



COPPE/UFRJ

METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE CARTAS DE CORRENTES DE  
MARÉ EM SISTEMAS ESTUARINOS E RECINTOS PORTUÁRIOS  
COM APLICAÇÃO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BA

Vicente Barroso Junior

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

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro  
Março de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE CARTAS DE CORRENTES DE  
MARÉ EM SISTEMAS ESTUARINOS E RECINTOS PORTUÁRIOS  
COM APLICAÇÃO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BA

Vicente Barroso Junior

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

Aprovada por:

---

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.

---

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Albano Ribeiro Alves, D.Sc.

---

Prof. Mauro Cirano, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2009

Barroso Junior, Vicente

Metodologia para Geração de Cartas de Correntes de Maré em Sistemas Estuarinos e Recintos Portuários com Aplicação na Baía de Todos os Santos, BA / Vicente Barroso Junior – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2009.

XIX, 157 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Oceânica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 153-157.

1. Cartas de Correntes de Maré. 2. Modelagem Hidrodinâmica. 3. Baía de Todos os Santos. I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Para minha mulher Arleuda e minha futura filha Gabriela,  
as estrelas que iluminam minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por ter me concedido a saúde física e mental que permitissem levar a cabo essa tarefa.

Aos meus pais Vicente Barroso e Vera Lúcia, pelo amor e incentivo em todas as etapas profissionais da minha vida.

Ao professor Paulo Cesar Colonna Rosman, pela paciente orientação, por seus direcionamentos no estudo e pelo tratamento recebido, sem os quais não teria sido possível a elaboração deste trabalho.

Aos demais professores do Programa de Engenharia Oceânica, pela forma sempre segura e profissional com que souberam transmitir seus valiosos conhecimentos.

Aos professores Mauro Cirano e Guilherme Lessa da UFBA, pela atenção e boa vontade no envio do material solicitado, que me foi de grande valia.

Ao professor Albano Ribeiro Alves e ao Comte. Marcelo Fricks Cavalcante, pelas sábias idéias e sugestões que ofereceram novo rumo no desenvolvimento de meus trabalhos.

Aos demais professores do Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais – 2000, os quais muito contribuíram para formação de minha base profissional e solidificaram meus primeiros conhecimentos nas lides hidrográficas.

A minha esposa Arleuda Barroso, pelo amor, compreensão, incentivo e ajuda carinhosa recebida, principalmente durante o acabamento deste trabalho.

A todos aqueles que me forneceram dados importantes, em especial aos Comandantes Luiz Carlos Torres, Alexandre Moreira Ramos, Rosuita Roso, Aluísio e Ten. Borba.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Costeira, em especial ao Daniel Alves e à Clarisse Lacerda pelo companheirismo e amizade.

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

METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE CARTAS DE CORRENTES DE  
MARÉ EM SISTEMAS ESTUARINOS E RECINTOS PORTUÁRIOS  
COM APLICAÇÃO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BA

Vicente Barroso Junior

Março/2009

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta uma metodologia para geração de prognósticos de correntes, em sistemas estuarinos e recintos portuários, que servirão de subsídios para atualização e modernização das Cartas de Correntes de maré astronômica atualmente em vigor. Os prognósticos de correntes foram gerados por meio do uso de modelagem computacional tridimensional. Como ferramenta de modelagem, foi empregado o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA 6.5. Uma aplicação piloto da metodologia foi realizada no sistema estuarino da Baía de Todos os Santos (BTS), BA. A calibração e validação do modelo foram realizadas por meio de dados coletados durante duas campanhas (verão e inverno) realizadas no ano de 1999, por ocasião do Programa Bahia Azul. Como produto final, chegaremos a protótipos de Cartas de Correntes de maré para Baía de Todos os Santos e algumas localidades de interesse marítimo em seu interior.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

METHODOLOGY FOR TIDAL CURRENT CHARTS GERATION IN  
ESTUARINES COMPLEXES AND PORT AREAS WITH APLICATION  
IN TODOS OS SANTOS BAY, BRAZIL

Vicente Barroso Junior

March/2009

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

This work presents a methodology for prognostic generation of tidal currents in estuarine systems and port areas, that should be useful as aid in modernization and updating astronomic Tidal Current Charts, currently in use. The current prognostics were generated by three-dimensional computational modeling. The hydrodynamic model SisBaHiA 6.5 was used as a modeling tool. A pilot application of the methodology was carried out at Todos os Santos Bay (TSB) estuarine system, Brazil. Model calibration and validation were performed with data collected during two campaigns (summer and winter) in the course of year 1999, on the occasion of Bahia Azul Program. As our final product, we will obtain the prototypes of Tidal Current Charts of TSB and some places of marine interest in the TSB interior.

## SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA .....	iii
DEDICATÓRIA .....	iv
AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
SUMÁRIO .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABELAS .....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações gerais .....	1
1.2 Objetivos e desenvolvimento do trabalho .....	5
1.3 Sistema de unidades .....	8
2. MARÉS E CORRENTES DE MARÉ EM ESTUÁRIOS.....	9
3. CARTAS DE CORRENTES DE MARÉ.....	18
4. REGIÃO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	25
5. MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE SISTEMAS ESTUARINOS .....	32
5.1 Escolha da ferramenta de modelagem .....	33
5.2 Usos precedentes do SisBaHiA na região da BTS .....	34
5.3 Alguns fundamentos do modelo hidrodinâmico.....	35
5.4 Síntese das equações governantes .....	37
6. CONFIGURAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....	41
6.1 Dados de contorno de terra.....	42
6.2 Malha de discretização .....	43
6.3 Dados de batimetria.....	45
6.4 Rugosidade equivalente do fundo .....	48
6.4.1 Tratamento de áreas com afloramento.....	50
6.4.2 Calibração da rugosidade.....	52
6.5 Condições de contorno da fronteira aberta.....	54
6.6 Dados de vento .....	61

6.7	Vazões fluviais .....	63
6.8	Tipos de nós do contorno de terra .....	65
6.9	Outros parâmetros e desempenho do modelo.....	67
7.	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....	69
7.1	Calibração do modelo hidrodinâmico.....	70
7.1.1	Variações de níveis.....	71
7.1.1.1	Comparação entre séries temporais de níveis.....	71
7.1.1.2	Comparação entre constantes harmônicas de maré.....	76
7.1.2	Comparação de correntes .....	84
7.1.3	Síntese da calibração .....	103
7.2	Validação do modelo hidrodinâmico.....	105
7.2.1	Comparação entre séries temporais de níveis.....	106
7.2.2	Comparação de Correntes.....	109
7.2.3	Síntese da validação.....	125
7.3	Resumo da calibração e validação.....	126
8.	SIMULAÇÕES DE GERAÇÃO DAS CARTAS .....	128
8.1	Interferência dos ventos nas correntes.....	129
8.2	Interferência de variações do NMM nas correntes.....	135
8.3	Interferência de correntes residuais .....	136
8.4	Resumo da coerência dos resultados obtidos com características da circulação interna na BTS.....	136
9.	APRESENTAÇÃO DAS CARTAS DE CORRENTES .....	141
10.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	148
	REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA.....	153

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes tipos de usuários com interesse em informações sobre correntes .....	6
Figura 2 – Aspecto giratório das correntes de maré medidas em uma região de plataforma oceânica em comparação com aspecto axial das correntes medidas no interior de uma baía.....	11
Figura 3 – Onda de maré estacionária em um estuário retangular idealizado sem efeito de atrito.....	13
Figura 4 – Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética idealizada do tipo puramente estacionária .....	14
Figura 5 – Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética idealizada do tipo puramente progressiva.....	15
Figura 6 – Carta de Correntes de Maré do Porto de Salvador, BA, correspondente a três horas depois da preamar de sizígia .....	19
Figura 7 – Carta de Correntes de Maré do Terminal Marítimo Alte. Alves Câmara (Temadre), BA, correspondente a quatro horas depois da preamar de sizígia .....	19
Figura 8 – Ábaco de fator de correção da velocidade da corrente de maré para o Porto de Salvador, BA .....	20
Figura 9 – Ábaco de fator de correção da velocidade da corrente de maré para a Baía de Guanabara, RJ .....	21
Figura 10 – Esquema de posicionamento das estações correntométricas e maregráficas ocupadas por ocasião da campanha “Operação Salvador” .....	23
Figura 11 – Localização de alguns dos principais portos, terminais e indústrias existentes na região da BTS. ....	27
Figura 12 – Sistema de coordenadas e variáveis consideradas no SisBaHiA .....	38
Figura 13 – Localização das regiões de refinamento da malha de elementos finitos.....	44
Figura 14 – Domínio modelado da Baía de Todos os Santos.....	45
Figura 15 – Batimetria interpretada pelo modelo.....	48
Figura 16 – Distribuição da amplitude da rugosidade equivalente do fundo considerada nas simulações com o modelo calibrado.....	53

Figura 17 – Esquema da prescrição de dados de elevação para as condições de contorno da fronteira aberta utilizados na metodologia 1 .....	55
Figura 18 – Esquema da prescrição de dados de elevação para as condições de contorno da fronteira aberta utilizados na metodologia 2 .....	59
Figura 19 – Diferenças de fase das variações de níveis prescritas nas condições de contorno para os nós pertencentes à fronteira aberta.....	61
Figura 20 – Localização da estação de coleta dos dados de vento prescritos para todo domínio de modelagem nas simulações de calibração.....	62
Figura 21 – intensidades e direções de vento usadas nas simulações de calibragem do modelo (cenário de verão).....	63
Figura 22 – Tipos de nós de contorno de terra empregados nas simulações e identificação dos rios que tiveram descargas líquidas consideradas.....	67
Figura 23 – Localização das estações maregráficas e correntométricas utilizadas na calibração do modelo hidrodinâmico.....	71
Figura 24 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM dos dados medidos na estação S19 e calculados pelo modelo .....	74
Figura 25 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação S19 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM.....	74
Figura 26 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM medidos na estação S20 e calculados pelo modelo .....	75
Figura 27 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação S20 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM .....	75
Figura 28 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida no Porto de Salvador e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local.....	79
Figura 29 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida na Base Naval de Aratu e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local.....	80
Figura 30 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida no Temadre e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local.....	81
Figura 31 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida na Ponta de Itaparica e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local.....	82

Figura 32 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida no Terminal de São Roque e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local .....	83
Figura 33 – Componente E-W da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S08 .....	89
Figura 34 – Componente N-S da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S08 .....	89
Figura 35 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes 2DH medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S08. ....	90
Figura 36 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 superior .....	91
Figura 37 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 superior .....	91
Figura 38 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S03 superior .....	92
Figura 39 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 inferior .....	93
Figura 40 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 inferior .....	93
Figura 41 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S03 inferior .....	94
Figura 42 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 superior .....	95
Figura 43 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 superior .....	95
Figura 44 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S15 superior .....	96
Figura 45 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 inferior .....	97
Figura 46 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 inferior .....	97
Figura 47 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S15 inferior .....	98

Figura 48 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 superior .....	99
Figura 49 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 superior .....	99
Figura 50 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S07 superior .....	100
Figura 51 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 inferior. ....	101
Figura 52 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 inferior .....	101
Figura 53 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S07 inferior .....	102
Figura 54 – Localização das estações maregráficas e correntométricas utilizadas na validação do modelo hidrodinâmico.....	105
Figura 55 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM de dados medidos na estação W19 e calculados pelo modelo .....	107
Figura 56 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação W19 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM .....	107
Figura 57 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM de dados medidos na estação W20 e calculados pelo modelo .....	108
Figura 58 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação W20 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM .....	108
Figura 59 – Componente E-W da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W08.....	111
Figura 60 – Componente N-S da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W08.....	111
Figura 61 – Diagrama de Dispersão de velocidades de correntes 2DH medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W08.....	112
Figura 62 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 superior.....	113
Figura 63 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 superior.....	113
Figura 64 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W03 superior.....	114

Figura 65 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 inferior.....	115
Figura 66 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 inferior.....	115
Figura 67 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W03 inferior.....	116
Figura 68 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 superior.....	117
Figura 69 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 superior.....	117
Figura 70 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W15 superior.....	118
Figura 71 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 inferior.....	119
Figura 72 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 inferior.....	119
Figura 73 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W15 inferior.....	120
Figura 74 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 superior.....	121
Figura 75 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 superior.....	121
Figura 76 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W07 superior.....	122
Figura 77 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 inferior.....	123
Figura 78 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 inferior.....	123
Figura 79 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W07 inferior.....	124
Figura 80 – Campos de velocidade 2DH calculados pelo modelo relativos aos três regimes de vento considerados nas simulações de geração das Cartas - situação de meia-maré enchente de sizígia no Canal de Salvador. ....	130

Figura 81 – Campos de velocidade 2DH calculados pelo modelo relativos aos três regimes de vento considerados nas simulações de geração das Cartas - situação de maré enchente de quadratura no Canal de Salvador.....	131
Figura 82 – Perfis verticais de correntes obtidos pelo modelo nas simulações de geração das Cartas de Correntes.....	133
Figura 83 – Perfis verticais de correntes obtidos pelo modelo nas simulações de geração das Cartas de Correntes.....	134
Figura 84 – Porcentagem de probabilidade de ocorrência de correntes de maré com magnitudes superiores a 0,5 m/s no interior da BTS.....	138
Figura 85 – Porcentagem de probabilidade de ocorrência de correntes de maré com magnitudes inferiores a 0,25 m/s no interior da BTS.....	139
Figura 86 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para Baía de Todos os Santos referente às 3h do dia 19/jan/1999.....	142
Figura 87 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para as proximidades do Porto de Salvador referente às 3h do dia 19/jan/1999.....	143
Figura 88 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré da Baía do Aratu referente às 20h do dia 19/jan/1999.....	144
Figura 89 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para as proximidades do Terminal Marítimo Alte. Alves Câmara (Temadre), na Ilha Madre de Deus.....	145
Figura 90 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré das proximidades da Ponta de Itaparica referente às 3h do dia 19/jan/1999.....	146
Figura 91 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para Baía de Todos os Santos referente às 14h do dia 13/mar/2009.....	147

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Amplitude equivalente da rugosidade do fundo empregada na calibração e validação do modelo realizada no ano de 2000.....	50
Tabela 2 – Amplitude final da rugosidade equivalente do fundo adotada nas simulações com o modelo calibrado.....	53
Tabela 3 – Constantes harmônicas de maré da estação Garcia D’Ávila, BA, empregadas para geração da maré prevista para janeiro de 1999 no nó central da fronteira aberta.....	58
Tabela 4 – Descarga fluvial média prescrita nos rios considerados no domínio de modelagem .....	64
Tabela 5 – Outros parâmetros utilizados na configuração do modelo hidrodinâmico .....	67
Tabela 6 – Parâmetros médios de avaliação do desempenho do modelo hidrodinâmico nas rodadas de calibração e validação. ....	68
Tabela 7 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida no Porto de Salvador e maré calculada pelo modelo no mesmo local. ....	79
Tabela 8 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida na Base Naval de Aratu e maré calculada pelo modelo no mesmo local .....	80
Tabela 9 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida no Terminal Marítimo de Madre de Deus (Temadre) e maré calculada pelo modelo no mesmo local.....	81
Tabela 10 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida na Ponta de Itaparica e maré calculada pelo modelo no mesmo local.....	82
Tabela 11 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida no Terminal de São Roque e maré calculada pelo modelo no mesmo local. ....	83
Tabela 12 – Profundidades das estações utilizadas para comparação de correntes durante o procedimento de calibração e as correspondentes profundidades consideradas pelo modelo, profundidades de aquisição dos dados de campo e os correspondentes níveis sigma onde foram calculados os resultados do modelo para comparação com os dados de campo.....	85

Tabela 13 – Diferenças relativas percentuais médias entre alturas da onda de maré dos dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de calibração.....	103
Tabela 14 – Diferenças relativas percentuais médias entre velocidades máximas de dados de correntes medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de calibração.....	103
Tabela 15 – Profundidades das estações utilizadas para comparação de correntes durante o procedimento de validação e as correspondentes profundidades consideradas pelo modelo, profundidades de aquisição dos dados de campo e os correspondentes níveis sigma onde foram calculados os resultados do modelo para comparação com os dados de campo.....	110
Tabela 16 – Diferenças relativas percentuais médias entre alturas da onda de maré dos dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de validação.....	125
Tabela 17 – Diferenças relativas percentuais médias entre velocidades máximas de dados de correntes medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de validação.....	126
Tabela 18 – Diferentes regimes de vento considerados nas simulações de geração dos protótipos das Cartas de Correntes de Maré para BTS.....	128

