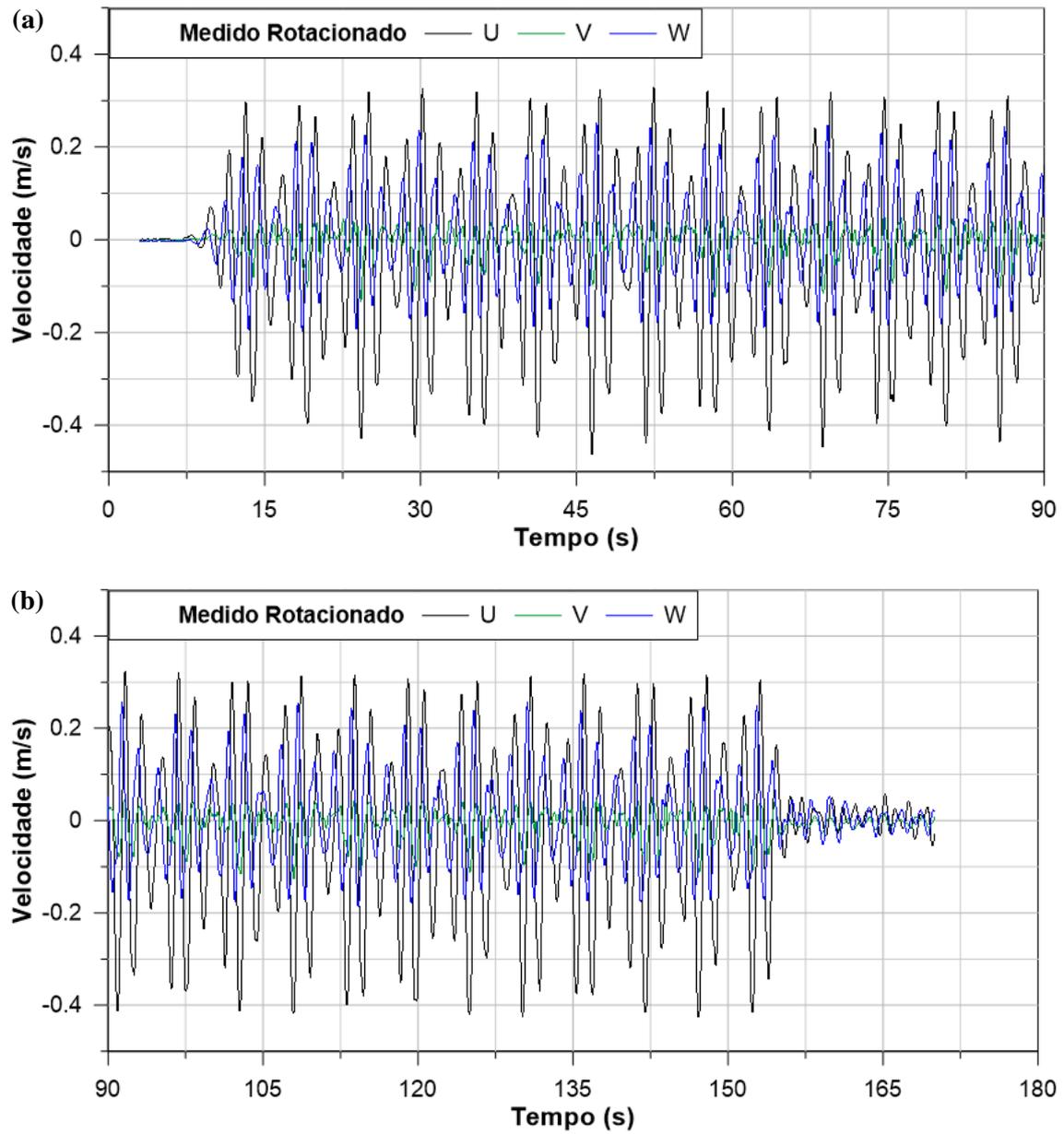


Figura A2.5. Séries de velocidade rotacionada do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.

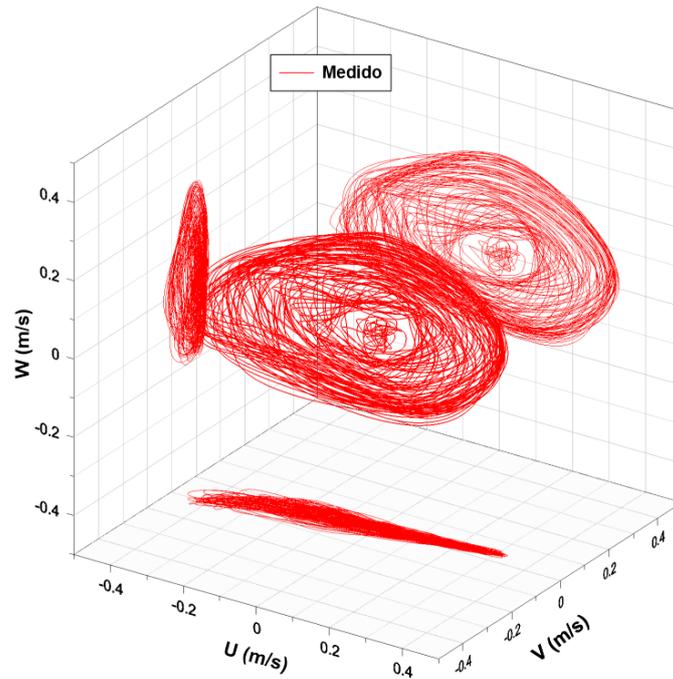


Figura A2.6. Órbita de velocidade final do ADV 2.2.1 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.

