JOÃO VICENTE SPARANO

MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DE ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS
BASEADO EM MOVIMENTOS DE 1ª ORDEM DE SISTEMAS
OCEÂNICOS: VALIDAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA E VERIFICAÇÃO
EM ESCALA REAL

São Paulo
2008

JOÃO VICENTE SPARANO

MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DE ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS
BASEADO EM MOVIMENTOS DE 1ª ORDEM DE SISTEMAS
OCEÂNICOS: VALIDAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA E VERIFICAÇÃO
EM ESCALA REAL

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

São Paulo
2008

JOÃO VICENTE SPARANO

MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DE ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS
BASEADO EM MOVIMENTOS DE 1ª ORDEM DE SISTEMAS
OCEÂNICOS: VALIDAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA E VERIFICAÇÃO
EM ESCALA REAL

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Alexandre Nicolaos Simos

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Sparano, João Vicente

Método de estimação de espectro direcional de ondas baseado em movimentos de 1ª ordem de sistemas oceânicos : validação em escala reduzida e verificação em escala real / J.V.

Sparano. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

245 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Estimação espectro direcional 2.Método bayesiano 3.Validação experimental 3.Monitoração escala real I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

DEDICATÓRIA

Para todos os Prymus

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, seus professores e funcionários.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Nicolaos Simos.

Aos amigos da sala A-13 que me acolheram quando comecei esta jornada em 1999: Alexandre Simos, André Fugarra, Eduardo Tannuri e Vinicius Matos.

Aos Prof. Dr. José A. P. Aranha e Prof. Dr. Oscar B. Augusto, profissionais e pessoas brilhantes, que acreditaram em mim até nos momentos em que duvidei de mim mesmo.

Aos amigos que me acompanharam ao longo deste trabalho dentro da Universidade: Clóvis A. Martins, Celso P. Pesce, Kazuo Nishimoto, Antônio Russo, Carlos Fucatu, Isaías Masetti, Marcos Donato, Marcos Cueva, Daniel Cueva e Fernando Dotta.

Aos amigos que me acompanharam ao longo deste trabalho fora da Universidade, me acompanham desde antes dele começar, e me acompanharão depois de terminado: Peru, Divera, Lica, Borelli, Funai, Crazy Dog, Boi, Véio, Só, Deley, Juninho, Chinelo, Chileno, Fino, Lixo, Miro, Guará, Uóx, Cássio, Salsicha, Stela, Diego, Porcão, Bozo, Mur, Veraldino, Buga, Coronel, Pepê, Fabiano, Ítalo, Miranda, Bra, Tiço, Digão e Mig.

À minha namorada Vivi: apoio, carinho e companheirismo a todo o momento.

RESUMO

Este texto trata da estimação de espectro direcional de ondas a partir de movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos estacionários utilizando um método de inferência bayesiana. Após descrição do método e discutidas suas principais fontes de incertezas, este foi validado experimentalmente através de ensaios com dois tipos de embarcações para ondas irregulares e mares bimodais, e verificado com dados de monitoração em escala real. Uma comparação preliminar com dados provenientes de um radar próximo ao sistema monitorado também foi feita.

Com base nestes resultados, discute-se a eficiência do método e suas limitações.

ABSTRACT

This text is about estimating directional wave spectra based on first order motions of stationary systems by means of a bayesian inference method. After being described the method and its main sources of uncertainties discussed, an experimental validation was carried out with two different types of hulls for irregular waves and bimodal seas, with a posterior verification using data from a real scale monitoring campaign. Also, a preliminary comparison with data from a radar in the vicinities of the monitored system was made.

Based on those results, the method's efficiency is discussed, along with its limitations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Exemplo de Espectros de Movimento via MATLAB®	32
Figura 4-1: ΔH_s (%) x NPER para P-35 e BGL-1	35
Figura 4-2: P-35 Cheio - H_s e direção de incidência x “u”	38
Figura 4-3: Exemplo de mapa espectral.....	39
Figura 5-1: Embarcações Ensaçadas: FPSO P-35 e BGL-1	41
Figura 5-2: Tanque de provas LabOceano (extraída de “Ensaio para medição de espectro direcional dos modelos P-35 e BGL-1 – Relatório LabOceano”) ..	42
Figura 5-3: Espectros de onda JONSWAP unimodais (short-crested) e bimodais	48
Figura 5-4: Sistema de Coordenadas Estacionário e Sistema de Coordenadas Móvel do navio	49
Figura 5-5: Ondas a 0° e -30° geradas em relação ao Sistema de Coordenadas Estacionário do LabOceano	49
Figura 5-6: Onda gerada a 0° incidindo a 90° na embarcação	50
Figura 5-7: Resultados experimentais - ensaio P35C90I1	54
Figura 5-8: Resultados experimentais – ensaio P35C135I2	56
Figura 5-9: Resultados experimentais – ensaio P35C150B2	58
Figura 5-10: Resultados experimentais – ensaio P35C150B3	59
Figura 5-11: RAOs do FPSO P-35 calado cheio	60
Figura 5-12: Resultados experimentais – ensaio P35C90I4	62
Figura 5-13: RAOs de <i>surge</i> e <i>pitch</i> do FPSO P-35 a 90° e 180°	63
Figura 5-14: Resultados experimentais – ensaio P35I90I1	67
Figura 5-15: Resultados experimentais – ensaio P35I135I2	68
Figura 5-16: Resultados experimentais – ensaio P35I90I4	70
Figura 5-17: Resultados experimentais – ensaio P35L90I1	73
Figura 5-18: Resultados experimentais – ensaio P35L90I2	74
Figura 5-19: Resultados experimentais – ensaio P35L90I4	76
Figura 5-20: Resultados experimentais – ensaio P35L120B3.....	78
Figura 5-21: Resultados experimentais – ensaio P35L150B2.....	79
Figura 5-22: Resultados experimentais – ensaio P35L150B3.....	80
Figura 5-23: Resultados experimentais – ensaio BGL135I1	84
Figura 5-24: Resultados experimentais – ensaio BGL135I3	85
Figura 5-25: Resultados experimentais – ensaio BGL120B3.....	87
Figura 5-26: Resultados experimentais – ensaio BGL150B2.....	88
Figura 5-27: Resultados experimentais – ensaio BGL150B3.....	89
Figura 5-28: Resultados experimentais – ensaio BGL120B1	91
Figura 5-29: Comparação: mar 3 da Tabela 5-3; incidência 135° – FPSO P35 – 3 calados.....	93
Figura 5-30: Comparação: mar 3 da Tabela 5-3; incidência 135° – BGL-1	94
Figura 5-31: Comparação ensaio P35L150B3 x BGL150B3.	95
Figura 6-1: Ilustração dos dados no software <i>ShipManager-88</i>	101
Figura 6-2: Ilustração dos dados no software <i>Sstab</i>	102
Figura 6-3: Malha numérica para o programa WAMIT® - caso 1.....	103
Figura 6-4: Velocidades angulares e acelerações – caso 1	104
Figura 6-5: Movimentos de 1ª ordem – caso 1	105

Figura 6-6: Aproamento caso 1	105
Figura 6-7: Grandezas estatísticas significativas do estado de mar – Saída do Programa W@ves21®	106
Figura 6-8: Gráfico de contorno do espectro direcional - Saída do Programa W@ves21®	107
Figura 6-9: Gráfico tridimensional do espectro direcional - Saída do Programa W@ves21®	107
Figura 6-10: Espectro de potência, direção e espalhamento médios - Saída do Programa W@ves21®	108
Figura 6-11: Variação de Aproamento – Caso Extra 1	110
Figura 6-12: Resultados escala real: caso 1	112
Figura 6-13: Resultados escala real: caso 5	113
Figura 6-14: Resultados escala real: caso 8	114
Figura A-1: ΔH_s (%) x NPER: P-35 e BGL-1	132
Figura A-2: ΔT_p (%) x NPER: P-35 e BGL-1	133
Figura A-3: ΔDir (%) x NPER: P-35 e BGL-1	134
Figura A-4: ΔH_s (%) x NDIR: P-35 e BGL-1	135
Figura A-5: ΔT_p (%) x NDIR: P-35 e BGL-1	136
Figura A-6: ΔDir (%) x NDIR: P-35 e BGL-1	137
Figura A-7: Espectro Experimental: Caso Bimodal P35 calado cheio	138
Figura A-8: Mapas de Espectro x “u”: FPSO P35 cheio; mar bimodal	140
Figura B-1: Resultados experimentais - ensaio P35C90I1	142
Figura B-2: Resultados experimentais – ensaio P35C90I2	143
Figura B-3: Resultados experimentais – ensaio P35C90I3	144
Figura B-4: Resultados experimentais – ensaio P35C90I4	145
Figura B-5: Resultados experimentais – ensaio P35C135I1	146
Figura B-6: Resultados experimentais – ensaio P35C135I2	147
Figura B-7: Resultados experimentais – ensaio P35C135I3	148
Figura B-8: Resultados experimentais – ensaio P35C135I4	149
Figura B-9: Resultados experimentais – ensaio P35C120B1	150
Figura B-10: Resultados experimentais – ensaio P35C120B2	151
Figura B-11: Resultados experimentais – ensaio P35C120B3	152
Figura B-12: Resultados experimentais – ensaio P35C120B4	153
Figura B-13: Resultados experimentais – ensaio P35C120B5	154
Figura B-14: Resultados experimentais – ensaio P35C150B1	155
Figura B-15: Resultados experimentais – ensaio P35C150B2	156
Figura B-16: Resultados experimentais – ensaio P35C150B3	157
Figura B-17: Resultados experimentais – ensaio P35C150B4	158
Figura B-18: Resultados experimentais – ensaio P35C150B5	159
Figura C-1: Resultados experimentais – ensaio P35I90I1	161
Figura C-2: Resultados experimentais – ensaio P35I90I2	162
Figura C-3: Resultados experimentais – ensaio P35I90I3	163
Figura C-4: Resultados experimentais – ensaio P35I90I4	164
Figura C-5: Resultados experimentais – ensaio P35I135I1	165
Figura C-6: Resultados experimentais – ensaio P35I135I2	166
Figura C-7: Resultados experimentais – ensaio P35I135I3	167
Figura C-8: Resultados experimentais – ensaio P35I135I4	168
Figura C-9: Resultados experimentais – ensaio P35I120B1	169
Figura C-10: Resultados experimentais – ensaio P35I120B2	170
Figura C-11: Resultados experimentais – ensaio P35I120B3	171

Figura C-12: Resultados experimentais – ensaio P35I120B4	172
Figura C-13: Resultados experimentais – ensaio P35I120B5	173
Figura C-14: Resultados experimentais – ensaio P35I150B1	174
Figura C-15: Resultados experimentais – ensaio P35I150B2	175
Figura C-16: Resultados experimentais – ensaio P35I150B3	176
Figura C-17: Resultados experimentais – ensaio P35I150B4	177
Figura C-18: Resultados experimentais – ensaio P35I150B5	178
Figura D-1: Resultados experimentais – ensaio P35L90I1	180
Figura D-2: Resultados experimentais – ensaio P35L90I2	181
Figura D-3: Resultados experimentais – ensaio P35L90I3	182
Figura D-4: Resultados experimentais – ensaio P35L90I4	183
Figura D-5: Resultados experimentais – ensaio P35L135I1	184
Figura D-6: Resultados experimentais – ensaio P35L135I2	185
Figura D-7: Resultados experimentais – ensaio P35L135I3	186
Figura D-8: Resultados experimentais – ensaio P35L135I4	187
Figura D-9: Resultados experimentais – ensaio P35L120B1	188
Figura D-10: Resultados experimentais – ensaio P35L120B2	189
Figura D-11: Resultados experimentais – ensaio P35L120B3	190
Figura D-12: Resultados experimentais – ensaio P35L120B4	191
Figura D-13: Resultados experimentais – ensaio P35L120B5	192
Figura D-14: Resultados experimentais – ensaio P35L150B1	193
Figura D-15: Resultados experimentais – ensaio P35L150B2	194
Figura D-16: Resultados experimentais – ensaio P35L150B3	195
Figura D-17: Resultados experimentais – ensaio P35L150B4	196
Figura D-18: Resultados experimentais – ensaio P35L150B5	197
Figura E-1: Resultados experimentais – ensaio BGL90I1	199
Figura E-2: Resultados experimentais – ensaio BGL90I2	200
Figura E-3: Resultados experimentais – ensaio BGL90I3	201
Figura E-4: Resultados experimentais – ensaio BGL90I4	202
Figura E-5: Resultados experimentais – ensaio BGL135I1	203
Figura E-6: Resultados experimentais – ensaio BGL135I2	204
Figura E-7: Resultados experimentais – ensaio BGL135I3	205
Figura E-8: Resultados experimentais – ensaio BGL135I4	206
Figura E-9: Resultados experimentais – ensaio BGL120B1	207
Figura E-10: Resultados experimentais – ensaio BGL120B2	208
Figura E-11: Resultados experimentais – ensaio BGL120B3	209
Figura E-12: Resultados experimentais – ensaio BGL120B4	210
Figura E-13: Resultados experimentais – ensaio BGL120B5	211
Figura E-14: Resultados experimentais – ensaio BGL150B1	212
Figura E-15: Resultados experimentais – ensaio BGL150B2	213
Figura E-16: Resultados experimentais – ensaio BGL150B3	214
Figura E-17: Resultados experimentais – ensaio BGL150B4	215
Figura E-18: Resultados experimentais – ensaio BGL150B5	216
Figura F-1: Resultados escala real: caso 1	218
Figura F-2: Resultados escala real: caso 2	219
Figura F-3: Resultados escala real: caso 3	220
Figura F-4: Resultados escala real: caso 4	221
Figura F-5: Resultados escala real: caso 5	222
Figura F-6: Resultados escala real: caso 6	223
Figura F-7: Resultados escala real: caso 7	224

Figura F-8: Resultados escala real: caso 8	225
Figura F-9: Resultados escala real: caso “Extra 2”	226
Figura F-10: Resultados escala real: caso “Extra 3”	227
Figura G-1: RAOs P-35 calado intermediário	229
Figura G-2: RAOs P-35 Calado de Lastro	230
Figura G-3: RAOs BGL-1	231

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Hs (m), Tp (s) e Dir (°) variando o KG do FPSO P-35 calado leve	36
Tabela 4-2: Valores do Parâmetro de Calibração “u” – Ensaio LabOceano...	38
Tabela 5-1: Características principais do casco do FPSO P-35.....	44
Tabela 5-2: Características principais do casco da BGL-1.....	45
Tabela 5-3: Características das ondas irregulares unimodais.....	47
Tabela 5-4: Características das ondas irregulares bimodais.....	47
Tabela 5-5: Método Bayesiano – P-35 calado cheio	52
Tabela 5-6: Método Bayesiano – P-35 calado intermediário	65
Tabela 5-7: Método Bayesiano – P-35 calado de lastro	71
Tabela 5-8: Método Bayesiano – BGL-1 calado operacional	82
Tabela 6-1: Disponibilidade dos Dados	99
Tabela 6-2: Casos selecionados – Escala real.....	99
Tabela 6-3: Método Bayesiano: P-35 escala real.....	109
Tabela 6-4: Dados do radar WAMEX® P-18 para os casos de mar	116
Tabela 6-5: Dados do radar WAMEX® P-40 para os casos de mar	116
Tabela 6-6: Casos de mar: Hs - Radar x Bóia x Bayesiano	117
Tabela A-1: Hs (m), Tp (s) e θ (°) x “u” para FPSO P35 cheio – mar bimodal (Hs = 1.49m, Tp = 11.4s e θ = 105.0407°)	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1MF	Fit to Unimodal Parametric Model
BDM	Bayesian Directional Method
BGL-1	Balsa Guindaste e Lançamento 1
DSF	Directional Spreading Function
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FPSO	Floating, Production Storage and Offloading
GM	Altura metacêntrica
IMLM	Iterative Refinements of MLM
JIP	Joint Industry Project
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
KG	Posição vertical do centro de gravidade do navio a partir da quilha
LabOceano	Laboratório de Tecnologia Oceânica
LHM	Long Hasselman Method
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
MEM	Maximum Entropy Method
MLM	Maximum Likelihood Method
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
RAO	Response Amplitude Operators
TFS	Truncated Fourier Series Decomposition
VLCC	Very Large Crude Carrier
WFS	Weighted Fourier Series Decomposition

LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta(\theta')$ - delta de Dirac

ε_k - diferença de 2^a. ordem correspondente à direção k

ε_4 - Largura espectral

$\Gamma(\omega)$ – “*Long-crestedness parameter*” no intervalo $[0;1]$

ϕ_{mn} - Espectro cruzado entre os movimentos “m” e “n” do navio

$\sigma(\omega)$ - Largura direcional

σ^2 - variância

θ – direção média de propagação do espectro

$\theta_m(\omega)$ - Direção média de onda dada no intervalo $[0;2\pi]$

$\theta_p(\omega)$ - Direção principal de onda dada no intervalo $[0;\pi]$

$\theta_k(\omega)$ - Ângulo principal de espalhamento no intervalo $[0; \pi/2]$

ω - Freqüência (rad/s)

A – Matriz dos RAOs do Navio

a_n, b_n ($n = 1;2$) – Coeficientes da decomposição em série de Fourier de DSF

B – Matriz dos espectros cruzados dos movimentos do navio

$C_{ij}(\omega)$ – Parte Real de $G_{ij}(\omega)$

$D(\theta)$ – Função de espalhamento direcional (DSF)

$E(\omega)$ – Espectro de freqüência

f – freqüência (Hz)

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

$G_{ij}(\omega)$ – Espectros cruzados entre cada par (X_i, X_j)

$G(s)$ – Fator normalizador de $D(\omega, \theta)$

$H(D)$ – Função de entropia

H_s - Altura significativa de onda

$J(x)$ – Funcional a ser minimizado no Método Bayesiano

k – Número de onda

$L(B | x)$ - A função de verossimilhança

m_n – Momentos espectrais

$P(x)$ – Probabilidade/Distribuição a priori

$Q_{ij}(\omega)$ – Parte imaginária de $G_{ij}(\omega)$

RAOm – Operador de Resposta em Amplitude (Função de Transferência)
do navio no movimento “ m ”

$R_{ij}(\tau)$ – Função de correlação cruzada entre cada par (X_i, X_j)

s – Espalhamento direcional

$S(f, \theta)$; $S(\omega, \theta)$ – Espectro direcional de ondas

T_{01} e T_{02} - Períodos médios

T_p – Período de Pico

$\mathbf{U}$ - vetor que representa o ruído de medida

“ $\mathbf{u}$ ” - controla o *trade-off* entre a aderência com as medições e a suavidade do espectro direcional

u_{energia} – parâmetro que impede que o espectro direcional de ondas assumam valor não nulo na região de frequências onde ambos os RAOs e os espectros de movimentos são nulos.

$w(\theta, \theta')$ – função janela

$x = (S_1 \ S_2 \ \dots \ S_K)^T$ - Vetor das componentes do Espectro Direcional de Ondas $S(\omega, \theta)$

X_1 – Registro de *heave* de bóia oceanográfica

X_2 – Registro de *roll* de bóia oceanográfica

X_3 – Registro de *pitch* de bóia oceanográfica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. Bóias Oceanográficas	8
2.1.1 <i>Séries de Fourier</i>	8
2.1.2 <i>Estatística de Inferência</i>	12
2.2 Movimentos de Primeira Ordem de Embarcações.....	16
2.3 Radares Meteorológicos.....	20
3. O MÉTODO BAYESIANO APLICADO À ESTIMAÇÃO DE ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS.....	22
3.1 Noções Preliminares	22
3.2 Método Bayesiano aplicado à Estimação da Função de Espalhamento Direcional – Fundamentação Teórica de Hashimoto e Kobune (1988).....	24
3.3 Método Bayesiano aplicado à Estimação do Espectro Direcional de Ondas a partir de Movimentos de Primeira Ordem de Sistemas Estacionários	27
3.4 Implementação Numérica.....	32
4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS.....	34
4.2 Calibração dos parâmetros “u” e “u _{energia} ”	37
5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO BAYESIANO DE 5 MOVIMENTOS: ESTUDO COM BASE NOS ENSAIOS DO LABOCEANO DA COPPE/UFRJ.....	41
5.1 Ensaio com Modelo do FPSO P-35.....	51
5.1.1 Ensaio com calado cheio (18.44m).....	51
5.1.2 Ensaio com calado intermediário (14.73m).....	65
5.1.3 Ensaio com calado de lastro (8.51m).....	71
5.2 Ensaio com modelo da Balsa Guindaste e Lançamento (BGL-1)	82
5.3 Comentários Adicionais e Conclusões acerca da Validação Experimental.....	92
6. VERIFICAÇÃO EM ESCALA REAL: ESTUDO COM BASE NA MONITORAÇÃO DO FPSO P-35.....	97
6.1 Metodologia de Análise.....	98
6.2 Procedimento para Levantamento dos Dados do Navio.....	100
6.2.1 Dados do Navio Leve.....	100
6.2.2 Dados do Navio nas Diferentes Condições de Carga.....	101
6.2.3 Obtenção das Funções de Transferência de Movimentos de Primeira Ordem (RAOs).....	103
6.2.4 Procedimento para Levantamento dos Movimentos de Primeira-Ordem Monitorados	104
6.2.5 Procedimento para Obtenção dos Espectros de Mar a partir dos Dados da Bóia Oceanográfica	106
6.3 Resultados Finais	108
6.4 Comparação adicional com resultados dos radares instalados nos sistemas P-40 e P-18.....	115
6.5 Comentários e Conclusões Finais acerca da Verificação em Escala Real	118
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	119
8. BIBLIOGRAFIA	124

APÊNDICE A – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MÉTODO BAYESIANO À DISCRETIZAÇÃO DO RAO E VARIAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS E DOS MAPAS ESPECTRAIS COM O PARÂMETRO “ u ”: EXEMPLO.....	130
APÊNDICE B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O FPSO P-35	
CALADO CHEIO	141
Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais.....	142
Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais.....	150
APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O FPSO P-35	
CALADO INTERMEDIÁRIO	160
Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais.....	161
Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais.....	169
APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O FPSO P-35	
CALADO DE LASTRO	179
Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais.....	180
Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais.....	188
APÊNDICE E – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A BALSA GUINDASTE E LANÇAMENTO (BGL-1) EM CALADO OPERACIONAL.....	198
Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais.....	199
Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais.....	207
APÊNDICE F - RESULTADOS FPSO P-35 EM ESCALA REAL	217
APÊNDICE G - RAOs P-35 CALADOS INTERMEDIÁRIO E LASTRO E BGL-1	228

1. INTRODUÇÃO

A monitoração em escala real de sistemas flutuantes de produção, em especial os FPSOs (*Floating Production Storage and Offloading*), é um tópico importante no desenvolvimento da engenharia oceânica, pois permite embasar e verificar os modelos analíticos e numéricos desenvolvidos para, entre outros aspectos, prever seu comportamento no mar. Para isso, porém, é necessário que se tenha conhecimento do espectro de ondas incidente, levando em conta também sua direcionalidade.

O conhecimento do espectro direcional de ondas pode ser útil também para a própria operação dos FPSOs, possibilitando a reorientação destes com relação à direção de incidência preponderante das ondas. Em situações de ondas extremas, o conhecimento do espectro direcional pode ser utilizado para a adoção de procedimentos de emergência com vistas a garantir a segurança das instalações. Por fim, informações sobre ondas podem ser usadas no controle de sistemas de posicionamento dinâmico de FPSOs e também convencionais.

Em outras embarcações, operações de alto risco como *lifting* de cargas, lançamento de dutos, fibras óticas, instrumentação de *risers*, por exemplo, se tornam mais eficientes e seguras se houver disponível a informação da condição de mar no local e momento das mesmas.

A forma tradicional de monitoração do estado de mar é baseada em dados coletados por bóias oceanográficas (ver, por exemplo, Longuet-Higgins et al. (1961)). No entanto, a instalação e a manutenção de tais equipamentos apresentam algumas dificuldades, em particular no caso de mares de grande profundidade, que atualmente representam a tendência das companhias exploradoras de petróleo, em particular, a Petrobras.

Uma forma mais prática de se realizar esta monitoração é através de sistemas localizados a bordo das embarcações. Neste caso, as facilidades de instalação,

operação e manutenção são significativas quando comparadas às bóias oceanográficas. Um exemplo disso são os radares, como sistema WAVEX^{® 1} e o sistema WAMOS^{® 2}, este último inclusive adquirido pela Petrobras para algumas de suas embarcações.

Ainda no âmbito dos sistemas localizados a bordo para a determinação dos espectros de mar, ou seja, que prescindem da utilização de bóias, uma metodologia alternativa tem sido estudada no Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) desde o ano de 2000, e é o objetivo deste trabalho. Tal metodologia se baseia na estimação do espectro direcional de ondas do mar a partir da monitoração dos movimentos de primeira-ordem de sistemas estacionários de grande porte, como os FPSOs, diferentemente dos trabalhos existentes na literatura que estudam o problema de estimação espectral fazendo uso de embarcações de pequeno porte e em movimento (ver, por exemplo, Iseki e Ohtsu (2000), Iseki (2004) e Pascoal et al. (2005)).

Este estudo inicial da EPUSP, apoiado pela Petrobras na forma de convênio de pesquisa, utilizava, como será visto no Capítulo 2, dois métodos de estimação: um paramétrico e um não-paramétrico (utilizando as técnicas de inferência bayesiana propostas por Iseki e Ohtsu (2000)), cujos resultados de simulações numéricas e condições de mar centenárias se mostraram bastante animadores, demonstrando ser viável uma estimação adequada dos espectros de mar a partir da monitoração de seus movimentos (ver, por exemplo, Tannuri et al. (2001; 2004) e Tannuri (2002)).

A metodologia estudada consiste em realizar a estimação espectral com base nos movimentos de primeira-ordem de um sistema flutuante, permitindo assim a estimação de espectros de onda, inclusive bimodais, a um custo significativamente inferior se comparado àqueles dos sistemas a radar e das bóias oceanográficas. A instalação necessária para tornar o sistema de monitoração operacional é composta simplesmente por uma base inercial

¹ Sítio eletrônico acessado em <http://www.mirros.no>

² Sítio eletrônico acessado em <http://www.oceanwaves.de>

(acelerômetros e *rate-gyros*) e um computador PC usual. Trata-se, portanto, de um sistema de baixo custo inicial e de fáceis manutenção e instalação.

Considerando que a Petrobras possui embarcações passíveis de serem instrumentadas para o registro de dados de seus movimentos, justifica-se o estudo da viabilidade de se utilizar esses registros para estimar o espectro direcional de ondas.

Pode-se encarar o sistema flutuante como um sensor por meio do qual se quer medir o espectro de mar. Sensores são dispositivos usados em uma infinidade de aplicações industriais e uma condição indispensável para terem utilidade é que seu comportamento dinâmico seja conhecido na região de operação de interesse, tanto no que se refere ao nível dos sinais quanto à faixa de frequência destes. No caso dos sistemas flutuantes em questão isto também se aplica.