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AT	– Água Tropical
BM	– Baixa-mar
BTS	– Baía de Todos os Santos
$c$	– Celeridade ou velocidade de propagação da onda. $c = L/T$
$C_h$	– Coeficiente de Chézy
$Cr$	– Número do Courant
$d$	– Distância horizontal que separa dois pontos na superfície da Terra
DHN	– Diretoria de Hidrografia e Navegação
ENC	– Carta Náutica Eletrônica
$F$	– Número de Forma da maré
$g$	– Aceleração da gravidade local. Adotado valor de $9,81 \text{ m/s}^2$ no presente trabalho.
$h$	– Cota do fundo em relação ao nível de referência
$\bar{H}$	– Profundidade média ou profundidade do nível médio do mar no local
$H$	– Altura da coluna d'água ou profundidade instantânea ou tirante hidráulico
$H_m$	– Altura da onda de maré ou distância vertical entre uma PM e a BM subsequente
$k$	– Constante de Von Karman
$K$	– Número de onda. $K = 2\pi/L$
$L$	– Comprimento de onda
$m$	– Massa
NMM	– Nível médio do mar, valor médio em torno do qual a maré oscila.
NR	– Nível de Redução - superfície de referência adotada como origem dos dados de batimetria lançados nas Cartas Náuticas editadas pela Marinha do Brasil.
$p$	– Pressão
$P_d$	– Componente dinâmica da pressão $p$
PM	– Preamar
$S$	– Escala espacial característica de um fenômeno
$t$	– Tempo
$T$	– Período de onda

- $u$  – Velocidade do escoamento na direção E-W  
 $U_i$  – Velocidade do escoamento na direção  $x_i$  promediada verticalmente  
 ( $i = 1 \rightarrow x, i = 2 \rightarrow y$ )  
 $u$  – Velocidade do escoamento na direção E-W (ou na direção do no eixo  $x$ )  
 $v$  – Velocidade do escoamento na direção N-S (ou na direção do no eixo  $y$ )  
 $w$  – Velocidade do escoamento na direção vertical (ou na direção do no eixo  $z$ )  
 $x$  – Coordenada horizontal no sentido E-W  
 $y$  – Coordenada horizontal no sentido N-S  
 $z$  – Coordenada vertical  
 $\delta$  – Variação infinitesimal de distância  
 $\varepsilon$  – Amplitude da rugosidade equivalente do fundo  
 $\zeta$  – Elevação da superfície livre em relação à superfície de referência adotada  
 $\theta$  – Ângulo de latitude local  
 $\rho$  – Massa específica da água  
 $\rho_0$  – Valor constante de referência da massa específica da água. Adotado valor de 1023,1 kg/m<sup>3</sup> no presente trabalho.  
 $\tau$  – Componentes do tensor de tensões  
 $\tau^F$  – Tensão de atrito no fundo de um corpo d'água  
 $\Phi$  – Velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local  
 $\omega$  – Freqüência angular de onda.  $\omega = 2\pi/T$

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações gerais

Nas últimas décadas, ocorreram grandes progressos no conhecimento humano sobre o comportamento da dinâmica de corpos d'água naturais. A aplicação desse conhecimento ocorre em diversas áreas, tais como: implantação e gestão de obras de Engenharia Costeira e Portuária, otimização do aproveitamento sustentável e controle dos corpos d'água naturais, minimização do impacto ambiental de obras produzidas sobre o meio físico e garantia da segurança à navegação.

Dentro desse último contexto – segurança à navegação – será imputado o foco principal do trabalho em tela, sem desconsiderar sua aplicação direta ou indireta nos diversos outros campos de interesse anteriormente mencionados.

Nos primórdios da navegação, o desconhecimento do comportamento dos fenômenos naturais, aliados às precárias condições tecnológicas dos instrumentos de navegação e embarcações, eram, sem dúvida, as principais barreiras para se navegar com segurança. Com o passar dos tempos, os avanços tecnológicos tornaram as aventuras marítimas mais seguras, fazendo com que a atividade comercial prosperasse, estreitando as relações entre as nações separadas por mares e oceanos.

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos na área de navegação marítima deram um verdadeiro salto. O rápido desenvolvimento de sistemas digitais e o aparecimento de novas tecnologias aliadas ao aumento da capacidade computacional trouxeram muitas alterações na vida do navegante moderno, possibilitando uma navegação mais precisa e segura. Tornaram-se mais sofisticados os sistemas eletrônicos, radioelétricos e equipamentos de navegação, que oferecem atualmente alta precisão de posicionamento e informações praticamente contínuas. As Publicações Náuticas ou Publicações de Auxílio à Navegação tornaram-se também cada vez mais confiáveis e seguras. O conjunto desses recursos, destinados a proporcionar ao navegante informações para conduzir seu navio ou embarcação com segurança e economia, recebe a denominação de Auxílios à Navegação (MIGUENS, 1996).

Paralelamente ao avanço tecnológico, muitos portos do Brasil tiveram seus tráfegos marítimos intensificados e, além disso, os navios também aumentaram significativamente suas dimensões. Esses fatores contribuíram para que fosse reduzida drasticamente a margem de erro de navegação. Como consequência imediata, acentuaram-se as necessidades de atualização dos Auxílios à Navegação. Aumentaram também os investimentos em projetos de construção, ampliação e modernização de portos e terminais, de modo a incrementar o grau de competitividade internacional do modal aquaviário nacional.

Vale ressaltar que a garantia da segurança à navegação tem papel decisivo na vida econômica do País, uma vez que cerca de 95% de nossos produtos exportados ou importados fazem o uso do transporte marítimo. Além do interesse econômico, podemos destacar uma importância ainda maior de uma navegação segura: a salvaguarda da vida humana no mar.

Nos dias atuais, o Brasil é internacionalmente apontado como sendo um país seguro em termos de navegação marítima. Os documentos náuticos brasileiros são considerados de ótima qualidade técnica. Entretanto, há indícios de que a falta de uma atualização regular desses documentos, aliada às deficiências na sinalização náutica em algumas localidades, possa ocasionar uma redução da segurança da navegação no País. Uma das consequências dessa redução da segurança seria a elevação do custo dos seguros e fretes marítimos, acarretando prejuízos ao comércio exterior brasileiro. O receio de que o chamado custo Brasil aumente nos próximos anos já é verificado entre os especialistas do setor.

A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) é o órgão responsável por garantir a qualidade das atividades de segurança da navegação na área marítima de interesse do Brasil e nas vias navegáveis interiores, incluindo a edição e atualização das Publicações de Auxílio à Navegação. A DHN, órgão da Marinha do Brasil, está localizada no Complexo Naval da Ponta D'Armação, na cidade de Niterói, RJ.

De acordo com Alfredini (2005), “o Brasil possui 7367 km de linha costeira voltada para o Oceano Atlântico, que se ampliam por mais 8500 km considerando os recortes litorâneos”. Assim sendo, há de se considerar o imenso esforço da DHN e gastos no

orçamento público da União na tentativa de manter todos os documentos náuticos perfeitamente precisos e atualizados para pronto uso pelo navegante nacional e estrangeiro.

Dentro do enfoque da permanente necessidade de atualização dos Auxílios à Navegação, estão incluídas as Publicações Náuticas ou Publicações de Auxílio à Navegação, indispensáveis tanto na fase do planejamento como na execução da viagem no ambiente marítimo. A mais importante Publicação de Auxílios à Navegação é, sem dúvida, a Carta Náutica. Entretanto, inviável e inexequível seria se a Carta Náutica incluísse todas as informações necessárias ao navegante. Desta forma, existem outras Publicações Náuticas, que complementam ou ampliam os elementos fornecidos pela primeira (MIGUENS, 1996). Pode-se citar, e.g., as Cartas de Correntes de Maré.

As Cartas de Correntes de Maré são publicações, editadas pela DHN, que fornecem ao navegante informações aproximadas sobre os elementos de correntes geradas pela maré puramente astronômica. Atualmente, existem Cartas de Correntes para treze dos principais portos da costa brasileira.

No âmbito da navegação, correntes de maré têm sua importância mais relevante na navegação em águas restritas, quando não se pode permitir que o navio se afaste muito do percurso planejado. O conhecimento antecipado da direção e velocidade das correntes é requisito indispensável ao planejamento do percurso a ser seguido pelo navio e da escolha da velocidade de evolução em águas restritas. Além disso, constituem também um importante auxílio à tomada de decisões quanto às manobras adequadas de atracação e desatracação, escolha do melhor bordo de atracação, tipo de amarração do navio junto ao cais, folga adequada das espias e horários mais favoráveis às manobras (MIGUENS, 1996).

Correntes de maré também têm significativa importância na maioria dos estudos característicos de Engenharia Costeira e Oceanográfica, tais como: estudos da circulação hidrodinâmica de fenômenos costeiros, transportes de sedimentos, processos de interação ar-mar, determinação de esforços sobre estruturas marítimas, projetos de construção de portos e terminais e etc.

Além dos aspectos atinentes à navegação e Engenharia Costeira e Oceanográfica, o conhecimento das correntes é muito importante em vários outros campos científicos. Alguns exemplos podem ser citados na área ambiental (em estudos de dispersão de efluentes e construção de emissários submarinos), na Engenharia de Pesca (em estudos envolvendo atividades de aquicultura), na Biologia (em estudos da diversidade de organismos, interação plancton-bentos e reprodução de espécies) e, mais recentemente, no setor de produção energética, por meio de usinas maremotrizes.

Nos dias de hoje, a energia das correntes produzidas pela maré está sendo seriamente levada em consideração. É bem sabido que, além da política de preços dos combustíveis minerais, tais recursos são não-renováveis, i.e., chegará o tempo em que tais fontes de energia estarão exauridas. Dessa forma, uma usina maremotriz poderá ser uma alternativa interessante. Países como a França (no estuário do La Rince) e Canadá (na Baía de Fundy) já possuem tradição na geração de energia maremotriz (FRANCO, 1988). No Brasil, muitos estudos estão avançando nesse setor.

A despeito dos fatos acima comentados relativos à importância das correntes, ainda são poucas as informações recentes sobre correntes disponíveis para muitos dos principais estuários e portos da costa brasileira. Em geral, estudos mais recentes sobre correntes são documentados por meio de variados relatórios de pesquisa, muitas vezes de divulgação restrita, elaborados em função de determinada necessidade específica de estudo.

Há de se considerar que nosso País carece de publicações modernas, de uso ostensivo, que sejam padronizadas e elaboradas com a finalidade de oferecer a seus usuários informações sobre elementos de correntes, para os principais estuários e recintos portuários. Talvez, as publicações organizadas nesse sentido mais completas em termos de correntes de maré sejam as atuais Cartas de Correntes de Maré, confeccionadas em um período compreendido entre 1962 e 1981.

Não obstante os heróicos esforços despendidos pelo pessoal daquela época para geração desses documentos, os recursos tecnológicos e computacionais eram limitados quando comparados com os disponíveis nos tempos atuais. Dessa forma, mostra-se premente a necessidade de atualização e modernização dessas publicações e, principalmente, a

ampliação de sua divulgação, além da comunidade marítima, também para comunidade científica.

## 1.2 Objetivos e desenvolvimento do trabalho

O principal objetivo do trabalho em tela é apresentar uma metodologia para a geração de Cartas de Correntes de Maré digitais em ambientes estuarinos, com ênfase em seus recintos portuários, por meio do uso das atuais técnicas de modelagem numérica computacional.

A aplicação da metodologia aqui proposta permitirá a substituição progressiva das tradicionais Cartas de Correntes de Maré nacionais, atualmente disponíveis fisicamente em papel para a maioria dos principais portos do Brasil. Assim sendo, almeja-se, em primeiro lugar, contribuir para a garantia da segurança da navegação no País, e paralelamente, para a salvaguarda da vida humana no mar.

As Cartas de Correntes atualmente em vigor limitam-se, na prática, unicamente ao uso da comunidade marítima. Pretende-se, em segundo lugar, por meio da metodologia proposta, ampliar as classes de usuários das Cartas de Correntes, incluindo também interesses da comunidade científica, servindo de referência para pesquisadores e estudantes. Para tal, sugere-se, futuramente, a disponibilização dos documentos produzidos em sítio próprio na *internet*, o que poderia ser feito por meio de um *link* na página digital da DHN.

Dessas aspirações advém a motivação do presente tema de dissertação: contribuir para modernização e atualização de importantes produtos e serviços náuticos oferecidos pela Marinha do Brasil à sociedade brasileira e, mais especificamente, às comunidades científica e marítima, seja no âmbito nacional ou internacional.

A título de exemplo, será realizada uma aplicação da metodologia em um modelo calibrado e validado para a Baía de Todos os Santos (BTS), BA. Para tal, a ferramenta de modelagem empregada será o modelo hidrodinâmico do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA. Trata-se de um sistema de modelos

computacionais desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanografia do Programa de Engenharia Oceânica, em conjunto com a Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos do Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Será utilizada a modelagem tridimensional (3D) acoplada com a modelagem bidimensional em planta (2DH). Embora medições de correntes realizadas no interior da BTS indiquem pouca variação dos perfis verticais de velocidade, a modelagem 3D será empregada a fim de dispor, a navegantes e pesquisadores, informações sobre os padrões de correntes em diferentes profundidades distribuídas ao longo da coluna d'água.

Os níveis de profundidade serão definidos em função do tipo de usuário, e.g., o seguimento de navegação de esporte e recreio, com embarcações de calados curtos, certamente, estará interessado apenas nos primeiros níveis da coluna d'água. Já o seguimento de navegação de cabotagem, com navios de calados maiores, que ocupem quase totalidade da coluna d'água, certamente estará interessado nos padrões de correntes 2DH. Passando para área científica, o prognóstico de correntes em um nível específico localizado no meio da coluna d'água pode ser interessante para o planejamento do fundeio de equipamentos oceanográficos (Figura 1).



(a)

(b)

(c)

Figura 1 – Diferentes tipos de usuários com interesse em informações sobre correntes. A figura (a) representa o seguimento de navegação de cabotagem, a figura (b), o seguimento de navegação de esporte/recreio e a figura (c), o seguimento científico, através do lançamento de um equipamento oceanográfico configurado para fundeio com bóia.

Fontes: (a) <http://oceanservice.noaa.gov/topics/navops/ports> (b) <http://en.wikipedia.org/wiki/sailing> (c) <http://www.interoceansystems.com/s4apps.htm>

Tendo em vista que a ferramenta de modelagem será empregada com intenção de gerar um prognóstico de correntes de maré, será utilizada a maré prevista na definição de níveis d'água para as condições de contorno da fronteira aberta do domínio de modelagem. Esse procedimento será empregado não só nas simulações de geração das Cartas de Correntes, mas também, como experiência, na realização da calibração e validação do modelo hidrodinâmico. Nessa fase de calibração e validação, serão comparados valores de variações de níveis e correntes medidos em campo com dados calculados pelo modelo.

Os dados medidos utilizados na fase de calibração e validação são provenientes de duas campanhas de campo (verão e inverno) realizadas no ano de 1999. As medições foram efetuadas por ocasião do Programa Bahia Azul, que representa o maior conjunto de obras e ações na área de saneamento e meio ambiente que se realiza desde os primeiros anos da década de 1970. Como parte integrante do Programa Bahia Azul, encontra-se o Programa de Saneamento Ambiental da Baía de Todos os Santos – BTS (XAVIER, 2002). Esse programa teve como um de seus executores o então Centro de Recursos Ambientais da Bahia (CRA), atualmente denominado Instituto do Meio Ambiente (IMA). O SisBaHiA foi o sistema de modelagem de circulação hidrodinâmica e de transporte adotado pelo IMA no Programa BTS. As medições foram realizadas por contrato junto ao consórcio Hydros-CH2 Mhill e cedidas pela Fundação Coppetec para realização do presente trabalho.

Depois de concluída a fase de calibração e validação, serão efetuadas as rodadas de geração das Cartas de Correntes. Como produto final, chegaremos ao protótipo da Carta de Correntes de Maré da BTS e algumas das localidades de interesse marítimo localizadas no interior da baía. As referidas cartas da região da BTS poderão servir de base para substituição das publicações “Cartas de Corrente de Maré do Porto de Salvador” e “Cartas de Corrente de Maré do Terminal de Madre de Deus”, que datam, respectivamente, de 1975 e 1963.

Trabalho semelhante foi elaborado por Oliveira (1998), por ocasião de sua Dissertação de Mestrado intitulada “Utilização de Modelos Numéricos para Geração de Cartas de Correntes em Recintos Portuários”, desenvolvida junto ao Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. O trabalho obteve, através de técnicas de modelagem

bidimensional em planta (2DH), subsídios para a elaboração das Cartas de Correntes de Maré para Baía de Guanabara, RJ. Alguns anos depois, o trabalho de Oliveira (1998) foi ampliado por Malta (2005), que realizou, por meio de modelagem tridimensional (3D), um estudo do padrão de correntes da Baía de Guanabara visando também a elaboração das Cartas de Correntes de Maré.

Posteriormente, a técnica aqui apresentada também poderá ser aplicada às demais localidades de interesse no País, que apresentem características naturais semelhantes. Logicamente, modificações e adaptações se farão necessárias na metodologia proposta, para adequá-la às peculiaridades atinentes a cada região.

### **1.3 Sistema de unidades**

Foi adotado, no presente trabalho, o Sistema Internacional de Unidades (SI). Ao longo do corpo do trabalho, são apresentadas as unidades no SI correspondentes à grandeza dos termos utilizados nas expressões matemáticas.