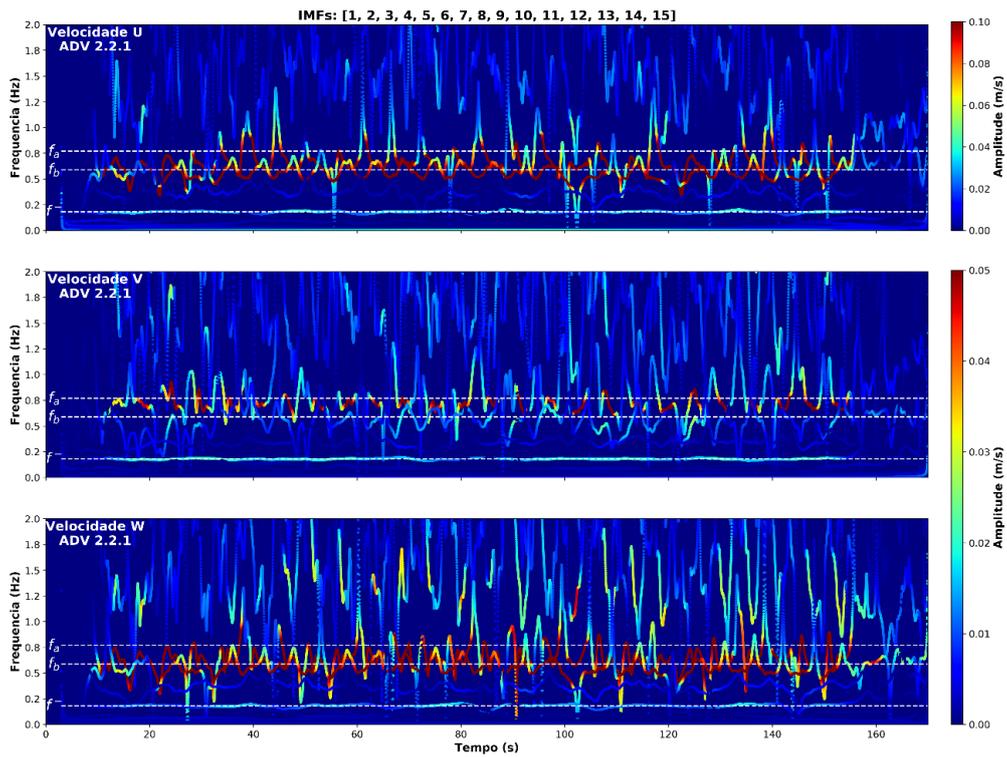


Figura A2.7. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.1 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.

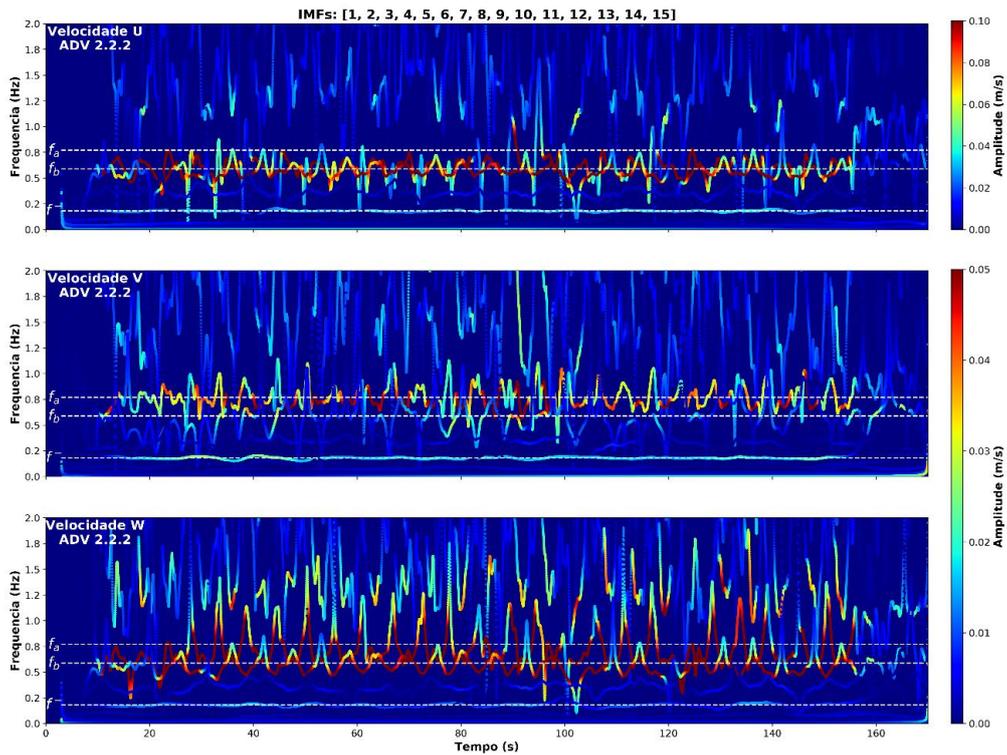


Figura A2.8. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.2 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.