Naturalmente, dado que a dinâmica própria da embarcação filtra o efeito das componentes de alta frequência presentes nas ondas do mar através de uma característica do sistema chamada **período de corte**, ou seja, período abaixo do qual as funções de transferência da embarcação não apresentam níveis significativos de resposta, o que se pode pretender estimar é apenas a porção do espectro correspondente à banda de frequências que se manifesta no movimento da embarcação. Contudo, é fundamental observar que apenas esta faixa de frequências é de interesse quando o propósito é avaliar o efeito das ondas sobre a embarcação. Em outras palavras, a intenção não é obter dados de onda com a mesma precisão e na mesma extensão daqueles que podem ser obtidos por meio de bóias oceanográficas ou radares, mas sim estimar o espectro de mar que efetivamente está excitando a embarcação, buscando associar seus movimentos com esse espectro de mar. No caso de embarcações de grande porte, esta banda de frequência de movimentos de primeira ordem é menor se comparada àquela das embarcações de pequeno porte, e, para condições de mar amenas (cujo período de pico do espectro encontra-se próximo do valor do período de corte da embarcação, ou baixos valores de altura significativa de onda, ou ambos), de maior probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da embarcação em campo, em especial na

Bacia de Campos (Seixas (1997)), o nível de seus movimentos de primeira ordem é menor também. Contudo os resultados da estimação são excelentes, como se verá ao longo do texto.

Vale a pena lembrar que uma hipótese fundamental em que se assenta este trabalho é a de linearidade e da invariância no tempo, e, portanto, da possibilidade de traduzir o movimento da embarcação como função apenas da frequência, amplitude e direção das ondas incidentes. Assim, os movimentos induzidos na embarcação pela ação das ondas são descritos apenas com base em suas funções de transferência, os chamados *Response Amplitude Operators* (RAOs).

Em outras palavras, o mecanismo básico aplicado para estimar o espectro direcional de ondas pode ser resumido da seguinte forma: os espectros cruzados dos sinais correspondentes aos movimentos do navio devem ser estimados a partir dos registros de dados coletados pelos instrumentos a bordo da embarcação. Os RAOs que relacionam os movimentos do navio às ondas que lhes dão origem devem ser estimados previamente para cada embarcação, utilizando modelos matemáticos ou *softwares* já disponíveis (WAMIT[®](2004)), por exemplo). Por fim, as estimativas dos espectros direcionais de onda são geradas utilizando os elementos acima.

Isto posto, o objetivo central do presente texto é apresentar esta metodologia de estimação de espectro direcional de ondas a partir de movimentos de primeira ordem de sistemas estacionários e discutir as principais fontes de incerteza da estimação. Dentre os modelos estudados inicialmente pela EPUSP, o não-paramétrico (bayesiano) proposto por Iseki e Ohtsu (2000) foi revisado, ampliado e validado experimentalmente para mares unimodais com diferentes espalhamentos e para mares bimodais, pois se mostrou mais adequado à sua missão do que o método paramétrico, como será visto no Capítulo 2. A partir destes resultados experimentais, é visível a questão anteriormente discutida a respeito da filtragem em alta frequência, fruto da dinâmica própria da embarcação.

Além disso, foi feita uma verificação do modelo de estimação para situações reais de espectros incidentes na Bacia de Campos, graças à monitoração do FPSO P-35 (doravante apenas P-35) da Petrobras feita pelo MARIN (*Maritime Research Institute Netherlands*) no segundo semestre do ano de 2005. Graças aos sinais adquiridos de movimentos de primeira ordem nos seis graus de liberdade da embarcação e de aproamento da mesma, juntamente com a condição de carregamento dos tanques de óleo no momento da aquisição, foi possível esta verificação e a comparação dos resultados estimados com aqueles provenientes de uma bóia oceanográfica presente no local, utilizada como paradigma da estimação. Estes resultados, únicos na literatura, confirmam a eficiência do método para as condições de mar amenas anteriormente citadas. E, reforçando a viabilidade do método, embora de maneira preliminar, os resultados da estimação para situações reais também são comparados com resultados de um radar localizado nos sistemas P-18 e P-40, próximos à P-35, mostrando que as incertezas da estimação de ambos são da mesma ordem de grandeza.

Uma das constatações deste trabalho é que, quando os RAOs do sistema flutuante são conhecidos com relativa precisão e seu aproamento não apresenta grande variação durante a aquisição dos sinais de movimentos de primeira ordem, o espectro do mar é estimado com grande fidelidade na região de frequências em que a embarcação responde à ação das ondas.

Dessa forma, este texto está assim estruturado: o Capítulo 2 faz uma revisão da bibliografia referente ao estudo de estimativas de espectro direcional usando dados de bóias oceanográficas, movimentos de primeira ordem de sistemas flutuantes e radares; o Capítulo 3 detalha o método bayesiano, eleito o mais adequado para tal tarefa, além de detalhes referentes ao seu processo de implementação numérica.

O Capítulo 4 trata da análise de sensibilidade das estimativas a parâmetros do método que precisam ser calibrados (como é natural de métodos de otimização) e das fontes de incerteza da estimação.

O Capítulo 5 mostra a validação experimental do método bayesiano para duas embarcações: a P-35 em três condições de carregamento, e a Balsa Guindaste

e Lançamento 1 (doravante apenas BGL-1) em calado único. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O Capítulo 6 apresenta a verificação do método bayesiano com dados de campo (escala real) da P-35 e os resultados de comparação com o radar.

Por fim, o Capítulo 7 finaliza o trabalho tecendo conclusões a respeito do problema de estimativa de espectro direcional de ondas baseado em movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos, além de sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema de estimativa de espectro direcional de ondas parte da hipótese geral de que este, denominado por $S(\omega, \theta)$, é uma função da frequência de onda “ ω ” e direção de propagação θ , através da clássica decomposição

$$S(\omega, \theta) = E(\omega) \cdot D(\omega, \theta) \quad (1)$$

onde $E(\omega)$ é o espectro de frequência e $D(\omega, \theta) \geq 0$ no intervalo $[0; 2\pi]$ é a função de espalhamento direcional (*Directional Spreading Function* – DSF). Estas duas funções obedecem as seguintes relações

$$E(\omega) = \int_0^{2\pi} S(\omega, \theta) d\theta \quad e \quad \int_0^{2\pi} D(\omega, \theta) d\theta = 1 \quad (2)$$

Os primeiros esforços na tentativa de se estimar o espectro direcional de ondas se apoiaram sobre um dispositivo simples, porém muito bem concebido: a bóia oceanográfica, que em linhas gerais é um disco circular dotado de acelerômetros e giroscópios para a medição de aceleração vertical e declividade das ondas incidentes em duas direções perpendiculares. Como a bóia tem dinâmica própria desprezível, a análise destes registros de aceleração e inclinações, via séries de Fourier, permitia estimar o espectro direcional com alguma precisão. Entretanto, como será visto adiante, a análise de Fourier apresenta limitações, de modo que os pesquisadores lançaram mão de técnicas de estatística de inferência para uma melhor representação da função $D(\omega, \theta)$.

E, como evolução destes primeiros trabalhos que utilizam bóias oceanográficas, métodos paramétricos e não-paramétricos de estimação de espectro direcional a partir de movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos surgiram na década de 1970.

O objetivo deste capítulo é discutir as técnicas de estimação de espectro direcional de ondas utilizando bóias oceanográficas, movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos, e, por fim, os radares.

2.1. Bóias Oceanográficas

2.1.1 Séries de Fourier

Através do registro de três propriedades de onda (por exemplo, elevação, velocidade, pressão, declividade, etc.) é possível calcular, para cada frequência, os coeficientes da decomposição em série de Fourier de DSF, escritos como

$$D(\omega, \theta) = \frac{1}{2 \cdot \pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n(\omega) \cdot \cos(n \cdot \theta) + b_n(\omega) \cdot \sin(n \cdot \theta)) \quad (3)$$

Para uma bóia oceanográfica localizada no ponto (x_0, y_0) , através dos registros de uma elevação e duas declividades ortogonais da superfície livre (seus movimentos de *heave*, *pitch* e *roll*), denotadas respectivamente por X_1 , X_2 e X_3

$$X_1(t) = \eta(x_0, y_0, t) \quad X_2(t) = \frac{\partial \eta}{\partial x}(x_0, y_0, t) \quad X_3(t) = \frac{\partial \eta}{\partial y}(x_0, y_0, t) \quad (4)$$

é possível calcular, através de procedimentos de análise espectral, seis espectros cruzados $G_{ij}(\omega)$ entre cada par (X_i, X_j) das três propriedades acima medidas através da relação

$$G_{ij}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ij}(\tau) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} d\tau \quad (5)$$

$$R_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_i(t) \cdot X_j(t + \tau) d\tau$$

Estes espectros cruzados (ou coeficientes de correlação cruzada) são em geral complexos, ou seja

$$G_{ij}(\omega) = C_{ij}(\omega) + i \cdot Q_{ij}(\omega) \quad (6)$$

Longuet-Higgins et al. (1961) mostraram que os coeficientes $Q_{11}(\omega)$, $Q_{22}(\omega)$, $Q_{33}(\omega)$, $C_{12}(\omega)$, $C_{13}(\omega)$ e $Q_{23}(\omega)$ são nulos e que os quatro primeiros coeficientes da decomposição em série de Fourier de DSF têm a forma

$$\begin{aligned} a_1(\omega) &= \int_0^{2\pi} D(\omega, \theta) \cos(\theta) d\theta = \frac{Q_{12}(\omega)}{E(\omega) \cdot k} \\ a_2(\omega) &= \int_0^{2\pi} D(\omega, \theta) \cos(2\theta) d\theta = \frac{C_{22}(\omega) - C_{33}(\omega)}{E(\omega) \cdot k^2} \\ b_1(\omega) &= \int_0^{2\pi} D(\omega, \theta) \sin(\theta) d\theta = \frac{Q_{13}(\omega)}{E(\omega) \cdot k} \\ b_2(\omega) &= \int_0^{2\pi} D(\omega, \theta) \sin(2\theta) d\theta = \frac{2 \cdot C_{23}(\omega)}{E(\omega) \cdot k^2} \end{aligned} \quad (7)$$

onde $k = \omega^2 / g$ é o número de onda e g a aceleração da gravidade. A dedução de (7) também pode ser encontrada em Ochi (1998), páginas 181-182.

Alguns parâmetros não-direcionais podem ser extraídos de $E(\omega)$, através de seus momentos espectrais

$$m_n = \int_0^{\infty} E(\omega) \cdot \omega^n d\omega \quad (8)$$

tais como

- i. Altura significativa de onda H_s

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad (9)$$

- ii. Períodos médios T_{01} e T_{02}

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (10)$$

- iii. Largura espectral ϵ_4

$$\varepsilon_4 = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 \cdot m_4}} \quad (11)$$

Além disso, de posse dos coeficientes (7), é possível expressar os parâmetros direcionais abaixo, conforme Besnard e Benoit (1994) e Frigaard *et al.* (1997):

iv. Direção média de onda $\theta_m(\omega)$ dada no intervalo $[0; 2\pi]$

$$\theta_m(\omega) = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (12)$$

v. Direção principal de onda $\theta_p(\omega)$ dada no intervalo $[0; \pi]$

$$\theta_p(\omega) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{b_2}{a_2}\right) \quad (13)$$

vi. Largura direcional $\sigma(\omega)$

$$\sigma(\omega) = \sqrt{2(1 - \sqrt{a_1^2 + b_1^2})} \quad (14)$$

vii. “Long-crestdness parameter” $\Gamma(\omega)$ no intervalo $[0; 1]$

$$\Gamma(\omega) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{1 + \sqrt{a_2^2 + b_2^2}}} \quad (15)$$

viii. Ângulo principal de espalhamento $\theta_k(\omega)$ no intervalo $[0; \pi/2]$

$$\theta_k(\omega) = \arctan\left(\frac{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot b_1^2(1 + a_2) - a_1 b_1 b_2 + \frac{1}{2} a_1^2(1 - a_2)}}{a_1^2 + b_1^2}\right) \quad (16)$$

Os parâmetros $\Gamma(\omega)$ e $\theta_k(\omega)$ são nulos para ondas unidirecionais.

Assim, no Método de Decomposição em Série de Fourier Truncada (*Truncated Fourier Series Decomposition - TFS*) a DSF é simplesmente expressa como uma série de Fourier truncada cujos primeiros coeficientes (a_1 , a_2 , b_1 , b_2) são calculados a partir dos espectros cruzados. Devido a número limitado de termos da decomposição, isto é, como o número de registros da bóia é limitado em 3 (três), a expansão em Fourier pode ser conduzida apenas até $n = 2$, fazendo esta estimativa assumir valores negativos e geralmente apresentando baixa resolução (ver, por exemplo, Ochi (1998), página 183).

A solução para este problema é a Decomposição em Série de Fourier Ponderada (*Weighted Fourier Series Decomposition - WFS*), onde a DSF é ainda expressa como uma série de Fourier truncada, mas uma função de ponderação é usada para evitar possíveis valores negativos usualmente obtidos na estimativa do método anterior. A desvantagem desse método reside no fato de que os picos do espectro estimado são significativamente inferiores e de banda mais larga que aqueles esperados (ver, por exemplo, Stansberg (1998)).

Outra alternativa é a adoção de um Modelo Paramétrico Unimodal para a DSF (*Fit to Unimodal Parametric Model – 1MF*), onde esta é parametrizada por um modelo unimodal (Longuet-Higgins et al. (1961) e Ochi (1998), página 190), tal como

$$D(f, \theta) = G(s) \cdot \cos^{2s} \left(\frac{(\theta - \theta_0)}{2} \right) \quad (17)$$

onde $G(s)$ é um fator normalizador determinado a partir da condição de que a integral de $D(\omega, \theta)$ no intervalo $[0; 2\pi]$ é igual à unidade. O problema é então reduzido à determinação de dois parâmetros: a direção média da energia espalhada θ_0 e o espalhamento direcional “s”, ou seja, um número real positivo que controla o grau de concentração da energia espalhada em torno do valor médio θ_0 . Estes coeficientes são calculados a partir dos coeficientes de Fourier da DSF. Evidentemente, este método não permite representar DSFs assimétricas ou bimodais. Outra desvantagem é o extremo esforço computacional que métodos paramétricos exigem, especialmente quando se tenta um modelo paramétrico bimodal para a DSF a partir da combinação linear de dois modelos paramétricos unimodais.

2.1.2. Estatística de Inferência

Devido ao fato do número de registros da bóia oceanográfica ser igual a 3, a expansão em série de Fourier da DSF é possível apenas até $n = 2$. De modo a se ter o máximo de informações com dados limitados, vários métodos estatísticos de inferência foram aplicados para estimar a função de espalhamento direcional.

A função $D(\omega, \theta)$ em si não é uma função densidade de probabilidade da propagação de onda; ela representa o estado de propagação da energia da onda. Entretanto, a função de espalhamento direcional dada na forma $D(\theta)$ ou em relação a uma frequência específica $D(\theta|\omega)$ são funções não-negativas integráveis, e a área integrada com respeito a θ é unitária. Portanto, elas satisfazem as condições necessárias para ser funções densidade de probabilidade. Isto motiva o uso de técnicas de estatística de inferência para uma melhor representação da função de espalhamento direcional.

No Método da Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Method – MLM*) o espectro direcional é suposto uma combinação linear dos espectros cruzados (por exemplo, Glad e Krogstad (1992), Walls *et al* (2002)). Os coeficientes de ponderação desta combinação linear são calculados com a condição de ganho unitário do estimador na ausência de ruído do sinal. De fato, o MLM pode ser visto como uma convolução da DSF atual com uma função-janela $w(\theta, \theta')$. Esta estimativa melhor aproximará a DSF atual quando a função-janela tender a uma função delta de Dirac $\delta(\theta')$. A DSF sugerida que melhor satisfaz essa condição é

$$D_{MLM}(f, \theta) = \frac{\kappa}{\sum_{i,j} H_i(f, \theta) \cdot G_{ij}^{-1}(f) \cdot H_j^*(f, \theta)} \quad (18)$$

onde G_{ij}^{-1} é a matriz inversa dos espectros cruzados e κ é determinado a partir da condição de integral unitária de MLM no intervalo $[0; 2\pi]$. No caso de uma matriz de espectros cruzados de ordem três, esta pode ser invertida analiticamente, o que torna este método computacionalmente eficiente. De fato,

este método é amplamente usado para estimativa de espectros direcionais com excelente acurácia.

Entretanto, em alguns casos, foi notado que as estimativas do MLM não são consistentes com os espectros cruzados medidos, isto é, os coeficientes de Fourier estimados pelo MLM diferiam daqueles obtidos diretamente dos espectros cruzados medidos. Para resolver esta questão, Pawka (1983) propôs dois refinamentos iterativos para o MLM, criando assim o *Iterative Refinements of MLM – IMLM*:

$$D_{IMLM}^i(f, \theta) = D_{IMLM}^{i-1}(f, \theta) + \varepsilon^i(f, \theta) \quad D_{IMLM}^0(f, \theta) = D_{MLM}(f, \theta)$$

com

$$\varepsilon^i(f, \theta) = \frac{|\lambda|^{\beta+1}}{\lambda\gamma} D_{IMLM}^{i-1}(f, \theta) \quad \lambda = 1 - \frac{\Delta_{MLM}^{i-1}(f, \theta)}{D_{MLM}(f, \theta)} \quad (19)$$

ou

$$\varepsilon^i(f, \theta) = \frac{|\lambda|^{\beta+1}}{\lambda\gamma} \quad \lambda = D_{MLM}(f, \theta) - \Delta_{MLM}^{i-1}(f, \theta)$$

Nas expressões acima Δ_{MLM}^{i-1} é a estimativa do MLM computada a partir dos espectros cruzados baseado em D_{IMLM}^{i-1} . Os parâmetros β e γ controlam a convergência do algoritmo. Testes em laboratório (Benoit e Teisson, 1994) mostram que na maioria dos casos a segunda forma de ε leva a resultados mais confiáveis, com um número máximo de 20 interações, apesar de elevar bastante o custo computacional do MLM tradicional.

Long e Hasselmann (1979) desenvolveram o Método Variacional Inverso (*Variational Inverse Technique – Long Hasselman Method – LHM*), onde uma estimativa inicial é modificada iterativamente a fim de minimizar um funcional que leva em consideração as várias condições da função de espalhamento, as equações dadas pelos espectros cruzados, a condição de integral unitária da DSF e o fato da mesma ter de ser positiva. O método também leva em conta a variabilidade estatística das estimativas dos espectros cruzados. A estimativa “ótima” é aquela que minimiza

$$D_{LHM}(\theta) = \max \left[0; \tilde{D}(\theta) + \mu_1 + \mu_2 \cos \theta + \mu_3 \sin \theta + \mu_4 \cos 2\theta + \mu_5 \sin 2\theta \right] \quad (20)$$

onde $\tilde{D}(\theta)$ é a estimativa inicial e μ_j ($j=1, \dots, 5$) são coeficientes determinados por um algoritmo de interação. A aplicação deste método em dados de bóias oceanográficas pode ser vista em Long (1980).

Benoit e Teisson (1994) observaram que neste método os picos estimados são significativamente inferiores e de banda mais larga que os desejados, de modo que LHM não se mostrou adequado para estimação de mares com picos estreitos e pronunciados, a não ser que a estimativa inicial esteja bem próxima do resultado esperado.

O princípio do Método da Máxima Entropia (*Maximum Entropy Method – MEM*) é definir uma função de “entropia” a qual deve ser maximizada sob as várias restrições dadas pelos espectros cruzados. Lygre e Krogstad (1986), por exemplo, propuseram a seguinte função de entropia:

$$H(D) = - \int_0^{2\pi} \ln(D(\theta)) d\theta \quad (21)$$

A estimativa que maximiza $H(D)$ e cujos dois primeiros harmônicos da decomposição em série de Fourier são idênticos àqueles obtidos dos espectros cruzados medidos é

$$D_{MEM}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1 - F_1 c_1^* - F_2 c_2^*}{|1 - F_1(\cos \theta - i \cdot \sin \theta) - F_2(\cos 2\theta - i \cdot \sin 2\theta)|^2} \quad (22)$$

onde F_1 e F_2 são números complexos obtidos dos coeficientes de Fourier (também complexos) c_1 e c_2 da DSF ($c_n = a_n + i \cdot b_n$).

A principal vantagem deste método é sua alta eficiência, cujas estimativas estão sempre consistentes com os dados dos espectros cruzados, embora tenham sido observados casos onde a altura dos picos era superestimada, e casos unimodais em que o método estimava dois picos.

Para contornar esse fato, Kobune e Hashimoto (1986) propuseram uma modificação na função de “entropia”

$$H_2(D) = - \int_0^{2\pi} D(\theta) \ln(D(\theta)) d\theta \quad (23)$$

cujas restrições a serem satisfeitas são, como no caso anterior, os valores dos primeiros quatro coeficientes de Fourier da DSF. Para esta nova definição da função de “entropia” a DSF que satisfaz estas condições é

$$D_{MEM2}(\theta) = \exp(-\mu_1 - \mu_2 \cos \theta - \mu_3 \sin \theta - \mu_4 \cos 2\theta - \mu_5 \sin 2\theta) \quad (24)$$

onde μ_j ($j=1, \dots, 5$) são multiplicadores de Lagrange determinados a partir da solução de um sistema não linear de equações dadas pelos espectros cruzados e a condição de integral unitária de DSF.

Kim *et al.* (1993) confirmaram que a modificação acima é mais indicada para a maioria dos casos que sua antecessora. Experimentos mostraram sua igual eficiência para casos unimodais e bimodais, embora seja mais difícil de ser implementada e requeira um esforço computacional muito maior devido à necessidade de solução de um sistema de equações não linear.

Hashimoto e Kobune (1988) aplicaram o Método Bayesiano (*Bayesian Directional Method – BDM*) para estimar a função de espalhamento direcional (ver também Ochi (1998), página 212). Neste método, nenhum conhecimento prévio a respeito da função de espalhamento direcional é assumido, apenas que esta é discretizada ao longo da direção θ e suposta constante em cada $\Delta\theta_k$ ($k = 1, \dots, K$) no intervalo $[0; 2\pi]$. A variável de interesse é descrita como o produto de duas funções: a função de verossimilhança e a distribuição *a priori*, que serão discutidas com maior nível de detalhe no Capítulo 3. Dessa forma, o BDM permite representar praticamente todos os formatos de DSF ao se estabelecer, desde que corretamente, estas funções.

O enfoque bayesiano de Hashimoto e Kobune (1988) produz uma alta resolução no cálculo da DSF, e isto motivou pesquisadores a adaptá-lo para

estimar o espectro direcional de ondas utilizando movimentos de primeira ordem de embarcações, como será visto na próxima seção.

2.2 Movimentos de Primeira Ordem de Embarcações

Os métodos descritos acima (e, portanto, suas conclusões por parte de seus autores) foram elaborados e testados usando, na grande maioria dos casos, os espectros cruzados de *heave*, *roll* e *pitch* de bóias oceanográficas.

Para se estimar o espectro direcional de ondas a partir dos movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos, alterações devem ser feitas na formulação do método devido à dinâmica própria do sistema flutuante, a qual se admite descrita por seus RAOs.

As primeiras publicações nesta área datam da década de 1970, com algoritmos para estimar apenas o espectro de frequências. Takekuma e Takahashi (1973) usaram apenas o movimento de *pitch* para estimar o espectro de frequência de ondas cujos ângulos relativos à proa do navio não poderiam passar de 60°. Para tal, um banco de dados com os RAOs de *pitch* era utilizado, e o método foi chamado de “Método Operacional Reverso de Espectro de Mar” (*Reverse Operational Method of Sea Spectrum*).

Iseki e Ohtsu (2000) adaptaram o método bayesiano proposto por Hashimoto e Kobune (1988) para estimar o espectro direcional de ondas baseado em três movimentos de primeira ordem de uma embarcação de pequeno porte em movimento: *heave*, *roll* e *pitch*.

Como dito na Introdução, um estudo preliminar conduzido na EPUSP teve início no ano de 2000, resultando em duas metodologias de estimação espectral: uma não-paramétrica, utilizando inferência bayesiana, e uma paramétrica.

A primeira, descrita em Tannuri et al. (2001), segue a linha de trabalho de Iseki e Ohtsu (2000), com resultados de simulações numéricas para mares

decenários e centenários da Bacia de Campos, resultados estes com excelente nível de precisão. Entretanto, neste trabalho, os autores sugerem a substituição do movimento de *roll* pelo movimento de *sway*, argumentando que o RAO de *sway*, além de também ser uma função ímpar em relação à linha de centro do navio (o que fornece informação a respeito da direção de incidência do espectro a ser estimado), não apresenta não-linearidades na região da ressonância devido ao amortecimento viscoso, além de ser menos sensível a incertezas devido a mudanças no carregamento da embarcação, especialmente quando esta apresenta tanques compensadores de *roll* que controlam a frequência e a amplitude de oscilação. O trabalho ainda apresenta uma análise de sensibilidade à condição de carregamento da embarcação, que por sua vez dá origem aos RAOs da mesma, concluindo que os resultados estimados não são significativamente afetados por pequenas discrepâncias destas funções.

Já no Método Paramétrico (Tannuri (2002) e Tannuri et al. (2004)), a forma do espectro direcional é definida *a priori*, baseada na parametrização de Graham e Juszko (1993). O método consiste em minimizar o erro quadrático entre o espectro medido dos movimentos do navio, utilizando novamente os movimentos de *sway*, *heave* e *pitch*, e o espectro calculado. Para este cálculo, parte-se do espectro parametrizado e, considerando os RAOs do navio nos movimentos supracitados, avalia-se os espectros dos movimentos. Também para simulações numéricas de mares decenários e centenários, o método paramétrico conseguiu estimar com bom nível de precisão o espectro direcional de ondas. Entretanto, uma desvantagem deste modelo é que ele se reduz a um problema de Programação Não Linear, cuja solução numérica é computacionalmente muito custosa.

Em adição ao seu trabalho anterior, Iseki (2004) propõe um Método Bayesiano Estendido para levar em conta mudanças no espectro direcional de ondas devido ao curso, velocidade de avanço e aproamento da embarcação. A metodologia proposta baseia-se no cálculo dos espectros cruzados em diferentes instantes de tempo, considerando a flutuação do espectro de ondas. Isso é feito introduzindo um vetor de coeficientes auto-regressivos variantes no tempo no método bayesiano tradicional, testado em embarcações de pequeno

porte e em movimento. Os resultados experimentais mostraram-se bons - entretanto, novamente, desde que a dinâmica da embarcação seja bem conhecida (embarcações de pequeno porte têm menos incertezas nos RAOs, já que não apresentam variações significativas de carregamento), fato que não foi discutido no artigo.