Os gráficos e figuras também empregaram unidades do SI, inclusive os mapas de geração dos protótipos das Cartas de Correntes. Na ocasião da produção das Cartas de Correntes propriamente ditas, deve-se converter as unidades para o padrão náutico internacional. Comentários adicionais sobre unidades náuticas constam em notas de rodapé.

## 2. MARÉS E CORRENTES DE MARÉ EM ESTUÁRIOS

Segundo Miranda *et al.* (2002), a palavra estuário deriva do adjetivo latino *aestuarium*, cujo significado é maré ou onda abrupta de grande altura. Na definição clássica de Cameron e Pritchard (1963, *apud* DYER, 1997), estuário “é um corpo d’água semiconfinado na costa, com ligação livre com o mar, no qual a água do mar se mistura com a água doce proveniente da drenagem do interior das terras”. A definição mais moderna e amplamente aceita consiste em uma adaptação da definição anterior de Cameron e Pritchard, a qual inclui a expressão “e que se estende para montante até onde se fazem sentir as influências da maré”.

Sistemas estuarinos são corpos d’água ainda mais complexos, já que podem conter vários estuários, e.g., baías como a de Todos os Santos-BA, Guanabara-RJ, Sepetiba-RJ e Paranaguá-PR são sistemas estuarinos, dentro dos quais existem vários estuários. É comum, em tais sistemas, a ocupação humana ser intensa, ocasionando significativas alterações morfológicas e variadas formas de poluição.

Estuários e sistemas estuarinos sempre estiveram ligados à atividade econômica, por possuírem normalmente águas abrigadas, ricas em nutrientes e, algumas vezes, facilidades de acesso marítimo. Muitos dos principais portos e algumas das maiores cidades do mundo se situam no interior de estuários, como Rotterdam, Amsterdam, Antuérpia, Londres, Liverpool, etc. (MOTTA, 1978). No Brasil, ocorre o mesmo, e.g., portos de Santos-SP, Rio de Janeiro-RJ, Salvador-BA, etc.

Em geral, também é grande o interesse científico em tais corpos d’água, sendo a compreensão da hidrodinâmica estuarina freqüentemente alvo de muitos estudos e projetos de pesquisa. Os movimentos oscilatórios de elevação e descida da superfície livre devido às marés são acompanhados por movimentos horizontais da massa líquida denominados correntes de maré. Ambos os fenômenos – marés e correntes de maré – são fundamentalmente efeitos das mesmas causas: atração gravitacional dos corpos celestes (notadamente a Lua e o Sol) e ação da força centrífuga resultante da revolução do sistema Terra-Lua.

Podemos denominar as variações de níveis d'água de maré vertical e variações de correntes, de maré horizontal. Entretanto, a relação entre ambas nem sempre é evidente, podendo, em determinadas ocasiões, ser bastante complexa e variável. Algumas áreas costeiras podem apresentar variações de níveis sem coexistirem correntes de maré e outras, mais raras, podem apresentar correntes de marés embora não apresentem variações significativas de níveis (GROSS, 1990).

O comportamento das correntes de maré apresenta maior variabilidade temporal e espacial do que as oscilações de nível causadas pelas marés. Isso ocorre porque as correntes são bem mais sensíveis às mudanças de profundidade e da geometria dos corpos d'água costeiros, sobretudo na ocorrência de formação de baías, enseadas e promontórios costeiros (HOWARTH, 1982 *apud* PUGH, 1987).

A maré na área oceânica e na plataforma adjacente tem forte influência na hidrodinâmica de estuários e seus afluentes. Existe uma considerável alteração no comportamento da onda de maré propagando-se estuário acima em função de sua morfologia. A forma da onda de maré depende basicamente da topografia do estuário e seu efeito no atrito do fundo. As variações ao longo do estuário de amplitude e fase na maré irão afetar diretamente as velocidades das correntes (DYER, 1997).

Em alguns estuários, a entrada da onda de maré ocorre com elevação abrupta do nível, quase que verticalmente, e as correntes assumem velocidades críticas – é o fenômeno da pororoca (denominado *bore* na literatura internacional), bem conhecido no Rio Amazonas. Outros exemplos, de menor magnitude, ocorrem em Shangai, na China e no Rio Petitcodiac, zona oriental do Canadá, onde o nível d'água sobe por cerca de 1 m em 10 segundos e depois por mais 2 m em 20 minutos (POND e PICKARD, 1983).

Em áreas oceânicas, onde o escoamento não sofre restrições físicas, as correntes de maré têm um caráter rotatório, com a direção variando continuamente ao longo de uma trajetória elíptica durante um ciclo de maré. A velocidade normalmente varia ao longo do ciclo de maré passando por dois máximos em sentidos aproximadamente opostos e dois mínimos intercalados entre os máximos. Esse aspecto rotatório das correntes em áreas oceânicas é conhecido como rosa de correntes ou elipse de correntes devido ao formato elíptico descrito pela seqüência de vetores representativos das correntes (BOWDITCH, 1995).

Esse caráter rotatório é causado pela rotação da Terra em interação com as forças astronômicas; e, desconsiderando alterações provocadas por condições locais, seguirá o sentido horário no hemisfério norte e sentido anti-horário no hemisfério sul e sofrerá também desvios devido ao efeito de Coriolis.

Em estuários relativamente estreitos ou rios, onde o escoamento é fortemente afetado por contornos físicos, a elipse de correntes sofre distorções significativas em seu formato geométrico. Nessas regiões, as correntes de maré são melhor caracterizadas, em geral, por uma corrente axial alternada, segundo o eixo do canal. Os máximos de corrente ocorrem em direções opostas e são intercalados por um pequeno intervalo de tempo de velocidades muito baixas ou nulas, chamado de estofa. Quando o escoamento evolui de uma situação de efluxo (saída de água do corpo d'água) para afluxo (entrada de água no corpo d'água) caracteriza-se a estofa de vazante e quando o escoamento evolui de uma situação de afluxo para efluxo caracteriza-se a estofa de enchente.

A Figura 2 que se segue ilustra um exemplo comparativo entre dados de corrente medidos na região oceânica no litoral norte do Brasil e dados medidos no interior de uma região estuarina no litoral nordeste.

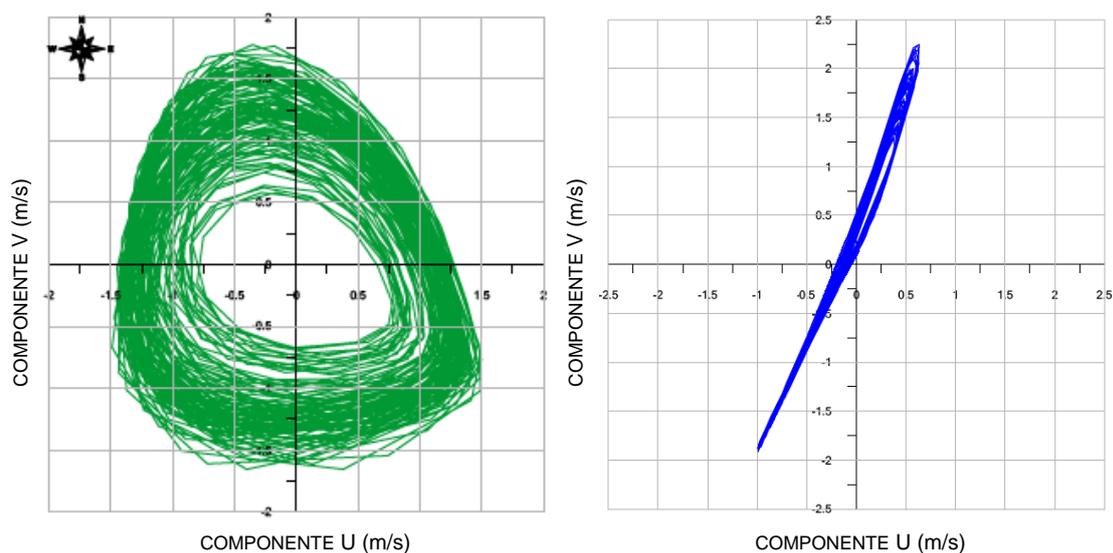


Figura 2 – Aspecto giratório das correntes de maré medidas em uma região de plataforma oceânica (à esquerda) em comparação com aspecto axial das correntes medidas no interior de uma baía (à direita). Destaca-se o comportamento rotatório das correntes no gráfico da esquerda em contraste com uma direção característica dominante no gráfico da direita. As medições foram realizadas no litoral norte e nordeste do Brasil por ocasião de estudos realizados na área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ (Fonte: adaptado de relatório Coppetec PENO-11297, 2008).

Na medida em que a onda de maré avança para o interior do estuário, a convergência das margens faz com que a onda de maré seja comprimida lateralmente e, na ausência do atrito, a conservação de energia ocasiona o aumento da altura da maré, devido ao adensamento da energia. Por outro lado, o atrito no fundo e nas margens causa o decréscimo da altura da maré devido à dissipação de energia. De acordo Nichols e Biggs (1985 *apud* DYER, 1997), em função da importância relativa dessas duas influências, resultam as seguintes condições: estuário hipersíncrono, síncrono e hiposíncrono:

- Estuário hipersíncrono: geralmente tem a forma afunilada e a convergência excede o atrito. Como consequência, a altura da maré e as correntes aumentam em direção à cabeceira. Na seção fluvial do estuário, a convergência diminui, o efeito do atrito torna-se maior e a altura da maré tende a diminuir.
- Estuário síncrono: os efeitos do atrito e da convergência estão em equilíbrio, e a altura da maré permanece constante até a seção fluvial do estuário.
- Estuário hiposíncrono: quando o efeito do atrito excede o da convergência e, em consequência, a altura da maré diminui ao longo do estuário.

Quanto à defasagem entre níveis e correntes, os estuários podem apresentar sistemas de onda de maré tendendo a estacionária, progressiva ou mista.

### **Estuário teórico com onda de maré puramente estacionária**

Em um estuário retangular de maré puramente estacionária (desprezando-se os efeitos do atrito no fundo e nas margens), a onda de maré irá se propagar livremente estuário acima até atingir a cabeceira, onde será refletida e retornará se propagando em direção à embocadura. Caso o retorno ocorra em um intervalo de tempo igual ao período de maré, a onda refletida irá se sobrepor à próxima onda de maré incidente que está se propagando para montante, estabelecendo-se, dessa forma, um sistema de ondas estacionárias (DYER, 1997). A Figura 3 apresenta um esquema da situação.

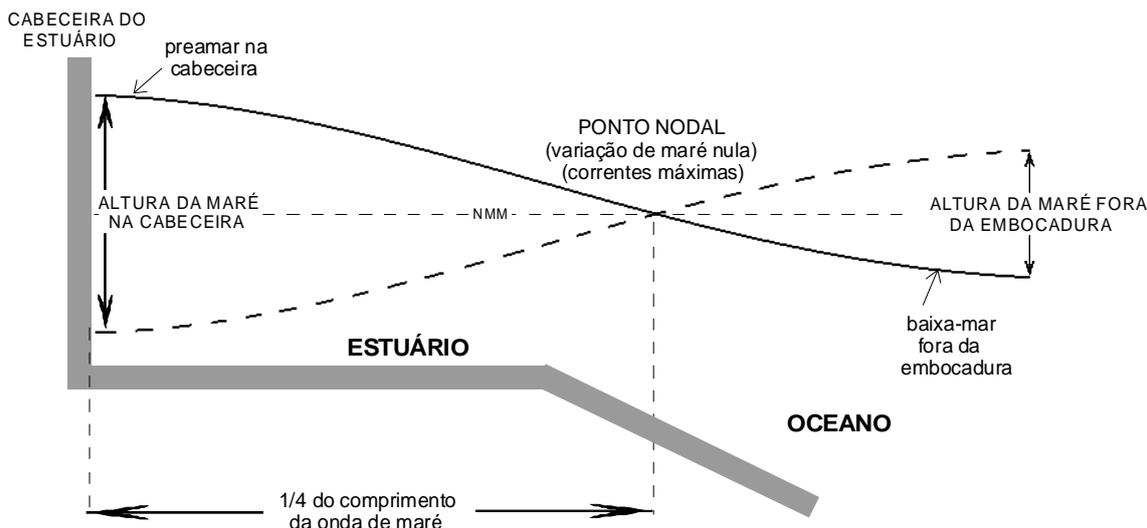


Figura 3 – Onda de maré estacionária em um estuário retangular idealizado sem efeito de atrito. Percebe-se, nesse caso particular, a formação de um ponto nodal fora da embocadura do estuário e formação de um antinodo na cabeceira. No antinodo, ocorrerá a máxima amplitude de maré. No ponto nodal, localizado, nesse caso, a uma distância da cabeceira de um quarto do comprimento de onda, a variação de maré será nula ou quase nula, mas com máximos valores de corrente horizontal (adaptado de “Encyclopedia of Coastal Science”, PARKER, 2005).

Em dada posição ao longo do eixo do estuário, todas as partículas executarão um movimento harmônico simples com amplitudes distintas. Em determinados pontos, espaçados de meio comprimento de onda, denominados pontos nodais ou nodos, a amplitude de maré terá valor nulo e o módulo da velocidade será máximo. Como os pontos nodais estão permanentemente em repouso, a energia da onda permanece estacionária. Por sua vez, nos pontos antinodais ou antinodos, também espaçados de meio comprimento de onda, a amplitude assumirá valores extremos positivos e negativos, iguais ao dobro da amplitude da onda original (se desconsiderado o efeito de atrito) e o módulo da velocidade será nulo (MIRANDA *et al.*, 2002).

Grande parte dos estuários são corpos d’água relativamente pequenos quando comparados com o comprimento da onda de maré. Imaginemos a situação de um estuário com uma profundidade média de aproximadamente 10m que apresente características de maré semidiurna. O comprimento da onda de maré, dado pela expressão  $T \times (g\bar{H})^{1/2}$ , será da ordem de 450 km. Sendo  $T$ , o período da onda de maré,  $g$ , a aceleração da gravidade local e  $\bar{H}$  a profundidade média. Mesmo considerando uma grande baía que possua 100 km de extensão, podemos perceber que apenas uma pequena parcela da onda de maré entra no estuário.

Assim sendo, o mais comum é que o ponto nodal esteja localizado a jusante da embocadura. Dessa forma, a amplitude de maré tenderá a ser máxima na cabeceira e as correntes tenderão a aumentar em direção à embocadura. As preamares (PM) e baixamars (BM) ocorrerão quase que simultaneamente em toda a extensão do corpo d'água e irão coincidir com o instante de inversão das correntes. Por outro lado, em estuários muito longos, podem existir vários nodos e antinodos (DYER, 1997).

Em um estuário de maré puramente estacionária, as amplitudes da maré e as velocidades das correntes estarão defasadas de  $90^{\circ}$ <sup>1</sup>; i.e., as velocidades máximas das correntes ocorrerão nos instantes em que o nível passa pelo nível médio (Figura 4).

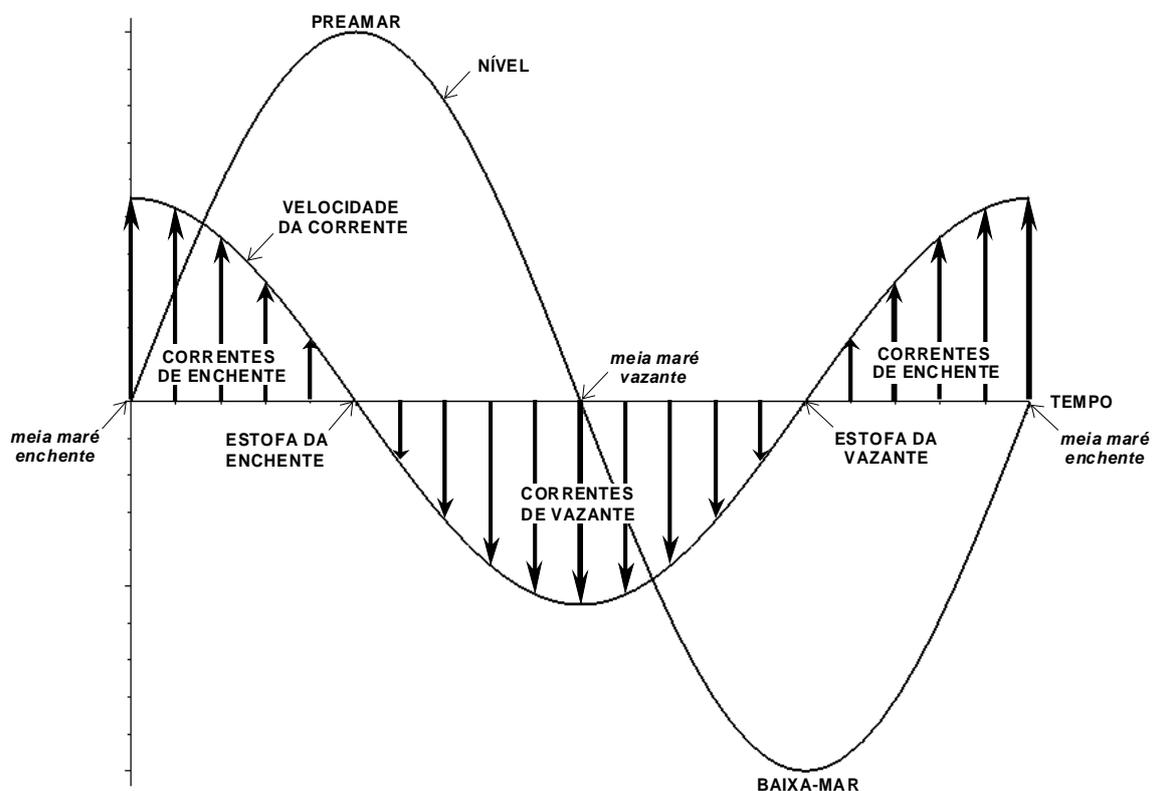


Figura 4 – Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética idealizada do tipo puramente estacionária. As amplitudes da maré estarão defasadas de  $90^{\circ}$  (ou  $270^{\circ}$ ) das velocidades das correntes.