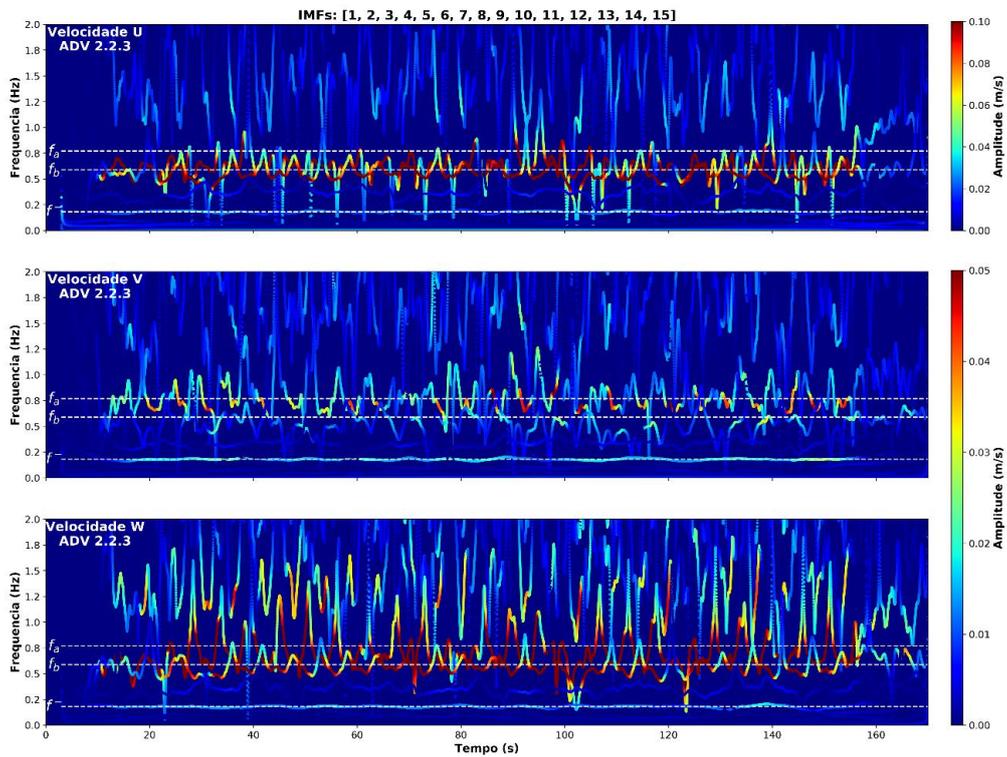


Figura A2.9. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.3 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.

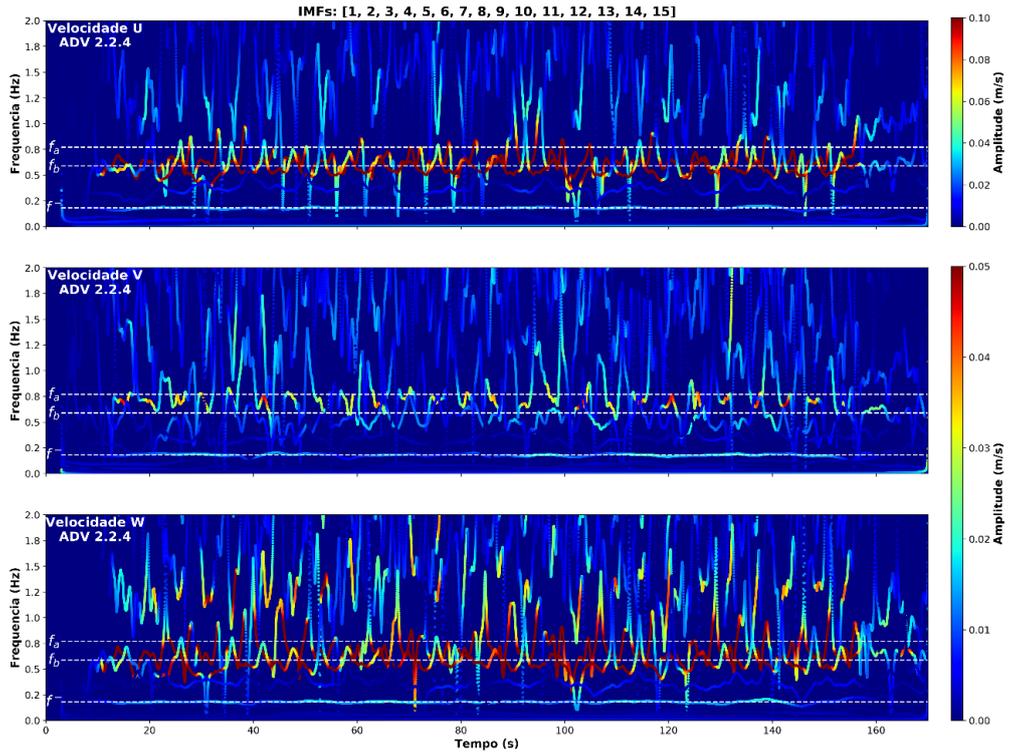


Figura A2.10. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.4 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.