Pascoal et al. (2005) mostram resultados numéricos de estimativa de espectro direcional de ondas baseado em movimentos de primeira ordem de uma embarcação de pequeno porte em mares com períodos de pico da ordem de 18s através de dois métodos: um paramétrico iniciado por um algoritmo genético, e um não-paramétrico com uma função de custo semelhante àquela sugerida por Herbers e Guza (1990). Sua justificativa para a não utilização de navios de grande porte se deve ao fato de que o RAO de *heave*, em sua opinião o mais importante já que seu módulo tem qualitativamente o mesmo comportamento de função de frequência, tem seu primeiro zero dependente do inverso da raiz quadrada do comprimento, o que torna navios longos, em sua opinião, péssimos estimadores, principalmente para ondas de popa e de proa, e menciona que para ondas de través talvez a estimativa seja melhor. Os autores sugerem que em ambos os métodos as estimativas não apresentarão resultados positivos nas frequências dos pontos de cancelamento dos RAOs de *heave* e *pitch*, e que as funções de transferência da embarcação devem ser interpoladas em sua forma complexa, e não interpoladas separadamente suas amplitudes e fases. Ainda citam que vários autores indicam a ocorrência de erros de 180° na direção estimada.

Os resultados experimentais do Capítulo 5 deste texto mostram que tal afirmação a respeito dos navios de grande porte não é verdadeira: para ondas de través com espalhamento elevado, verificou-se um espalhamento do espectro estimado em direção à proa do navio em alguns casos, mas em uma faixa extremamente estreita de frequência, de modo que as estatísticas deste espectro (altura significativa, período de pico e direção principal de incidência) não são significativamente afetadas por este fato, não inviabilizando, portanto, o uso de embarcações de grande porte para estimar o espectro direcional de ondas. E, quanto à questão de erros de 180° na direção estimada, nos

resultados do estudo do presente texto isto não foi identificado em nenhum caso.

E por fim concluem que o método não-paramétrico é mais rápido, flexível e menos susceptível a incertezas que o paramétrico, embora este apresente linhas de contorno de espectro mais definidas, visto que a forma do espectro é definida *a priori*.

Recentemente, Simos et al. (2007) apresentam estimativas de espectro direcional de ondas confrontados por resultados de monitoração em escala real de um FPSO na Bacia de Campos, realizada pelo MARIN no segundo semestre do ano de 2005, utilizando os métodos bayesiano e paramétrico, ambos agora com cinco movimentos para os cálculos: *surge*, *sway*, *heave*, *pitch* e *yaw*, pois esta configuração de *input* forneceu resultados ligeiramente melhores em comparação àquela de três movimentos (*sway*, *heave* e *pitch*) utilizadas por Tannuri et al. (2001, 2004) e Tannuri (2002): a maior influência se deu na previsão do espalhamento dos mares, obtido com maior precisão com a inclusão dos dois movimentos adicionais. Como conclusão principal do trabalho, a abordagem baseada no modelo de inferência bayesiana com cinco movimentos se mostrou superior àquela baseada em método paramétrico de estimação. De fato, o método paramétrico é capaz de fornecer boas estimativas para mares com energia suficiente para induzir grandes movimentos do navio, como foi o caso das simulações numéricas com mares decenários e centenários da Bacia de Campos apresentados em Tannuri (2002) e Tannuri et al. (2004), mas perde precisão rapidamente para mares de menor intensidade, além do alto custo computacional anteriormente citado.

O método bayesiano com cinco movimentos se mostrou, enfim, mais preciso e com um custo computacional extremamente baixo, sendo capaz de fornecer estimativas bastante razoáveis mesmo para mares com alturas relativamente baixas e períodos próximos ao período de corte definido previamente em estudos numéricos³ (Tannuri et al. (2001, 2004) e Tannuri (2002)), sendo a metodologia adotada neste texto para a estimativa de espectro direcional de

³ Para um navio do tipo VLCC (*Very Large Crude Carrier*), típico de embarcações FPSO, este período de corte corresponde a um período entre zeros do espectro da ordem de 7 (sete) segundos.

ondas baseada em movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos estacionários.

2.3 Radares Meteorológicos

E, por fim, com o avanço da tecnologia, uma alternativa mais prática para essa monitoração ambiental é através de sistemas de monitoração através de radar instalado a bordo de embarcações. Atualmente, diversos sistemas de monitoração de ondas por radar são encontrados comercialmente, entre eles o sistema WAVEX[®] e o sistema WAMOS[®]. Este último foi adquirido pela Petrobras e já se encontra instalado nas unidades P-37, P-38, P-47 e, mais recentemente, na BGL-1. Neste caso, as facilidades de instalação, operação e manutenção são significativas quando comparadas às bóias oceanográficas. Segundo Reichert et al. (1999), o sistema WAMOS[®] fornece parâmetros como altura significativa de onda, períodos representativos e direção predominante e espalhamento do espectro de mar, tanto para sistemas estacionários quanto para aqueles com velocidade de avanço. A estimação espectral prevê a ocorrência de mares bimodais e, para estados de mar resultantes de uma combinação entre um mar de *swell* e um mar local. Neste último caso, adota uma hipótese *ad hoc* de que os períodos dessas duas componentes obedeçam a certa relação dada em função da velocidade do vento, ou seja, que seus períodos não sejam muito próximos.

Alguns trabalhos encontrados na literatura trazem comparações entre estimativas de espectros direcionais de ondas obtidas por intermédio de radares e de bóias oceanográficas (ver, por exemplo, Reichert et al. (1999) e Borge et al. (1999)).

Deve-se ressaltar, todavia, que algumas questões são pouco discutidas ou até mesmo estão ausentes, com a questão da validação para mares bimodais ou as limitações para mares compostos com alturas significativas baixas e períodos de pico relativamente próximos, esta última situação sendo

relativamente comum, por exemplo, na Bacia de Campos, conforme relatado em Seixas (1997).

Além da existência de poucos trabalhos de validação, os radares instalados a bordo devem passar por uma campanha inicial de monitoração com o objetivo de calibrar o sistema, campanha esta feita com bóias oceanográficas, trazendo à tona as dificuldades de instalação e manutenção destes dispositivos, citadas na Introdução deste texto.

3. O MÉTODO BAYESIANO APLICADO À ESTIMAÇÃO DE ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS

3.1 Noções Preliminares

Considere uma quantidade de interesse desconhecida τ (tipicamente não-observável). A informação de que dispomos sobre τ , resumida probabilisticamente através de $p(\tau)$, pode ser aumentada observando-se uma quantidade aleatória X relacionada com τ . A distribuição amostral $p(x|\tau)$, que é a função de densidade de probabilidade da distribuição condicional de uma observação x dado τ , define esta relação. A idéia de que após observar $X = x$ a quantidade de informação sobre τ aumenta é bastante intuitiva e o teorema de Bayes é a regra de atualização utilizada para quantificar este aumento de informação

$$p(\tau|x) = \frac{p(x|\tau) \cdot p(\tau)}{p(x)} \quad (25)$$

Note que $1/p(x)$, que não depende de τ , funciona como uma constante normalizadora de $p(\tau|x)$.

Para um valor fixo de x , a função $l(\tau;x) = p(x|\tau)$ é chamada “função de verossimilhança”, pois fornece a plausibilidade ou a verossimilhança de cada um dos possíveis valores de τ enquanto $p(\tau)$ é chamada “distribuição *a priori* de τ ”, que também é a densidade marginal de τ . Esta função denota o grau de conhecimento acumulado sobre τ , antes da observação de x . Estas duas fontes de informação, *a priori* e verossimilhança, são combinadas levando à

distribuição *a posteriori* de τ , ou seja, $p(\tau|x)$. Assim, a forma usual do teorema de Bayes é

$$p(\tau|x) \propto l(\tau;x) \cdot p(\tau) \quad (26)$$

Note que, ao omitir o termo $p(x)$, a igualdade em (25) foi substituída por uma proporcionalidade. Esta forma simplificada do teorema de Bayes é útil em problemas que envolvem estimação de parâmetros, já que o denominador é apenas uma constante normalizadora.

É intuitivo também que a probabilidade *a posteriori* de um particular conjunto de valores de τ será pequena se $p(\tau)$ ou $l(\tau;x)$ for pequena para este conjunto. Em particular, se atribuirmos probabilidade *a priori* igual a zero para um conjunto de valores de τ , então a probabilidade *a posteriori* será zero qualquer que seja a amostra observada.

A constante normalizadora da distribuição *a posteriori* pode ser facilmente recuperada, pois

$$p(\tau|x) = k \cdot p(x|\tau) \cdot p(\tau) \quad (27)$$

onde

$$k^{-1} = \int_R p(x|\tau) \cdot p(\tau) d\tau = E_{\tau}[p(X|\tau)] = p(x)$$

é chamada distribuição marginal ou preditiva de x com respeito a τ , e R é a amplitude da distribuição de τ . E_{τ} significa esperança com respeito à distribuição de τ . Esta é a distribuição esperada para a observação x dado τ .

Verifica-se pela expressão (25) que um fator lógico que diferencia o enfoque bayesiano da abordagem freqüentista refere-se ao tipo de informação utilizada. Na concepção bayesiana, toda informação de que se dispõe é útil e deve ser utilizada. Por outro lado, a estatística clássica utiliza apenas observações de dados reais, desprezando-se as informações subjetivas. Para os bayesianos, tudo o que é desconhecido é incerto e, portanto, toda a incerteza deve ser quantificada em termos de probabilidade.

As seções seguintes mostram em detalhes o método desenvolvido por Hashimoto e Kobune (1988) para estimar a função de espalhamento direcional e sua posterior adaptação para uso dos movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos feita por Iseki e Ohtsu (2000), conforme discutido no capítulo anterior.

3.2 Método Bayesiano aplicado à Estimação da Função de Espalhamento Direcional – Fundamentação Teórica de Hashimoto e Kobune (1988)

Segundo Ochi (1998), página 212, o Método Bayesiano é utilizado por Hashimoto e Kobune (1988) para estimar a função de espalhamento de energia (DSF), onde os autores assumem que a função de espalhamento direcional $D(\theta|\omega)$, isto é, $D(\theta)$ para uma frequência ω específica, consiste de K funções constantes igualmente espaçadas no intervalo $[0; 2\pi]$; em outras palavras, a DSF é discretizada ao longo da direção θ e constante em cada $\Delta\theta_k$ ($k = 1, \dots, K$) naquele intervalo. Fazendo

$$\ln D(\theta_k | \omega) = x_k(\omega) \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (28)$$

a função de espalhamento direcional é dada por

$$D(\theta | \omega) = \sum e^{x_k(\omega)} \cdot I_k(\theta | \omega) \quad (29)$$

onde

$$I_k(\theta | \omega) = \begin{cases} 1 & (k-1)\Delta\theta < \theta < k\Delta\theta \\ 0 & \text{caso_contrário} \end{cases}$$

Utilizando a relação de dispersão $\omega^2 = kg \tanh kh$ (h = profundidade) e assumindo linearidade entre espectro de entrada ($S(\omega, \theta)$) e espectro de saída ($S_{mn}(\omega)$), através da função de transferência $H_j(\omega, \theta)$, escreve-se a matriz de espectros cruzados como

$$S_{mn}(\omega) = \int H_j(\omega, \theta) \cdot S(\omega, \theta) d\theta \quad (30)$$

Utilizando (29):

$$\begin{aligned} S_{mn}(\omega) &= \int H_j(\omega, \theta) \cdot S(\omega) \cdot D(\theta | \omega) d\theta \\ S_{mn}(\omega) &= S(\omega) \cdot \sum e^{x_k(\omega)} \cdot \int H_j(\omega, \theta) \cdot I_k(\theta | \omega) d\theta = S(\omega) \cdot \left(\sum_{k=1}^K \alpha_{j,k}(\omega) e^{x_k(\omega)} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

onde

$$\alpha_{j,k}(\omega) = \int H_j(\omega, \theta) \cdot I_k(\theta | \omega) d\theta$$

Assumindo agora que os espectros cruzados obtidos a partir dos registros aquisitados possuam um erro $\varepsilon(\omega)$, a função de espalhamento direcional pode ser re-escrita como

$$\varphi_j(\omega) = \sum \alpha_{j,k}(\omega) \cdot e^{x_k(\omega)} + \varepsilon_j(\omega) \quad j = 1, 2, \dots, 2n \quad (32)$$

Aplicando (32) à análise dos registros, os erros $\varepsilon_j, j=1, 2, \dots, n$ são assumidos independentes, seguindo uma distribuição normal de média zero e variância σ^2 . A estimação da função de espalhamento direcional pode ser feita através da maximização da seguinte função de verossimilhança com respeito a x_k e σ^2 :

$$L(x_1, x_2, \dots, x_k; \sigma^2) = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma^2)^n} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot \sum_{j=1}^{2n} \left\{ \varphi_j(\omega) - \sum_{k=1}^K \alpha_{j,k}(\omega) \cdot e^{x_k(\omega)} \right\}^2 \right] \quad (33)$$

Ao maximizar a função de verossimilhança acima, uma condição extra há de ser considerada, visto que a função $L(x_1, x_2, \dots, x_k; \sigma^2)$ é elaborada sob a hipótese de que a função de espalhamento direcional $D(\theta|\omega)$ é constante em cada $\Delta\theta_k$. De modo a se ter uma função de espalhamento direcional contínua e suave ao longo da direção, a segunda derivada da função $\ln D(\theta|\omega) = x_k$ deve ser

próxima de zero. Este resultado na maximização de (33) é equivalente à maximizar a seguinte expressão:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \sigma^2) \cdot \exp \left\{ -\frac{u^2}{2\sigma^2} \cdot \sum_{k=1}^K (x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2})^2 \right\} \quad (34)$$

onde “ u ” é o parâmetro que controla esta suavidade.

A partir da comparação da expressão acima com o segundo membro da equação (27), a fórmula acima pode ser considerada como sendo a distribuição *a posteriori* se a distribuição *a priori* de $\tilde{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ for dada por

$$h(x | u^2, \sigma^2) = \left(\frac{u}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \right)^K \cdot \exp \left\{ -\frac{u^2}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^K (x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2})^2 \right\} \quad (35)$$

Assim, o teorema de Bayes dado por (27) pode ser escrito como

$$f(\tilde{x} | u^2, \sigma^2) = C \cdot h(\tilde{x} | u^2, \sigma^2) \cdot L(\tilde{x}, \sigma^2) \quad (36)$$

e se o valor de “ u ” é dado, o valor de $\tilde{x}$ que maximiza (36) é determinado pela minimização da seguinte expressão, independente do valor de σ^2 :

$$\sum_{j=1}^{2n} \left\{ \varphi_j - \sum_{k=1}^K \alpha_{j,k} \cdot e^{x_k} \right\}^2 + u^2 \left\{ \sum_{k=1}^K (x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2})^2 \right\} \quad (37)$$

onde $\alpha_{j,k} = \text{Re } \alpha_{j,k}(\omega)$

3.3 Método Bayesiano aplicado à Estimação do Espectro Direcional de Ondas a partir de Movimentos de Primeira Ordem de Sistemas Estacionários

A partir do modelo de estimação da função de espalhamento discutido acima, Iseki e Ohtsu (2000) fizeram algumas adaptações de modo a se poder estimar o espectro direcional de ondas a partir dos movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos.

Qualitativamente falando, na formulação da seção anterior foram inseridos os RAOs da embarcação e a matriz dos espectros cruzados dos movimentos do navio. Abaixo segue uma discussão deste modelo.

Novamente, assumindo linearidade entre ondas e a resposta da embarcação, a matriz de espectros cruzados do navio e o espectro direcional de ondas estão relacionados pelo RAO através da seguinte integral:

$$\phi_{mn}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} RAO_m(\omega, \theta) RAO_n^*(\omega, \theta) S(\omega, \theta) d\theta \quad (38)$$

onde RAO_m denota o Operador de Resposta em Amplitude do movimento m na frequência ω e direção de incidência θ (o símbolo “*” denota seu complexo conjugado) e $S(\omega, \theta)$ denota o espectro de ondas direcional.

A expressão discreta de (38) é derivada assumindo o integrando como sendo constante em cada intervalo $\Delta\theta$, para uma partição $\{\omega_j\}_{j=0}^{J-1}$ de J pontos do intervalo de frequências de interesse $[\omega_0, \omega_f]$:

$$\phi_{mn}(\omega_j) = \Delta\theta \sum_{k=1}^K RAO_{mk}(\omega_j) RAO_{nk}^*(\omega_j) S_k(\omega_j) \quad (39)$$

com:

$$\Delta\theta = 2\pi / K \quad (40)$$

$$RAO_{mk}(\omega_j) = RAO_m(\omega_j, k\Delta\theta) \quad (41)$$

$$S_k(\omega_j) = S(\omega_j, k\Delta\theta) \quad (42)$$

Ou, matricialmente⁴:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{16} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{26} \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \dots & \phi_{36} \\ \phi_{41} & \phi_{42} & \dots & \phi_{46} \\ \phi_{51} & \phi_{52} & \dots & \phi_{56} \\ \phi_{61} & \phi_{62} & \dots & \phi_{66} \end{bmatrix} = \Delta\theta \times \begin{bmatrix} RAO_{11} & RAO_{12} & \dots & RAO_{1K} \\ RAO_{21} & RAO_{22} & \dots & RAO_{2K} \\ RAO_{31} & RAO_{32} & \dots & RAO_{3K} \\ RAO_{41} & RAO_{42} & \dots & RAO_{4K} \\ RAO_{51} & RAO_{52} & \dots & RAO_{5K} \\ RAO_{61} & RAO_{62} & \dots & RAO_{6K} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & S_K \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} RAO_{11}^* & RAO_{21}^* & \dots & RAO_{61}^* \\ RAO_{12}^* & RAO_{22}^* & \dots & RAO_{62}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RAO_{1K}^* & RAO_{2K}^* & \dots & RAO_{6K}^* \end{bmatrix} \quad (43)$$

Notando que a matriz (ϕ_{ij}) é Hermitiana, basta utilizar os elementos da matriz triangular superior. Além disso, considerando que os espectros ϕ_{ii} são reais e os espectros cruzados ϕ_{ij} são complexos, a equação (43) pode ser desdobrada e reescrita na forma linear

$$B = A\tilde{x} + U \quad (44)$$

onde:

$$B = (\phi_{11} \quad \phi_{22} \quad \dots \quad \phi_{66} \quad \text{Re}(\phi_{12}) \quad \dots \quad \text{Re}(\phi_{16}) \quad \text{Re}(\phi_{23}) \quad \dots \quad \text{Re}(\phi_{26}) \quad \text{Re}(\phi_{34}) \quad \dots$$

$$\dots \quad \text{Re}(\phi_{36}) \quad \text{Re}(\phi_{45}) \quad \text{Re}(\phi_{46}) \quad \text{Re}(\phi_{56}) \quad \text{Im}(\phi_{12}) \quad \dots \quad \text{Im}(\phi_{16}) \quad \text{Im}(\phi_{23}) \quad \dots$$

$$\dots \quad \text{Im}(\phi_{26}) \quad \text{Im}(\phi_{34}) \quad \dots \quad \text{Im}(\phi_{36}) \quad \text{Im}(\phi_{45}) \quad \text{Im}(\phi_{46}) \quad \text{Im}(\phi_{56}))^T$$

é o vetor dos espectros cruzados dos movimentos medidos,

⁴ Doravante, omitir-se-á a dependência dos parâmetros à frequência ω .

$$A = \begin{bmatrix} \|RAO_{11}^2\| & \|RAO_{12}^2\| & \dots & \|RAO_{1K}^2\| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \|RAO_{61}^2\| & \|RAO_{62}^2\| & \dots & \|RAO_{6K}^2\| \\ \text{Re}(RAO_{11}RAO_{21}^*) & \text{Re}(RAO_{12}RAO_{22}^*) & \dots & \text{Re}(RAO_{1K}RAO_{2K}^*) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Re}(RAO_{61}RAO_{51}^*) & \text{Re}(RAO_{62}RAO_{52}^*) & \dots & \text{Re}(RAO_{6K}RAO_{5K}^*) \\ \text{Im}(RAO_{11}RAO_{21}^*) & \text{Im}(RAO_{12}RAO_{22}^*) & \dots & \text{Im}(RAO_{1K}RAO_{2K}^*) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Im}(RAO_{61}RAO_{51}^*) & \text{Im}(RAO_{62}RAO_{52}^*) & \dots & \text{Im}(RAO_{6K}RAO_{5K}^*) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{x} = (S_1 \quad S_2 \quad \dots \quad S_K)^T$$

e $\mathbf{U}$ é o vetor que representa o ruído medido, ou seja, o erro presente nos espectros cruzados dos movimentos do navio, suposto como sendo um ruído branco gaussiano com média zero e variância σ^2 .

Iseki e Ohtsu (2000) mostraram que a função de verossimilhança $L(B | \tilde{x})$, na hipótese de que o vetor $\mathbf{U}$ é gaussiano, é dada por

$$L(B | \tilde{x}) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{9/2} \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|B - A\tilde{x}\|^2 \right) \quad (45)$$

Note a semelhança entre a (45) e (33): o termo $\|B - A\tilde{x}\|$ que está elevado ao quadrado na exponencial em (45) é o vetor de erro dos espectros cruzados $\varepsilon_j(\omega)$ de (33).

Analogamente à condição da segunda derivada da função de espalhamento direcional, que originou a expressão (34), supõe-se que o espectro direcional seja suave como função do ângulo de incidência das ondas, definindo-se a diferença de 2ª ordem ε_k correspondente à direção k :

$$\varepsilon_k = x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2} \quad (46)$$

Com isso, a forma de exprimir o requisito de suavidade do espectro ao longo de todas as direções é tornar a somatória

$$\sum_{k=1}^K \varepsilon_k^2 \quad (47)$$

a menor possível. Iseki e Ohtsu (2000) mostraram que, considerando ε_k uma variável aleatória gaussiana com média nula e variância σ^2 , a distribuição *a priori* de ocorrência do espectro $\tilde{x}$ é dada por

$$P(\tilde{x}) = \left(\frac{u^2}{2\pi\sigma^2} \right)^{K/2} \exp \left(-\frac{u^2}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^K \varepsilon_k^2 \right) \quad (48)$$

Onde, novamente, “ u ” é o parâmetro que define o compromisso entre a qualidade do ajuste do espectro estimado às medidas do espectro do movimento e a suavidade desse mesmo espectro, ou seja, o parâmetro “ u ” controla o *trade-off* entre a aderência com as medições e a suavidade do espectro direcional.

Mais uma vez, nota-se a semelhança entre (48) e (35).

Definindo a matriz D como

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \quad (49)$$

e tendo em vista a equação (46), a equação (48) pode ser reescrita como

$$P(\tilde{x}) = \left(\frac{u^2}{2\pi\sigma^2} \right)^{K/2} \exp \left(-\frac{u^2}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^K \|D\tilde{x}\|^2 \right) \quad (50)$$

O produto entre a função verossimilhança (45) pela distribuição *a priori* (50) fornece então:

$$L(B|\tilde{x}).P(\tilde{x}) = \left(\frac{u^2}{2\pi\sigma^2}\right)^{K/2} \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{9/2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (\|B - A\tilde{x}\|^2 + u^2 \|D\tilde{x}\|^2)\right) \quad (51)$$

Assim, é imediato concluir que, para maximizar (51), deve-se minimizar a função

$$J(\tilde{x}) = \|B - A\tilde{x}\|^2 + u^2 \|D\tilde{x}\|^2 \quad (52)$$

ou seja, o termo da exponencial, expressão esta análoga àquela em (37). Nota-se que (52) é um problema de programação quadrática e que

$$\tilde{x} \geq 0 \quad (53)$$

é uma restrição que deve ser satisfeita .

O modelo acima, entretanto, não leva em conta o seguinte fato: nas regiões onde ambos os espectros de movimentos e RAOs são nulos, o espectro de ondas estimado (vetor $\tilde{x}$) pode, segundo a equação (38), assumir qualquer valor. Isto, sob o ponto de vista físico, é inapropriado, de modo que uma correção para este fato foi introduzida, *a posteriori* pelo DNV-EPUSP, na equação (52), sob a forma de um parâmetro chamado " $u_{energia}$ ". Então, a equação (52) fica:

$$J(\tilde{x}) = \|B - A\tilde{x}\|^2 + u^2 \|D\tilde{x}\|^2 + u_{energia} \|\tilde{x}\|^2 \quad (54)$$

com a garantia de que o espectro estimado contém uma quantidade de energia equivalente ao espectro real.

A equação (54), portanto, é o funcional efetivamente implementado para a metodologia de estimativa de espectro direcional de ondas a partir de movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos proposta neste texto, fazendo uso dos sinais de 5 movimentos da embarcação: *surge*, *sway*, *heave*, *pitch* e *yaw*, conforme discutido no Capítulo 2.

3.4 Implementação Numérica

Toda a programação do método foi realizada em ambiente MATLAB[®] versão 7.0, e alguns detalhes desta implementação merecem destaque.

Para o cálculo dos espectros dos movimentos da embarcação a partir de suas séries temporais, utilizou-se o Método de *Welch* através rotina “*pwelch.m*”, exemplificado na Figura 3-1 abaixo:

Figura 3-1: Exemplo de Espectros de Movimento via MATLAB[®]

Para o cálculo dos espectros de movimentos foi utilizado NFFT como sendo a menor potência de 2 maior que o comprimento do sinal, e valores *default* do programa para janelamento (*Hamming* de 12.5%, de modo a se ter 8 segmentos do sinal “*x*”), e *overlap* (50%).

Assim procedendo, o espectro de movimentos obtido contém uma grande quantidade de informações, e também de pontos. Como o método bayesiano faz a estimação espectral frequência a frequência, a presença de picos espúrios (*spikes*) não é bem-vinda, de modo que se faz necessário algum tipo de filtragem do espectro. Neste caso, optou-se por um filtro de média móvel (curva vermelha na Figura 3-1). Ainda quanto à questão de filtragem, é muito importante que apenas as componentes de primeira ordem apareçam no espectro. Como a estimativa espectral via método bayesiano utiliza-se apenas

destes movimentos, a presença de componentes de segunda ordem, como por exemplo “*slow drift*”, prejudica todos os cálculos. Para as simulações deste texto, utilizou-se um filtro “passa-alta” de 0.222 Hz (período de 45s).

No capítulo seguinte serão discutidos a influência dos RAOs na estimação de espectro direcional de ondas, e a calibração do modelo numérico através dos parâmetros “ u ” (equação (48)) e “ $u_{energia}$ ” (equação (54)).

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS

Relembrando o capítulo anterior, o problema de estimação de espectro direcional de ondas a partir de cinco movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos consiste em minimizar o funcional

$$J(x) = \|B - Ax\|^2 + u^2 \|Dx\|^2 + u_{energia} \|x\|^2 \quad (55)$$

onde “ x ” é o vetor das incógnitas, “ B ” é a matriz dos espectros de movimentos de primeira ordem do sistema flutuante, “ A ” é a matriz dos RAOs da embarcação obtida via WAMIT[®] (2004), “ D ” é definida segundo a equação (49), além dos parâmetros “ u ” e “ $u_{energia}$ ”, discutidos anteriormente.