<sup>1</sup> Dependendo da convenção de sinais adotada para definir a direção do fluxo enchente e vazante, as defasagens entre níveis e correntes em um estuário de maré puramente estacionária podem ser  $90^{\circ}$  ou  $270^{\circ}$ . Na literatura, é mais comum adotar-se o sentido positivo para correntes de enchente e negativo para correntes de vazante, e consecutivamente, defasagens de  $90^{\circ}$  entre níveis e correntes.

## Estuário teórico com onda de maré puramente progressiva

Se a energia da onda de maré for completamente dissipada antes da reflexão ou se o canal do estuário for infinitamente longo, a onda de maré torna-se puramente progressiva. A amplitude da maré e a magnitude das correntes diminuem em direção à cabeceira do estuário, havendo uma progressão nos instantes das preamares e baixa-mares em relação ao instante de inversão das correntes (DYER, 1997). Desta forma, as amplitudes da maré e as velocidades das correntes estarão em fase<sup>2</sup>; ou seja, as velocidades máximas das correntes de enchente ocorrerão nos mesmos instantes das preamares e as velocidades máximas das correntes de vazante ocorrerão nos mesmos instantes das baixa-mares (Figura 5).

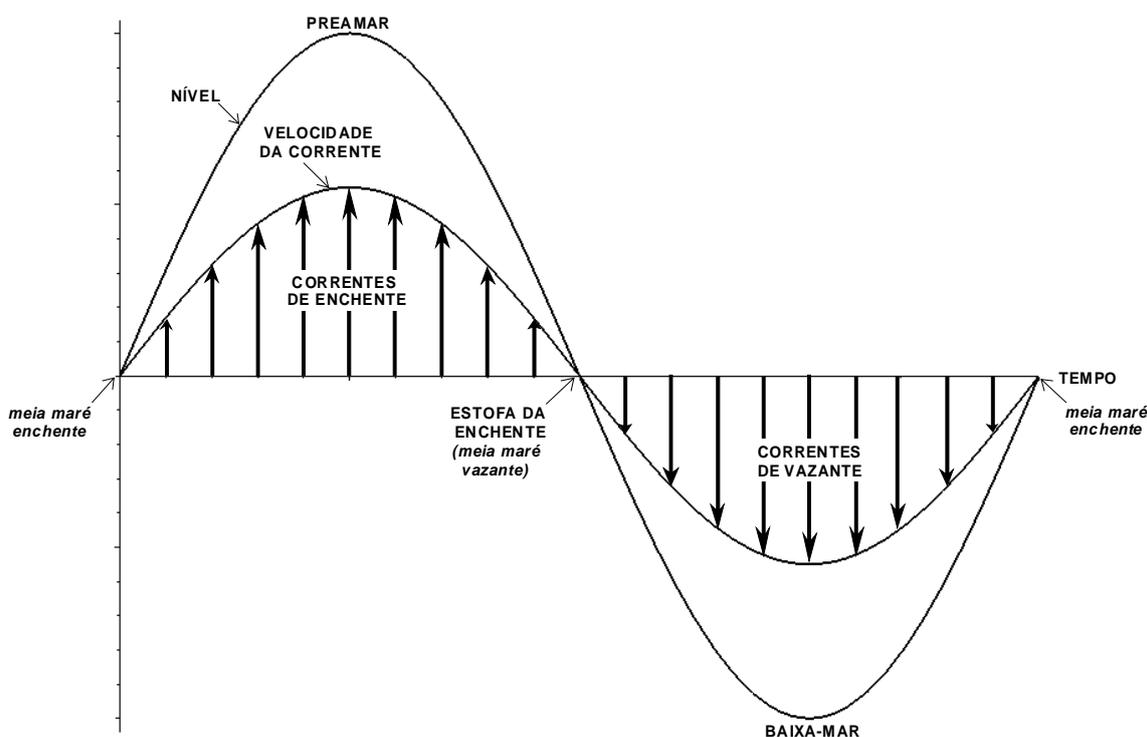


Figura 5 – Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética idealizada do tipo puramente progressiva. As amplitudes da maré estarão em fase (ou defasadas de 180°) com as velocidades das correntes.

<sup>2</sup> Dependendo da convenção de sinais adotada para definir a direção do fluxo enchente e vazante, as defasagens entre níveis e correntes em um estuário de maré puramente progressiva podem ser 0° ou 180°. Na literatura, é mais comum adotar-se o sentido positivo para correntes de enchente e negativo para correntes de vazante, e consecutivamente, defasagens de 0° entre níveis e correntes.

## **Estuário com onda de maré mista**

Como os estuários na natureza não têm uma geometria uniforme, a cabeceira não se comporta como uma extremidade fechada e há sempre uma dissipação variada de energia das ondas por atrito. A onda de maré realmente existente no interior do estuário resulta de uma composição complexa de ondas progressivas e estacionárias, caracterizando o estuário de maré mista.

Estuários encontrados na natureza não apresentam características de maré puramente estacionária, nem de maré puramente progressiva. O comum é que existam defasagens entre correntes e amplitudes de maré da ordem de algumas dezenas de minutos, sendo este valor variado ao longo do estuário. Quanto maior for essa defasagem, mais estacionária será a onda de maré no estuário.

Em geral, a onda de maré atinge a linha de costa como uma onda progressiva; e, ao entrar no estuário, sofre os efeitos característicos de águas rasas, tendo alteradas suas defasagens entre níveis e correntes. Em muitos estuários, a onda de maré é gradualmente amortecida ao se propagar para montante, tendo sua altura reduzida devido principalmente à dissipação de energia pelo atrito no fundo e nas margens, caracterizando o estuário com onda de maré tendendo a progressiva. Mas, em outros estuários, a onda de maré, ao atingir as margens do estuário, é refletida, caracterizando o estuário com onda de maré tendendo a estacionária.

Motta (1978) afirma:

O mecanismo de propagação da maré ao longo de um estuário pode ser afetado por qualquer alteração natural ou artificial em sua geometria. Esta modificação pode agir, quer sobre a celeridade de propagação da maré, quer sobre a defasagem entre a variação de níveis e a variação de velocidades, quer sobre a perda de carga no escoamento de maré, quer diretamente sobre o volume do prisma a ser cheio e esvaziado.

O fato do estuário apresentar onda de maré com tendência estacionária ou progressiva também está intimamente ligado com sua capacidade de transporte de sedimentos por meio dos escoamentos de vazante e enchente. Estuários com onda de maré progressiva tendem a ter boa capacidade de expelir sedimentos, uma vez que, em geral, as correntes de vazante apresentam velocidades maiores e/ou durações maiores que as correntes de

enchente. Assim sendo, tais estuários apresentam capacidade de autodepuração sedimentar (MOTTA, 1978).

A razão para o aumento da velocidade e/ou duração das correntes de vazante, em estuários com onda de maré com tendência progressiva, está na redução da seção hidráulica que ocorre com a descida do nível durante a BM - instante de ocorrência dos picos de correntes de vazante. A idéia é simples: se o volume de água que entra no estuário com a maré enchente é aproximadamente o mesmo que aquele que sai durante a maré vazante, então a redução da seção hidráulica causará fluxos mais intensos e/ou mais duradouros.

Vale ressaltar que aumentando a velocidade do escoamento, aumenta também, na razão quadrática, a tensão de atrito no fundo e, por conseguinte, perda de carga do escoamento (cf. Equação 1, pág. 40). Para compensar esse efeito e manter preservado o balanço hidráulico, a natureza responde criando uma carga adicional por meio da elevação do nível médio. Por sua vez, a elevação do nível médio acarreta uma assimetria na onda de maré, fazendo com que as vazantes apresentem maior duração do que as enchentes.

Em estuários com onda de maré com tendência estacionária, a seção hidráulica média para enchente e vazante é aproximadamente a mesma. Por esse motivo, as diferenças entre velocidades de correntes na vazante e na enchente tendem a ser menos pronunciadas. Segundo Motta (1978), alterações, naturais ou antrópicas, na defasagem entre a variação de níveis e a variação de velocidades são capazes de deteriorar as profundidades ao longo de extensos trechos de estuários.

### 3. CARTAS DE CORRENTES DE MARÉ

Miguens (1996) afirma que:

É importante para o navegante ser capaz de prever a direção e a velocidade da corrente de maré em qualquer instante e levar em conta o seu efeito sobre o movimento do navio.

Dada a afinidade entre a maré e corrente de maré, para determinados portos é possível relacionar a velocidade e a direção da corrente de maré às horas da preamar e baixa-mar. Informações sobre as correntes de maré podem ser obtidas em Cartas de Correntes de Maré, preparadas para os principais portos do País. [...]

Além das Cartas de Correntes de Maré, algumas Cartas Náuticas apresentam, também, informações sobre correntes de maré. Estas informações, usadas para o planejamento, devem ser sempre verificadas e, se necessário, corrigidas durante a navegação, pela comparação das posições observadas e estimadas, pelo deslocamento de objetos que bóiam, pela posição de embarcações fundeadas, pela observação de bóias e etc.

As Cartas de Correntes de Maré atualmente em vigor, apresentam características semelhantes para diferentes localidades. Normalmente, são iniciadas por uma página com as instruções para uso, seguida de um exemplo e de uma coletânea de pequenas cartas tais como apresentadas nas Figuras 6 e 7 que se seguem. Em cada Carta, são encontrados vetores representativos das direções e números que indicam as velocidades das correntes na época de sizígia (MIGUENS, 1996).

A seleção da carta a ser consultada é feita em função apenas da diferença em horas cheias entre o instante de interesse e o instante da preamar mais próxima prevista nas Tábuas das Marés. As Tábuas das Marés são publicações editadas anualmente pela DHN, que apresentam previsões de maré para diversos portos e ilhas da costa brasileira e para Estação Antártica Comandante Ferraz. Uma versão *on line* das Tábuas de Marés pode ser consultada no sítio <https://www.mar.mil.br/dhn>.

As velocidades representadas nas Cartas de Correntes de Maré são dadas em nós e décimos de nó<sup>3</sup> e são representativas de uma situação média de sizígia, conforme destacado em nota contida nas próprias Cartas (cf. Figuras 6 e 7).

---

<sup>3</sup> Nó é unidade náutica internacional de medida de velocidades no mar, 1 nó corresponde a 1 milha náutica por hora (MN/h). Uma milha náutica mede 1852 m e 1 nó corresponde a 0,514 m/s. A regra prática aproximada para se converter *m/s* para nós é simplesmente multiplicar por dois.

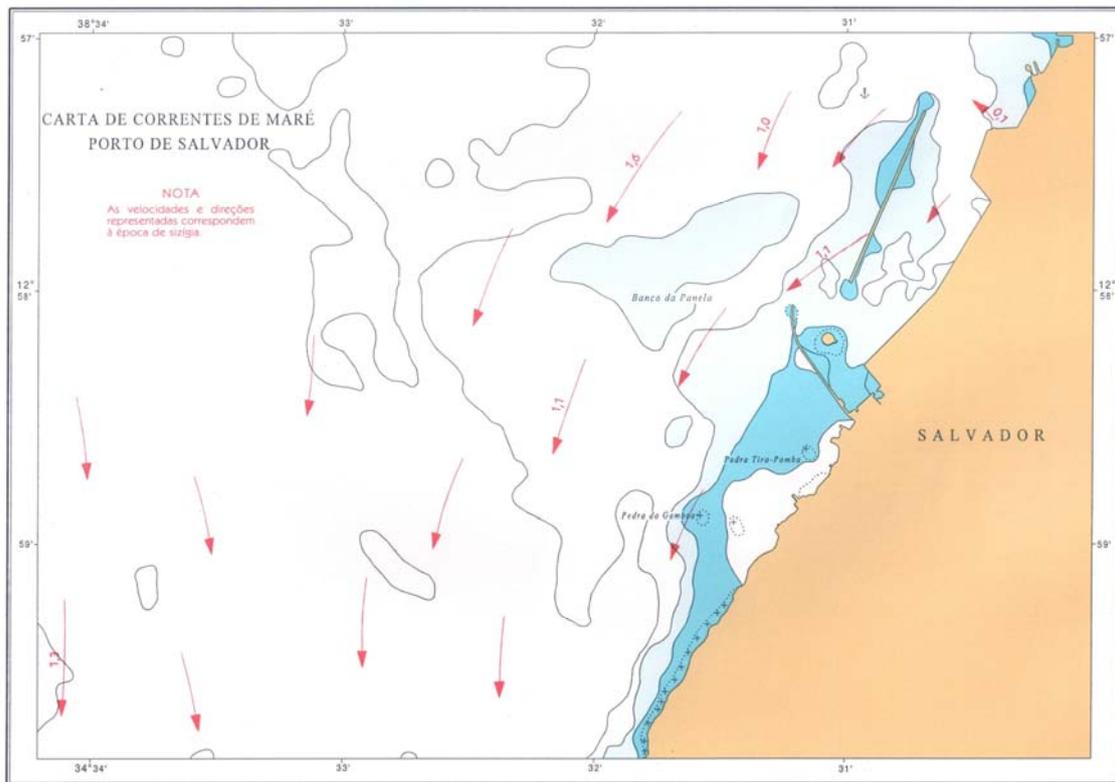


Figura 6 – Carta de Correntes de Maré do Porto de Salvador, BA, correspondente a três horas depois da preamar de sizigia (Fonte: DHN, 1975).

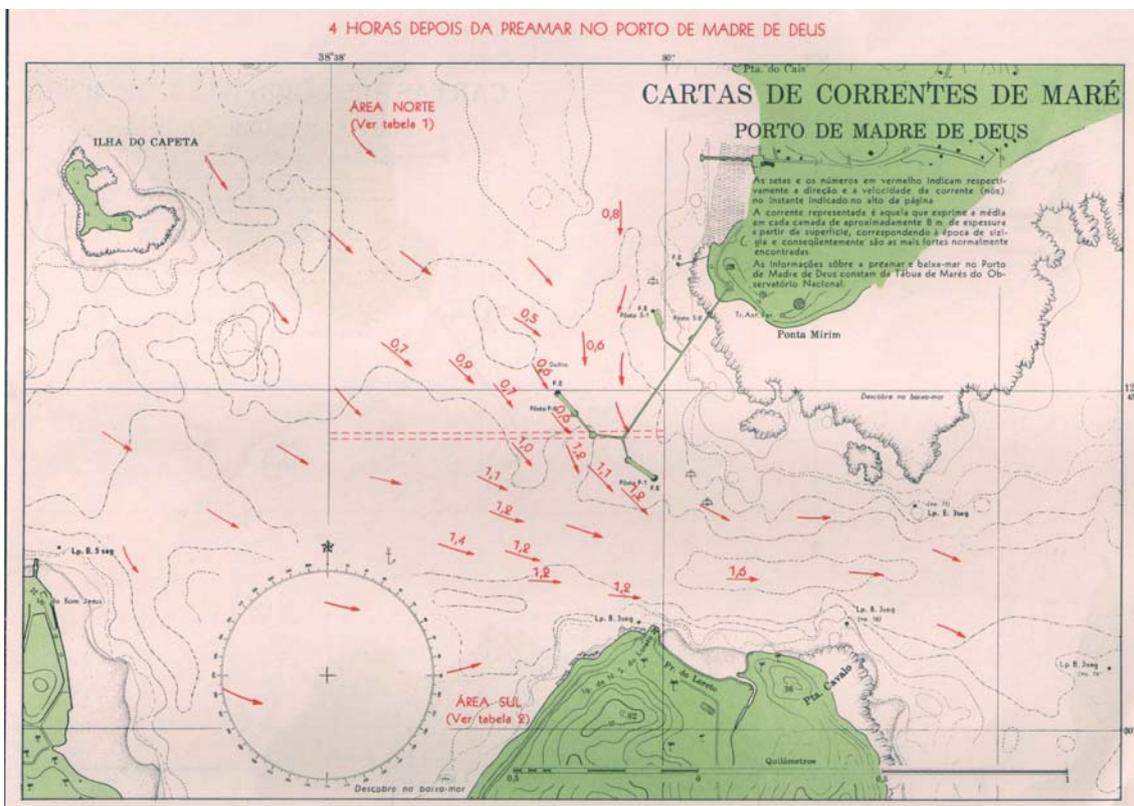


Figura 7 – Carta de Correntes de Maré do Terminal Marítimo Alte. Alves Câmara (Temadre), BA, correspondente a quatro horas depois da preamar de sizigia (Fonte: DHN, 1963).