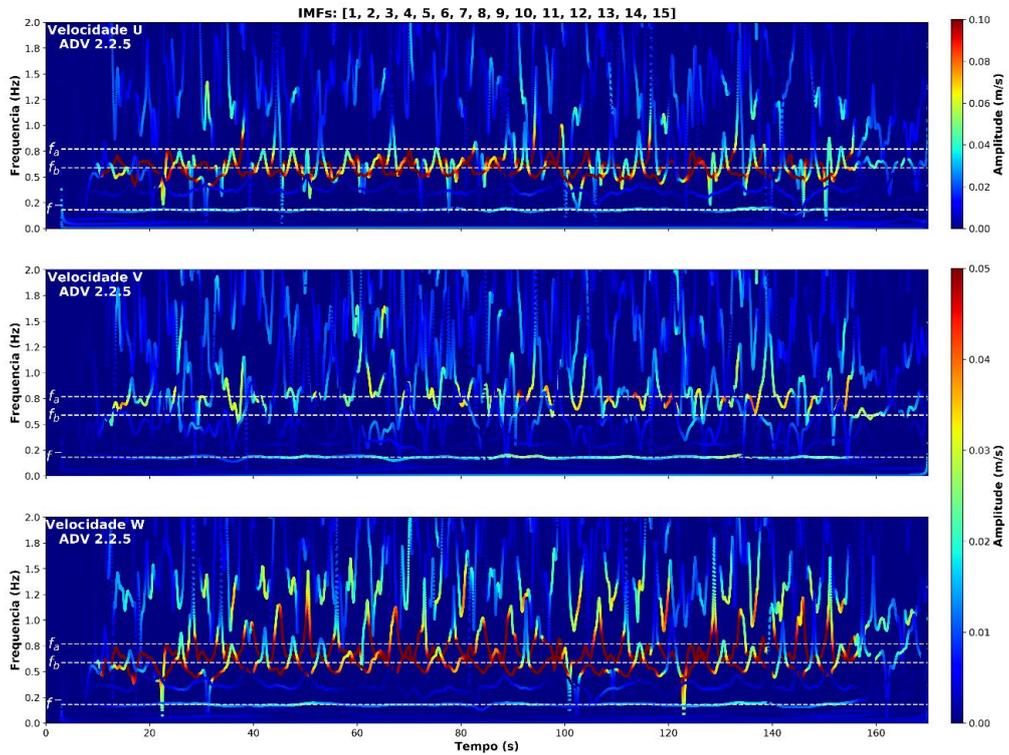


Figura A2.11. Transformada de Hilbert das velocidades medidas U, V e W do ADV 2.2.5 para o caso T4-B2. Todas as 15 IMFs extraídas estão representadas.