Portanto, vê-se que a matriz “ A ”, isto é, os RAOs da embarcação, é aquela que carrega o maior nível de incerteza da estimação, visto que os parâmetros “ u ” e “ $u_{energia}$ ” são calibrados posteriormente, e a matriz “ B ” é dada.

Na tentativa de minimizar estas incertezas nos RAOs, foi feita uma análise de sensibilidade referente ao número de períodos e de direções de incidência de onda para qual o RAO é calculado, e discutido como a posição vertical do centro de gravidade do navio a partir da quilha (KG) influencia estes RAOs, e, portanto, a qualidade das estimações. Assim dividiu-se o problema da seguinte maneira: para uma determinada condição de mar (H_s , T_p e direção de incidência θ), na ausência de um paradigma tal como uma bóia oceanográfica, fixa-se o número de direções de incidência e varia-se o número de períodos nos RAOs até que a diferença do valor obtido dos parâmetros (H_s , T_p ou θ), em relação a seu antecessor, não apresente variação significativa em termos de porcentagem. Em outras palavras, a partir de curvas como “ ΔH_s (%) x número de períodos”, “ ΔT_p (%) x número de períodos”, “ $\Delta \theta$ (%) x número de

períodos”, determina-se o número mínimo de períodos para a “convergência”, e repete-se o processo agora variando o número de direções de incidência.

E, para verificar a influência do KG no cálculo dos RAOs e sua posterior influência na estimacão espectral, foi feita uma comparacão direta de resultados de simulacão para uma determinada condiçao de mar.

Como exemplo do procedimento descrito acima, a Figura 4-1 abaixo corresponde à variaçao de Hs com o número de períodos (ΔH_s (%) x NPER), fixado o número de direções de incidência, para a P-35 em três condiçoes de carregamento (cheio, intermediário e lastro) e também para a BGL-1.

Figura 4-1: ΔH_s (%) x NPER para P-35 e BGL-1

Esta análise de sensibilidade completa encontra-se no Apêndice A e mostra que:

1. Tanto no caso da P-35 como da BGL-1, um valor de 65 períodos no intervalo [5;43]s se mostrou adequado em termos de convergência ($\Delta T = 0.59s$).
2. O número de direções de incidência para a “convergência”, tanto no caso da P-35 como da BGL-1, é de 37 no intervalo $[0;180]^\circ$ ($\Delta\theta = 5^\circ$).

Portanto, para a validação experimental e verificação em escala real do Método Bayesiano como um estimador de espectro direcional de ondas a partir de cinco movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos serão usados RAOs com valores de períodos e direções acima obtidos.

Como será mostrado no Capítulo 6, sabe-se que em uma embarcação real, uma das maiores fontes de incerteza é o KG do navio leve que, combinado com o KG da carga, fornecerá o KG total da embarcação (origem dos RAOs calculados para a estimação espectral). Para a carga, este valor de KG é conhecido com precisão, através de softwares como o *ShipManager*, de modo que o erro no cálculo do KG total da embarcação fica todo uma função da imprecisão do KG do navio leve.

A Tabela 4-1 a seguir mostra uma simulação feita com a P-35, em situação de calado lastro (mais sensível a variações de KG), para um mar de $H_s = 4.59\text{m}$, $T_p = 10.12\text{s}$ e direção de incidência 90° , com duas variações do KG da embarcação: +30% e -30%

Tabela 4-1: H_s (m), T_p (s) e Dir ($^\circ$) variando o KG do FPSO P-35 calado leve

Paradigma			KG Original			KG - 30%			KG + 30%		
Hs (m)	Tp (s)	Dir ($^\circ$)	Hs (m)	Tp (s)	Dir ($^\circ$)	Hs (m)	Tp (s)	Dir ($^\circ$)	Hs (m)	Tp (s)	Dir ($^\circ$)
4.59	10.12	89.97	4.73	9.75	89.26	4.72	9.75	89.24	4.73	9.75	89.22
erros (%;%;%)			2.98	3.69	0.61	2.87	3.69	0.63	2.99	3.69	0.65

E, como se pode ver, os valores estimados continuam com erros muito baixos em relação ao paradigma de estimação, mostrando que o método tolera alguma incerteza na previsão dos RAOs. A mesma conclusão foi obtida em simulações com outros mares e diferentes direções de incidência. Esta tolerância é, em parte, consequência da exclusão do movimento de *roll* na estimação, dado que este é o mais sensível a variações de KG e inércia da embarcação.

De fato, isto havia sido previsto por Tannuri et al. (2001), que realizaram uma análise de sensibilidade a erros nos RAOs baseada em simulações numéricas. Nesta análise, a partir de RAOs de três condições de carregamento (100%, 90% e 80%), simula-se o método bayesiano para uma condição específica de mar. Os resultados numéricos mostraram que o método é pouco influenciado por pequenos erros na avaliação dos RAOs, ou seja, as incertezas existentes em casos práticos são bem comportadas pelo método, e estes resultados são

aqui reforçados por esta análise adicional da correta estimativa do KG da embarcação.

4.2 Calibração dos parâmetros “ u ” e “ $u_{energia}$ ”

Qualquer procedimento para inferência de espectro de ondas no mar deve ser submetido a uma calibração de parâmetros. É o caso, por exemplo, das bóias oceanográficas e dos sistemas de monitoração por radar, apenas para citar dois dos dispositivos mais usais.

No caso do método ora proposto para estimação de espectro a partir dos movimentos de primeira ordem de sistemas fundeados, os únicos parâmetros explícitos de calibração são o parâmetro de suavidade “ u ” (ver equação (48)) e o parâmetro “ $u_{energia}$ ” (equação (54)).

O valor mais adequado para estes parâmetros pode variar de acordo com as propriedades (calado, deslocamento, inércias, etc.) do sistema sobre o qual se realiza a monitoração. Extensas análises de sensibilidade foram realizadas com base nos resultados obtidos em escala real e também com base nos resultados de ensaios realizados no LabOceano. Como resultado principal destas análises, verificou-se que quanto maior o nível de movimentos do sistema face a uma determinada situação de mar, menor a variação das estatísticas do espectro estimado frente ao parâmetro de calibração “ u ”, e portanto menor pode ser o seu valor.

E, de maneira análoga à determinação do número de períodos e direções de incidência dos RAOs, foi feita uma análise de convergência dos parâmetros do espectro (H_s , T_p e direção de incidência) em relação ao parâmetro “ u ”.

A figura abaixo ilustra ΔH_s (%) e $\Delta \theta$ (%) como função do parâmetro “ u ” para a P-35, calado cheio:

Figura 4-2: P-35 Cheio - Hs e direção de incidência x “u”

Assim, para a P-35 calado cheio, verificou-se que $u = 0.07$ é um valor adequado para ser usado na equação (55). Para as condições de calado intermediário e lastro, assim como para a BGL-1, também foi calibrado o parâmetro “ u ” da mesma maneira, resultando na Tabela 4-2 abaixo, que será utilizada na validação experimental do Capítulo 5.

Tabela 4-2: Valores do Parâmetro de Calibração “ u ” – Ensaio LabOceano

Modelo	P-35			BGL-1
Calado	Cheio	Intermediário	Lastro	
u	0.070	0.035	0.0044	0.0044

Assim, o procedimento adotado para a geração dos resultados do Capítulo 5 referentes à P-35 foi o de acréscimo do valor do parâmetro de suavidade “ u ” com o aumento do calado. Uma vez calibrado o valor para cada calado, o mesmo foi mantido constante para todos os ensaios na respectiva situação de calado. Como dito anteriormente, quando maior o nível de movimentos do sistema (FPSO P-35 calado lastro e BGL-1), menor o valor de “ u ”.

A Figura 4-2 permite dizer que as estatísticas da estimação (altura significativa, período de pico e direção média) são pouco influenciadas pelo valor de “ u ”, principalmente no caso da BGL-1 e do FPSO P35 em condição de calado lastro, pois estes são os sistemas que apresentam maior nível de movimentos.

Quem sofre a maior influência do parâmetro “ u ” são os chamados “mapas espectrais” - gráficos de contorno (curvas de nível) do espectro estimado em função do período e da direção de incidência – pela própria definição de “ u ”, ou seja, um parâmetro de suavidade em direção. Um exemplo de mapa espectral, que será amplamente utilizado no Capítulo 5, é mostrado na figura abaixo⁵:

Figura 4-3: Exemplo de mapa espectral

Assim, nestes gráficos, uma suavização excessiva do espectro em relação à direção (altos valores de “ u ”) pode levar a resultados visuais incorretos, como pode ser visto no exemplo do Apêndice A. Neste exemplo, a variação do parâmetro “ u ” afeta muito mais os mapas espectrais que as estatísticas do espectro estimado.

E, na análise dos casos de monitoração em escala real, um procedimento semelhante foi adotado, definindo-se valores distintos do parâmetro “ u ” para diferentes faixas de calado.

É importante frisar que este procedimento foi adotado tendo como prioridade melhorar a qualidade das informações estatísticas (altura, período e direção média), mesmo que com certa perda no que se refere à avaliação do espalhamento direcional das ondas. Entende-se, portanto, que estas informações sejam efetivamente prioritárias em termos dos resultados procurados na estimação espectral.

⁵ Nos mapas espectrais, a linha horizontal que aparece entre 0 e 5s é uma linha espúria, fruto da imposição de limites nos eixos ‘x’ e ‘y’; em outras palavras, é um *bug* do MATLAB, e não tem significado físico algum.

Com o parâmetro " $u_{energia}$ " foi realizada uma análise semelhante, embora o significado físico deste parâmetro seja mais simples, ou seja, o parâmetro " $u_{energia}$ " força o espectro de ondas estimado a ser nulo nas regiões onde ambos os RAOs e os espectros de movimento são nulos. Para as validações experimentais e de campo do método bayesiano deste texto, o valor calibrado foi de 0.04, que se mostrou adequado a todas as estimações.

Os capítulos a seguir mostram a validação experimental e uma primeira verificação em escala real do Método Bayesiano acima descrito. Os ensaios experimentais foram conduzidos no tanque de provas do LabOceano com dois modelos de embarcação: a P35 em três condições de calado (cheio, intermediário e lastro) e com a BGL-1, enquanto a verificação em escala real foi feita sobre os dados de campo da P35 após campanha de monitoração feita pelo MARIN em 2005.

5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO BAYESIANO DE 5 MOVIMENTOS: ESTUDO COM BASE NOS ENSAIOS DO LABOCEANO DA COPPE/UFRJ

Com o objetivo de validar experimentalmente o método bayesiano de estimação espectral, baterias de ondas irregulares e mares bimodais foram realizadas no tanque de provas do LabOceano (COPPE/UFRJ) com dois modelos de embarcações: a P-35, em escala 1:70, e a balsa BGL-1, em escala 1:48, ilustrados na figura abaixo:

FPSO P-35

Modelo Escala 1:70

BGL-1

Modelo Escala 1:48

Figura 5-1: Embarcações Ensaçadas: FPSO P-35 e BGL-1

O tanque de provas do LabOceano tem as seguintes características principais:

- ✓ Dimensões: 40m de comprimento, 30m de largura e profundidade de 15m, além de um poço central com 10m adicionais e 5m de diâmetro.
- ✓ Gerador de ondas: 75 painéis articulados na base (altura imersa: 1.2m; largura: 0.4m) tipo *wet-back* com modos de geração de 1ª e 2ª ordem e

sistema de absorção de ondas refletivas, capazes de gerar ondas regulares, multi-direcionais e irregulares (com e sem espalhamento).

- ✓ Praias parabólicas: painéis de madeira com geometria parabólica; comprimento projetado de 8m (parede frontal) e 5m (parede lateral).

A Figura 5-2 mostra o *lay-out* do tanque oceânico e suas principais dimensões:

Figura 5-2: Tanque de provas LabOceano (extraída de “Ensaio para medição de espectro direcional dos modelos P-35 e BGL-1 – Relatório LabOceano”)

Além das ondas irregulares e mares bimodais para diferentes aproamentos – 90° , 120° , 135° e 180° - para ambos os modelos foram realizados levantamentos dos coeficientes de amortecimento através de ensaios de decaimento em *heave*, *roll* e *pitch*; levantamento das curvas de RAO a partir dos ensaios em ondas transientes e regulares e ensaios de inclinação estática para levantamento da altura metacêntrica (GM).

A seguinte instrumentação foi utilizada:

- ✓ Sensores de Onda (*Wave-Probes*), para medição das amplitudes de onda em pontos determinados.
- ✓ Sistema *Krypton* de rastreamento visual, para medição dos movimentos nos 6 graus de liberdade.
- ✓ Instrumentos diversos para calibração do modelo e acessórios (células de carga, inclinômetro digital, trenas *laser*, etc).

Para os ensaios, a frequência de amostragem é de 25 Hz (escala de modelo) para ambos os modelos.

As linhas de ancoragem reproduziram, de maneira linear, a restauração no plano horizontal devido às linhas de amarração e *risers* em determinada região de deriva na escala real. Os valores de rigidez do sistema de ancoragem foram calculados para um período natural em torno de 160 segundos, na escala real, e em todos os ensaios as linhas de ancoragem são horizontais e foram presas na altura do centro de gravidade do modelo ensaiado.

A P-35 foi ensaiada em três condições de carregamento: cheio, intermediário e lastro, enquanto a BGL-1 foi ensaiada apenas em um calado. As Tabela 5-1 e Tabela 5-2 abaixo sumarizam os dados dos modelos ensaiados. Nestas tabelas, os períodos naturais de *heave*, *roll* e *pitch* (Tn33, Tn44 e Tn55, respectivamente) em escala real foram estimados via WAMIT[®] (2004).

Tabela 5-1: Características principais do casco do FPSO P-35.

Fonte	Escala Real			Modelo – Escala 1:70		
Carregamento	Cheio	Intermed	Lastreado	Cheio	Intermed	Lastreado
L (m)	337.13			4.82		
Lpp (m)	320.00			4.57		
B (m)	54.50			0.78		
D (m)	28.00			0.40		
<i>Calado sec. mest. (m)</i>	<i>18.44</i>	<i>14.73</i>	<i>8.51</i>	<i>0.26</i>	<i>0.21</i>	<i>0.12</i>
Calado a vante (m)	17.31	12.49	7.18	0.25	0.18	0.10
Calado a ré (m)	19.58	16.97	9.84	0.28	0.24	0.14
Trim (graus)	0.41	0.80	0.48	0.41	0.80	0.48
Deslocamento (ton)	2.67E+05	2.09E+05	1.16E+05	0.78	0.61	0.34
LCG (m)	5.41	2.93	3.47	0.08	0.04	0.05
TCG (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VCG (m)	13.09	13.15	11.58	0.19	0.19	0.17
KMI (m)	414.09	497.35	771.31	5.92	7.11	11.02
KMt (m)	20.88	21.43	30.14	0.30	0.31	0.43
GMI (m)	400.66	483.67	758.77	5.72	6.91	10.84
GMt (m)	7.45	7.75	17.60	0.11	0.11	0.25
Ixx (ton*m ²)	8.89E+07	5.82E+07	5.24E+07	0.05	0.03	0.03
Iyy (ton*m ²)	1.72E+09	1.36E+09	9.43E+08	1.02	0.81	0.56
Izz (ton*m ²)	1.76E+09	1.37E+09	9.52E+08	1.04	0.82	0.57
Rxx (m)	18.26	16.70	21.24	0.26	0.24	0.30
Ryy (m)	80.29	80.72	90.09	1.15	1.15	1.29
Rzz (m)	81.13	81.02	90.51	1.16	1.16	1.29
Rxx (%B)	33.50	30.64	39.00	33.50	30.62	39.00
Ryy (%Lpp)	25.09	25.22	28.15	25.09	25.23	28.15
Tn33 (s)	11.68	10.98	10.03	1.40	1.31	1.20
Tn44 (s)	13.55	12.11	11.52	1.62	1.45	1.38
Tn55 (s)	12.14	12.39	11.79	1.45	1.48	1.41

Tabela 5-2: Características principais do casco da BGL-1

Fonte	Escala Real	Modelo – Escala 1:48
L (m)	120.00	2.50
B (m)	30.48	0.64
D (m)	8.53	0.18
Calado (m)	5.00	0.10
Deslocamento (ton)	1.75E+04	0.16
LCG (m)	1.27	0.03
TCG (m)	0.00	0.00
VCG (m)	4.83	0.10
Ixx (ton*m ²)	2.60E+06	0.01
Iyy (ton*m ²)	1.57E+07	0.06
Izz (ton*m ²)	1.57E+07	0.06
Rxx (m)	12.19	0.25
Ryy (m)	30.00	0.63
Rzz (m)	30.00	0.63
Rxx (%B)	40.00	0.83
Tn33 (s)	8.00	1.16
Tn44 (s)	7.00	1.01
Tn55 (s)	10.00	1.44

As características dos espectros direcionais gerados no tanque seguiram o modelo descrito a seguir:

$$E(f, \theta) = S(f) \cdot D(\theta) \quad (56)$$

onde a função de espalhamento direcional $D(\theta)$ é dada segundo o modelo proposto por Longuet-Higgins et al. (1961):

$$D(\theta) = \frac{1}{2\pi} \cdot 2^{2s-1} \cdot \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cdot \cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_1}{2}\right) \quad (57)$$

e o espectro de potência é admitido sendo um espectro de JONSWAP⁶:

⁶ Este espectro foi proposto pelo ITTC em 1984 para mares não plenamente desenvolvidos como decorrência dos resultados do programa conhecido como *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) concluído em 1969, e é a forma de espectro adotada para os mares da Baía de Campos.

$$\begin{aligned}
S(f) &= \alpha \cdot g^2 \cdot (2\pi)^{-4} \cdot f^{-5} \cdot \exp\left[-1.25 \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{2 \cdot \sigma \cdot f_p^2}\right]} \\
\sigma &= \begin{cases} \sigma_a = 0.07 & f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09 & f > f_p \end{cases} \\
\alpha &= 5.0609 \cdot \frac{H_s^2}{T_p^4} \cdot [1 - 0.287 \cdot \ln(\gamma)]
\end{aligned} \tag{58}$$

onde

α – constante de Phillips

f – frequência (Hz)

f_p – frequência de pico (Hz)

γ - parâmetro de pico

σ – parâmetro de forma (relacionado à largura do pico)

Os valores de γ utilizados serão aqueles exibidos nas Tabela 5-3 e Tabela 5-4, mostradas adiante.

As ondas irregulares estão divididas em dois grupos: unimodais com espalhamento direcional (*short-crested*) e mares bimodais gerados pela sobreposição de dois mares unidirecionais (*long-crested*) com direções distintas.

A Tabela 5-3 apresenta o grupo das ondas unimodais. Os mares 1 e 2 representam, respectivamente, a condição anual e centenária da Bacia de Campos. A escolha destes mares se justifica no desejo de se ter altos níveis de movimentos de primeira ordem para uma primeira validação do método bayesiano.

Tabela 5-3: Características das ondas irregulares unimodais

Ondas Irregulares - "Short-Crested"											
	Escala Real					Escala 1:70			Escala 1:48		
	Tz (s)	Hs (m)	s	γ	Duração (hrs)	Tz (s)	Hs (m)	Duração (s)	Tz (s)	Hs (m)	Duração (s)
1	9.00	4.50	∞	2.18	3	1.08	0.064	1291	1.30	0.094	1559
2	11.54	7.80	∞	1.93	3	1.38	0.111	1291	1.67	0.163	1559
3	9.00	4.50	60	2.18	3	1.08	0.064	1291	1.30	0.094	1559
4	9.00	4.50	12	2.18	3	1.08	0.064	1291	1.30	0.094	1559

Na tabela acima, é interessante notar que o que difere as ondas 1, 3 e 4 é o valor do espalhamento "s". Isto foi feito com a intenção de avaliar a capacidade do método bayesiano em estimar espectros direcionais com diferentes espalhamentos.

A Tabela 5-4 apresenta o grupo das ondas bimodais; estes, de mesma duração dos mares unimodais, foram gerados através da combinação de dois mares irregulares unidirecionais (*long-crested*), considerando alguns dos mares de maior probabilidade na Bacia de Campos segundo Seixas (1997), e com direções de propagação distintas, variando a abertura entre os mares de 0°, 45° e até 60°.

Tabela 5-4: Características das ondas irregulares bimodais

Mares Bimodais												
	Mares	Direção 1				Direção 2				Global		
		Hs (m)	Tp (s)	θ (°)	γ	Hs (m)	Tp (s)	θ (°)	γ	Hs (m)	Tp (s)	θ (°)
Escala Real	1	1.50	8.70	0	1.4	1.00	5.00	60	0.9	1.80	8.78	18.26
	2	2.00	5.50	0	1.6	0.70	7.00	45	2.0	2.11	5.57	4.66
	3	1.50	4.00	0	1.3	0.60	8.50	60	2.2	1.61	3.96	7.37
	4	2.00	8.60	0	1.5	1.00	8.60	60	1.2	2.23	8.68	10.91
	5	1.50	8.70	0	1.4	1.00	5.00	0	0.9	1.80	8.78	0.00
Escala 1:70	1	0.021	1.04	0	1.4	0.014	0.60	60	0.9	0.03	1.049	18.26
	2	0.029	0.66	0	1.6	0.010	0.84	45	2.0	0.03	0.666	4.66
	3	0.021	0.48	0	1.3	0.009	1.02	60	2.2	0.02	0.473	7.37
	4	0.029	1.03	0	1.5	0.014	1.03	60	1.2	0.03	1.037	10.91
	5	0.021	1.04	0	1.4	0.014	0.60	0	0.9	0.03	1.049	0.00
Escala 1:48	1	0.031	1.26	0	1.4	0.021	0.72	60	0.9	0.037	1.27	18.26
	2	0.042	0.79	0	1.6	0.015	1.01	45	2.0	0.044	0.80	4.66
	3	0.031	0.58	0	1.3	0.013	1.23	60	2.2	0.034	0.57	7.37
	4	0.042	1.24	0	1.5	0.021	1.24	60	1.2	0.046	1.25	10.91
	5	0.031	1.26	0	1.4	0.021	0.72	0	0.9	0.037	1.27	0.00

A Figura 5-3 abaixo ilustra os espectros de potência dos mares unimodais (*short-crested*) e bimodais.

Figura 5-3: Espectros de onda JONSWAP unimodais (short-crested) e bimodais

A inferência a partir das leituras de *wave-probes* foi empregada como paradigma para a validação experimental. Para esta leitura utilizou-se um conjunto de 8 *probes*, aplicando o método da máxima entropia segundo Tannuri et al. (2007). Os resultados inferidos através deste procedimento apresentaram uma aderência muito boa com os valores teóricos e tal aderência justifica o emprego dos resultados como paradigma para a validação ora apresentada.

Para uma compreensão correta dos resultados a serem apresentados, é de fundamental importância entender que:

1. As ondas geradas estão expressas em relação ao Sistema de Coordenadas Estacionário do LabOceano.
2. O Método Bayesiano estima o espectro direcional de ondas em relação ao Sistema de Coordenadas Móvel (do navio).
3. O aproamento do navio em relação ao Sistema de Coordenadas Estacionário do LabOceano é quem determina a conversão entre os referenciais estacionário e móvel.

A figura abaixo ajuda a ilustrar este fato:

Figura 5-4: Sistema de Coordenadas Estacionário e Sistema de Coordenadas Móvel do navio

Na figura acima, a direção positiva de “X” do Sistema de Coordenadas Estacionário (+X em azul na Figura 5-4) é **do batedor para a praia**. Dessa forma, duas ondas incidentes, uma a 0° e outra a -30° , ficariam como nas figuras abaixo:

Figura 5-5: Ondas a 0° e -30° geradas em relação ao Sistema de Coordenadas Estacionário do LabOceano

No Sistema de Coordenadas Móvel, a direção positiva de “X” (+X em amarelo na Figura 5-4) é da **popa para proa**. Assim, seguindo a convenção usual, uma onda a 0° no referencial do navio é aquela que vem de popa; 90° de boreste, 180° de proa, e assim sucessivamente.

Portanto, para uma onda gerada a 0° (no referencial do tanque oceânico) incidir a 90° (no referencial do navio) na embarcação, esta deverá estar aproada a -90° em relação ao Sistema de Coordenadas Estacionário do LabOceano, como mostram as figuras abaixo:

Figura 5-6: Onda gerada a 0° incidindo a 90° na embarcação

Um outro exemplo seria o seguinte: combinando uma onda gerada a 30° com um navio aproado a -120° , no Sistema de Coordenadas Móvel do navio esta onda incidirá com um ângulo de 150° .

Portanto, para cada condição de carregamento das embarcações, foi aplicado o método bayesiano para a estimação do espectro direcional de ondas, com os valores de “ u ” explicitados no Capítulo 4, e os resultados divididos por embarcação, condição de carregamento, assim como tipo de bateria de ondas.

Por fim, é importante ressaltar que todos os resultados apresentados doravante foram convertidos para a escala real, de forma a facilitar as comparações entre os resultados obtidos com modelos em escalas diferentes.

5.1 Ensaios com Modelo do FPSO P-35

5.1.1 Ensaios com calado cheio (18.44m)

A Tabela 5-5 abaixo sumariza os resultados do método bayesiano aplicado aos ensaios com a P-35 na condição de calado cheio. A nomenclatura das baterias segue o padrão P35C90(120; 135; 150)I(B)n, onde:

- P35C: P-35 calado cheio
- 90(120; 135; 150): incidência de 90°, 120°, 135° ou 150° em relação ao referencial móvel do navio
- I(B): mar unimodal (I) ou bimodal (B)
- n: mar “n” das Tabela 5-3 (mares unimodais) e Tabela 5-4 (mares bimodais)

Assim, os ensaios irregulares unimodais P35CXI1, P35CXI3 e P35CXI4 ($X = 90^\circ; 135^\circ$), correspondem essencialmente à mesma onda, porém com espalhamentos diferentes (ver Tabela 5-3). O mesmo fato também é verdade para as condições de calado intermediário e lastro da P-35, assim como para a BGL-1.

Além disso, as tabelas abaixo e subseqüentes (P-35 calado intermediário e lastro, e BGL-1) trazem apenas as estatísticas globais para os mares bimodais, em comparação com aqueles da Tabela 5-4.