No caso das Cartas de Correntes do Porto de Salvador, os valores das velocidades representadas se referem à corrente média em uma coluna d'água de 5 metros de profundidade a partir da superfície livre. Contudo, não há impropriedade na extensão dessa profundidade para até 10 metros, tendo em vista as diferenças insignificantes existentes entre tais valores (DHN,1975). Em relação às Cartas de Correntes do Terminal Marítimo de Madre de Deus, a velocidade representada é a média em uma coluna d'água de 8 m de profundidade a partir da superfície livre (DHN, 1963).

A fim de se obter a velocidade das correntes em situações de maré fora da época da sizígia, as intensidades representadas nas Cartas são multiplicadas por um fator de correção, que é obtido de ábacos ou tabelas existentes nas páginas iniciais da publicação. Os elementos de entrada nesses ábacos são o intervalo de tempo entre a PM e a BM (ou vice-versa) e a altura<sup>4</sup> da maré prevista a que o usuário estará sujeito no instante de interesse. Não há qualquer correção a ser aplicada às direções representadas.

As observações acima mencionadas constam das instruções iniciais das Cartas de Correntes de Maré, onde o navegante também é alertado do fato de que ventos anormais podem modificar substancialmente as informações indicadas.

Nas Figuras 8 e 9 que se seguem, são exemplificados ábacos para correção da velocidade das correntes a serem empregados respectivamente no Porto de Salvador (região de ocorrência de maré semidiurna) e na Baía de Guanabara (região de ocorrência de maré semidiurna com desigualdades diurnas).

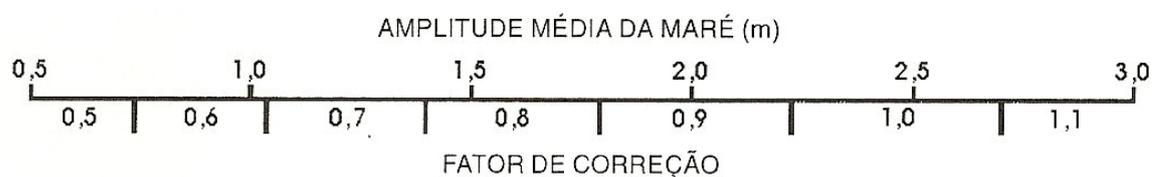


Figura 8 – Ábaco de fator de correção da velocidade da corrente de maré para o Porto de Salvador, BA. Entrando com o valor de altura da maré correspondente ao instante de interesse, o usuário obtém o fator de correção a ser multiplicado pela velocidade indicada nas Cartas de Correntes (Fonte: DHN, 1975).

<sup>4</sup> As publicações editadas pela Marinha do Brasil denominam amplitude de maré o que é conhecido na comunidade científica e também neste trabalho como altura de maré, ou seja, a distância vertical entre uma PM e uma BM consecutiva.

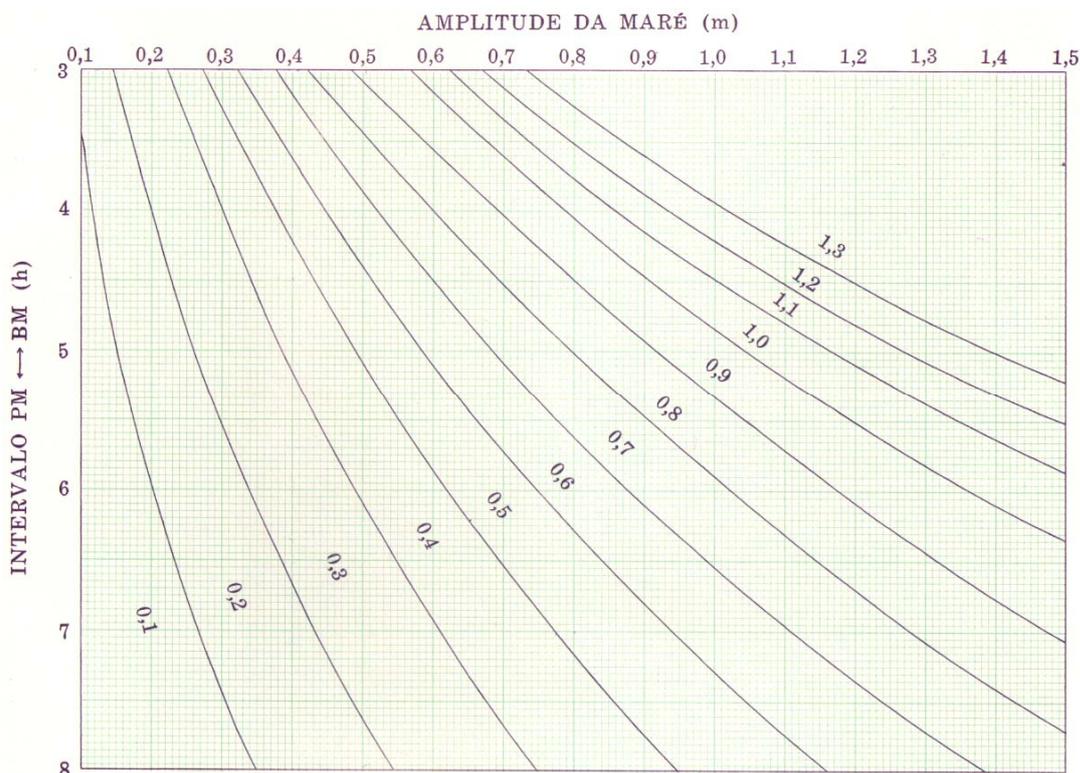


Figura 9 – Ábaco de fator de correção da velocidade da corrente de maré para a Baía de Guanabara, RJ. Entrando com valor de altura da maré correspondente ao instante de interesse e intervalo de tempo entre a PM e a BM, o usuário obtém o fator de correção a ser multiplicado pelas velocidades constantes nas Cartas de Correntes (Fonte: DHN,1974).

Em algumas Cartas de Correntes, o fator de correção é extraído de tabelas, ao invés de ábacos, conforme ocorre, e.g., nas Cartas do Terminal Marítimo de Madre de Deus. Os elementos de entrada são os mesmos a serem aplicados aos ábacos acima apresentados.

Atualmente, existem Cartas de Correntes de Maré publicadas para as seguintes localidades do País com suas respectivas datas de edição:

- Rio Pará – de Salinópolis a Belém, PA (1962);
- Itapessoca, PE e Luís Correia, PI (1962);
- Porto de Vitória, ES (1962);
- Terminal Marítimo de Madre de Deus, BA (1963);
- Porto do Natal, RN (1966);
- Proximidades da Baía de São Marcos e Portos de São Luís e Itaqui, MA(1972);
- Baía de Guanabara e Porto do Rio de Janeiro, RJ (1974);
- Porto de Salvador, BA (1975);
- Porto de Paranaguá, PR (1976);
- Porto de Santos, SP (1977); e
- Rio Amazonas – da Barra Norte ao Porto de Santana, AP (1981).

Outros países, como os Estados Unidos, publicam suas informações relativas às correntes de maré na forma de Tábuas de Correntes de Maré de aparência semelhante às Tábuas das Marés brasileiras. As Tábuas de Correntes de Maré americanas contêm previsões diárias, para diversas estações de referência, dos instantes e velocidades correspondentes às correntes máximas de enchente, de vazante e de corrente nula, correspondentes às estofas<sup>5</sup> da enchente e da vazante.

Além das estações de referência, existem correções que permitem obter a previsão da corrente de maré para muitas outras estações secundárias. As correções são calculadas com base nas diferenças de fase e nível existentes entre a estação de interesse e a estação de referência especificada. O sistema de previsão de correntes de maré, para as mais de 2700 estações de referência e secundárias espalhadas pela costa dos Estados Unidos e América Central, foi elaborado pelo Centro de Produtos e Serviços de Oceanografia Operacional da NOAA<sup>6</sup> (CO-OPS) e encontra-se disponível no endereço eletrônico [http://tidesandcurrents.noaa.gov/curr\\_pred.html](http://tidesandcurrents.noaa.gov/curr_pred.html).

### **Breve histórico da elaboração da Carta de Correntes de Maré do Porto de Salvador**

A referência bibliográfica utilizada neste item é o Relatório Final da Operação Salvador (OLIVEIRA FILHO, 1974) – campanha de campo que coletou os dados e informações que subsidiaram a produção das Cartas de Correntes do Porto de Salvador atualmente em vigor.

Dando continuidade ao programa desenvolvido pela DHN de geração das atuais Cartas de Correntes de Maré, foi executada, entre os meses de fevereiro e maio de 1974, a chamada Operação Salvador. A campanha teve como principal propósito o conhecimento das correntes de maré nas regiões de maior interesse sob o ponto de vista da navegação no interior da BTS e a obtenção de dados que permitissem estudos preliminares sobre a circulação hidrodinâmica no interior do corpo d'água. Foram

---

<sup>5</sup> Conhecida com *slack water* na literatura internacional.

<sup>6</sup> Sigla do Inglês de *National Oceanic and Atmospheric Administration*

coletados e analisados dados de correntometria e de marés, além de informações meteorológicas.

As observações correntométricas foram realizadas em 16 estações, distribuídas pela região de interesse (Figura 10). Dados de maré foram coletados em quatro estações localizadas no Porto de Salvador, Ponta de Itaparica (extremo norte da Ilha de Itaparica), Terminal Gerdau/USIBA (Ponta da Sapoca, distrito de São Tomé do Paripe) e Terminal Alte. Alves Câmara (Ilha Madre de Deus). Informações meteorológicas foram obtidas a bordo dos navios integrantes da campanha.

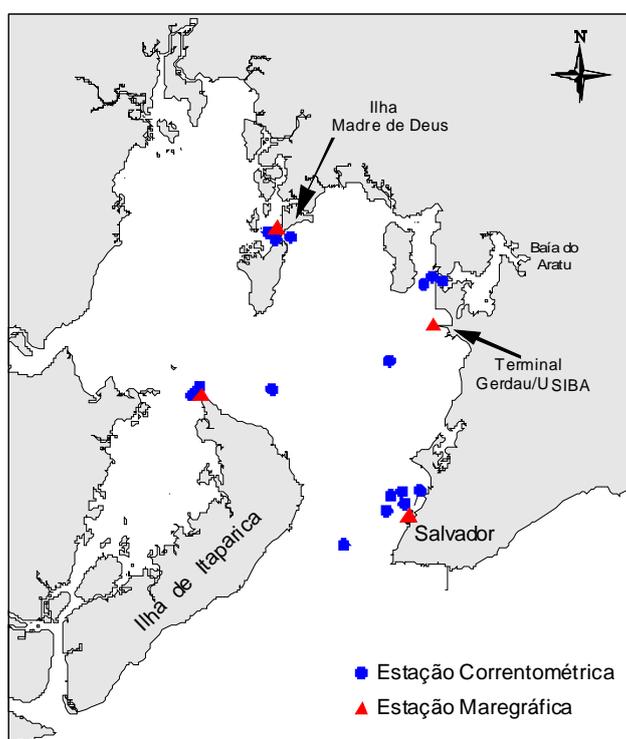


Figura 10 – Esquema de posicionamento das estações correntométricas e maregráficas ocupadas por ocasião da campanha “Operação Salvador”, realizada de fevereiro a maio de 1974, com a finalidade de gerar as atuais Cartas de Correntes de Maré do Porto de Salvador (adaptado de “Relatório Final da Operação Salvador”, OLIVEIRA FILHO, 1974).

Em cada estação correntométrica, os dados foram coletados em até quatro níveis ao longo da coluna d'água, por um período de 72 horas, com intervalos entre instantes de aquisição de uma hora e duração mínima de cada aquisição de 10 minutos. Foram empregados correntógrafos mecânicos *Bergen Nautik*, que apresentavam a direção e velocidade das correntes em rolos de registro gráfico por meio de representação vetorial.

O mesmo tipo de correntógrafo já havia sido anteriormente utilizado na Operação Guanabara, destinada à geração das Cartas de Correntes de Maré da Baía de Guanabara. O desempenho desse tipo de equipamento foi satisfatório considerando a época da empreitada, entretanto apresentou alguns inconvenientes que tornaram seu uso descontinuado, tais como: ser um equipamento bastante frágil, ter manutenção dispendiosa e ser alimentado por pilhas comuns. A título de curiosidade, em toda Operação Salvador, foram despendidas 1.740 pilhas grandes, 500 pilhas médias e 440 pilhas pequenas.

Após o processamento dos dados coletados em campo na Operação Salvador, foi produzida, com uso da análise harmônica de correntes, a Carta de Correntes de Maré do Porto de Salvador, publicada em 1975.

## 4. REGIÃO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Optou-se por realizar uma aplicação prática da metodologia aqui apresentada no sistema estuarino da BTS, BA. Os principais fatores que motivaram a escolha dessa região foram a disponibilidade de dados meteo-oceanográficos coletados em campo e a destacada importância da BTS em termos de navegação marítima, esporte e recreio. Há de se mencionar também sua destacada relevância científica, histórica e turística na vida do estado e do País.

Quanto à disponibilidade de dados, foram utilizados os dados provenientes das duas campanhas de campo realizadas no ano de 1999, por ocasião do Programa Bahia Azul, conforme mencionado anteriormente no subitem 1.2. Cada campanha de campo teve duração de cerca de 15 dias, sendo uma realizada no verão e outra no inverno. Em cada uma, foram monitorados dados oceanográficos em 20 estações distribuídas no interior da BTS e na área de plataforma.

As estações de verão são identificadas pelos trigramas S01 a S20 e as de inverno, pelos trigramas W01 a W20. Foram medidos dados de correntes em 17 estações, nas quais também eram simultaneamente medidos níveis em 13 delas. Três outras estações realizavam medições precisas de nível. As campanhas contaram também com perfis de CTD, lançamento de derivadores e medições de vento. Sem dúvida, esse é o maior levantamento de dados meteo-oceanográficos já realizado no Brasil (XAVIER, 2002).

Quanto à importância da BTS em termos de navegação, segundo Villa (2003), a BTS possui condições naturais que a qualificam como um dos melhores sítios do Brasil e do mundo para implantação de portos, terminais, estaleiros, marinas e prática de atividades náuticas.

Às margens deste complexo estuarino existem os portos principais de Aratu e Salvador, que juntos movimentam cerca de 4,4% de toda mercadoria portuária nacional (ANTAQ, 2007). Há também a Base Naval de Aratu – completo ponto de apoio para serviços de manutenção e reparos navais. Existem diversos outros terminais espalhados pelas margens da BTS (cf. Figura 11, pág. 27), dentre os quais se destaca o Terminal

Marítimo Almirante Alves Câmara (Temadre), localizado na Ilha Madre de Deus, operado pela Petróleo Brasileiro S.A – PETROBRAS, representando o principal ponto de escoamento da produção da Refinaria Landulpho Alves – Mataripe (RLAM), a mais antiga do País, localizada às margens do Rio Mataripe, município de São Francisco do Conde (TRANSPETRO, 2006).

Podemos citar outros terminais, tais como: o terminal marítimo privativo de granéis sólidos da Gerdau/Usina Siderúrgica da Bahia (USIBA), na Ponta da Sapoca; o terminal privativo de granéis líquidos da empresa Dow Produtos Químicos do Nordeste, na margem norte do Canal do Cotegipe; o Terminal de São Roque, pertencente à PETROBRAS, localizado na margem direita do Canal do Paraguaçu; o Terminal Portuário Miguel de Oliveira, especializado na movimentação de veículos pertencentes ao Grupo Executivo Ford (inaugurado em outubro de 2005); o Terminal Portuário Cotegipe e o Terminal Moinho Dias Branco entre outros. Destinado ao transporte de passageiros e veículos entre a cidade de Salvador e a Ilha de Itaparica existem respectivamente os terminais de São Joaquim e Bom Despacho, caracterizados pelo permanente tráfego de embarcações do tipo *Ferry-Boat*.

São diversos também os centros industriais existentes na região do recôncavo baiano. Destacam-se, além da Refinaria Landulpho Alves, o Centro Industrial de Aratu e o Pólo Petroquímico de Camaçari – o primeiro complexo petroquímico planejado do País e maior do hemisfério sul, contando com mais de 60 empresas químicas, petroquímicas e de outros ramos de atividade. A atividade pesqueira nos arredores da BTS também é intensa, contando com treze colônias de pesca nos arredores da BTS, além de algumas associações de pesca.