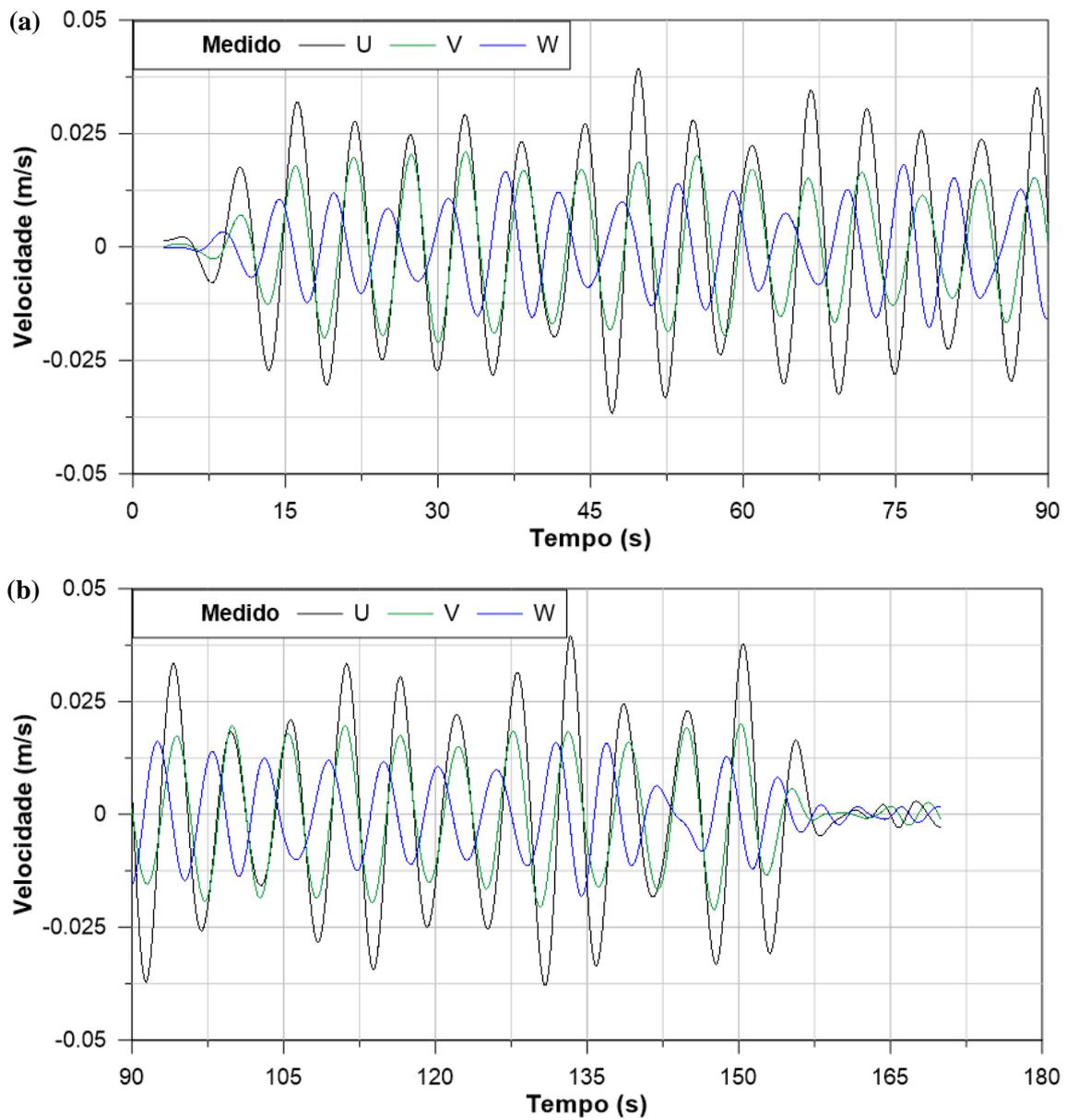


Figura A2.12. Séries de velocidade da IMF 9 extraída do ADV 2.2.1 durante os (a) primeiros e (b) últimos 90 s de simulação do teste T4-B2.

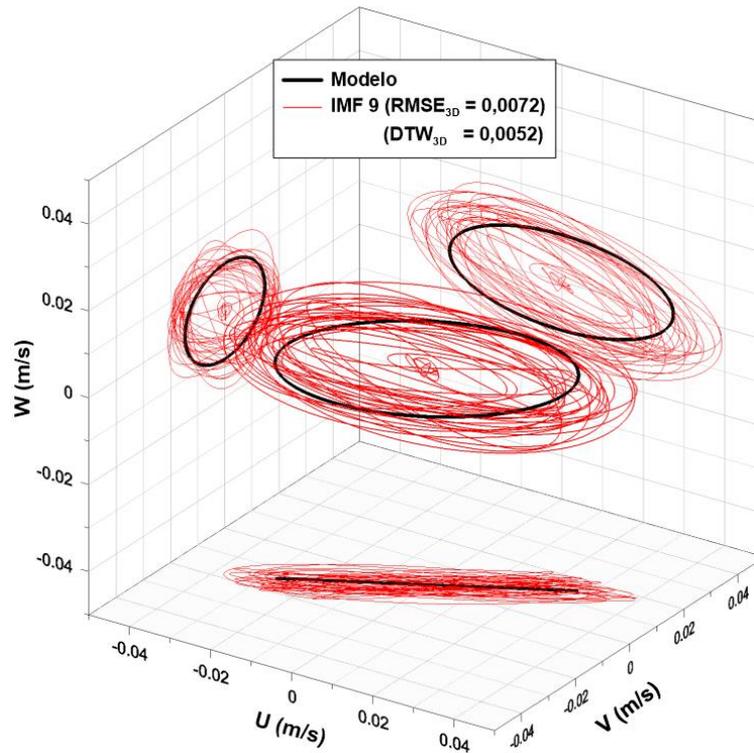


Figura A2.13. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.1 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.

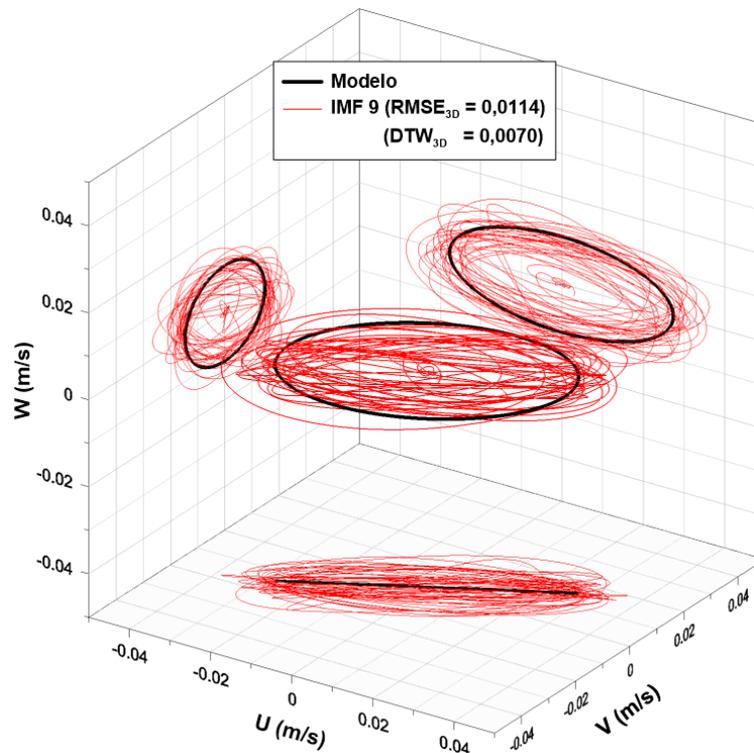


Figura A2.14. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.2 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.