Tabela 5-5: Método Bayesiano – P-35 calado cheio

	Experimental			Bayesiano $u=0.07$			Erros		
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (%)	Tp (%)	Dir (°)
P35C90I1	4.59	10.12	89.87	4.58	10.34	86.91	0.25	-2.18	2.96
P35C90I2	8.05	14.56	91.08	8.24	15.09	95.29	-2.33	-3.68	-4.21
P35C90I3	4.67	10.12	90.70	5.56	10.34	95.87	-19.07	-2.18	-5.17
P35C90I4	4.63	10.12	92.48	5.55	10.34	92.48	-19.86	-2.18	-0.01
P35C120B1	1.48	11.40	117.95	1.60	10.34	118.24	-8.66	9.29	-0.29
P35C120B2	1.79	7.30	107.57	1.64	7.62	96.68	8.18	-4.38	10.89
P35C120B3	0.97	11.40	120.39	0.73	10.08	126.52	25.33	11.61	-6.13
P35C120B4	2.11	11.40	118.70	2.30	10.34	124.13	-8.69	9.29	-5.43
P35C120B5	1.49	11.40	105.04	1.69	10.34	118.71	-13.27	9.29	-13.67
P35C135I1	4.59	10.12	134.87	3.61	10.08	135.36	21.48	0.44	-0.49
P35C135I2	8.05	14.56	136.08	7.77	14.90	121.86	3.47	-2.35	14.22
P35C135I3	4.67	10.12	135.70	3.96	10.08	127.23	15.10	0.44	8.47
P35C135I4	4.63	10.12	137.48	4.35	9.79	130.53	6.16	3.28	6.95
P35C150B1	1.48	11.40	147.95	1.47	10.38	140.91	0.29	8.94	7.04
P35C150B2	1.79	7.30	137.57	0.94	9.26	131.20	47.54	-26.95	6.37
P35C150B3	0.97	11.40	150.39	0.53	10.38	168.07	45.51	8.94	-17.68
P35C150B4	2.11	11.40	148.70	2.21	10.38	143.56	-4.35	8.94	5.15
P35C150B5	1.49	11.40	135.04	1.40	10.34	131.03	6.08	9.29	4.01

As páginas a seguir trazem como exemplo duas comparações entre valores estimados e medidos. Em cada página, as duas figuras superiores representam, respectivamente, um mapa de contorno do espectro estimado na forma de “radar”, permitindo a visualização da direção de incidência do espectro em relação ao aproamento do navio, e a comparação entre os espectros de potência inferidos no tanque e aqueles estimados pelo método bayesiano. A figura inferior esquerda mostra o mapa espectral inferido através das medidas de *wave-probes* no tanque e, por fim, a figura inferior direita apresenta o mesmo mapa espectral obtido através do Método Bayesiano, ambos na mesma escala de tons de cinza, tendo como paradigma o mapa espectral inferido através das medidas de *wave-probes*, dotado de escala. Cabe ainda destacar que a linha horizontal espúria entre 0s e 5s não tem significado algum, sendo fruto de um problema da rotina que plota o gráfico de

contornos do MATLAB[®] quando se impõem limites aos eixos coordenados. Nestes mapas é possível visualizar melhor o espalhamento direcional do espectro de ondas.

Todos os resultados da Tabela 5-5 constam do Apêndice B.

A Figura 5-7 abaixo mostra os resultados da estimação para um mar unimodal anual da Bacia de Campos (mar 1 da Tabela 5-3) *long-crested*, incidindo na embarcação a 90°. Na figura, nota-se que as estatísticas (Hs, Tp e direção relativa) experimentais e estimadas pelo método bayesiano são muito próximas, com erros, respectivamente, de 0.25%, -2.18% e 2.96°. A direção de incidência estimada pode ser vista no gráfico de radar (gráfico inferior à esquerda), e a aderência entre os espectros de potência dos mares experimental e estimado é excelente, como pode ser visto na figura superior à direita. Nos mapas espectrais, vê-se que o espalhamento dos mares experimental e estimado também é muito próximo entre si, por se tratar de um mar *long-crested*.

P35C9011	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	4.58 (0.25%)
Tp (s)	10.12	10.34 (-2.18%)
Dir. relativa (graus)	89.87	86.91 (2.96°)

Figura 5-7: Resultados experimentais - ensaio P35C9011

A mesma qualidade de resultados também pode ser vista na Figura 5-8 abaixo, que mostra os resultados da simulação para um mar centenário da Bacia de Campos (mar 2 da Tabela 5-3) *long-crested*, incidindo a 135° na embarcação. Novamente, as estatísticas experimentais e estimadas (H_s , T_p e direção relativa) são muito próximas, apresentando erros de, respectivamente, 3.47%, -2.35% e 14.22° , com excelente aderência entre as curvas de espectro de potência, assim como os mapas espectrais experimental e estimado.

Aliás, este é o padrão observado nos gráficos para a grande maioria dos casos constantes do Apêndice B.

P35C135I2

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

8.05

14.56

136.08

Bayesiano

7.77 (3.47%)

14.90 (-2.35%)

121.86 (14.22%)

Figura 5-8: Resultados experimentais – ensaio P35C135I2

Alguns aspectos destes resultados merecem destaque. Em primeiro lugar, ao se avaliar os resultados deve-se ter em mente que a situação de calado máximo do FPSO corresponde à situação para a qual a estimação é mais difícil, já que, para uma mesma energia de ondas, a resposta em 1ª ordem do navio será em geral menor do que aquela observada em calados menores.

Apesar de esta situação ser a mais desfavorável, as estatísticas globais da Tabela 5-5 mostram que, para a grande maioria dos casos, a altura significativa e o período de pico do espectro são estimados com erros inferiores a 30%, enquanto o erro máximo relativo à direção relativa foi de aproximadamente 18 graus.

As duas únicas exceções, para as quais os erros na altura foram superiores a 30%, são os casos P35C150B2 e P35C150B3, isto é, os mares 2 e 3 da Tabela 5-4 ambos com direção relativa ao navio de 150°, cujos resultados são detalhados na Figura 5-9 e na Figura 5-10, a seguir:

P35C150B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.79	0.94 (47.54%)
Tp (s)	7.30	9.26 (-26.95%)
Dir. relativa (graus)	137.57	131.20 (6.37°)

Figura 5-9: Resultados experimentais – ensaio P35C150B2

P35C150B3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	0.97	0.53 (45.51%)
Tp (s)	11.40	10.38 (8.94%)
Dir. relativa (graus)	150.39	168.07 (-17.68°)

Figura 5-10: Resultados experimentais – ensaio P35C150B3

Nestes dois casos, as explicações para os erros maiores na estimativa de energia do espectro são simples. O caso P35C150B2 equivale a um mar bimodal com período de pico (global) equivalente a 7.3 segundos (valor obtido a partir das medidas no tanque). O período é, portanto, muito baixo, e quase toda a energia do espectro é filtrada pelo navio, ou seja, o valor do período do espectro é muito próximo ao período de corte da embarcação, estipulado em aproximadamente 7 segundos para um navio VLCC (Tannuri et al. (2000)). A razão deste período de corte é facilmente entendida pela análise das funções de transferência de movimento da P-35 em condição de calado cheio, mostrados na Figura 5-11 abaixo:

Figura 5-11: RAOs do FPSO P-35 calado cheio

Como se pode ver, abaixo de 7 segundos as curvas de RAO da P-35 calado cheio praticamente não apresentam níveis significativos de resposta em todas as direções, filtrando a energia do espectro. Este fato se torna mais evidente no mapa espectral estimado da Figura 5-10.

Os RAOs da P-35 calados intermediário e cheio e da BGL-1 são mostrados no Apêndice G.

Por fim, uma última questão deve ser observada. Nos testes com calado máximo, em alguns casos o método mostrou a tendência de espalhar o mar no sentido da incidência de proa (180°). Essa tendência é bem visível, por exemplo, no caso P35C90I4 (Figura 5-12), isto é, um mar unimodal anual da Bacia de Campos (mar 4 da Tabela 5-3, de maior espalhamento) incidindo a 90° na embarcação, mostrado a seguir:

É importante notar, neste caso, que este espalhamento ocorre em uma banda de períodos muito estreita. Assim, apesar do pico do espectro que vem pela proa ser pronunciado, a energia global nele contida é pequena, embora este erro na energia estimada conduza a um erro maior na estimação do H_s , pois corresponde aproximadamente ao período de pico do mar. Este parâmetro e, principalmente, a direção relativa estimados não são tão influenciados por este espalhamento.

Faz-se necessário dizer que o erro nas fases dos espectros cruzados a 90° e 180° não é suficiente para eliminar esta faixa espúria de energia durante o processo de otimização, de modo que alternativas para a solução deste fenômeno devem ser estudadas.

P35C90I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	5.55 (-19.86%)
Tp (s)	10.12	10.34 (-2.18%)
Dir. relativa (graus)	92.48	92.48 (-0.01°)

Figura 5-12: Resultados experimentais – ensaio P35C90I4

O que acontece é que mesmo a 90° , no período 10.34s (estimado pelo método bayesiano) o navio apresenta resposta em *surge* (curva (a)) e *pitch* (curva (c)), se comparada às mesmas curvas a 180° ((b) para *surge* e (d) para *pitch*) como pode ser visto na Figura 5-13 abaixo:

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 5-13: RAOs de *surge* e *pitch* do FPSO P-35 a 90° e 180°

Para o FPSO P-35 calado cheio, o período de 10.34s corresponde aproximadamente ao pico do RAO de *surge* a 90° (curva (a)), cujo valor é da ordem de 60% do valor da curva de *surge* a 180° (curva (b)) no mesmo período. No caso do movimento de *pitch* (curvas (c) e (d)), esta relação é praticamente o dobro.

E como a 90° os movimentos de *sway* e *yaw* são muito próximos de zero, o método estima espectro pela proa já que encontra resposta a 90° nos RAOs de *surge*, *heave* e *pitch*.

Isso se deve, em parte, ao fato do FPSO P-35 apresentar um *trim* de popa para todas as condições de calado, e este *trim* de popa é mais acentuado para a condição de calado cheio, o que aumenta ainda mais a assimetria proa-popa do casco do navio. Observando as curvas de RAOs de outros FPSOs do mesmo porte do P-35, mas sem *trim*, como o Vidal de Negreiros, por exemplo, vê-se que também há níveis de resposta de *surge* e *pitch* a 90° - estes são muito baixos se comparados àqueles a 180° , mas não exatamente nulos - o que indica que a assimetria proa-popa causa uma resposta, mesmo que pequena no caso do navio sem *trim*, na condição de ondas de través.

E, se a comparação entre espectro estimado e experimental for feita com base nas estatísticas, vê-se que a questão do espalhamento pela proa pouco influencia os resultados, atestando que, mesmo com esta limitação do método para navios de grande porte em situações de baixos níveis de movimento (como é o caso do calado cheio), com assimetrias no casco devido a fatores como *trim*, sujeitos a mares com espalhamento elevado, não se pode afirmar que tais sistemas são péssimos estimadores, ao contrário do que dizem Pascoal et al. (2005).

De fato, analisando as curvas da Figura 5-13, e como se verá mais adiante, essa tendência diminui à medida que o calado é reduzido, sendo praticamente inexistente na situação de lastro e na BGL-1.

5.1.2 Ensaios com calado intermediário (14.73m)

A Tabela 5-6 abaixo sumariza os resultados do método bayesiano aplicado aos ensaios com o FPSO P-35 na condição de calado intermediário. A nomenclatura das baterias segue o mesmo padrão:

- P35I: P-35 calado intermediário
- 90(120; 135; 150): incidência de 90°, 120°, 135° ou 150° em relação ao referencial móvel do navio
- I(B): mar unimodal (I) ou bimodal (B)
- n: mar “n” das Tabela 5-3 (mares unimodais) e Tabela 5-4 (mares bimodais)

Tabela 5-6: Método Bayesiano – P-35 calado intermediário

Caso	Experimental			Bayesiano $u=0.035$			Erros		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (%)	Tp (%)	Dir (°)
P35I90I1	4.59	10.12	89.87	4.64	9.16	90.86	-0.98	9.55	-0.99
P35I90I2	8.05	14.56	91.08	8.25	15.09	90.36	-2.47	-3.68	0.72
P35I90I3	4.67	10.12	90.70	5.43	9.16	91.71	-16.36	9.55	-1.01
P35I90I4	4.63	10.12	92.48	5.35	9.16	101.87	-15.52	9.55	-9.40
P35I120B1	1.48	11.40	117.95	1.50	9.75	124.95	-1.33	14.50	-7.00
P35I120B2	1.79	7.30	107.57	1.70	7.45	101.13	4.89	-2.11	6.45
P35I120B3	0.97	11.40	120.39	0.73	10.08	136.92	24.94	11.61	-16.53
P35I120B4	2.11	11.40	118.70	2.19	9.75	129.23	-3.83	14.50	-10.53
P35I120B5	1.49	11.40	105.04	1.58	9.75	114.82	-5.73	14.50	-9.78
P35I135I1	4.59	10.12	134.87	3.56	10.71	145.05	22.40	-5.78	-10.19
P35I135I2	8.05	14.56	136.08	7.69	14.90	135.58	4.42	-2.35	0.50
P35I135I3	4.67	10.12	135.70	3.95	9.52	148.22	15.33	5.97	-12.52
P35I135I4	4.63	10.12	137.48	4.30	9.52	140.71	7.19	5.97	-3.23
P35I150B1	1.48	11.40	147.95	1.42	9.79	146.68	4.04	14.14	1.27
P35I150B2	1.79	7.30	137.57	1.14	9.02	129.05	36.37	-23.61	8.52
P35I150B3	0.97	11.40	150.39	0.57	11.42	166.55	40.93	-0.17	-16.16
P35I150B4	2.11	11.40	148.70	2.14	9.79	150.08	-1.06	14.14	-1.38
P35I150B5	1.49	11.40	135.04	1.53	9.79	142.99	-2.58	14.14	-7.95

As páginas a seguir trazem como exemplo duas comparações entre valores estimados e medidos. O padrão de apresentação segue aquele já comentado na seção anterior.

Todos os resultados da Tabela 5-6 constam do Apêndice C.

A Figura 5-14 mostra os resultados da estimação para o mar unimodal anual da Bacia de Campos (mar 1 da Tabela 5-3) *long-crested*, incidindo na embarcação a 90°, análogo ao primeiro exemplo do calado cheio (Figura 5-7). Na figura, nota-se que as estatísticas (Hs, Tp e direção relativa) experimentais e estimadas pelo método bayesiano também são muito próximas, com erros, respectivamente, de -0.98%, 9.55% e -0.99°, portanto menores que para o caso do calado cheio. A direção de incidência estimada pode ser vista no gráfico de radar, e a aderência entre os espectros de potência dos mares experimental e estimado mais uma vez é excelente. Nos mapas espectrais, vê-se novamente que o espalhamento dos mares experimental e estimado também é muito próximo entre si.

A Figura 5-15 apresenta os resultados para o mar centenário da Bacia de Campos (mar 2 da Tabela 5-3), *long-crested*, incidindo na embarcação a 135°. Neste conjunto de resultados, os erros na estimação das estatísticas do espectro direcional também são significativamente baixos: 4.42% para Hs, -2.35% para Tp e apenas 0.5° para a direção relativa. Nos mapas espectrais vê-se que o espalhamento dos mares foi novamente estimado com um bom nível de precisão.

Também para a situação de calado intermediário, a grande maioria dos resultados do Apêndice C segue o padrão de qualidade das duas comparações apresentadas a seguir.

P35I90I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	4.64 (-0.98%)
Tp (s)	10.12	9.16 (9.55%)
Dir. relativa (graus)	89.87	90.86 (-0.99°)

Figura 5-14: Resultados experimentais – ensaio P35I90I1

P35I135I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	7.69 (4.42%)
Tp (s)	14.56	14.90 (-2.35%)
Dir. relativa (graus)	136.08	135.58 (0.50°)

Figura 5-15: Resultados experimentais – ensaio P35I135I2

A análise da Tabela 5-6 permite dizer que a qualidade das estatísticas é superior àquela observada nos ensaios com calado máximo. A menos de dois casos bimodais (P35I150B2 e P35I150B3), os erros máximos em altura e período foram respectivamente 25% e 15%, enquanto o maior erro em direção relativa foi de aproximadamente 17 graus. Os dois casos bimodais acima referidos são os mesmos já discutidos na análise em calado máximo. Ambos estão fora da faixa de estimação mais precisa por conterem energia significativa em frequências muito elevadas. Deve-se notar, todavia, que os erros na altura significativa estimada são agora menores em geral (Tabela 5-5 e Tabela 5-6), já que a redução de calado induz maiores movimentos do navio.

As melhorias mais sensíveis obtidas em comparação com as estimativas em calado máximo se referem aos espalhamentos direcionais. As comparações dos mapas estimados correspondentes nos dois calados indicam claramente que os espalhamentos agora são mais próximos dos esperados.

Concomitantemente a essa maior precisão no espalhamento direcional, a tendência de espalhar o mar para a proa diminui em relação ao caso de calado máximo, como foi previsto na seção anterior, pois segundo a Figura 5-13, as respostas em *surge* e *pitch* da P-35 na situação de calado intermediário são menores que aquelas para a situação de calado cheio, já que o período estimado agora é ligeiramente menor (9.16s) do que aquele para o calado cheio (10.34s). A comparação dos resultados da Figura 5-16, mostrada a seguir, com aqueles da Figura 5-12 ilustram claramente este fato.

P35I90I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	5.35 (-15.52%)
Tp (s)	10.12	9.16 (9.55%)
Dir. relativa (graus)	92.48	101.87 (-9.40°)

Figura 5-16: Resultados experimentais – ensaio P35I90I4

5.1.3 Ensaios com calado de lastro (8.51m)

A Tabela 5-7 abaixo sumariza os resultados do método bayesiano aplicado aos ensaios com a P-35 na condição de calado de lastro. A nomenclatura das baterias segue:

- P35L: P-35 calado lastro
- 90(120; 135; 150): incidência de 90°, 120°, 135° ou 150° em relação ao referencial móvel do navio
- I(B): mar unimodal (I) ou bimodal (B)
- n: mar “n” das Tabela 5-3 (mares unimodais) e Tabela 5-4 (mares bimodais)

Tabela 5-7: Método Bayesiano – P-35 calado de lastro

Caso	Experimental			Bayesiano $u=0.0044$			Erros		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (deg)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (deg)	Hs (%)	Tp (%)	Dir (deg)
P35L90I1	4.59	10.12	89.87	4.73	9.75	89.26	-2.98	3.69	0.61
P35L90I2	8.05	14.56	91.08	8.14	13.91	89.99	-1.10	4.48	1.10
P35L90I3	4.67	10.12	90.70	5.17	10.34	105.37	-10.77	-2.18	-14.67
P35L90I4	4.63	10.12	92.48	4.81	10.94	107.15	-3.83	-8.04	-14.68
P35L120B1	1.48	11.40	117.95	1.49	11.42	123.03	-0.71	-0.17	-5.08
P35L120B2	1.79	7.30	107.57	1.72	7.14	107.91	3.63	2.14	-0.34
P35L120B3	0.97	11.40	120.39	0.71	11.82	133.47	27.27	-3.62	-13.08
P35L120B4	2.11	11.40	118.70	2.10	10.94	123.57	0.73	4.09	-4.87
P35L120B5	1.49	11.40	105.04	1.49	10.94	109.25	0.04	4.09	-4.21
P35L135I1	4.59	10.12	134.87	3.84	10.38	151.20	16.28	-2.58	-16.33
P35L135I2	8.05	14.56	136.08	7.80	13.71	141.40	3.07	5.84	-5.32
P35L135I3	4.67	10.12	135.70	3.92	9.52	150.11	16.12	5.97	-14.41
P35L135I4	4.63	10.12	137.48	3.98	11.42	144.87	14.21	-12.84	-7.40
P35L150B1	1.48	11.40	147.95	1.33	11.42	149.40	9.63	-0.17	-1.45
P35L150B2	1.79	7.30	137.57	1.21	8.57	146.15	32.19	-17.43	-8.58
P35L150B3	0.97	11.40	150.39	0.58	11.05	165.60	40.27	3.06	-15.21
P35L150B4	2.11	11.40	148.70	1.99	11.42	151.40	5.95	-0.17	-2.70
P35L150B5	1.49	11.40	135.04	1.44	12.24	143.80	3.14	-7.33	-8.76

As páginas a seguir trazem como exemplo duas comparações entre valores estimados e medidos. O padrão de apresentação segue aquele já comentado nas seções anteriores, e todos os resultados da Tabela 5-7 constam do Apêndice D.

A Figura 5-17 apresenta os resultados da estimação para o mar unimodal anual da Bacia de Campos (mar 1 da Tabela 5-3), semelhante às Figura 5-7 e Figura 5-14, e a Figura 5-18 apresenta os resultados para o mar centenário da Bacia de Campos (mar 2 da Tabela 5-3), ambos *long-crested* e incidindo na embarcação a 90°. Em comparação com os resultados (gráficos e estatísticas) dos calados cheio e intermediário, vê-se que estes para o calado de lastro ficaram superiores, como previsto anteriormente, pois para a situação de calado de lastro o nível de movimentos de primeira ordem é maior que aquele das condições de calado cheio e intermediário, e conseqüentemente o período de corte é menor, de modo que a banda de freqüências onde há movimentos de primeira ordem é maior, favorecendo o método bayesiano na tarefa de estimar o espectro direcional de ondas. A estimação das estatísticas é muito precisa, com erros em H_s , T_p e direção relativa de, respectivamente, -2.98%, 3.69% e 0.61° para a Figura 5-17 e -1.10%, 4.48% e 1.10° para a Figura 5-18.

Este padrão de qualidade se repete em praticamente todos os casos do Apêndice D, atestando que para situações de altos níveis de movimento e baixos períodos de corte, o método bayesiano estima com grande precisão o espectro direcional de ondas, inclusive aqueles com espalhamento elevado, como será visto nas próximas páginas com os ensaios com a BGL-1.

P35L9011	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	4.73 (-2.98%)
Tp (s)	10.12	9.75 (3.69%)
Dir. relativa (graus)	89.87	89.26 (0.61°)

Figura 5-17: Resultados experimentais – ensaio P35L9011

P35L90I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	8.14 (-1.10%)
Tp (s)	14.56	13.91 (4.48%)
Dir. relativa (graus)	91.08	89.99 (1.10°)

Figura 5-18: Resultados experimentais – ensaio P35L90I2

A comparação das estatísticas espectrais obtidas com base nos movimentos medidos nos três calados mostra variações muito pequenas. Isso, à primeira vista, pode parecer pouco intuitivo, já que o nível de movimentos do navio aumenta sensivelmente com a redução do calado. Todavia, deve-se lembrar que isso é resultado da calibração do parâmetro “ U ”, a qual foi realizada visando-se manter a qualidade destas estatísticas, mesmo que em detrimento do espalhamento direcional à medida que o calado aumenta (vide Capítulo 4).

Graças a essa calibração, os efeitos do aumento do calado sobre as estatísticas são reduzidos, embora as discrepâncias nos espalhamentos aumentem, gerando espectros forçosamente mais espalhados para os calados maiores.

A análise dos resultados mostra que não apenas as estatísticas espectrais como também os espalhamentos direcionais são muito bem reproduzidos no caso de calado leve. A tendência de espalhamento pela proa, discutida para os calados anteriores, nesse caso praticamente desaparece (comparar, por exemplo, Figura 5-12 e Figura 5-16 com a Figura 5-19, mostrada abaixo).

P35L9014	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	4.81 (-3.83%)
Tp (s)	10.12	10.94 (-8.04%)
Dir. relativa (graus)	92.48	107.15 (-14.68°)

Figura 5-19: Resultados experimentais – ensaio P35L9014

Assim como no caso dos calados máximo e intermediário, os erros apresentados nas estatísticas para o calado de lastro somente são maiores nos casos em que os espectros de ondas apresentam energia significativa em períodos muito baixos, para as quais o FPSO praticamente não responde em 1ª ordem. Exemplos disso estão nas figuras a seguir: os casos P35L120B3 (mar 3 da Tabela 5-4, incidindo a 120° no FPSO, Figura 5-20), P35L150B2 (mar 2 da Tabela 5-4, incidindo a 150° no FPSO, Figura 5-21) e P25L150B3 (mar 3 da Tabela 5-4, incidindo a 150° no FPSO, Figura 5-22), únicos casos com erros em Hs acima de 20% e, não por acaso, todos eles mares bimodais com uma das componentes de espectro com pico de baixo período (abaixo de 7 segundos).

P35L120B3

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

0.97

11.40

120.39

Bayesiano

0.71 (27.27%)

11.82 (-3.62%)

133.47 (-13.08°)

Figura 5-20: Resultados experimentais – ensaio P35L120B3

P35L150B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.79	1.21 (32.19%)
Tp (s)	7.30	8.57 (-17.43%)
Dir. relativa (graus)	137.57	146.15 (-8.58°)

Figura 5-21: Resultados experimentais – ensaio P35L150B2

P35L150B3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	0.97	0.58 (40.27%)
Tp (s)	11.40	11.05 (3.06%)
Dir. relativa (graus)	150.39	165.60 (-15.21°)

Figura 5-22: Resultados experimentais – ensaio P35L150B3

Nos casos supracitados, esbarra-se, na verdade, nos limites de estimação do sistema. Obviamente, *tanto maior será a faixa de mares passíveis de serem estimados a partir dos movimentos de um casco quanto menores forem suas dimensões*. Esse fato ficará claro ao se comparar os resultados obtidos com base nos ensaios do FPSO P-35 com aqueles realizados com modelo da balsa BGL-1, os quais são apresentados a seguir.

5.2 Ensaios com modelo da Balsa Guindaste e Lançamento (BGL-1)

A Tabela 5-8 abaixo sumariza os resultados do método bayesiano aplicado aos ensaios com a BGL-1 na condição de calado operacional. Mais uma vez, a nomenclatura segue o padrão adotado anteriormente:

- BGL: BGL-1 em calado operacional
- 90(120; 135; 150): incidência de 90°, 120°, 135° ou 150° em relação ao referencial móvel do navio
- I(B): mar unimodal (I) ou bimodal (B)
- n: mar “n” das Tabela 5-3 (mares unimodais) e Tabela 5-4 (mares bimodais)

Tabela 5-8: Método Bayesiano – BGL-1 calado operacional

Caso	Experimental			Bayesiano $u=0.0044$			Erros		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (%)	Tp (%)	Dir (°)
BGL90I1	4.34	10.88	90.94	4.83	10.23	89.62	-11.32	5.91	1.32
BGL90I2	8.04	15.49	92.19	8.52	14.41	91.56	-6.03	7.00	0.63
BGL90I3	4.63	9.87	90.48	5.22	9.54	88.16	-12.87	3.38	2.32
BGL90I4	4.54	10.32	91.43	4.94	10.23	87.29	-8.73	0.86	4.14
BGL120B1	1.62	11.43	120.81	1.58	10.93	117.11	2.75	4.39	3.70
BGL120B2	1.93	7.48	109.56	2.08	7.45	106.56	-7.32	0.39	3.00
BGL120B3	1.22	5.33	119.97	1.26	5.37	126.93	-3.73	-0.61	-6.96
BGL120B4	2.14	11.43	119.33	2.15	10.93	115.43	-0.74	4.39	3.90
BGL120B5	1.59	12.06	105.61	1.68	10.93	110.01	-5.69	9.34	-4.40
BGL135I1	4.34	10.88	135.94	4.71	10.93	126.17	-8.48	-0.48	9.77
BGL135I2	8.04	15.49	137.19	9.00	15.80	126.63	-11.90	-1.97	10.56
BGL135I3	4.63	9.87	135.48	4.80	10.23	124.29	-3.75	-3.66	11.19
BGL135I4	4.54	10.32	136.43	4.42	10.23	126.77	2.73	0.86	9.66
BGL150B1	1.62	11.43	150.81	1.59	11.63	140.32	1.99	-1.69	10.49
BGL150B2	1.93	7.48	139.56	1.90	6.76	132.70	1.56	9.68	6.87
BGL150B3	1.22	5.33	149.97	1.20	5.37	156.87	1.58	-0.61	-6.90
BGL150B4	2.14	11.43	149.33	2.13	10.93	142.40	0.12	4.39	6.94
BGL150B5	1.59	12.06	135.61	1.65	11.63	127.27	-4.07	3.57	8.34

As páginas a seguir trazem como exemplo duas comparações entre valores estimados e medidos, seguindo o mesmo formato já empregado para os ensaios do FPSO P-35.