Passando para o seguimento de esporte e lazer, a BTS é considerada um excelente sítio para prática de esportes náuticos, contando com vasto número de atracadouros, águas mornas e ventos favoráveis. Destaca-se a Bahia Marina, ao sul do Porto de Salvador, com infra-estrutura de padrão internacional. Outros pontos de apoio são a Marina Itaparica, Iate Clube da Bahia, Aratu Iate Clube, Marina e Estaleiro Aratu e etc.

Diante dos fatos acima mencionados, há de se imaginar a imensidão e diversidade do tráfego marítimo existente no interior da BTS. A Figura 11 que se segue apresenta uma imagem satélite da BTS com a localização de alguns dos principais portos, terminais e indústrias existentes na região do recôncavo baiano.

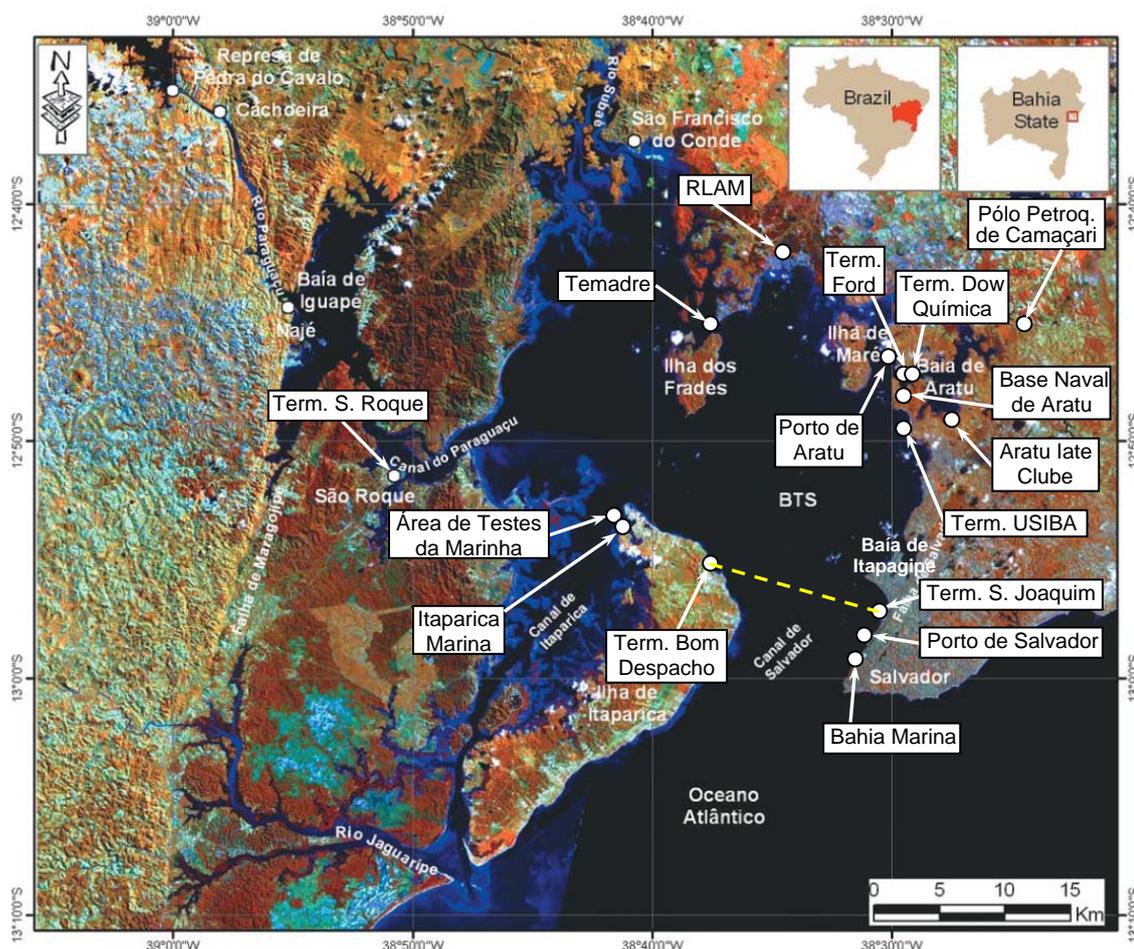


Figura 11 – Localização de alguns dos principais portos, terminais e indústrias existentes na região da BTS. A linha tracejada de cor amarela representa trajeto de *Ferry-Boats* (Fonte da imagem: adaptada de Cirano e Lessa, 2007).

### Características da região

Apresentamos a seguir um breve sumário das principais características oceanográficas básicas da BTS. Maiores detalhes sobre características da BTS podem ser encontradas em Lessa *et al.* (2001), Xavier (2002) e Cirano e Lessa (2007) - referências que constituem as principais fontes de informações que subsidiaram a elaboração deste tópico.

Localizada no estado da Bahia, região nordeste do Brasil, a BTS é a segunda maior baía costeira do País, após a Baía de São Marcos, no Maranhão. Sua área aproximada é de 1200 km<sup>2</sup> com uma profundidade média de 9,8 m. As dimensões aproximadas da BTS são de 50 km no eixo N-S e 32 km no eixo E-W.

A geometria da baía caracteriza-se por suas diversas planícies estuarinas e pequenas baías internas, dentre as quais se destacam as baías do Aratu, de Iguape e de Itapagipe. A BTS é uma feição costeira com morfologia fortemente controlada por falhas geológicas. A estrutura das falhas promove a ocorrência de vários altos topográficos e explica a existência de numerosas ilhas no interior da baía. A maior delas é a Ilha de Itaparica, localizada na porção SW da BTS, delimitando os dois canais de ligação com o mar aberto: Canal de Salvador e Canal de Itaparica (cf. Figura 11, pág.27).

De acordo com Cirano e Lessa (2007),

A distribuição mensal de chuvas sobre a baía está defasada do interior. Na primeira, a precipitação é concentrada principalmente durante o outono e início do inverno (de março a julho), quando ocorrem 60% da precipitação total. Por outro lado, a estação chuvosa no continente ocorre entre novembro e fevereiro.

A baía possui uma complexa rede de drenagem. Três grandes bacias de drenagem convergem para a BTS: Paraguaçu, Jaguaribe e Subaé. A descarga média de água doce é de aproximadamente 121 m<sup>3</sup>/s que podem ser adicionados por mais 41 m<sup>3</sup>/s considerando a precipitação das chuvas diretamente sobre a área da baía. O aporte de água doce para BTS é fortemente influenciado pela sazonalidade, com aumento da descarga líquida média ocorrendo durante o inverno, estação de característica chuvosa. A descarga fluvial média representa menos de 0,1% do prisma de maré<sup>7</sup> médio de sizígia, avaliado em  $1,3 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/s. Esse valor pode ser ampliado para até 1,6 % no caso de uma situação extrema que considere a descarga máxima de todos os rios ocorrendo simultaneamente (CIRANO e LESSA, 2007).

---

<sup>7</sup> Prisma de maré pode ser definido como o volume de água do mar que entra na bacia interior do estuário durante a enchente da maré (DYER, 1997).

Entre 1980 e 1985, foi construída uma barragem no Rio Paraguaçu, cerca de 15 km a montante da Baía de Iguape (cf. Figura 11), denominada Barragem Pedra do Cavalo. A construção da barragem causou uma redução da vazão do Rio Paraguaçu de aproximadamente 50% do valor médio anual de origem (LIMA e LESSA, 2002). Dessa forma, o regime hidrológico do Rio Paraguaçu que afluía para a BTS passou a ser controlado, e apenas uma pequena fração da vazão afluente à barragem ficou sendo transferida para o setor estuarino do rio.

No ano de 2005, foi implantada a Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo que modificou a operação da barragem. A vazão afluente para o estuário passou então a depender da operação das turbinas, podendo liberar até 80 m<sup>3</sup>/s (com 1 turbina) ou chegar próximo a 160 m<sup>3</sup>/s (com 2 turbinas). A vazão sanitária é de 10 m<sup>3</sup>/s. Além da geração de energia, a barragem também é utilizada para captação de água para abastecimento urbano da região metropolitana de Salvador e outras cidades próximas à barragem, além do controle de enchentes a jusante, nas cidades históricas de Cachoeira e São Félix (GENZ, 2006, 2008).

As marés apresentam características semidiurnas, com duas preamares e duas baixamares bem definidas ao longo do dia, apresentando pequenas desigualdades diurnas. O número de forma  $F$ , dado pela expressão  $F = (K_1 + O_1) / (M_2 + S_2)$ , cf. definida por A. Courtier (DEFANT, 1960 *apud* MIRANDA *et al.* 2002) varia entre 0,11, no oceano, e 0,06 na maior parte interior da baía. Segundo esse critério de classificação, marés do tipo semidiurna possuem número de forma variando entre 0 e 0,25.

As alturas médias de maré de sizígia e de quadratura são aproximadamente de 2,4 m e 1,1 m (XAVIER, 2002). A onda de maré possui características de tendência estacionária na maior parte da baía e sofre distorções ao se propagar em seu interior, apresentando vazantes com menor duração que as enchentes. O padrão assimétrico da maré ocorre em quase toda região interna da BTS, exceto no Rio Paraguaçu. São notadas também ampliações na onda de maré por cerca de 1,5 vezes no interior da baía (CIRANO e LESSA, 2007).

A circulação no interior da BTS é predominantemente forçada pela maré astronômica e não varia significativamente ao longo do ano. Ventos locais mostram ter papel secundário sobre a circulação quando comparados com a maré, modificando mais destacadamente o escoamento superficial. As correntes de maré na BTS são predominantemente unidirecionais com sentidos alternantes e mais intensas durante a maré vazante na maior parte da baía. Correntes de maré relativamente fortes se fazem sentir em um raio de aproximadamente 10 km para fora da embocadura (LESSA *et al.* 2001). Por outro lado, as propriedades das águas interiores da BTS sofrem alterações significativas nas estações chuvosa (inverno) e seca (verão).

De acordo com Cirano e Lessa (2007),

Durante o verão, as águas dentro da baía têm características oceânicas, com a Água Tropical (AT) penetrando ao longo de toda a região, com exceção da desembocadura do Rio Paraguaçu. A temperatura da água dentro da baía é maior do que a da região costeira adjacente, essas variações podem ser de até 3°C, atingindo temperaturas máximas de 30°C.

Durante o inverno, com o aumento do aporte de água doce, variações de salinidade de cerca de 4 podem ser observadas entre a parte mais interna da BTS e a região costeira adjacente. Valores de salinidade dentro da baía podem chegar até 32,3, inibindo a penetração da AT dentro da BTS, que fica totalmente ocupada por uma água costeira formada localmente. [...]

Apesar da circulação não apresentar uma variação sazonal significativa no interior da baía, observa-se que a plataforma interna associada é caracterizada por dois cenários. Durante o verão, os ventos de leste, que proporcionam ressurgência, atuam para gerar correntes para sudoeste, enquanto que durante o inverno, a maior ocorrência de frentes frias (ventos de sul), tende a reverter o padrão de circulação.

Em diferentes campanhas de campo, com medições de temperatura e salinidade, realizadas no final da década de 70 por Wolgemuth *et al.* (*apud* LESSA *et al.*, 2001), a BTS apresentou estrutura de coluna d'água bem misturada com variações de salinidade inferiores a 1,5 em locais com profundidades entre 20 e 30 m. As variações de salinidade e temperatura na seção principal da BTS apresentaram, claramente, características de mar aberto, com salinidades variando entre 33,0 e 36,7 e temperatura entre 24 e 30°C. Características típicas de estuários são encontradas apenas no Rio Paraguaçu.

Resultados de estudos apresentados por Lessa *et al.* (2001) confirmaram o proposto anteriormente por Wolgemuth *et al.* e indicaram que os sentidos das correntes instantâneas no interior da BTS são, em geral, concordantes em diferentes profundidades na maioria dos locais de medição. Sentidos divergentes das correntes foram associados às pequenas velocidades (proximidade da estofa).

Dados oceanográficos de campo coletados na BTS pelo consórcio Hydros-CH2 Mhill e Fundação Coppetec durante as campanhas de verão (janeiro de 1999) e de inverno (maio e junho de 1999) apresentaram perfis verticais de velocidades quase uniformes em muitas das estações de coleta de dados localizadas no interior da BTS. Esse fato possibilitou a comparação de velocidades promediadas na vertical com dados de campo coletados em profundidades específicas (ROSMAN *et al.*, 1999, 2000).

Estudos mais recentes realizados por Cirano e Lessa (2007) com base nesses dados confirmaram que a maré é nitidamente a principal forçante do sistema. Outras forçante secundárias que podem também influenciar a circulação no interior da BTS são representadas pelo vento, efeitos meteorológicos remotos e forçantes termo-halinas, as quais possuem importância mais destacada em estudos envolvendo escalas subinerciais.

## 5. MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE SISTEMAS ESTUARINOS

Conforme se lê em Rosman (1997),

Usualmente, dá-se o nome de modelagem hidrodinâmica de sistemas estuarinos à determinação da quantidade de movimento da água, resultando na definição dos padrões de correntes. [...] Tipos de modelos muito comuns de interesse em sistemas estuarinos são os modelos hidrodinâmicos em fluido homogêneo.

Modelos hidrodinâmicos em fluido homogêneo são modelos para determinação do padrão de correntes em corpos d'água com superfície livre, tais como águas costeiras, baías, sistemas estuarinos, rios, lagos, reservatórios e etc. Tais modelos variam grandemente em complexidade indo desde modelos unidimensionais (1D) até modelos tridimensionais (3D), passando por modelos bidimensionais em planta ou promediados verticalmente (2DH), bidimensionais em perfil ou promediados lateralmente (2DV).

Sistemas estuarinos são provavelmente os corpos d'água naturais de maior complexidade, por apresentarem escoamentos altamente variados no espaço e variáveis no tempo. A mistura de água doce proveniente dos rios com a água salgada do mar gera gradientes de densidade que induzem a uma circulação adicional típica, denominada circulação estuarina. Tal complexidade mostra o desafio que representa a modelagem em tais sistemas. Entretanto, existem vários tipos de estuários e diferentes fenômenos de interesse e, dependendo de cada caso, simplificações e aproximações são adotadas.

Sistemas estuarinos são considerados corpos d'água rasos. Um corpo d'água, com determinada profundidade média  $\bar{H}$ , é considerado raso para um fenômeno com escala espacial característica,  $S$ , quando a condição  $S > 20 \bar{H}$  é atendida. Essa condição é perfeitamente satisfeita no estudo de fenômenos associados à maré, pois as escalas espaciais características dos escoamentos de interesse são sempre muito maiores que a profundidade dos sistemas estuarinos.

De fato, o interesse da modelagem em sistemas estuarinos está centrado nos escoamentos oriundos da interação da propagação das marés com os escoamentos de origem fluvial e a influência dos ventos. O interesse não está nas ondas de curto período (da ordem de poucos segundos) geradas pelo vento, mas em ondas de gravidade com períodos variando entre os típicos de marés (horas a dias), até períodos relativos às oscilações naturais dos sistemas estuarinos (da ordem de vários minutos) (ROSMAN, 1997).

Um sistema de modelos de concepção nacional e de uso consagrado em modelagem de corpos d'água rasos, tais como sistemas estuarinos, é o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA. Novas versões do SisBaHiA têm sido continuamente implementadas na COPPE/UFRJ desde 1987, com ampliações de escopo e aperfeiçoamentos introduzidos por meio de várias teses de doutorado, dissertações de mestrado e projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados pela Fundação Coppetec - órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da COPPE/UFRJ. Maiores detalhes sobre trabalhos desenvolvidos com o uso do SisBaHiA podem ser encontrados no sítio <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/AplicacoesProjetos.htm>.

## 5.1 Escolha da ferramenta de modelagem

Na metodologia do trabalho aqui proposto, optou-se por adotar o modelo hidrodinâmico<sup>8</sup> do SisBaHiA – versão 6.5 S8G6. Por meio do SisBaHiA pretende-se produzir um prognóstico de correntes geradas pela maré astronômica, que servirá de subsídio para atualização das Cartas de Correntes de Maré atualmente em vigor.

Diversos fatores motivaram a preferência do autor pelo uso do SisBaHiA:

- trata-se de um sistema totalmente nacional e de domínio público, cedido gratuitamente para usos profissionais e acadêmicos, desde que não envolvam uso comercial. A cessão é feita por meio de contrato de cooperação técnico-científica;
- os modelos e ferramentas são integrados em uma interface de trabalho extremamente amigável;
- possui necessidade computacional reduzida, podendo ser instalado no disco rígido de computadores pessoais de uso comum;

---

<sup>8</sup> O sistema de modelos do SisBaHiA possui outros módulos não empregados no trabalho em tela, são eles: Modelo de Transporte Euleriano, Modelo de Qualidade de Água, Modelo de Transporte Lagrangeano e Modelos de Geração e Propagação de Ondas.