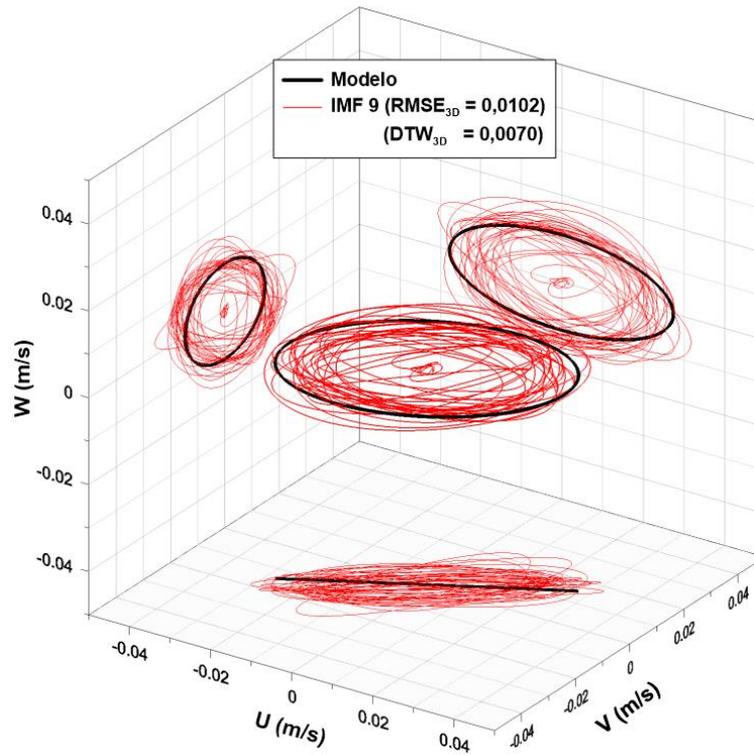


Figura A2.15. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.3 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.

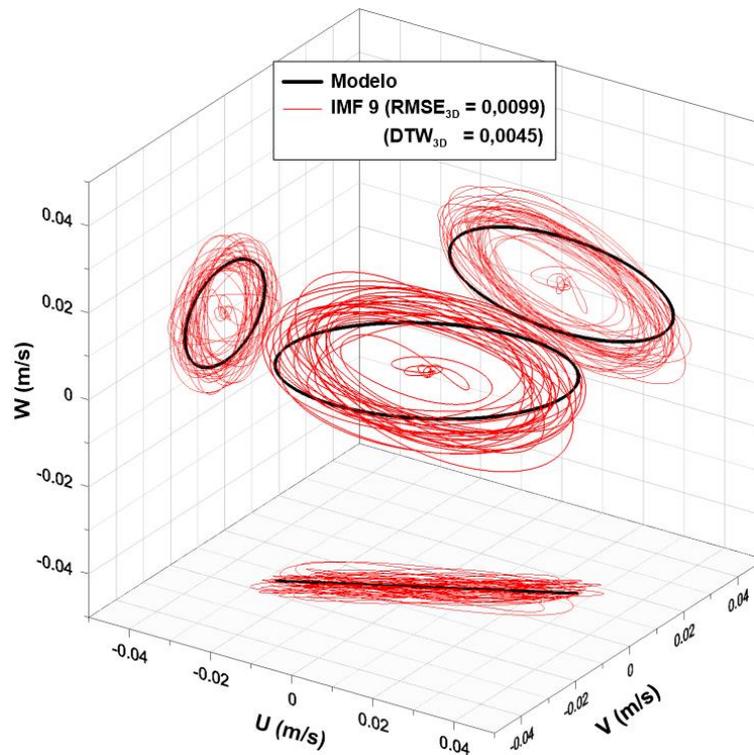


Figura A2.16. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.4 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.

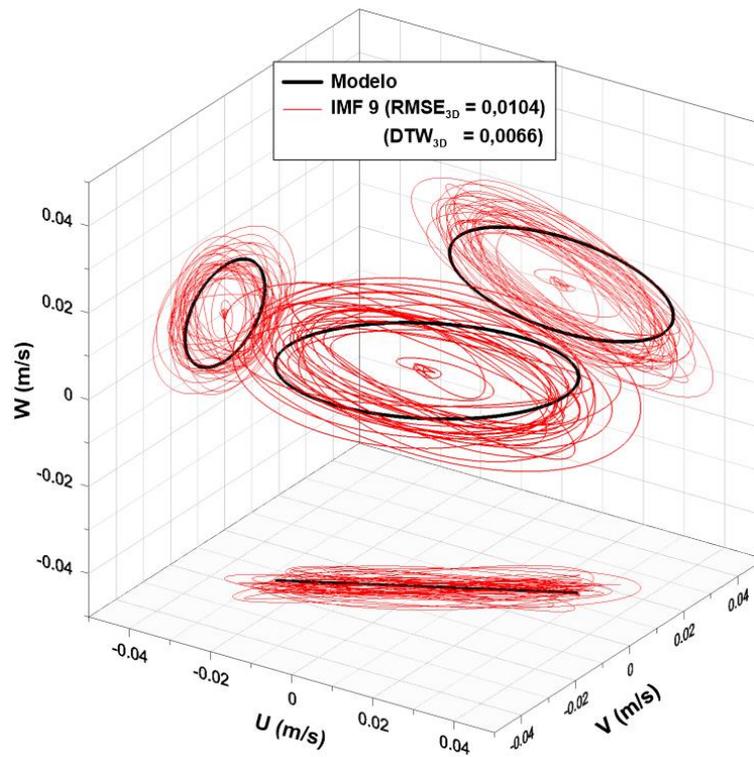


Figura A2.17. Comparação entre as hodógrafas modelada (SHARMA e DEAN, 1981) e extraída (HHT) da interação onda-onda subtrativa gerada pelas Bi-Bis para o ADV 2.2.5 durante todo o período de simulação do teste T4-B2.

ANEXO III

SAÍDA DO WAVELAB®

O WaveLab® é um programa computacional de análise de dados de ondas, desenvolvido especificamente para medições feitas em laboratório. O programa foi feito pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aalborg, da Dinamarca e é utilizado por diversas universidades e institutos de pesquisa ao redor do mundo.