Todos os resultados da Tabela 5-8 constam do Apêndice E.

A Figura 5-23 ilustra os resultados da estimação para o mesmo mar anual *long-crested* da Bacia de Campos (mar 1 da Tabela 5-3) dos exemplos da P-35, mas desta vez incidindo na BGL-1 com ângulo de 135° , enquanto a Figura 5-24 traz os resultados para o mar 3 da Tabela 5-3 (que na realidade é o mar 1 da figura anterior com um espalhamento maior) com a mesma direção de incidência de 135° . Em outras palavras, é a mesma condição de mar (H_s , T_p e direção média) em ambos os casos, a menos do espalhamento.

Como se pode ver pelas figuras a seguir (e aquelas do Apêndice E), além das estatísticas do espectro estimado apresentar erros muito baixos, a qualidade dos gráficos de radar, espectros de potência e mapas espectrais é muito boa, superior até que aqueles para o caso da P-35 em calado de lastro, mostrando a eficiência do método bayesiano em estimar o espectro direcional de ondas, até aqueles com espalhamento elevado, quando aplicado a uma embarcação que apresenta altos níveis de movimentos de primeira ordem, como é o caso da BGL-1 se comparada a um FPSO.

BGL135I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.34	4.71 (-8.48%)
Tp (s)	10.88	10.93 (-0.48%)
Dir. relativa (graus)	135.94	126.17 (9.77°)

Figura 5-23: Resultados experimentais – ensaio BGL135I1

BGL135I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	4.80 (-3.75%)
Tp (s)	9.87	10.23 (-3.66%)
Dir. relativa (graus)	135.48	124.29 (11.19°)

Figura 5-24: Resultados experimentais – ensaio BGL135I3

A análise da Tabela 5-8 e dos resultados gráficos permite afirmar que, no que se refere às estimativas, o aumento de precisão obtido a partir da monitoração da BGL-1 em comparação com o caso da P-35 é visível. Os erros nas estatísticas são menores e a representação do espectro direcional é mais precisa em termos de espalhamento.

Dentre todos os casos ensaiados, o maior erro nas estimativas de altura e período foram, respectivamente, 12% (caso de um mar unimodal com espalhamento elevado) e 10% (caso de um mar bimodal com frequência elevada). O erro máximo na direção média de ondas foi de apenas 11° - novamente, em um caso unimodal com espalhamento elevado.

Comparando os casos bimodais que resultaram em maiores erros no estudo baseado no FPSO P-35 (casos P35X120B3, P35X150B2 e P35XB3, X = C; I; L), percebe-se que os erros agora são muito menores. Observando os resultados na Figura 5-25, Figura 5-26 e Figura 5-27, mostradas a seguir, percebe-se claramente que a energia em períodos mais baixos é identificada a partir dos movimentos da BGL, ao contrário dos resultados correspondentes obtidos com modelo do FPSO.

BGL120B3

Hs (m)

Experimental

1.22

Bayesiano

1.26 (-3.73%)

Tp (s)

5.33**5.37 (-0.61%)**

Dir. relativa (graus)

119.97**126.93 (-6.96°)** **Figura 5-25: Resultados experimentais – ensaio BGL120B3**

BGL150B2

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

1.93

7.48

139.56

Bayesiano

1.90 (1.56%)

6.76 (9.68%)

132.70 (6.87%)

Figura 5-26: Resultados experimentais – ensaio BGL150B2

BGL150B3

Hs (m)

Experimental

1.22

Bayesiano

1.20 (1.58%)

Tp (s)

5.33**5.37 (-0.61%)**

Dir. relativa (graus)

149.97**156.87 (-6.90°)** **Figura 5-27: Resultados experimentais – ensaio BGL150B3**

Em função dos movimentos elevados apresentados pelo sistema, as estimativas são ainda menos sensíveis ao valor do parâmetro de calibração (“ u ”), como foi discutido no Capítulo 4.

De fato, os resultados confirmam a análise inicial de que valores maiores de “ u ” devem ser adotados à medida que o calado do navio aumenta, de forma a garantir mapas espectrais e estatísticas mais precisos. Consequentemente, a previsão do espalhamento de ondas tende a se deteriorar para os casos de maior carregamento, e tal deterioração é tão mais intensa quanto menor o nível de movimentos do navio (ou seja, para mares de menor energia); entretanto, navios nestas condições não inviabilizam a utilização do método bayesiano para estimar espectros direcionais de ondas, como pode ser visto pelos resultados da Tabela 5-5.

Além disso, a questão do espalhamento pela proa, identificada, por exemplo, no caso P35C120B1, desaparece nos resultados com a BGL-1, como foi previsto anteriormente e pode ser visto na figura abaixo, no caso análogo BGL120B1, onde não há espalhamento pela proa e as estatísticas experimentais e estimadas são muito próximas, com erros em H_s , T_p e direção relativa de, respectivamente, 2.75%, 4.39% e 3.70°:

BGL120B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.62	1.58 (2.75%)
Tp (s)	11.43	10.93 (4.39%)
Dir. relativa (graus)	120.81	117.11 (3.70°)

Figura 5-28: Resultados experimentais – ensaio BGL120B1

5.3 Comentários Adicionais e Conclusões acerca da Validação Experimental

Neste capítulo foi realizado um extenso conjunto de testes que permitiram verificar a aderência entre os espectros direcionais medidos a partir de método de estimação baseado na leitura de *wave-probes* no tanque e aqueles estimados via monitoração dos movimentos de modelos da P-35 (escala 1:70) e BGL-1 (escala 1:48).

Os resultados obtidos com o modelo da P-35 mostraram ser possível obter os parâmetros estatísticos relevantes (altura significativa, período e direção relativa) com boa precisão em todas as situações de calado, e para tal foi feita calibração do parâmetro de suavidade da estimação (" u "), que aumenta com o calado do navio. Como discutido, embora o espalhamento direcional estimado se deteriore à medida que o calado aumenta (e, portanto, os níveis de movimentos de primeira ordem diminuem), forçando um espalhamento maior do que o real, as estatísticas dos espectros estimados não apresentam erros significativamente altos de modo a inviabilizar a utilização do método para estes casos; pelo contrário, atestam que mesmo embarcações de grande porte, com baixos níveis de movimentos de primeira ordem, podem ser utilizadas como estimadores espectrais, contrariando o que foi dito por Pascoal et al. (2005). À medida que o calado diminui, portanto, é possível obter boas estimativas inclusive no que se refere ao espalhamento direcional.

Para ilustrar melhor esta discussão, a Figura 5-29 abaixo apresenta a comparação de resultados para um dos mares unimodais (mar 3 da Tabela 5-3) obtidas nas três situações de calado da P-35. Entre parênteses os erros nas estimativas de H_s , T_p e direção relativa para cada estimativa. Este caso foi escolhido por ser um dos mares unimodais com maiores erros de estimação. Corresponde a ensaios com incidência de 135° em relação ao modelo.

Figura 5-29: Comparação: mar 3 da Tabela 5-3; incidência 135° – FPSO P35 – 3 calados

Verifica-se, além da redução do espalhamento pela proa, o *trade-off* já comentado entre a suavidade do espectro e os erros. À medida que o calado aumenta, aumenta-se a suavidade do espectro, forçando o método a espalhar mais a energia. Com a redução do calado (e do parâmetro de calibração), essa tendência diminui, permitindo a estimação de um espectro com espalhamento mais próximo do real, embora com uma pequena piora na direção média.

Como esperado, os resultados obtidos com a BGL-1 com as mesmas condições de mar confirmam que as estimativas ganham em qualidade com o aumento do nível de movimentos de primeira ordem do casco. Passa a ser possível estimar os espalhamentos direcionais com grande precisão e também espectros com períodos de pico menores, ampliando-se o alcance do método de estimação.

Para ilustrar estes ganhos, a Figura 5-30 abaixo compara o mesmo mar, agora estimado com o modelo da BGL-1.

Figura 5-30: Comparação: mar 3 da Tabela 5-3; incidência 135° – BGL-1

Outro exemplo que ilustra claramente o maior “alcance” da estimação com a redução das dimensões do sistema flutuante é o caso de mar bimodal 3 da Tabela 5-4, composto por dois mares *long-crested*, sendo um deles com período de pico bastante baixo (próximo de 5 segundos na escala real). Trata-se também de um dos mares bimodais com maiores erros de estimação, justamente em virtude desta componente de maior período, para o qual a resposta dos cascos é pequena. Com isso, boa parte da energia é “filtrada” pelos navios.

A Figura 5-31 a seguir compara as estimativas deste mar obtidas com o modelo do FPSO P-35 em calado leve e com o modelo da BGL-1 para o mar 3 da Tabela 5-4, ou seja, um mar bimodal, incidindo a 150° nos modelos. Mais uma vez, os erros nas estimações são apresentados entre parênteses.

É fácil perceber que a componente de menor período não é percebida pelo modelo do FPSO P-35, mesmo na situação leve, já que o mesmo não mais

responde em períodos próximos de 5 segundos (lembrar que o período de corte para esta embarcação foi estipulado em aproximadamente 7 segundos). Já a BGL-1, por ainda apresentar resposta nesta faixa de períodos, permite a identificação desta componente do espectro com maior precisão e, como resultado, os erros da estimação caem em aproximadamente 50% no que se refere à altura e direção média de ondas. Neste caso, para a comparação ser mais justa, o período de pico experimental corresponde apenas ao espectro de maior período, o qual é enxergado efetivamente pelos dois modelos, o que explica os erros compatíveis nos dois casos.

Figura 5-31: Comparação ensaio P35L150B3 x BGL150B3.

O conjunto completo de resultados experimentais atesta, assim, a viabilidade de estimativa de espectros direcionais de onda a partir dos movimentos de primeira-ordem de sistemas flutuantes. Obviamente, a gama de espectros passíveis de serem estimados com precisão aumenta para sistemas que apresentam dinâmica mais significativa em ondas.

Relembrando o Capítulo 4, a qualidade das estimativas está relacionada com a previsão das funções de transferência de movimentos (RAOs), as quais descrevem esta dinâmica. Nos casos dos ensaios em escala reduzida, esta previsão é menos susceptível a erros, já que os parâmetros (deslocamento, inércias, centro de gravidade, etc.) são conhecidos com maior precisão.

Esta análise prévia, em conjunto com os excelentes resultados experimentais, confere confiabilidade ao estudo em escala real, cujos resultados são apresentados a seguir.

6. VERIFICAÇÃO EM ESCALA REAL: ESTUDO COM BASE NA MONITORAÇÃO DO FPSO P-35

Após a validação experimental do método bayesiano, com maior controle sobre parâmetros tais como deslocamento, inércias, KG, etc., e casos de mar que permitiram altos níveis de movimento, um JIP (*Joint Industry Project* – Projeto Multicliente) para estudo de amortecimento em *roll* em escala real do qual a Petrobras participou permitiu uma primeira verificação do método bayesiano para situações de mares reais, tipicamente mais amenas que aquelas anuais e centenárias presentes nos ensaios, além de sujeitas a todas as incertezas inerentes a uma embarcação em escala real operando na Bacia de Campos.

O FPSO P-35 conta com um sistema de monitoração da condição de carregamento dos tanques, expresso por um arquivo de extensão “.ldp”, que permitiu o levantamento dos RAOs. A monitoração feita pelo MARIN em 2005 envolveu dois tipos de arquivo: um de movimentos nos 6 graus de liberdade (extensão “.mqk”) e um de aproamento da embarcação (extensão “.hdg”).

Durante este período de monitoração houve a presença de uma bóia oceanográfica *Datawell*[®], instalada pela Petrobras nas vizinhanças do FPSO, cujos arquivos de monitoração (extensão “.wdr”) permitiram a estimação do espectro direcional de ondas.

Neste capítulo, descreve-se o procedimento adotado para tal verificação, isto é, de como foram obtidos os RAOs a partir dos arquivos de carregamento, e como foram utilizadas as informações contidas em cada tipo de arquivo para se estimar o espectro direcional de ondas.

6.1 Metodologia de Análise

Esta seção apresenta a definição da metodologia e os procedimentos para levantamento dos dados referentes à monitoração de campo da plataforma P35.

Dados brutos:

Foram fornecidos pela Petrobras:

- Arquivos de carregamento (extensão .ldp);
- Arquivos de movimentos (extensão .mqk);
- Arquivos de aproamento (extensão .hdg);
- Arquivos de dados da bóia oceanográfica (extensão .wdr);
- *Software* para leitura dos arquivos de carregamento: *ShipManager-88.exe*
- *Software* para leitura dos movimentos: Rotina MATLAB® 'ReadMQK.m'
- *Software* para leitura dos aproamentos: Rotina MATLAB® 'ReadNMEA.m'
- *Software* para análise dos dados da bóia: W@ves21® v2.1.6
- Planilha Excell® com cálculo de pesos e centros do navio leve: P35.xls
- Arquivo de dados hidrostáticos: P35_Peso leve final_Rev_A.sst (*software* Sstab)

Os arquivos de carregamento foram aquisitados com intervalo de 6 horas quando o FPSO não se encontrava em operação de alívio e de 1 hora caso contrário. Os arquivos de movimentos, aproamentos e da bóia foram aquisitados em intervalos de 30 minutos.

A Tabela 6-1 apresenta os períodos de disponibilidade dos dados. Deve-se atentar para o fato de que os intervalos ressaltados são os únicos para os quais todos os dados necessários se encontram disponíveis para validação dos modelos de estimação espectral. Dessa forma, para fins de validação do

método de estimação de espectro, dispõe-se de apenas 8 dias de medição. Este intervalo de tempo certamente não é suficiente para uma validação consistente em escala real. Todavia, a análise dos resultados traz informações relevantes em uma primeira verificação da metodologia em um caso real.

Tabela 6-1: Disponibilidade dos Dados

Mês	<i>Carreg.</i>	<i>Movim.</i>	<i>Aproam.</i>	<i>Bóia</i>
<i>Julho</i>	01 a 14	15 a 31	15 a 31	15 a 18
<i>Agosto</i>	05; 14 a 31	01 a 31	01 a 31	29 a 31
<i>Setembro</i>	01 a 30	01 a 29	01 a 29	01 a 08
<i>Outubro</i>	01 a 31	06 a 31	06 a 31	-----
<i>Novembro</i>	02 a 23	01 a 30	01 a 30	14

Assim, dentre um enorme banco de dados, foram selecionados aqueles casos onde coexistiam os quatro arquivos. Os casos selecionados encontram-se na Tabela 6-2 abaixo⁷:

Tabela 6-2: Casos selecionados – Escala real

Caso	Carregamento (ddmmaahh)	Calado médio (m)
1	08/09/05/18	18.04
2	04/09/05/10	14.09
3	08/09/05/20	18.44
4	04/09/05/10	14.06
5	14/11/05/08	14.45
6	02/09/05/17	17.39
7	08/09/05/07	17.82
8	01/09/05/07	16.71
Extra 1	26/08/05/05	10.84
Extra 2	20/07/05/04	14.04
Extra 3	20/07/05/06	14.06

Os casos identificados pela palavra “Extra” foram posteriormente enviados pela Eng. Maiza Pimenta Goulart (E&P/Petrobras) e incorporados à análise.

⁷ Na ausência de um arquivo de carregamento com a exata diferença de três horas, escolheu-se aquele de horário mais próximo, baseado na hipótese de que um estado de mar não deva variar muito dentro do período de até 3 horas.

6.2 Procedimento para Levantamento dos Dados do Navio

A seguir, descreve-se o procedimento para levantar todos os dados referentes ao navio, necessários para a estimação dos espectros de ondas. Esses dados incluem:

- Calado (incluindo possível ocorrência de *trim* e/ou banda);
- Deslocamento (Δ);
- Posição do Centro de Gravidade (CG) do navio (X_G , Y_G , Z_G);
- Momentos de Inércia (em relação ao CG).

6.2.1 Dados do Navio Leve

Os dados do navio leve foram encaminhados pela Petrobras.

O KG do navio leve é o dado que mais apresenta incerteza em seu valor, segundo a própria empresa. Isto justifica as análises de sensibilidade da estimação à variação do KG que foram previamente realizadas no Capítulo 4, e que, novamente, demonstraram que mesmo grandes variações neste parâmetro não implicam em variações significativas na estimação. Além disso, como mencionado anteriormente, este fato está certamente correlacionado à não utilização do RAO de *roll* na análise, dado que este é o movimento mais influenciado por variações no KG.

6.2.2 Dados do Navio nas Diferentes Condições de Carga

O procedimento para cálculo dos dados do navio durante os vários instantes de monitoração é descrito a seguir:

O procedimento se inicia com a obtenção dos dados de carregamento da plataforma. Tais dados são obtidos com precisão a partir de arquivos *.ldp, lidos com o auxílio do executável *ShipManager-88*. Esse executável lê os arquivos de carregamento da plataforma e os dispõe em tabelas que informam o carregamento de cada tanque na situação estudada (ilustração na Figura 6-1 a seguir).

COMPARTMENT	CAPACITY (Cm3)	ELLAGE (m)	G-VOL (Cm3)	G-VOL (m3)	TEMP (°C)	WGT (kg)	N-VOL (Cm3)	S-G	WEIGHT (kg)	LCG (m)	VCG (m)	TCG (m)	FCM (m)
1. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
2. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
3. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
4. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
5. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
6. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
7. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
8. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
9. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
10. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
11. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
12. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
13. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
14. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
15. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
16. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
17. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
18. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
19. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
20. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
21. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
22. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
23. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000
24. CENTER TANK	11.800	21.754,26	56,44	60,000	1.0000	11.800	11.800	0.000	11.800	11.800	0.000	0.000	0.000

Figura 6-1: Ilustração dos dados no software *ShipManager-88*

Os dados de carregamento de cada tanque são passados ao programa *Sstab*, versão 3.08.15, que possui tabelas de entrada para esses dados (ilustração na Figura 6-2 a seguir).

Figura 6-2: Ilustração dos dados no software Sstabs

Considerando a massa dos componentes da plataforma e seu carregamento total, são calculados a massa total da plataforma, o valor do calado na popa, proa e à meia-nau, o KG e os GM transversal e longitudinal e também o valor dos ângulos de *trim* e banda.

Passa-se então a considerar somente a carga presente naquela situação e sua disposição nos tanques da plataforma (ou seja, desconsideramos a massa dos itens que compõem o peso leve da plataforma) para calcular a massa e o centro de massa da carga (as cargas nos tanques são consideradas pontuais e a origem do sistema de coordenadas adotado é a quilha à meia-nau) e também os momentos de inércia da carga em relação aos eixos *x* (*roll*), *y* (*pitch*) e *z* (*yaw*).

O passo acima é necessário uma vez que os itens de peso do navio leve no programa SStab não apresentam os valores da posição transversal do centro de massa e, portanto, não apresentam valores corretos do momento de inércia em relação ao eixo *x*.

Por fim, os dados obtidos no passo anterior (massa total da plataforma, massa da carga, calado, ângulos de trim/banda, centro de massa e momentos de inércia da carga) servem como dados de entrada para uma planilha Excel programada para calcular os valores finais da posição do CG do navio e os momentos de inércia da plataforma na situação estudada, obtendo-se, assim, todos os valores desejados. Nessa planilha, os dados do navio leve são

combinados com os dados da carga para fornecer, como resultados finais, a posição do centro de gravidade da plataforma e os momentos de inércia já calculados em relação ao CG.

6.2.3 Obtenção das Funções de Transferência de Movimentos de Primeira Ordem (RAOs)

De posse dos dados do navio para um determinado instante de monitoração, gera-se os RAOs do navio correspondentes à condição de carregamento daquele instante. Para tanto, emprega-se o *software* WAMIT[®] (2004). As malhas numéricas utilizadas são baseadas na malha original empregada pelo programa Sstab (fornecida pela Petrobras). Para cada caso de monitoração é gerada uma malha diferente, corrigindo-se o calado e os ângulos de *trim* e/ou banda.

A Figura 6-3, a seguir, ilustra a malha do programa WAMIT[®] correspondente ao caso 1 da Tabela 6-2:

Figura 6-3: Malha numérica para o programa WAMIT[®] - caso 1

6.2.4 Procedimento para Levantamento dos Movimentos de Primeira-Ordem Monitorados

A rotina em MATLAB® ‘ReadMQK.m’, feita pelo MARIN, lê o arquivo de movimentos (extensão .mqk),

As acelerações são dadas em relação à posição no navio onde foi instalado o sistema de medição (ponte de comando).

A Figura 6-4 abaixo ilustra as velocidades angulares e acelerações efetivamente medidas para o caso 1 da Tabela 6-2:

Figura 6-4: Velocidades angulares e acelerações – caso 1

Dentro dessa rotina existe uma outra rotina, a ‘mqk.m’, cuja função é fazer a integração das velocidades de rotação e a dupla integração das acelerações, tendo como saída duas matrizes de movimento: os lineares e os angulares.

A Figura 6-5 abaixo ilustra os movimentos da embarcação como saída final da rotina ⁸:

⁸ Houve apenas uma modificação na rotina para que a saída dos movimentos de rotação fosse em graus e para que fosse subtraída de cada sinal a sua média.

Figura 6-5: Movimentos de 1ª ordem – caso 1

A rotina MATLAB® *ReadNMEA.m*, também feita pelo MARIN, lê o arquivo de aproamento (extensão .hdg), ilustrado na Figura 6-6 abaixo também para o caso 1 da Tabela 6-2:

Figura 6-6: Aproamento caso 1

Como dito na Introdução deste texto, uma das premissas do método bayesiano para estimação espectral é que, durante a aquisição dos movimentos de primeira ordem, não haja variações significativas de aproamento da embarcação. Para as simulações deste texto, adotou-se o valor de $\pm 5^\circ$ de desvio em relação ao valor médio como uma variação tolerável deste parâmetro.

Assim, os movimentos, o aproamento da plataforma e seus RAOs formam o conjunto de dados que alimentará o programa de estimação espectral. Vale

lembrar que, neste conjunto, os movimentos são transferidos para o CG da embarcação, em relação ao qual foram calculados os RAOs.

6.2.5 Procedimento para Obtenção dos Espectros de Mar a partir dos Dados da Bóia Oceanográfica

Os mares monitorados através da bóia oceanográfica *Datawell* para cada caso da Tabela 6-2 servirão como paradigma para a estimação baseada nos movimentos da plataforma P35. O software W@ves21[®], disponibilizado pela Petrobras, realiza a leitura dos arquivos de dados da bóia e fornece estimativas próprias de espectro de ondas além de informações estatísticas sobre o mesmo. Uma breve descrição dos parâmetros fornecidos será apresentada a seguir.

Os dados são analisados pelo programa, que já fornece valores estatísticos significativos do estado de onda medido. Estes valores, indicados na Figura 6-7 abaixo, incluem o período de pico do espectro, período entre zeros, altura significativa, entre outros.

Spectrum: Summary				
Symbol	Name	Description	Definition	Value
TP	Modal Period or Peak Period	The period at which S(f) has its highest value		9.09 s
Dirp	Peak Direction	The mean direction at 1/TP		121.1°
Sprp	Peak Spread	The direction spread at 1/TP		34.8°
Tz	Zero-Crossing Period	The average period of zero up-cross waves	$\text{Sqrt}(m[0]/m[2])$	6.31 s
Hm0	Significant Waveheight		$4*\text{Sqrt}(m[0])$	192 cm
TI	Integral Period	The Tz of the integral of the record	$\text{Sqrt}(m[-2]/m[0])$	7.89 s
T1	Mean Period	1/f1, the mean frequency of the spectrum	$m[0]/m[1]$	6.81 s
Tc	Crest Period	The average period between wave crests	$\text{Sqrt}(m[2]/m[4])$	4.25 s
Tdw2	? Period	$=\text{Sqrt}(TE*T1)$	$\text{Sqr}(m[-1]/m[1])$	7.19 s
Tdw1	? Period	?	$\text{Sqrt}(m[-1,2])/m[0]$	9.02 s
Tpc	Calculated Peak Period	Approximates to the modal period	$m[-2]*m[1]/m[0]^2$	9.14 s
nu	Bandwidth Parameter	The radius of gyration about f1 as a proportion of f1	$\text{Sqrt}((T1/Tz)^2-1)$	0.408
eps	Bandwidth Parameter	?	$\text{Sqrt}(1-(Tc/Tz)^2)$	0.738
QP	Goda's Peakedness Parameter	?	$2/m[0]^2*m[1,2]$	2.391
Ss	Significant Steepness	?	$2*\pi/g*Hs/Tz^2$	0.031
TRef	Reference Temperature	?		0.00 °C
TSea	Sea Surface Temperature	?		0.00 °C
Bat	Battery Status			0
TE	Energy Period	Total wave power in deep water = $\rho * g^2 / 4 / \pi * TE * m[0]$	$m[-1]/m[0]$	7.58 s

Figura 6-7: Grandezas estatísticas significativas do estado de mar – Saída do Programa W@ves21[®]

Além disso, o programa permite a visualização gráfica do espectro direcional de diversas formas, conforme mostram as Figura 6-8 e Figura 6-9 a seguir:

Figura 6-8: Gráfico de contorno do espectro direcional - Saída do Programa W@ves21®

Figura 6-9: Gráfico tridimensional do espectro direcional - Saída do Programa W@ves21®

O espectro de potência também pode ser visualizado, bem como a direção média e o espalhamento em cada frequência, conforme ilustra a Figura 6-10 a seguir:

Figura 6-10: Espectro de potência, direção e espalhamento médios - Saída do Programa W@ves21®

Os dados de todos os gráficos acima apresentados podem ser exportados em forma de arquivo texto, para posterior tratamento.