- possui código aberto, cedido mediante solicitação formal;
- por ter sido desenvolvido pela COPPE/UFRJ, torna-se fácil o acesso a pessoal experiente altamente capacitado e qualificado para prestar apoio e esclarecer eventuais dificuldades encontradas por ocasião do uso do sistema; e
- existência de um convênio de cooperação técnica e científica, firmado em 1999, entre a Marinha do Brasil e a Fundação Coppetec – COPPE/UFRJ, com o objetivo de usar o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA para a geração de Cartas de Correntes de Maré para os portos brasileiros.

## **5.2 Usos precedentes do SisBaHiA na região da BTS**

Conforme apresentado em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/AplicacoesProjetos.htm>, o SisBaHiA já foi aplicado à região da BTS em diversas outras oportunidades. Durante o período de março de 1999 a dezembro de 2000, foi desenvolvido, na COPPE/UFRJ, um trabalho por contrato do consórcio Hydros-CH2 Mhill com a Fundação Coppetec. O trabalho envolveu estudos de diagnóstico e prognóstico ambientais para a BTS. Naquela ocasião, o SisBaHiA foi, pela primeira vez, calibrado e validado para a BTS e foi também instalado no então Centro de Recursos Ambientais (CRA), órgão do Governo da Bahia atualmente denominado Instituto do Meio Ambiente (IMA). Desde então, o SisBaHiA vem sendo regularmente utilizado pelo IMA como ferramenta de gestão ambiental da BTS.

Aplicações de modelo hidrodinâmico 3D e 2DH do SisBaHiA também ocorreram em 2003, juntamente com modelos de geração de ondas e modelos de transporte lagrangeano condicionado, para determinação de correntes residuais, de transporte de sedimentos e poluentes na BTS. A aplicação foi efetuada no âmbito do contrato entre o consórcio Hydros-CH2 Mhill e a Fundação Coppetec, intitulado “Modelagem Computacional para Análise de Aspectos da Dinâmica de Sedimentos na Baía de Todos os Santos, BA” (cf. ROSMAN, 2003). Nesse trabalho, foram empregadas a calibração e a validação já realizadas anteriormente no ano 2000.

Nos anos de 2003 e 2004, outras aplicações do SisBaHiA foram realizadas em estudos e projetos de sistemas para disposição oceânica de esgotos através de emissários, na costa oceânica de Salvador. A aplicação foi efetuada no âmbito do contrato entre o consócio SDO-Hydros-CH2 Mhill e a Fundação Coppetec, intitulado “Modelagem Computacional para Análise de Aspectos dos Sistemas de Disposição Oceânica da Área Metropolitana de Salvador, BA”. Nessa ocasião, foram empregados os modelos hidrodinâmico 3D e de qualidade de água.

Usos mais recentes dos modelos hidrodinâmico 3D e de qualidade de água foram realizados no trabalho “Suporte ao Monitoramento Ambiental da Área de Influência do Emissário Submarino do Rio Vermelho - Salvador, BA”. A aplicação é atinente ao Programa de Trabalho no contexto do contrato de cooperação técnica com a empresa Hydros Engenharia e Planejamento Ltda., em andamento desde março de 2008.

### 5.3 Alguns fundamentos do modelo hidrodinâmico

Apresentamos a seguir um breve sumário dos principais fundamentos básicos que compõem a formulação matemática do Modelo Hidrodinâmico no SisBaHiA dentro do contexto da modelagem de corpos d'água rasos. Maiores detalhes sobre modelos de circulação em corpos d'água rasos podem ser encontrados em Rosman (1989, 1997). Outras amplas considerações específicas sobre os modelos do SisBaHiA podem ser encontradas na Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN *et al.*, 2008) disponível em [http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_TecRef\\_V65.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_TecRef_V65.pdf). Essas referências constituem as principais fontes de informações que subsidiaram a elaboração deste tópico.

O modelo hidrodinâmico adotado no SisBaHiA denomina-se FIST3D<sup>9</sup>. Trata-se de um eficiente modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, para escoamentos homogêneos e de grande escala. Segundo Rosman (1997), “o termo ‘grande escala’ significa de fato a menor escala de interesse que se deseja resolver na modelagem de um dado

---

<sup>9</sup> FIST3D é a sigla de *Filtered in Space and Time* 3D – versão 3D da linhagem FIST, que representa um sistema de modelagem de corpos d'água nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem semelhantes às empregadas na Simulação de Grande Vórtices (LES – *Large Eddy Simulation*). Para maiores detalhes sobre LES cf. Rosman (1989).

fenômeno”. Em geral, escalas práticas de aplicações de engenharia ou de ciências do meio ambiente em corpos d’água variam de muitos centímetros a dezenas de quilômetros, e de segundos a meses, dependendo do fenômeno em estudo.

O modelo é composto por dois módulos:

1. Um módulo promediado na vertical ou bidimensional na horizontal (2DH), através do qual a elevação da superfície livre e velocidades de corrente 2DH promediadas na vertical são calculadas. O modelo FIST3D sempre calcula esse módulo.
2. Um módulo 3D que calcula o campo de velocidades tridimensional.

No caso de modelagem 3D, os dois módulos funcionam acoplados e são interdependentes. O módulo 2DH pode ser executado como um módulo independente.

Segundo Rosman (2003), o Modelo Hidrodinâmico existente na versão atual do SisBaHiA é um modelo de circulação dominado por forçantes barotrópicas<sup>10</sup>, e otimizado para corpos de água naturais nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. O modelo otimizado é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa.

As discretizações espaciais horizontais empregam o Método dos Elementos Finitos. Esse método apresenta como principal vantagem a enorme flexibilidade em discretizar domínios complexos tão comuns em sistemas estuarinos. A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma. A discretização temporal é feita por meio de esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem.

O conceito de modelagem de sistemas estuarinos pode ser visto como uma idealização simplificada desses complexos corpos d’água naturais. Dessa forma, a modelagem envolve, obrigatoriamente, a utilização de aproximações que simplificam o problema em estudo, centralizando a atenção sobre os principais fenômenos de interesse.

---

<sup>10</sup> Encontra-se, atualmente, em fase final de elaboração a versão 7 beta do SisBaHiA, que possui a opção de considerar efeitos baroclínicos.

Assim sendo, são consideradas, na formulação matemática das equações do modelo hidrodinâmico do SisBaHiA 6.5, as aproximações hidrostática, de Boussinesq e a condição de fluido incompressível.

No contexto da aproximação de Boussinesq, foi considerado, no presente trabalho, uma massa específica constante para todo o domínio de modelagem no valor de  $1023,1 \text{ kg/m}^3$ . Esse valor foi obtido com base em medições de campo realizadas em pontos distribuídos pelo interior da BTS. Na ausência de medições, é comum adotar-se o valor de  $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$  para sistemas estuarinos.

## 5.4 Síntese das equações governantes

Conforme apresentado na Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN *et al.* 2008),

A mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento é governada pelas equações de Navier-Stokes. Tais equações representam o princípio da conservação da quantidade de movimento. Essas equações em conjunto com a Equação da Continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo de água.

Tratando-se de corpos d'água relativamente bem misturados na vertical, admite-se que o termo de pressão devido a gradientes horizontais de densidade pode ser desprezado nas equações do movimento em planta. Tal termo possui valor pequeno quando comparado ao termo de pressão devido a gradientes da superfície livre. Logo, as equações de estado e transporte de escalares não serão incluídas na formulação geral do problema, permanecendo apenas as equações do movimento e da continuidade. O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA 6.5 é considerado um modelo barotrópico, uma vez que efeitos baroclínicos são desprezados.

A formulação matemática do modelo hidrodinâmico adota as seguintes variáveis principais (cf. Figura 12):

$\zeta$  = Elevação da superfície livre

H = Altura da coluna d'água ou profundidade instantânea

$h$  = Cota do fundo

$u_i$  = Componente da velocidade na direção<sup>11</sup>  $x_i$

$U_i$  = Componente da velocidade promediada na vertical na direção  $x_i$

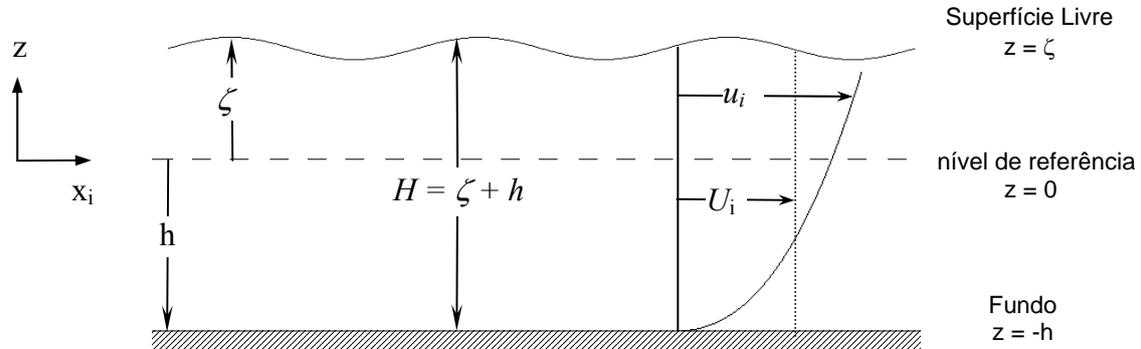


Figura 12 – Sistema de coordenadas e variáveis consideradas no SisBaHiA

Apresentamos a seguir um resumo das equações governantes que compõe a formulação matemática do Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA, considerando as aproximações e condições comentadas anteriormente. Para o cálculo das quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica 3D ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ , e  $\zeta$ ) são necessárias quatro equações:

- Equação da quantidade de movimento na direção  $x$ :

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{Aceleração local}} + \underbrace{u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}}_{\text{Aceleração advectiva}} = \underbrace{-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}}_{\text{Gradiente de pressão hidrostática}} + \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)}_{\text{Resultante das tensões turbulentas dinâmicas}} + \underbrace{2\Phi \text{sen} \theta \cdot v}_{\text{Aceleração de Coriolis}}$$

- Equação da quantidade de movimento na direção  $y$ :

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{Aceleração local}} + \underbrace{u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}}_{\text{Aceleração advectiva}} = \underbrace{-g \frac{\partial \zeta}{\partial y}}_{\text{Gradiente de pressão hidrostática}} + \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)}_{\text{Resultante das tensões turbulentas dinâmicas}} - \underbrace{2\Phi \text{sen} \theta \cdot u}_{\text{Aceleração de Coriolis}}$$

<sup>11</sup> Com o uso da notação indicial em expressões,  $i = 1$  representa a componente na direção  $x$ ,  $i = 2$  representa a componente na direção  $y$  e  $i = 3$  representa a componente na direção  $z$ .

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- Equação da Continuidade integrada na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u \cdot dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v \cdot dz = 0$$

- onde:  $u, v$  e  $w$  = Componentes da velocidade na direção dos eixos  $x, y$  e  $z$  (m/s)  
 $g$  = Aceleração da gravidade local. Adotado valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .  
 $\zeta$  = Elevação da superfície livre (m)  
 $\rho_0$  = Massa específica da água constante de referência ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\tau_{ij}$  = Componentes do tensor de tensões turbulentas ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ )  
 $\Phi$  = Veloc. angular de rotação da Terra no sistema de coord. local (rad/s)  
 $\theta$  = Ângulo de latitude local (rad)

A maioria dos corpos d'água rasos pode ser bem representada por um modelo bidimensional no plano horizontal. Para isso, é preciso que as escalas verticais do movimento sejam muito menores que as horizontais, e que a coluna d'água seja razoavelmente bem misturada, i.e., com pouca ou nenhuma estratificação vertical. Exemplos típicos de sistemas estuarinos bem representados pela modelagem 2DH na costa do Brasil ocorrem na Baía de Guanabara-RJ e Baía de Todos os Santos-BA.

No caso da modelagem 2DH, para o cálculo das três incógnitas da circulação hidrodinâmica 2D ( $U, V$  e  $\zeta$ ) são necessárias três equações, das quais duas são obtidas por meio da integração vertical das equações do movimento nas direções  $x$  e  $y$  e a terceira é a Equação da Continuidade integrada na vertical. Dessa forma, obtém-se como resultado as equações bidimensionais em planta (2DH), também chamadas equações de águas rasas quando o termo de pressão é representado pela aproximação hidrostática.

É através do termo resultante das tensões turbulentas dinâmicas (indicado nas equações do movimento acima apresentadas) que o modelo sente o atrito no fundo e a ação do vento sobre a superfície livre.

A tensão do atrito do fundo é dada pela expressão abaixo no módulo 2DH do modelo hidrodinâmico acoplado com o módulo 3D (empregado no trabalho em tela):

$$\tau_i^F = \rho_0 \cdot \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \cdot U_i \quad (1)$$

onde:  $\tau_i^F$  = Tensão de atrito no fundo na direção  $x_i$ , sendo  $i = 1$  ou  $2$  ( $\text{N/m}^2$ )  
 $\rho_0$  = Massa específica da água. Adotado valor constante de  $1023,1 \text{ kg/m}^3$ .  
 $g$  = Aceleração da gravidade local. Adotado valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .  
 $U_i$  = Velocidade promediada na vertical do escoamento na direção  $x_i$  ( $\text{m/s}$ )  
 $u_*$  = Velocidade de atrito característica, função do perfil de velocidades ( $\text{m/s}$ )  
 $C_h$  = Coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \cdot \log\left(\frac{6H}{\varepsilon}\right) \quad (2)$$

onde:  $H$  = Altura da coluna d'água (m)  
 $\varepsilon$  = Amplitude da rugosidade equivalente do fundo (m)

No modelo FIST3D, a tensão do atrito na superfície livre devido ao vento é dada por:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} \cdot C_D \cdot W_{10}^2 \cdot \cos \phi_i$$

onde:  $\tau_i^S$  = Tensão de atrito na superfície livre devido ao vento na direção  $x_i$ , sendo  $i$  igual a 1 ou 2 ( $\text{N/m}^2$ )  
 $\rho_{ar}$  = Densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $C_D$  = Coeficiente de arraste do vento<sup>12</sup>,  $C_D = (0,80 + 0,065 W_{10}) \cdot 10^{-3}$   
 $W_{10}$  = Magnitude da velocidade do vento local medida na cota de 10 m acima da superfície livre ( $\text{m/s}$ )  
 $\phi_i$  = Ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$  (rad)

---

<sup>12</sup> A expressão adotada no modelo para determinação do coeficiente de arraste do vento é a apresentada em 1982 por Wu (*apud* ROSMAN, 2008).

## 6. CONFIGURAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

No caso da BTS, um corpo d'água que apresenta pouca ou nenhuma estratificação vertical tendendo a verticalmente homogêneo (cf. capítulo 4), pode-se considerar satisfatório quantificar as variáveis em valores médios ao longo da coluna d'água. Desta forma, para a obtenção de padrões de correntes, o uso de valores de velocidades promediados na vertical seria plenamente aceitável.

Entretanto, além do modelo bidimensional em planta (2DH), será também empregada a modelagem tridimensional (3D) acoplada. Será usada a modelagem 3D, a fim de dispor, a navegantes e pesquisadores, informações sobre os padrões verticais das correntes em diferentes profundidades distribuídas ao longo da coluna d'água (cf. subitem 1.2). Outro propósito do uso da modelagem 3D seria confirmar os conhecimentos disponíveis a respeito do comportamento dos perfis verticais de velocidades no interior da BTS.

O período de simulação das rodadas de calibração (com dados do verão de 1999) foi de 35 dias e das rodadas de validação (com dados do inverno de 1999) e geração das Cartas de Correntes foi de 21 dias. As simulações da fase da calibração foram mais longas porque objetivaram também a análise harmônica de maré, usada para comparação entre as constantes harmônicas calculadas pelo modelo e as constantes harmônicas conhecidas das estações maregráficas. O procedimento adotado nessa comparação é apresentado mais adiante, no subitem 7.1.1.2 (pág. 76).

Em todas as simulações, os três primeiros dias foram destinados ao aquecimento do modelo, não sendo, portanto, considerados para efeito de avaliação dos resultados. Conforme apresentado no Relatório de Calibração e Validação (ROSMAN *et al.*, 2000), o modelo FIST3D tem um período de aquecimento de cerca de 1½ ciclo de maré ou menos para a BTS. Para garantir que os resultados considerados não fossem afetados pelas condições iniciais, o período de aquecimento empregado foi ampliado para seis ciclos de maré, resultando em três dias de aquecimento, sendo inicializado na primeira baixa-mar do dia 01 de janeiro de 1999, ocorrida às 9h.

Os resultados do modelo hidrodinâmico 3D foram obtidos através do módulo 3D analítico-numérico do FIST3D, i.e., uma parte do modelo matemático é resolvida através de um modelo numérico e outra através de um modelo analítico. Foi dada preferência a esse módulo por ser mais eficiente em termos computacionais e atender à ordem de precisão requerida no presente trabalho. A outra opção seria o módulo 3D totalmente numérico, menos eficiente em termos computacionais, porém mais preciso em regiões que apresentem ao longo da coluna d'água variações relevantes de acelerações advectivas (ROSMAN *et al.* 2008).