Neste trabalho, o programa foi utilizado para fazer as análises das medições realizadas pelos dois arranjos de USSs. A Figura A3.1 apresenta um exemplo de saída gráfica fornecida pelo WaveLab®. O espectro direcional exemplificado foi calculado pelo método BDM para o teste T4-B2, e é equivalente à Figura 6.2, sendo este produzido em Python a partir dos dados daquele.

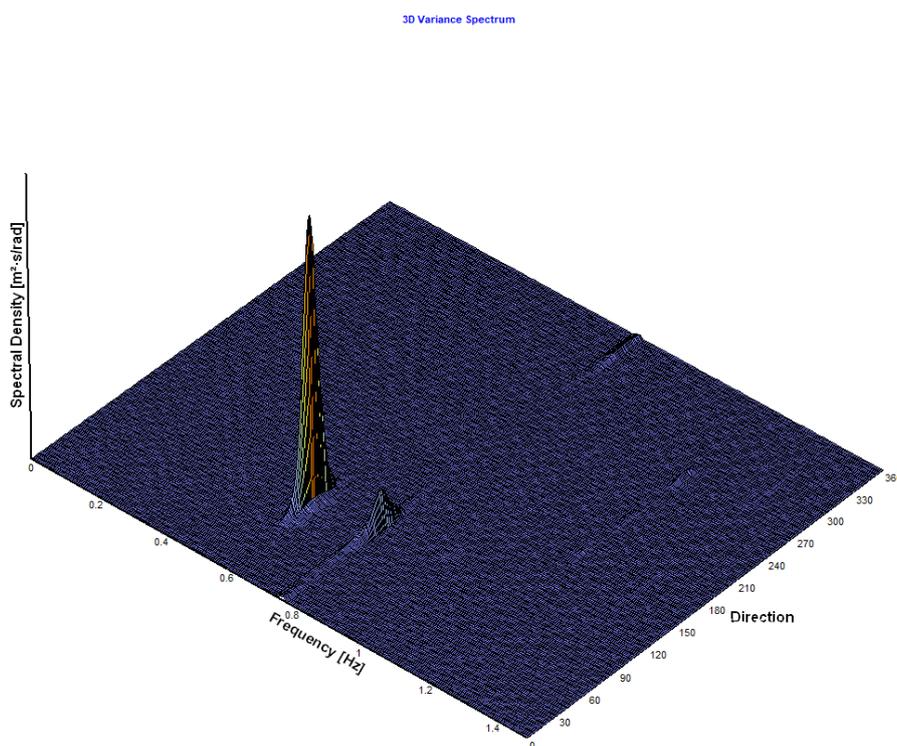


Figura A3.1. Gráfico tridimensional de saída do WaveLab® para o teste T4-B2.

Observa-se que o eixo vertical corresponde à densidade espectral nas unidades de $\text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{rad}$. Para o cálculo de H_s , é necessário fazer a integração do volume abaixo da superfície definida pela densidade de energia. Deve-se atentar que os pontos da superfície estão em coordenadas polares (f, θ), e não cartesianas. Portanto, o H_s deve ser calculado pela equação (6.1). No entanto, a análise dimensional desta equação sugere que $[d_E] = \text{m}^2 \cdot \text{s}^2 / \text{rad}$.

A equação necessária para que a unidade de d_E fosse aquela sugerida pelo eixo vertical

da Figura A3.1 é $H_s = 4 \sqrt{\sum_{i,j}^{n,m} d_E(f_i, \theta_j) \Delta f \Delta \theta}$, ou seja, sem a multiplicação da expressão

dentro da raiz pela frequência, f_i . No entanto, esta equação é resultado da integração cartesiana da superfície, o que é equivocado.

Como não foi possível entrar em contato com a equipe técnica do WaveLab[®] a tempo do fechamento deste trabalho, fez-se um teste calculando-se o H_s através das duas equações. Em todos os casos, a equação (6.1) apresentou resultados mais próximos das ondas requeridas e dos resultados apresentados pelo MMQNL. Assumiu-se, portanto que o programa computacional possui um erro de unidades na plotagem do gráfico espectral tridimensional. Testes com apenas uma onda também foram feitos e indicaram a mesma conclusão.

A título de comparação, neste anexo também são expostos os valores de H_s calculados pela equação que assume que $[d_E] = m^2 \cdot s/rad$ para os testes com ondas Bi-Bi apresentados no **Capítulo VI**: T4-B2, T6-B2, T2-C4, T5-E5, T1-E3 e T3-A2. É notável que os valores de H_s Total nas tabelas abaixo são mais próximos dos relatórios de saída do programa. Conclui-se, portanto, que o próprio WaveLab[®], internamente, calcula o H_s a partir da equação de integração cartesiana em vez da equação (6.1), o que, na visão deste autor, é um equívoco.

Tabela A3.1. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T4-B2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,27	1,71	-1,50
a	0,12	1,30	6,50
b	0,24	1,71	-1,50
Subtrativa	0,012	5,46	37,50

Tabela A3.2. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T6-B2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,27	1,71	-2,50
a	0,11	1,30	7,50
b	0,24	1,71	-2,50
Subtrativa	0,032	5,46	25,50

Tabela A3.3. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T2-C4.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,40	2,10	-0,50
a	0,12	1,30	4,50
b	0,27	2,10	-0,50
Subtrativa	0,042	3,41	31,50

Tabela A3.4. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T5-E5.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,162	2,10	-23,50
a	0,068	1,61	13,50
b	0,140	2,10	-23,50
Subtrativa	-	-	-

Tabela A3.5. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T1-E3.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,250	2,28	1,50
a	0,142	1,51	25,50
b	0,191	2,28	1,50
Subtrativa	0,021	4,31	48,50

Tabela A3.6. Espectro direcional calculado pelo arranjo 2 de USS. Teste T3-A2.