6.3 Resultados Finais

A Tabela 6-3 mostra os resultados do método bayesiano aplicados aos casos da Tabela 6-2

A calibração do parâmetro de suavidade “ u ” adotou um critério de variação por faixas de calados, segundo a análise discutida no Capítulo 4. Seguindo esse critério, os casos 1, 3, 6, 7 e 8 foram agrupados na faixa superior de calados ($u=2.5E-3$). A faixa intermediária incluiu os casos 2, 4, 5, “Extra 2” e “Extra 3”

($u=0.625E-3$). O caso “Extra1”, na faixa de calado leve, foi estimado com $u=0.156E-3$.

Na tabela abaixo, os valores estimados de período de pico (T_p) correspondem ao período de máximo valor do espectro de potência $S(f)$, seguindo a mesma definição empregada pelo software de análise da bóia. O período entre zeros (T_z) é calculado pelos momentos espectrais do espectro de potência. A direção relativa (θ) é dada em relação ao navio, seguindo a convenção usual (0° para popa, 90° boreste e 180° proa), considerando-se o aproamento médio em cada caso.

Tabela 6-3: Método Bayesiano: P-35 escala real

	Bóia				Bayesiano				Erros			
Mar	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	θ (deg)	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	θ (deg)	H_s	T_p (s)	T_z	θ (deg)
1	2.28	11.11	7.46	21.16	1.89	9.93	9.47	13.11	17.3%	10.6%	-26.9%	8.0
2	2.99	11.76	7.30	31.64	2.24	11.25	10.09	22.90	25.0%	4.3%	-38.3%	8.7
3	2.23	11.76	7.01	18.96	2.01	9.93	10.09	-7.02	9.8%	15.6%	-43.9%	26.0
4	2.72	11.76	6.82	34.92	1.69	12.58	9.45	39.28	37.8%	-6.9%	-38.6%	-4.4
5	1.92	9.09	6.31	92.31	1.51	8.61	7.14	94.62	21.4%	5.3%	-13.2%	-2.3
6	1.86	10.00	6.31	105.38	1.46	8.61	8.27	152.62	21.4%	13.9%	-31.0%	-47.2
7	2.08	10.00	6.15	2.94	1.55	8.61	8.92	1.76	25.3%	13.9%	-45.1%	1.2
8	2.02	8.33	5.01	128.48	1.06	8.61	7.82	136.29	47.7%	-3.3%	-56.0%	-7.8
Extra 1	3.90	11.76	8.25	42.22	3.40	13.00	9.46	101.41	12.8%	-10.5%	-14.7%	-59.2
Extra 2	3.60	11.76	7.07	106.46	2.91	8.61	9.21	132.14	19.0%	26.8%	-30.2%	-25.7
Extra 3	3.34	13.33	6.80	100.02	3.06	8.61	8.88	132.90	8.3%	35.4%	-30.6%	-32.9

Vários aspectos nesta comparação merecem destaque, a começar pelo fato que, embora a monitoração da P-35 tenha sido realizada por vários meses, a bóia teve seu funcionamento limitado a poucos dias. Infelizmente, nos dias para os quais todos os dados necessários se encontravam disponíveis, as situações de mar foram bastante brandas. A menos do caso “Extra1” (que inclusive teve de ser descartado, por motivos explicados adiante), todos os mares disponíveis possuíam períodos entre zeros inferiores a 8 segundos. Além disso, como pode se ver na Tabela 6-2, em todos esses casos, o calado do FPSO variou entre intermediário e máximo (entre 14m e 18m). Essa combinação de mares amenos com carregamentos elevados do FPSO constitui, portanto, as condições mais desfavoráveis para a estimação baseada em movimentos de 1ª ordem.

Uma parcela significativa da energia destes mares é filtrada pelo navio, o que fica evidente comparando-se os erros nas estimativas de período de pico e período entre zeros. Os erros significativamente maiores nestes últimos são consequência da “filtragem” das componentes de onda de menores períodos, para as quais o navio não responde. Por esse motivo, o período entre zeros estimado é sempre maior do que o real. Essa discussão é muito bem ilustrada pela análise dos espectros de potência apresentados nas páginas seguintes. Pela mesma razão, a altura significativa estimada é sempre menor do que aquela inferida pela bóia.

A razão pela qual o caso “Extra 1” (na verdade, a situação mais favorável por combinar calado menor com maior período e altura de mar) foi excluída da análise foi a variação de aproamento deste caso durante a medição de movimentos, que chegou a atingir 50° (ver Figura 6-11 abaixo).

Figura 6-11: Variação de Aproamento – Caso Extra 1

Essa variação explica, portanto, o erro na estimativa de direção média do caso “Extra 1”. Todavia, é interessante notar que, sendo esse o caso de maiores níveis de movimento, os erros em H_s , T_z e T_p permanecem baixos.

Em resumo, observa-se que, dadas as dificuldades apresentadas pelos casos disponíveis, os resultados obtidos em escala real são bastante animadores. Descartando-se o caso 8, com período entre zeros de 5 segundos, além do caso “Extra 1” pelos motivos já explicados, os erros médios globais em H_s , T_p e direção são, em valor absoluto, respectivamente 20,6%, 13,2% e $7,6^\circ$.

As figuras abaixo mostram os resultados do método bayesiano para três exemplos extraídos da Tabela 6-3: os casos 1, 5 e 8. O padrão de

apresentação dos resultados segue os moldes daquele do Capítulo 5, com apenas dois gráficos adicionais: no canto inferior esquerdo, a variação do aproamento ao longo da medida, e ao lado deste, um desenho da direção de incidência teórica do espectro. Novamente, faz-se necessário citar a presença da linha espúria nos mapas espectrais, que não tem significado físico nenhum.

Todas as figuras com os resultados da Tabela 6-3 (excluindo o caso “Extra 1”) estão no Apêndice F.

O caso 1, de calado máximo, corresponde a um mar de $H_s = 2.28\text{m}$, $T_p = 11.11\text{s}$ (o maior da Tabela 6-3), incidindo a 21.16° no FPSO. Nota-se que neste caso o aproamento praticamente não varia durante a aquisição dos movimentos, e que o método estima a direção de incidência com bastante precisão (erro de 8.0°). Os erros em H_s e T_p são, respectivamente, 17.3% e 10.6%.

O caso 5 corresponde a uma condição de mar menor em H_s e T_p que aquele do caso 1, e com uma variação de aproamento maior. Entretanto, por se tratar de um mar praticamente de través, as estatísticas do espectro estimado apresentam erros bastante plausíveis (21.4%, 5.3% e -2.3° para, respectivamente, H_s , T_p e direção relativa).

O caso 8 corresponde ao mar de menor período da Tabela 6-3 ($T_z = 5\text{s}$), ou seja, abaixo do período de corte da embarcação, o que justifica os maiores erros desta validação em escala real para H_s (47.7%), embora o período de pico e a direção relativa sejam estimados com bastante precisão (erro de -3.3% e -7.8° , respectivamente)

Figura 6-12: Resultados escala real: caso 1

Figura 6-13: Resultados escala real: caso 5

Figura 6-14: Resultados escala real: caso 8

6.4 Comparação adicional com resultados dos radares instalados nos sistemas P-40 e P-18

O objetivo desta seção é fazer apenas uma comparação preliminar entre dois métodos distintos de estimação de espectro direcional *on-board*: o método bayesiano deste texto e um radar meteorológico, e apontar as principais diferenças entre os resultados da estimação para cada um deles, com base nesta comparação.

Nas proximidades da P-35, os sistemas P-18 e P-40, ambas plataformas semi-submersíveis, estão equipados com o radar WAMEX[®]. Em relação à P-35, a P-18 encontra-se a aproximadamente 5 km NE, enquanto a P-40 a aproximadamente 12 km SE.

Assim, para os casos de mar selecionados da Tabela 6-2, as estimativas simultâneas do radar em cada uma das plataformas são mostradas nas Tabela 6-4 e Tabela 6-5 abaixo^{9,10}. Em cada uma das tabelas, as colunas estão assim definidas da esquerda para direita:

- ✓ Caso da Tabela 6-2
- ✓ Período do segundo pico do espectro (s)
- ✓ Período do primeiro pico do espectro (s)
- ✓ Direção relativa (°) do segundo pico do espectro em relação ao norte (0°)
- ✓ Direção relativa (°) do primeiro pico do espectro em relação ao norte (0°)
- ✓ Hs do segundo pico (m)
- ✓ Hs do primeiro pico (m)
- ✓ Hs do espectro global (m)

Nota-se que o radar não leva em conta o aproamento da embarcação.

⁹ Dados fornecidos pela Petrobras.

¹⁰ A palavra "NaN" indica que o radar não foi capaz de estimar o espectro no horário especificado (a estimativa é feita de hora em hora).

Tabela 6-4: Dados do radar WAMEX® P-18 para os casos de mar

Caso	T sec. peak (s)	T first peak (s)	Dir. Regar. Sec.peak (°) - 0° North	Dir. Regar. first peak (°) - 0° North	H. sec. peak (m)	H. first peak (m)	Hs (m)
1	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
2	10.6	12.8	203	223	1.63	1.55	2.7
3	9.2	11.4	179	131	0.92	1.04	1.9
4	7.1	12.7	273	208	0.69	2.17	2.7
5	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
6	8	9.8	68	100	1.01	1.22	2.1
7	16.2	10	163	218	0.83	1.6	2.3
8	8.5	6.4	72	6	1.19	1.31	2.3
9	7.2	14	224	216	1.65	3.23	4
10	9.9	14.2	198	214	1.19	2.71	3.6

Tabela 6-5: Dados do radar WAMEX® P-40 para os casos de mar

Caso	T sec. peak (s)	T first peak (s)	Dir. Regar. Sec.peak (°) - 0° North	Dir. Regar. first peak (°) - 0° North	H. sec. peak (m)	H. first peak (m)	Hs (m)
1	10.82	12.61	211.63	157.88	0.83	0.85	1.67
2	10.16	11.5	68.32	204.25	1.13	1.29	2.1
3	9.26	11.65	161.53	181.06	0.91	1.33	1.8
4	10.02	11.64	39.89	248.3	1.11	1.25	2
5	9.66	8.16	215.56	123	0.71	0.98	1.5
6	7.22	9.64	41.34	29.79	0.77	1.14	1.7
7	11.41	9.83	161.55	204.14	0.96	1.22	1.93
8	6.38	8	7	60.16	1.07	1.22	1.92
9	8.69	13.59	336.3	187.65	1.23	2.73	3.28
10	11.82	14.01	217.19	204.83	2.09	1.92	3.11

Alguns aspectos devem ser notados. Em primeiro lugar, as estimativas de Hs global do radar da P-18 são sempre maiores (tipicamente, entre 5% e 30%) do que as inferidas pelo radar na P-40. Isso pode indicar diferenças na calibração dos dois sistemas. Os períodos estimados nos dois casos são próximos, mas as direções médias tem diferenças significativas, podendo chegar a 70° para a direção do pico de maior período (caso do mar 6) e até 230° para o pico de menor período (caso do mar 4).

O radar fornece, como única estatística global, a altura significativa Hs (m), de modo que este é o único parâmetro que permite uma comparação direta entre radar, bóia e o método bayesiano (os demais parâmetros são separados por picos, o que dificulta a comparação direta com os resultados anteriores). A comparação encontra-se na Tabela 6-6, indicando também as diferenças percentuais de cada método em relação aos valores da bóia:

Tabela 6-6: Casos de mar: Hs - Radar x Bóia x Bayesiano

Mar	Bóia	MP18	MP40	Bayes	$\Delta P18$	$\Delta P40$	$\Delta Bayes$
1	2.28	NaN	1.67	1.89		-27%	-17%
2	2.99	2.7	2.1	2.24	-10%	-30%	-25%
3	2.23	1.9	1.8	2.01	-15%	-19%	-10%
4	2.72	2.7	2	1.69	-1%	-26%	-38%
5	1.92	NaN	1.5	1.51		-22%	-21%
6	1.86	2.1	1.7	1.46	13%	-9%	-21%
7	2.08	2.3	1.93	1.55	11%	-7%	-25%
8	2.02	2.3	1.92	1.06	14%	-5%	-48%
Extra 1	3.90	4	3.28	3.40	3%	-16%	-13%
Extra 2	3.60	3.6	3.11	2.91	0%	-14%	-19%
Extra 3	3.34	3.6	3.11	3.06	8%	-7%	-8%

Ao menos em termos de Hs, o sistema que mais se aproxima das medidas da bóia é o sistema de radar instalado na P-18.

Uma comparação interessante é aquela entre o método bayesiano que emprega os movimentos da P-35 e o radar WAMEX[®] instalado na P-40. Neste caso, verifica-se que os erros entre os dois dispositivos são próximos, apesar da maior distância entre eles. E, para os mares com períodos entre zeros superiores a 7 segundos (casos 1, 2, 3, Extra 2 e Extra 3), as diferenças obtidas pelo Método Bayesiano são em geral menores do que aquelas fornecidas pelo radar da P-40.

Embora preliminares, os resultados da comparação acima vêm ratificar a viabilidade da medição por movimentos, que se torna tão mais eficaz quanto maior o nível de resposta do casco sobre o qual a monitoração é realizada.

Há ainda outro aspecto que deve ser lembrado. A instrumentação necessária para a monitoração por movimentos envolve apenas uma base inercial (3 acelerômetros e 3 *rate-gyros*) de dimensões bastante reduzidas, acoplada a um microcomputador PC usual. Em termos de equipamentos e instalação, portanto, o trabalho e os custos envolvidos nesta opção de monitoração são extremamente reduzidos, se comparados às bóias e aos sistemas de radar.

6.5 Comentários e Conclusões Finais acerca da Verificação em Escala Real

Embora os dados disponíveis para a verificação em escala real tenham se restringido a poucos dias de monitoração, os resultados proporcionados pelos mesmos foram válidos para discutir a viabilidade do método proposto neste projeto de pesquisa.

Resultados muito bons foram obtidos mesmo em situações de mar amenas e com o FPSO carregado, situações muito pouco favoráveis para a estimação com base nos movimentos de primeira ordem.

A comparação com os dados de radar disponibilizados pela Petrobras (sistemas WAMEX[®] instalados nas plataformas P-18 e P-40) levou a conclusões igualmente importantes. A comparação entre o método de estimação ora proposto (com base nos movimentos da P-35) e os resultados do radar instalado na P-40 demonstraram que a variabilidade nas estimativas dos dois métodos é, de fato, compatível.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo reúne as conclusões a respeito da estimativa de espectro direcional de ondas baseada em movimentos de primeira ordem de sistemas oceânicos dispostas ao longo do texto, além de sugerir trabalhos futuros baseados neste tema.

No que se refere à metodologia proposta para o processo de estimação de ondas, a abordagem baseada no modelo de inferência bayesiano mostrou-se bastante confiável, sendo capaz de fornecer estimativas razoáveis mesmo para mares com alturas relativamente baixas e períodos próximos ao período de corte definido previamente em estudos numéricos, além de apresentar um custo computacional muito baixo.

O método foi descrito em detalhes no Capítulo 3, incluindo alguns detalhes de implementação numérica. O método proposto por Iseki e Ohtsu (2000) foi ampliado para cinco movimentos, com a inclusão do parâmetro u_{energia} para garantir que o espectro estimado tenha a mesma energia que o espectro real. No Capítulo 4 realizou-se, através de análises de sensibilidade, a calibração dos parâmetros " u " e " u_{energia} " do modelo e discutiu-se a influência dos RAOs na qualidade da estimação. Verificou-se que as estatísticas estimadas não são muito afetadas pela escolha do parâmetro " u "; as maiores variações estão nas estimativas do espalhamento direcional dos mares, e que quanto menor o calado (e portanto maior o nível de movimentos) menos dependente deste parâmetro o método se torna. E também que o método tolera pequenas incertezas no cálculo das funções de transferência, em particular o KG.

Baterias de ensaios foram realizadas no Capítulo 5 com o objetivo de validar numericamente o método utilizando-se duas embarcações: o FPSO P-35 em três condições de carregamento (cheio, intermediário e lastro), e a balsa guindaste e lançamento BGL-1.

Além da validação experimental, a campanha de monitoração feita pelo MARIN no FPSO P-35 durante o ano de 2005 permitiu, mesmo que de forma preliminar, verificar o método também em escala real. Este procedimento está descrito no Capítulo 6.

Todos os resultados obtidos em escala real e escala do modelo, em seu conjunto, permitem concluir que a estimação de espectros direcionais baseada em movimentos de primeira-ordem de sistemas oceânicos é, de fato, viável. O único requisito para que as estimativas sejam precisas é óbvia: o sistema em questão deve ter uma resposta ao menos razoável face ao mar a ser estimado. Os resultados obtidos com o modelo da P-35 mostraram ser possível obter os parâmetros estatísticos relevantes (altura significativa, período e direção média) com boa precisão em todas as situações de calado. Para isso, todavia, é necessária uma calibração do parâmetro de suavidade da estimação (" u "), que aumenta com o calado do navio. Com isso, embora o espalhamento direcional estimado se deteriore à medida que o calado aumenta (pois à medida que o calado aumenta, aumenta-se a suavidade do espectro, forçando o método a espalhar mais a energia, ou seja, forçando um espalhamento maior do que o real), as estatísticas, inclusive de direção média, não perdem qualidade em relação àquelas inferidas com o menor calado. À medida que o calado diminui, portanto, é possível obter boas estimativas inclusive no que se refere ao espalhamento direcional. Com a redução do calado (e do parâmetro de calibração), essa tendência diminui, permitindo a estimação de um espectro com espalhamento mais próximo do real.

As situações de mar amenas estudadas tanto em escala real como em alguns ensaios demonstram que, mesmo para o caso de um FPSO (provavelmente, o sistema de maior porte passível de ser empregado para essa monitoração), estimativas confiáveis podem ser obtidas para mares com período entre zeros até na faixa de 6 segundos. Embora com suas limitações, conclui-se que navios de grande porte também podem ser utilizados como estimadores espectrais, contrariando o que foi dito por Pascoal et al. (2005).

Quanto à questão do espalhamento pela proa, vista em alguns ensaios principalmente na condição de calado cheio, poder-se-ia tentar minimizar seus

efeitos analisando, por exemplo, a direção média calculada a cada interação do método, ou seja, a cada frequência, para em combinação com os espectros cruzados neste instante, encontrar um critério que permita a correção deste fato.

Por outro lado, os ensaios da BGL-1 atestam que, empregando-se sistemas de menor porte, a gama de mares passível de ser estimada com precisão pode ser ampliada, abrangendo parcela significativa dos possíveis mares de interesse prático.

Como esperado, os resultados obtidos com a BGL-1 com as mesmas condições de mar ensaiadas para o modelo da P-35 confirmam que as estimativas ganham em qualidade com o aumento do nível de movimentos de 1ª ordem do casco. Passa a ser possível estimar os espalhamentos direcionais com grande precisão e também espectros com períodos de pico menores, ampliando-se o alcance do método de estimação.

O conjunto completo de resultados experimentais atesta, assim, a viabilidade de estimativa de espectros direcionais de onda a partir dos movimentos de primeira-ordem de sistemas flutuantes. Obviamente, a gama de espectros passíveis de serem estimados com precisão aumenta para sistemas que apresentam dinâmica mais significativa em ondas.

A qualidade das estimativas está relacionada com a correta previsão das funções de transferência de movimentos (RAOs), as quais descrevem esta dinâmica. Nos casos dos ensaios em escala reduzida, esta previsão é pouco susceptível a erros, já que os parâmetros (deslocamento, inércias, centro de gravidade, etc.) são conhecidos com precisão. A aplicação em escala real está sujeita, certamente, a maiores imprecisões na avaliação destes parâmetros, e mesmo nesta situação os resultados indicam que o método é confiável, sendo pouco influenciado por pequenos erros na avaliação dos RAOs, como foi visto no Capítulo 4 em relação ao KG e em Tannuri et al. (2001) quanto à questão da correta condição de carregamento da embarcação.

Como foi mencionado no início do Capítulo 6, da campanha de monitoração da P-35 feita pelo Marin no segundo semestre de 2005 apenas poucos dias

puderam ser aproveitados para a verificação do método bayesiano para uma situação real. Embora estes poucos dias não configurem uma validação em escala real para o método, os resultados proporcionados pelos mesmos atestam, mesmo que de maneira preliminar, a viabilidade do método bayesiano apresentado neste texto, já que os casos selecionados correspondem a situações de mar amenas, próximas ao período de corte do VLCC carregado, ou seja, situações desfavoráveis para a estimação com base nos movimentos de primeira ordem, justificando o termo “verificação” ao invés de “validação” em escala real no título do capítulo.

Resultados igualmente importantes foram obtidos da comparação, também preliminar, com os dados de radar disponibilizados pela Petrobras. Para duas plataformas semi-submersíveis próximas à P-35, P-18 e P-40, a comparação entre o método bayesiano e os resultados de radar, principalmente desta última (mais distante da P-35), demonstraram que os erros de estimação de ambos os métodos são compatíveis. E, em relação à P-18, a apenas 5 km NE da P-35, o fato da altura de onda significativa ser sempre maior que aquela estimada pela bóia oceanográfica chama a atenção, indicando que talvez possa ter ocorrido algum erro na calibração do radar. Evidentemente, esta conclusão é especulativa, embora plausível para explicar a ocorrência deste fenômeno em particular.

Deve-se ainda destacar que o método de monitoração ora proposto é muito pouco exigente em termos da instrumentação necessária. A monitoração é toda ela feita *on-board* e requer apenas uma base inercial (3 acelerômetros e 3 *rate-gyros*) de dimensões diminutas acoplado a um PC usual. A instrumentação pode ser alocada em qualquer ponto do sistema, inclusive no interior da sala de operações, por exemplo. Comparada às demais alternativas usuais, como bóias e radares, os procedimentos de instalação são, assim, muito mais simples e os custos envolvidos, significativamente menores.

Como trabalhos futuros nesta área, os resultados apresentados permitem antever aplicações importantes, como a monitoração a partir de embarcações ou sistemas estacionários em regiões nas quais bóias oceanográficas não se

encontrem disponíveis. Qualquer casco pode ser utilizado, inclusive embarcações durante a navegação, já que a inclusão da velocidade de avanço pode ser realizada sem maiores problemas. Basta, portanto, conhecer as propriedades geométricas e inércias do casco em questão e realizar a devida calibração do método para o mesmo, nos mesmos moldes daquela efetuada neste projeto para o navio VLCC e para a balsa BGL-1. Outros sistemas também podem ser propostos, como embarcações de lançamento de *risers* e até mesmo rebocadores, nestes evidentemente tomadas as devidas cautelas quanto à questão da variação do aproamento, tipicamente altas para estas embarcações. Monobóias também configuram uma opção, embora, neste caso, deva-se ainda estudar a viabilidade de representar adequadamente sua dinâmica, especialmente durante a atracação de navios às mesmas.

Por fim, é importante mencionar que, para a monitoração de sistemas fundeados, os procedimentos matemáticos para a monitoração por movimentos de primeira ordem deste texto encontram-se praticamente concluídos. Para operacionalizar a metodologia, restaria apenas o desenvolvimento de um pacote que incluía a instrumentação e o *software* de análise. A instrumentação consistiria de uma base inercial com os devidos sensores (acelerômetros e *rate-gyros*), a ser instalada em um ponto específico da embarcação, e o *software* faria, por exemplo, a interface com sistemas de medição de carga (importante no caso dos FPSOs, por exemplo) e de monitoração do aproamento, além da estimação propriamente dita e permitir a visualização e o registro dos resultados.

8. BIBLIOGRAFIA

Audunson, T.; Barstow, S.F.; Krogstad, H.E. (1982). *Analysis of wave directionality from heave, pitch and roll buoy operated offshore Norway*. Ocean Sci. Eng., **7**, pp. 291-319.

Benoit, M. (1992). *Practical comparative performance survey of methods used for estimating directional wave spectra from heave-pitch-roll data*. In Proc. 23rd Conf. Coastal Engng., **1**, pp. 62-75, Venice.

Benoit, M. and Teisson, C. (1994). *Laboratory comparison of directional wave measurement systems and analysis techniques*. In Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engng., **1**, pp. 42-56, Kobe, Japan.

Besnard, J.C. and Benoit, M. (1994). *Representative directional wave parameters – Review and comparison on numerical simulations*. Int. Symp: Waves physical and numerical modelling, pp. 901-910.

Borge, J. C. N.; Hessner, K.; Reichert, K. (1999). *Estimation of the Significant Wave Height with X-Band Nautical Radars*, Proceedings of the 19th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE1999, St. John's, Canada.

Diretrizes para apresentação de dissertações e teses (2006), Divisão de Biblioteca da EPUSP, 3^a edição.

Ewans, K.C.; van der Vlugt, T. (1999). *Estimating Bimodal Frequency-Direction Spectra from Surface Buoy Data Recorded during Tropical Cyclones*, J. of Offshore Mech. And Arctic Engng, **121**, pp. 172-180.

Glad, I.K. and Krogstad, H.E. (1992). *The maximum-likelihood property of estimators of wave parameters from heave, pitch and roll buoys*. J. Atmospheric and Oceanic Technol., **9**, 2, pp. 169-73.

Graham, R.; Juszko, B.A. (1993). *Parameterization of Directional Spectra and its Influence on Ship Motion Predictions*, Journal of Ship Research, **37**, N°. 2, pp. 138-147.

Hashimoto, N; Kobune, K. (1988). *Directional spectrum estimation from a Bayesian approach*. In Proc. Coastal Engng. Conf., **1**, Costa del Sol-Malaga, Spain, pp. 62-76

Herbers, T.H.C.; Guza, R.T. (1990). *Estimation of Directional Wave Spectra from Multicomponent Observations*. J. of Phys. Oceanogr., **20**, No 11, pp. 1703-1724.

Iseki, T.; Ohtsu, K. (2000) *Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions*, Control Eng. Practice, **8**, pp. 215-219.

Iseki, T. (2004); *Extended Bayesian Estimation of Directional Wave Spectra*. Proc. of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, paper OMAE2004-51609.

Kobune, K. and Hashimoto, N. (1986); *Estimation of directional spectra from the maximum entropy principle*, In Proc. 5th Symp. Offshore Mech. And Arch. Eng., 80-85

Laboratório de Tecnologia Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LabOceano) (2007); Ensaio para medição de espectro direcional dos modelos P-35 e BGL-1; Relatório Técnico.

Long, R.B. and Hasselmann, K. (1979); *A variational technique for extracting directional spectra from multicomponent wave data*. J. Phys. Oceanogr., **9**, pp. 373-81.

Long, R.B. (1980); *The statistical evaluation of directional spectrum estimates derived from pitch/roll buoy data*. J. Phys. Oceanogr., **10**, pp. 944-52.

Longuet-Higgins, M.S.; Cartwright, D.E.; Smith, N.D. (1961) *Observations of the directional spectrum of sea waves using the motion of a floating buoy*, In Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, pp. 111-132.

Lygre, A. and Krogstad, H.E. (1986). *Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra*. J. Phys. Oceanogr., **16**, pp. 2052-60.