Sistema	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Total	0,24	1,09	10,50
a	-	-	-
b	-	-	-
Subtrativa	-	-	-

ANEXO IV

DADOS E ROTINAS

O presente trabalho gerou uma rica quantidade de dados de modelo físico que podem ser objeto de futuras pesquisas. Com a finalidade de permitir e facilitar a continuidade de trabalhos relacionados às interações onda-onda, este anexo aponta os caminhos para a obtenção dos dados brutos medidos na bacia tridimensional do Instituto Ludwig-Franzius, além de todas as rotinas desenvolvidas em Python para as análises feitas nesta tese.

Todos os dados medidos pelos ADVs, USSs, além dos vídeos gravados durante os experimentos, os arquivos de entrada do programa computacional da bacia de ondas e as rotinas de análise em Python podem ser acessados a partir da pasta “D.Sc. Mario de Souza e Silva – Data & Routines”, acessível pelo link:

<https://drive.google.com/open?id=16x5q1XDqTSJecpyyPPr3s79oITI01WKn>

Os dados de medição, vídeos dos experimentos e arquivos do gerador de ondas também foram arquivados no servidor do Instituto Ludwig-Franzius, na Alemanha. Pesquisadores interessados podem entrar em contato com o autor deste trabalho (mariogrune@oceanica.ufrj.br) ou com o corpo técnico do instituto, cujo endereço eletrônico pode ser acessado em:

<https://www.lufi.uni-hannover.de/mitarbeiter.html?&L=1>

As rotinas de análise de dados, escritas em Python, foram gravadas em um CD-ROM que acompanha esta tese. As etapas de análise, descritas no **Capítulo V** e resumidas no **Capítulo VII**, são aqui repetidas, mas agora relacionando-as com as subrotinas responsáveis por cada etapa.

A análise dos dados se resume a duas rotinas principais (*1QualityCheck.py*; *2DataAnalysis.py*) e doze subrotinas que são chamadas pelas rotinas principais. São elas: *ProbeCheck.py*; *BasicInfo.py*; *SNRCheck.py*; *Thompson.py*; *Despike_Goring_Nikora.py*; *Questions.py*; *Fourier.py*; *IMF.py*; *Noise-Smooth.py*; *HHT.py*; *Round.py*; e *Rotate.py*.

A rotina *1QualityCheck.py* tem por objetivo fazer uma primeira verificação da qualidade dos dados medidos pelos ADVs, além de uma pequena preparação dos dados para uso posterior. Os dados de entrada são arquivos gerados pelo programa Vectrino Plus®

(v1.22.00) da Nortek, desenvolvido para a leitura dos dados brutos dos instrumentos (extensão *.vno) e disponível gratuitamente em:

<http://www.nortek.no/en/support/software>

Este programa tem como saída arquivos com quatro diferentes extensões: *.adv; *.dat; *.hdr; *.pck. Os arquivos *.adv não são utilizados pelas rotinas em Python. Os arquivos *.hdr (de *header*, cabeçalho) apresentam as configurações principais dos instrumentos, além da listagem das colunas dos demais arquivos *.dat e *.pck.

A rotina *2DataAnalysis.py* é aquela responsável pela execução da metodologia proposta neste trabalho. A subrotina *Questions.py* faz uma série de perguntas ao usuário, para direcionar a subsequente análise de dados.

Após a etapa “(i) Medição das hodógrafas de velocidades a partir de um arranjo de 5 ADVs”, a subrotina *Thompson.py* executa a etapa “(ii) Retirada de dados espúrios (*spikes*) a partir do método de GORING e NIKORA (2002)”, com auxílio da subrotina *Despike_Goring_Nikora.py*, e “(iii) Filtragem da alta frequência a partir do filtro passa-baixa de THOMPSON (1983)”. Estas subrotinas geram dados como aqueles ilustrados pelas Figura A2.3 e Figura A2.4.

Em seguida, a subrotina *Rotate.py* executa a etapa “(iv) Correção da inclinação dos ADVs a partir do método proposto por NEVES *et al.* (2012)”. Os resultados são dados como aqueles apresentados pela Figura A2.5, já prontos para serem analisados pela HHT (Figura A2.6).

A subrotina *Fourier.py* faz apenas uma análise de Fourier para posteriores comparações entre esse método clássico de análise, e a HHT. Finalmente, as subrotinas *IMF.py*, *MEMD.py* e *HHT.py* são responsáveis pela última etapa da metodologia proposta, “(v) Aplicação da HHT (HUANG *et al.*, 1998) assistida pela NA-MEMD (REHMAN *et al.*, 2013) sobre os dados do arranjo de ADVs”. Os dados de saída podem ser, então, plotados como os gráficos da Figura A2.7 à Figura A2.17.

Para a comparação dos resultados extraídos com aqueles calculados com o modelo analítico de SHARMA e DEAN (1981), pode-se utilizar as rotinas presentes na subpasta “Sharma e Dean (1981)”, liderados pela rotina principal *Main.py*. Todas as rotinas estão comentadas para facilitar a utilização do usuário.