Muñoyerro, M.A.A.; Borge, J.C.N. (1997). *Directional wave navigation radar measurements compared with pitch-roll buoy data*, J. Offshore Mech. and Arctic Engng, **119**, pp. 25-29.

Ochi, M. K. (1998), *Ocean Waves – The Stochastic Approach*, Cambridge Ocean Technology Series **6**.

Pascoal, R.; Guedes Soares, C.; Sorensen, A.J. (2005), *Ocean Wave Spectral Estimation Using Vessel Wave Frequency Motions*, Proceedings of OMAE05 – 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 12-17, Haikidiki, Greece.

Pawka, S.S. (1983). *Island shadows in wave directional spectra*. J. Geophys. Res, **88**, pp. 2579-81.

Reichert, K., et al. (1999). *WaMoSII: A radar based wave and current monitoring system*. Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Eng. Conference, ISOPE99, Brest, France.

Seixas, N. A. B. (1997). *Clima de Ondas da Bacia de Campos: Análise dos Dados e Proposta de Parametrização*. Tese de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro.

Simos, A.N.; Sparano, J.V.; Tannuri, E.A., Matos, V.L.F. (2007). *Directional Wave Spectrum Estimation Based on a Vessel 1st Order Motions: Field Results*. The 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE2007, Lisbon, Portugal (submitted).

Stansberg, C.T. (1998). *On the Fourier Series Decomposition of Directional Wave Spectra*, Proc. of the 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conference, Montreal, Canada.

Takekuma, K; Takahashi, T. (1973). On the Evaluation of Sea Spectra based on the Measured Ship Motions. Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, N^o 45, pp. 51-57.

Tannuri, E.A.; Sparano, J.V.; Simos, A.N; Da Cruz, J.J. (2001). *Directional Wave Spectrum Base don Moored FPSO Motions*. Proc. Of the 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, paper OMAE01/OFT-1094.

Tannuri, E.A. (2002). *Development of Methodology for Design of Dynamic Positioning Systems Applied to Offshore Operations*, (in Portuguese), Phd Thesis at University of São Paulo, Brazil.

Tannuri, E.A.; Sparano, J.V.; Simos, A.N.; Da Cruz, J.J. (2004). *Estimating Directional Wave Spectrum Base don Stationary Ship Motion Measurements*. Appl. Ocean Res., **25**, pp. 243-261.

Tannuri, E. A., Mello, P. C., Sales Junior, J. S., Simos, A.N., Matos, V. L. F. (2007), *Estimation of directional wave spectrum using a wave-probe array* Proceedings of 3rd International Workshop on Applied Offshore Hydrodynamics, Rio de Janeiro, Brasil.

Walls, O.J.; Aalbers, A.B.; Pinkster, J.A. (2002). *Maximum Likelihood Method as a means to Estimate the Directional Wave Spectrum and the Mean Wave Drift Force and a Dynamically Positioned Vessel*, Proceedings of the 21st Offshore Mechanics and Artic Engineering Conference, OMAE2002, Oslo, Norway.

WAMIT[®] (2004), *A radiation-diffraction panel program for wave-body interactions, User Manual Version 6.2*, WAMIT Inc.

**APÊNDICE A – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MÉTODO
BAYESIANO À DISCRETIZAÇÃO DO RAO E VARIAÇÃO DAS
ESTATÍSTICAS E DOS MAPAS ESPECTRAIS COM O
PARÂMETRO “ u ”: EXEMPLO**

As figuras abaixo mostram a análise de sensibilidade dos parâmetros “Altura Significativa (Hs)”, “Período de Pico (Tp)” e “Direção Média de Incidência do Espectro (Dir)” para o VLCC P-35 em três condições de carregamento (cheio, intermediário e lastro) e para a BGL-1 em condição de calado único. Os parâmetros supracitados na realidade são expressos como ΔH_s , ΔT_p e ΔDir em termos de porcentagem, ou seja, é tomada a diferença percentual entre o valor calculado em relação ao anterior, até a convergência. Apenas a título de ilustração, os resultados referem-se a um ensaio realizado no LabOceano, em especial um mar de $H_s = 4.48\text{m}$ e $T_p = 10.3\text{s}$ e direção de incidência 90° .

Nas figuras, NPER é o número de períodos e NDIR o número de direções de incidência para o qual foram calculados os RAOs das embarcações.

Figura A-1: ΔH_s (%) x NPER: P-35 e BGL-1

Figura A-2: ΔT_p (%) x NPER: P-35 e BGL-1

Figura A-3: ΔDir (%) x NPER: P-35 e BGL-1

Figura A-4: ΔH_s (%) x NDIR: P-35 e BGL-1

Figura A-5: ΔTp (%) x NDIR: P-35 e BGL-1

Figura A-6: ΔDir (%) x NDIR: P-35 e BGL-1

Como dito no Capítulo 4, as estatísticas do espectro, parâmetros mais importante da estimação bayesiana, são muito pouco afetadas pela variação do parâmetro “ u ”. Como este suaviza o espectro ao longo das direções, conclui-se que os mapas de espectro são aqueles mais afetados pela variação de “ u ”. Mesmo assim, neste capítulo pode-se ver que mesmo nos mapas a alteração não é tão significativa comparada à magnitude de variação de “ u ”. Isto se justifica com o exemplo abaixo:

Considere o FPSO P35 calado cheio, sujeito a um mar bimodal cujo espectro global tem, em escala real, $H_s = 1.49\text{m}$, $T_p = 11.4\text{s}$, e cujo mapa de espectro experimental é mostrado na Figura A-7 abaixo:

Figura A-7: Espectro Experimental: Caso Bimodal P35 calado cheio

Este mar bimodal corresponde às duas ondas vindo de mesma direção: -30° em relação ao referencial do LabOceano. Como o FPSO está aproado a 120° , em relação ao navio tem-se um mar de través (90°).

Então, para este caso, efetuou-se a estimativa Bayesiana com três valores de “ u ”: o primeiro, $u_1 = 0.07$, conforme discutido no Capítulo 4, o segundo, $u_2 = 0.0035$, e, por fim, $u_3 = 1$. Lembrando que quanto maior “ u ”, mais suave o espectro fica com as direções, ou seja, corre-se o risco até de “achatar” as magnitudes do mesmo com um valor de “ u ” muito alto.

É evidente que $u_3 \gg u_1 \gg u_2$ e, para estes valores, as estatísticas estimadas encontram-se na Tabela A-1 abaixo:

Tabela A-1: H_s (m), T_p (s) e θ (°) x “ u ” para FPSO P35 cheio – mar bimodal ($H_s = 1.49\text{m}$, $T_p = 11.4\text{s}$ e $\theta = 105.0407^\circ$)

u	H_s (m)	T_p (s)	θ (°)
0.07	1.687	10.34	118.70
0.0035	1.694	10.34	119.96
1	1.582	9.747	104.55

Pela análise da tabela acima, pode-se ver que os erros percentuais, com relação ao valor experimental, para H_s , T_p são, respectivamente, no máximo 13% ($u = 0.0035$) e 14% ($u = 1$); e para a direção, 14° ($u = 0.0035$).

Em outras palavras, aumentando “ u ” de 0.0035 para 1 (aumento de 28000%), H_s melhorou 7%, T_p piorou 5% e a direção melhorou 14° , o que mostra que as estatísticas do espectro estimado pelo método bayesiano realmente não são muito sensíveis ao parâmetro “ u ”.

Os mapas de espectro para cada um dos valores de “ u ” encontram-se na Figura A-8 abaixo.

Como se pode ver, para muito baixos valores de “ u ” o mapa de espectro é muito pouco suavizado com a direção, isto é, com “cantos vivos” e com a impressão de estar pouco discretizado (todos os espectros estimados da Figura A-8 acima têm o mesmo número de pontos, pois foi usado do mesmo RAO para os cálculos). Já para valores exageradamente altos de “ u ”, como $u = 1$, vê-se que o espectro até perdeu seu pico secundário (faixa de 50° a 100° com relação ao referencial do LabOceano, ou seja, 170° a 220° em relação ao navio), mas foi “achatado” em magnitude, como se pode ver pela mudança na escala de cinza.

Figura A-8: Mapas de Espectro x " u ": FPSO P35 cheio; mar bimodal

Assim, conclui-se que realmente o método bayesiano é muito pouco influenciado pelo parâmetro " u " no que se refere às estatísticas do espectro, mais uma vez os parâmetros mais importantes sob o ponto de vista prático de uma estimativa espectral. A influência se dá no espalhamento direcional, como visto nos mapas espectrais acima.

**APÊNDICE B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O FPSO
P-35 CALADO CHEIO**

Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais

P35C90I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	4.58 (0.25%)
Tp (s)	10.12	10.34 (-2.18%)
Dir. relativa (graus)	89.87	86.91 (2.96°)

Figura B-1: Resultados experimentais - ensaio P35C90I1

P35C90I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	8.24 (-2.33%)
Tp (s)	14.56	15.09 (-3.68%)
Dir. relativa (graus)	91.08	95.29 (-4.21°)

Figura B-2: Resultados experimentais – ensaio P35C90I2

P35C90I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.67	5.56 (-19.07%)
Tp (s)	10.12	10.34 (-2.18%)
Dir. relativa (graus)	90.70	95.87 (-5.17°)

Figura B-3: Resultados experimentais – ensaio P35C90I3

P35C90I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	5.55 (-19.86%)
Tp (s)	10.12	10.34 (-2.18%)
Dir. relativa (graus)	92.48	92.48 (-0.01%)

Figura B-4: Resultados experimentais – ensaio P35C90I4

P35C135I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	3.61 (21.48%)
Tp (s)	10.12	10.08 (0.44%)
Dir. relativa (graus)	134.87	135.36 (-0.49°)

Figura B-5: Resultados experimentais – ensaio P35C135I1

P35C135I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	7.77 (3.47%)
Tp (s)	14.56	14.90 (-2.35%)
Dir. relativa (graus)	136.08	121.86 (14.22°)

Figura B-6: Resultados experimentais – ensaio P35C135I2

P35C135I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.67	3.96 (15.10%)
Tp (s)	10.12	10.08 (0.44%)
Dir. relativa (graus)	135.70	127.23 (8.47°)

Figura B-7: Resultados experimentais – ensaio P35C135I3

P35C135I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	4.35 (6.16%)
Tp (s)	10.12	9.79 (3.28%)
Dir. relativa (graus)	137.48	130.53 (6.95°)

Figura B-8: Resultados experimentais – ensaio P35C135I4

Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais

P35C120B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.48	1.60 (-8.66%)
Tp (s)	11.40	10.34 (9.29%)
Dir. relativa (graus)	117.95	118.24 (-0.29°)

Figura B-9: Resultados experimentais – ensaio P35C120B1

P35C120B2

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

1.79

7.30

107.57

Bayesiano

1.64 (8.18%)

7.62 (-4.38%)

96.68 (10.89°)

Figura B-10: Resultados experimentais – ensaio P35C120B2

P35C120B3

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

0.97

11.40

120.39

Bayesiano

0.73 (25.33%)

10.08 (11.61%)

126.52 (-6.13°)

Figura B-11: Resultados experimentais – ensaio P35C120B3

P35C120B4

Hs (m)

Experimental

2.11

Bayesiano

2.30 (-8.69%)

Tp (s)

11.40

10.34 (9.29%)

Dir. relativa (graus)

118.70

124.13 (-5.43°)

Figura B-12: Resultados experimentais – ensaio P35C120B4

P35C120B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.49	1.69 (-13.27%)
Tp (s)	11.40	10.34 (9.29%)
Dir. relativa (graus)	105.04	118.71 (-13.67°)

Figura B-13: Resultados experimentais – ensaio P35C120B5

P35C150B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.48	1.47 (0.29%)
Tp (s)	11.40	10.38 (8.94%)
Dir. relativa (graus)	147.95	140.91 (7.04°)

Figura B-14: Resultados experimentais – ensaio P35C150B1

P35C150B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.79	0.94 (47.54%)
Tp (s)	7.30	9.26 (-26.95%)
Dir. relativa (graus)	137.57	131.20 (6.37%)

Figura B-15: Resultados experimentais – ensaio P35C150B2

P35C150B3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	0.97	0.53 (45.51%)
Tp (s)	11.40	10.38 (8.94%)
Dir. relativa (graus)	150.39	168.07 (-17.68°)

Figura B-16: Resultados experimentais – ensaio P35C150B3

P35C150B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.11	2.21 (-4.35%)
Tp (s)	11.40	10.38 (8.94%)
Dir. relativa (graus)	148.70	143.56 (5.15%)

Figura B-17: Resultados experimentais – ensaio P35C150B4

P35C150B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.49	1.40 (6.08%)
Tp (s)	11.40	10.34 (9.29%)
Dir. relativa (graus)	135.04	131.03 (4.01°)

Figura B-18: Resultados experimentais – ensaio P35C150B5

**APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O FPSO
P-35 CALADO INTERMEDIÁRIO**

Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais

P35I90I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	4.64 (-0.98%)
Tp (s)	10.12	9.16 (9.55%)
Dir. relativa (graus)	89.87	90.86 (-0.99°)

Figura C-1: Resultados experimentais – ensaio P35I90I1

P35I90I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	8.25 (-2.47%)
Tp (s)	14.56	15.09 (-3.68%)
Dir. relativa (graus)	91.08	90.36 (0.72°)

Figura C-2: Resultados experimentais – ensaio P35I90I2

P35I90I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.67	5.43 (-16.36%)
Tp (s)	10.12	9.16 (9.55%)
Dir. relativa (graus)	90.70	91.71 (-1.01°)

Figura C-3: Resultados experimentais – ensaio P35I90I3

P35I90I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	5.35 (-15.52%)
Tp (s)	10.12	9.16 (9.55%)
Dir. relativa (graus)	92.48	101.87 (-9.40°)

Figura C-4: Resultados experimentais – ensaio P35I90I4

P35I135I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	3.56 (22.40%)
Tp (s)	10.12	10.71 (-5.78%)
Dir. relativa (graus)	134.87	145.05 (-10.19°)

Figura C-5: Resultados experimentais – ensaio P35I135I1

P35I135I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	7.69 (4.42%)
Tp (s)	14.56	14.90 (-2.35%)
Dir. relativa (graus)	136.08	135.58 (0.50°)

Figura C-6: Resultados experimentais – ensaio P35I135I2

P35I135I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.67	3.95 (15.33%)
Tp (s)	10.12	9.52 (5.97%)
Dir. relativa (graus)	135.70	148.22 (-12.52°)

Figura C-7: Resultados experimentais – ensaio P35I135I3

P35I135I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	4.30 (7.19%)
Tp (s)	10.12	9.52 (5.97%)
Dir. relativa (graus)	137.48	140.71 (-3.23°)

Figura C-8: Resultados experimentais – ensaio P35I135I4

Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais

P35I120B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.48	1.50 (-1.33%)
Tp (s)	11.40	9.75 (14.50%)
Dir. relativa (graus)	117.95	124.95 (-7.00%)

Figura C-9: Resultados experimentais – ensaio P35I120B1

P35I120B2

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

1.79

7.30

107.57

Bayesiano

1.70 (4.89%)

7.45 (-2.11%)

101.13 (6.45°)

Figura C-10: Resultados experimentais – ensaio P35I120B2

P35I120B3

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

0.97

11.40

120.39

Bayesiano

0.73 (24.94%)

10.08 (11.61%)

136.92 (-16.53°)

Figura C-11: Resultados experimentais – ensaio P35I120B3

P35I120B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.11	2.19 (-3.83%)
Tp (s)	11.40	9.75 (14.50%)
Dir. relativa (graus)	118.70	129.23 (-10.53°)

Figura C-12: Resultados experimentais – ensaio P35I120B4

P35I120B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.49	1.58 (-5.73%)
Tp (s)	11.40	9.75 (14.50%)
Dir. relativa (graus)	105.04	114.82 (-9.78°)

Figura C-13: Resultados experimentais – ensaio P35I120B5

P35I150B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.48	1.42 (4.04%)
Tp (s)	11.40	9.79 (14.14%)
Dir. relativa (graus)	147.95	146.68 (1.27°)

Figura C-14: Resultados experimentais – ensaio P35I150B1

P35I150B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.79	1.14 (36.37%)
Tp (s)	7.30	9.02 (-23.61%)
Dir. relativa (graus)	137.57	129.05 (8.52°)

Figura C-15: Resultados experimentais – ensaio P35I150B2

P35I150B3

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

0.97

11.40

150.39

Bayesiano

0.57 (40.93%)

11.42 (-0.17%)

166.55 (-16.16°)

Figura C-16: Resultados experimentais – ensaio P35I150B3

P35I150B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.11	2.14 (-1.06%)
Tp (s)	11.40	9.79 (14.14%)
Dir. relativa (graus)	148.70	150.08 (-1.38°)

Figura C-17: Resultados experimentais – ensaio P35I150B4

P35I150B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.49	1.53 (-2.58%)
Tp (s)	11.40	9.79 (14.14%)
Dir. relativa (graus)	135.04	142.99 (-7.95°)

Figura C-18: Resultados experimentais – ensaio P35I150B5

**APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O FPSO
P-35 CALADO DE LASTRO**

Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais

P35L90I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	4.73 (-2.98%)
Tp (s)	10.12	9.75 (3.69%)
Dir. relativa (graus)	89.87	89.26 (0.61°)

Figura D-1: Resultados experimentais – ensaio P35L90I1

P35L90I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	8.14 (-1.10%)
Tp (s)	14.56	13.91 (4.48%)
Dir. relativa (graus)	91.08	89.99 (1.10°)

Figura D-2: Resultados experimentais – ensaio P35L90I2

P35L90I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.67	5.17 (-10.77%)
Tp (s)	10.12	10.34 (-2.18%)
Dir. relativa (graus)	90.70	105.37 (-14.67°)

Figura D-3: Resultados experimentais – ensaio P35L90I3

P35L90I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	4.81 (-3.83%)
Tp (s)	10.12	10.94 (-8.04%)
Dir. relativa (graus)	92.48	107.15 (-14.68°)

Figura D-4: Resultados experimentais – ensaio P35L90I4

P35L135I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.59	3.84 (16.28%)
Tp (s)	10.12	10.38 (-2.58%)
Dir. relativa (graus)	134.87	151.20 (-16.33°)

Figura D-5: Resultados experimentais – ensaio P35L135I1

P35L135I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.05	7.80 (3.07%)
Tp (s)	14.56	13.71 (5.84%)
Dir. relativa (graus)	136.08	141.40 (-5.32°)

Figura D-6: Resultados experimentais – ensaio P35L135I2

P35L135I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.67	3.92 (16.12%)
Tp (s)	10.12	9.52 (5.97%)
Dir. relativa (graus)	135.70	150.11 (-14.41°)

Figura D-7: Resultados experimentais – ensaio P35L135I3

P35L135I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	3.98 (14.21%)
Tp (s)	10.12	11.42 (-12.84%)
Dir. relativa (graus)	137.48	144.87 (-7.40°)

Figura D-8: Resultados experimentais – ensaio P35L135I4

Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais

P35L120B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.48	1.49 (-0.71%)
Tp (s)	11.40	11.42 (-0.17%)
Dir. relativa (graus)	117.95	123.03 (-5.08°)

Figura D-9: Resultados experimentais – ensaio P35L120B1

P35L120B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.79	1.72 (3.63%)
Tp (s)	7.30	7.14 (2.14%)
Dir. relativa (graus)	107.57	107.91 (-0.34°)

Figura D-10: Resultados experimentais – ensaio P35L120B2

P35L120B3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	0.97	0.71 (27.27%)
Tp (s)	11.40	11.82 (-3.62%)
Dir. relativa (graus)	120.39	133.47 (-13.08°)

Figura D-11: Resultados experimentais – ensaio P35L120B3

P35L120B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.11	2.10 (0.04%)
Tp (s)	11.40	10.94 (4.09%)
Dir. relativa (graus)	118.70	109.25 (-4.21°)

Figura D-12: Resultados experimentais – ensaio P35L120B4

P35L120B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.49	1.49 (0.04 %)
Tp (s)	11.40	10.94 (4.09%)
Dir. relativa (graus)	105.04	109.25 (-4.21°)

Figura D-13: Resultados experimentais – ensaio P35L120B5

P35L150B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.48	1.33 (9.63%)
Tp (s)	11.40	11.42 (-0.17%)
Dir. relativa (graus)	147.95	149.40 (-1.45°)

Figura D-14: Resultados experimentais – ensaio P35L150B1

P35L150B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.79	1.21 (32.19%)
Tp (s)	7.30	8.57 (-17.43%)
Dir. relativa (graus)	137.57	146.15 (-8.58%)

Figura D-15: Resultados experimentais – ensaio P35L150B2

P35L150B3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	0.97	0.58 (40.27%)
Tp (s)	11.40	11.05 (3.06%)
Dir. relativa (graus)	150.39	165.60 (-15.21°)

Figura D-16: Resultados experimentais – ensaio P35L150B3

P35L150B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.11	1.99 (5.95%)
Tp (s)	11.40	11.42 (-0.17%)
Dir. relativa (graus)	148.70	151.40 (-2.70°)

Figura D-17: Resultados experimentais – ensaio P35L150B4

P35L150B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.49	1.44 (3.14%)
Tp (s)	11.40	12.24 (-7.33%)
Dir. relativa (graus)	135.04	143.80 (-8.76°)

Figura D-18: Resultados experimentais – ensaio P35L150B5

**APÊNDICE E – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A
BALSA GUINDASTE E LANÇAMENTO (BGL-1) EM CALADO
OPERACIONAL**

Ensaio em Mares Unimodais – Resultados experimentais

BGL90I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.34	4.83 (-11.32%)
Tp (s)	10.88	10.23 (5.91%)
Dir. relativa (graus)	90.94	89.62 (1.32°)

Figura E-1: Resultados experimentais – ensaio BGL90I1

BGL90I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.04	8.52 (-6.03%)
Tp (s)	15.49	14.41 (7.00%)
Dir. relativa (graus)	92.19	91.56 (0.63°)

Figura E-2: Resultados experimentais – ensaio BGL90I2

BGL90I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	5.22 (-12.87%)
Tp (s)	9.87	9.54 (3.38%)
Dir. relativa (graus)	90.48	88.16 (2.32°)

Figura E-3: Resultados experimentais – ensaio BGL90I3

BGL90I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.54	4.94 (-8.73%)
Tp (s)	10.32	10.23 (0.86%)
Dir. relativa (graus)	91.43	87.29 (4.14°)

Figura E-4: Resultados experimentais – ensaio BGL90I4

BGL135I1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.34	4.71 (-8.48%)
Tp (s)	10.88	10.93 (-0.48%)
Dir. relativa (graus)	135.94	126.17 (9.77%)

Figura E-5: Resultados experimentais – ensaio BGL135I1

BGL135I2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	8.04	9.00 (-11.90%)
Tp (s)	15.49	15.80 (-1.97%)
Dir. relativa (graus)	137.19	126.63 (10.56%)

Figura E-6: Resultados experimentais – ensaio BGL135I2

BGL135I3	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.63	4.80 (-3.75%)
Tp (s)	9.87	10.23 (-3.66%)
Dir. relativa (graus)	135.48	124.29 (11.19°)

Figura E-7: Resultados experimentais – ensaio BGL135I3

BGL135I4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	4.54	4.42 (2.73%)
Tp (s)	10.32	10.23 (0.86%)
Dir. relativa (graus)	136.43	126.77 (9.66°)

Figura E-8: Resultados experimentais – ensaio BGL135I4

Ensaio em Mares Bimodais – Resultados experimentais

BGL120B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.62	1.58 (2.75%)
Tp (s)	11.43	10.93 (4.39%)
Dir. relativa (graus)	120.81	117.11 (3.70°)

Figura E-9: Resultados experimentais – ensaio BGL120B1

BGL120B2	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.93	2.08 (-7.32%)
Tp (s)	7.48	7.45 (0.39%)
Dir. relativa (graus)	109.56	106.56 (3.00°)

Figura E-10: Resultados experimentais – ensaio BGL120B2

BGL120B3

Hs (m)

Experimental

1.22

Bayesiano

1.26 (-3.73%)

Tp (s)

5.33**5.37 (-0.61%)**

Dir. relativa (graus)

119.97**126.93 (-6.96°)** **Figura E-11: Resultados experimentais – ensaio BGL120B3**

BGL120B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.14	2.15 (-0.74%)
Tp (s)	11.43	10.93 (4.39%)
Dir. relativa (graus)	119.33	115.43 (3.90°)

Figura E-12: Resultados experimentais – ensaio BGL120B4

BGL120B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.59	1.68 (-5.69%)
Tp (s)	12.06	10.93 (9.34%)
Dir. relativa (graus)	105.61	110.01 (-4.40°)

Figura E-13: Resultados experimentais – ensaio BGL120B5

BGL150B1	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.62	1.59 (1.99%)
Tp (s)	11.43	11.63 (-1.69%)
Dir. relativa (graus)	150.81	140.32 (10.49%)

Figura E-14: Resultados experimentais – ensaio BGL150B1

BGL150B2

Hs (m)

Tp (s)

Dir. relativa (graus)

Experimental

1.93**7.48****139.56**

Bayesiano

1.90 (1.56%)**6.76 (9.68%)****132.70 (6.87°)** **Figura E-15: Resultados experimentais – ensaio BGL150B2**

BGL150B3

Hs (m)

Experimental

1.22

Bayesiano

1.20 (1.58%)

Tp (s)

5.33**5.37 (-0.61%)**

Dir. relativa (graus)

149.97**156.87 (-6.90°)** **Figura E-16: Resultados experimentais – ensaio BGL150B3**

BGL150B4	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	2.14	2.13 (0.12%)
Tp (s)	11.43	10.93 (4.39%)
Dir. relativa (graus)	149.33	142.40 (6.94°)

Figura E-17: Resultados experimentais – ensaio BGL150B4

BGL150B5	Experimental	Bayesiano
Hs (m)	1.59	1.65 (-4.07%)
Tp (s)	12.06	11.63 (3.57%)
Dir. relativa (graus)	135.61	127.27 (8.34°)

Figura E-18: Resultados experimentais – ensaio BGL150B5

APÊNDICE F - RESULTADOS FPSO P-35 EM ESCALA REAL

Figura F-1: Resultados escala real: caso 1

Figura F-2: Resultados escala real: caso 2

Figura F-3: Resultados escala real: caso 3

Figura F-4: Resultados escala real: caso 4

Figura F-5: Resultados escala real: caso 5

Figura F-6: Resultados escala real: caso 6

Figura F-7: Resultados escala real: caso 7

Figura F-8: Resultados escala real: caso 8

Figura F-9: Resultados escala real: caso “Extra 2”

Figura F-10: Resultados escala real: caso “Extra 3”

**APÊNDICE G - RAOs P-35 CALADOS INTERMEDIÁRIO E
LASTRO E BGL-1**

Figura G-1: RAOs P-35 calado intermediário

Figura G-2: RAOs P-35 Calado de Lastro

Figura G-3: RAOs BGL-1