## 6.1 Dados de contorno de terra

Cerca de 90% dos dados do contorno de terra foram cedidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) - órgão subordinado à DHN. Por meio do CHM, foram obtidas:

- uma série de coordenadas geográficas do contorno de terra correspondente à Carta Náutica nº 1110 – Baía de Todos os Santos, 2ª edição, datada de 1984; e
- uma imagem digital georeferenciada da aludida Carta Náutica no formato *tif*, a qual teve seu contorno digitalizado a fim de complementar os dados da série original.

As coordenadas dos pontos da linha de costa situados além dos limites da Carta Náutica nº 1110 foram obtidos por meio da Fundação Coppetec. Esses dados foram anteriormente empregados em estudos realizados pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ, por ocasião do trabalho intitulado “Modelagem Computacional para Análise de Aspectos da Dinâmica de Sedimentos na Baía de Todos os Santos” (ROSMAN, 2003).

Foi adotado um sistema de coordenadas planimétricas locais com origem na posição de coordenadas UTM<sup>13</sup> 495000 E e 8530000 N. Desta forma, deve-se somar estes valores às coordenadas locais ( $x$ ,  $y$ ) para serem obtidas as coordenadas UTM. Optou-se por adotar coordenadas locais, a fim de reduzir a quantidade de algarismos das coordenadas

---

<sup>13</sup> UTM – sigla do Inglês de *Universal Transverse Mercator* – sistema de projeção cilíndrica conforme de Gauss que adota um cilindro de projeção transversal secante ao elipsóide de revolução usado na modelagem da superfície do globo terrestre. Esse sistema é amplamente utilizado por diversos países na construção de cartas topográficas e recomendado pela União Geodésica e Geofísica Internacional.

nas plotagens e, desse modo, facilitar a pronta identificação de distâncias nos mapas. O datum horizontal de referência empregado é Córrego Alegre, MG, o mesmo utilizado na Carta Náutica nº 1110.

Foi utilizado o programa *CHMGeoTrans* – Sistema de Transformação de Coordenadas, versão 1.00.0010, desenvolvido pelo Centro de Hidrografia da Marinha, para conversão de coordenadas geográficas para coordenadas planimétricas UTM. O programa encontra-se em fase final de aprovação para uso oficial pela DHN.

A digitalização dos contornos e criação dos mapas bases foram realizadas por meio do programa *Surfer*, versão 8.02, desenvolvido pela companhia norte-americana *Golden Software*. Maiores detalhes sobre o *Surfer* podem ser obtidos no endereço eletrônico [www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com).

## **6.2 Malha de discretização**

No SisBaHiA, as estratégias de discretização espacial são otimizadas para corpos d'água naturais, pois permitem excepcional detalhamento de contornos recortados e batimetrias complexas. A discretização espacial foi feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos. Tal método de discretização espacial é potencialmente de quarta ordem.

A malha de elementos finitos foi elaborada com base na malha empregada em estudos anteriores realizados na BTS pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ. Inúmeras alterações foram realizadas na geometria dessa malha de modo a adequá-la às regiões de maior interesse no presente trabalho e às atualizações introduzidas no contorno de terra.

Assim sendo, foi implementado um refinamento da malha nas regiões de maior tráfego marítimo, ou seja, nas áreas portuárias e bacias de evolução, seus canais de acesso, áreas de exercícios de navios da Marinha e proximidades de marinas e iates clubes. A Figura 13 apresenta a localização dessas regiões agrupadas da seguinte forma:

- Região 1: Porto de Salvador e Bahia Marina, na margem sudeste da BTS;
- Região 2: Porto de Aratu, Base Naval de Aratu, Aratu Iate Clube e Canal do Cotegipe;
- Região 3: Terminal Marítimo Almirante Alves Câmara (Temadre), localizado na ponta Mirim, ao sul da Ilha Madre de Deus e seu canal de acesso;
- Região 4: Ponta de Itaparica, no extremo norte da Ilha de Itaparica (área de testes de navios da Marinha do Brasil), Itaparica Marina e Canal de Itaparica, que separa a Ilha de Itaparica da margem oeste da BTS;
- Região 5: Terminal Portuário de São Roque, localizado na margem direita do Canal do Paraguaçu, e seu canal de acesso.

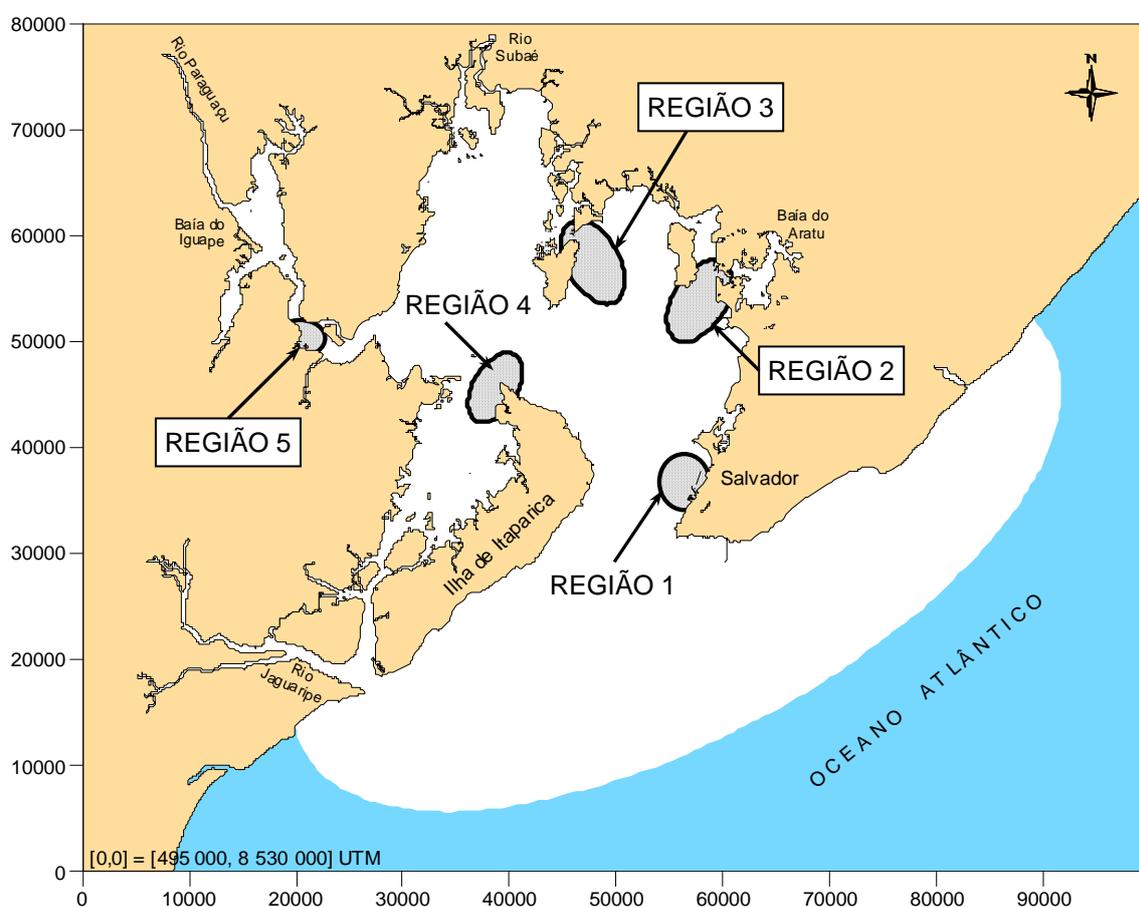


Figura 13 – Localização das regiões de refinamento da malha de elementos finitos, correspondentes às localidades de maior interesse em navegação no interior da BTS. Os eixos representam distâncias em metros referenciados a coordenadas planimétricas locais com origem na posição de coordenadas UTM  $x = 495\ 000$  E e  $y = 8\ 530\ 000$  N (datum horizontal Córrego Alegre-MG).

Com o intuito de facilitar a caracterização da topografia do fundo, a malha foi editada sobre uma imagem digital georeferenciada da Carta Náutica nº 1110. Para manipulação da malha, foi utilizado o programa comercial *Argus One*, versão *Student 4.2.0q*.

Maiores detalhes sobre o *Argus One* podem ser obtidos no endereço eletrônico [www.argusone.com](http://www.argusone.com).

A Figura 14 apresenta um mapa com a malha de discretização do domínio de modelagem utilizado no trabalho em pauta, constituída de 1465 elementos finitos quadráticos e 6672 nós para cada um dos 21 níveis sigma da modelagem 3D. Os nós de cada elemento foram conectados por linhas internas para melhor ilustrar a densidade da malha.

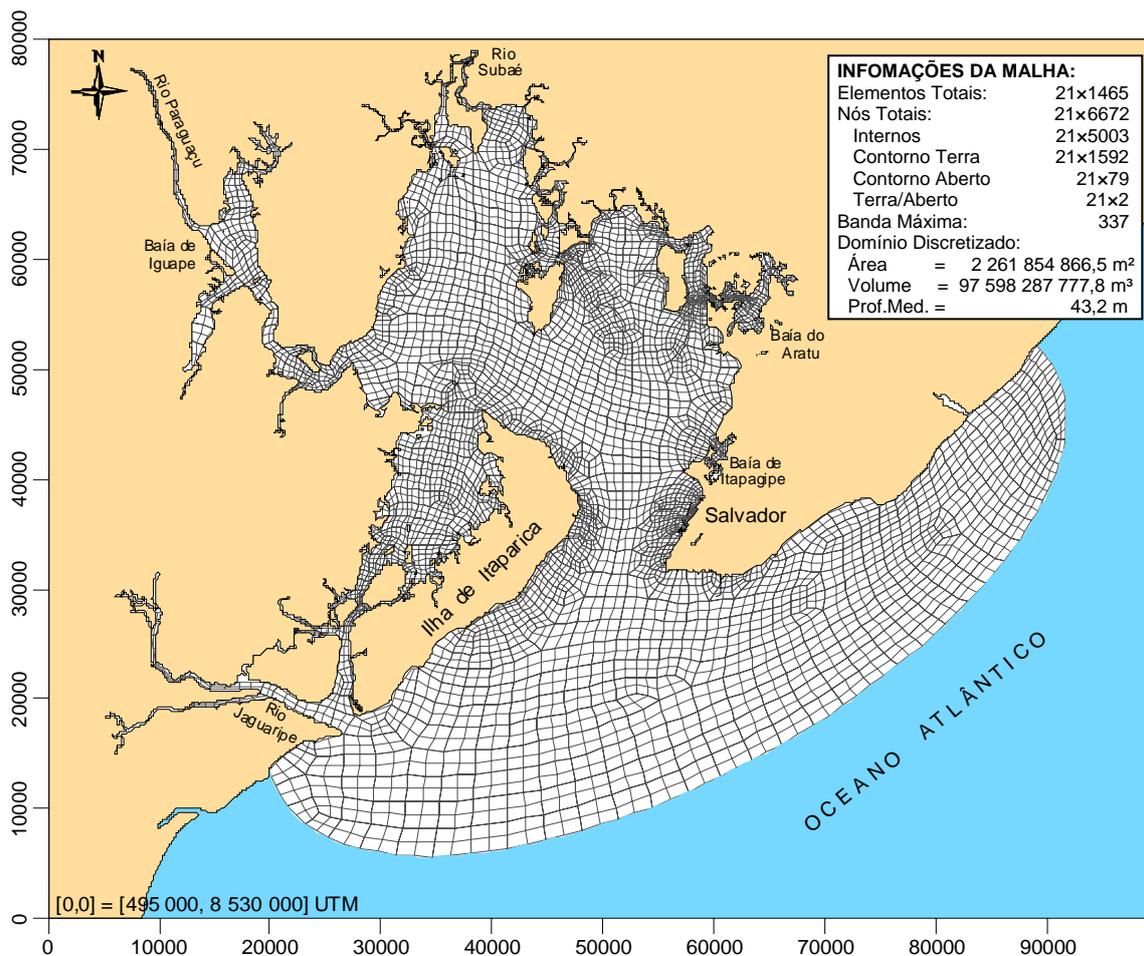


Figura 14 – Domínio modelado da BTS, indicando a malha de discretização em elementos finitos quadrangulares biquadráticos com linhas internas interligando os nós dos elementos. Usando a modelagem 3D com 21 níveis, a discretização completa do domínio resulta em uma pilha de 21 malhas de elementos finitos, uma para cada nível  $z$  da transformação sigma.

### 6.3 Dados de batimetria

Os dados de batimetria foram originados de três fontes distintas:

- Carta Náutica nº 1110 – Baía de Todos os Santos, 2ª. edição, datada de 1984;
- Levantamentos hidrográficos realizados pela DHN a partir do ano de 2003; e

- Dados obtidos junto à fundação Coppetec, fornecidos pelo Consórcio Hydros-CH2 Mhill, por ocasião dos trabalhos realizados no ano de 1999. Os dados fornecidos pelo referido consórcio foram obtidos a partir da digitalização de Cartas Náuticas da DHN.

Nas Cartas Náuticas editadas pela DHN, as profundidades são representadas em metros e décimos de metro, tendo como origem vertical um plano de referência denominado Nível de Redução (NR). O NR se aproxima do nível médio das baixa-mares de sizígia (MLWS<sup>14</sup>) da maré utilizada na redução das sondagens batimétricas. O valor do NR adotado pela Marinha é obtido a partir da análise harmônica de dados de maré de uma série temporal de referência, conhecida como série padrão, ou seja, a série que possui os melhores dados que caracterizem o comportamento da maré em determinada localidade.

Vale ressaltar que, ao contrário do que muitos pensam, o NR não é igual ao MLWS, uma vez que o primeiro é obtido por um processo de análise harmônica de maré; e, o segundo é obtido por um processo de média aritmética simples. A distância vertical entre cotas do NR e do MLWS é, em geral, da ordem de poucas dezenas de centímetros, e.g., no Porto de Salvador, o NR adotado é localizado a uma cota de 23 cm abaixo do MLWS nessa localidade.

A fim de referenciar fisicamente a cota do NR, são instalados, por ocasião dos levantamentos hidrográficos realizados pela Marinha, pelo menos três referências de nível (RN) em locais perenes nas proximidades da estação maregráfica. Essas RN's são niveladas entre si e com o zero do marégrafo por meio de nivelamentos topográficos locais (nivelamentos geométricos).

Dessa forma, uma mesma Carta Náutica, em função da extensão de sua área de abrangência, pode adotar mais de um valor de NR, e consecutivamente, mais de uma referência para os dados batimétricos lançados na mesma Carta em diferentes regiões. Voltando ao exemplo da Carta Náutica nº1110 da BTS, existem pelo menos quatro diferentes NR (Salvador, Aratu, Madre de Deus e Itaparica). A dificuldade na determinação de um único NR que atenda toda batimetria lançada na Carta Náutica é

---

<sup>14</sup> MLWS – sigla do Inglês correspondente a *Mean Low Water Springs* (média das baixa-mares de sizígia).

um dos óbices da modelagem digital do terreno quando feita a partir dos dados batimétricos lançados nas Cartas Náuticas.

Esse critério de referenciamento das profundidades das Cartas Náuticas tem como propósito garantir a segurança da navegação – principal finalidade dessas publicações. O objetivo é que, normalmente, o navegante encontre profundidades maiores do que as lançadas nas Cartas Náuticas; entretanto, por ocasião de uma baixa-mar intensa de sizígia, podem ser encontradas profundidades menores do que as lançadas.

No trabalho em tela, as variações entre NR correspondentes a diferentes localidades existentes Carta Náutica nº1110 foram desconsideradas na prescrição dos dados de cota do fundo. Assim sendo, foi estabelecido um valor único de NR para todo o domínio de modelagem, correspondente à média aritmética entre os NR existentes na Ilha Madre de Deus (1,51m) e no Porto de Salvador (1,31m) - pontos centrais da malha de discretização. Dessa forma, a referência vertical estabelecida para todas as cotas do domínio de modelagem foi de 1,41 m abaixo do nível médio do mar intermediário entre as duas localidades.

A interpolação das profundidades nos nós da malha foi realizada a partir de uma grade de batimetria gerada pelo programa *Surfer*, versão 8.02. Foi utilizado o método de interpolação *Kriging*, por ser o método pressuposto do SisBaHiA, e mais recomendável para uso geral.

Foram adotados, como parâmetros do método *Kriging*, 1894 divisões horizontais e 1579 divisões verticais dos respectivos limites das coordenadas dos dados, o que resultou em uma grade bastante densa, i.e., com espaçamento de 50 m entre pontos. O raio de busca foi reduzido para 1500 m, de modo a evitar que fossem consideradas, no variograma da interpolação, profundidades demasiadamente afastadas do ponto de cálculo. Esses parâmetros foram obtidos de forma interativa, buscando uma topografia do fundo mais realista, com melhor ajuste às variações encontradas na Carta Náutica e nos levantamentos batimétricos mais recentes.

A Figura 15 apresenta um mapa com a batimetria na forma que é interpretada pelo modelo.

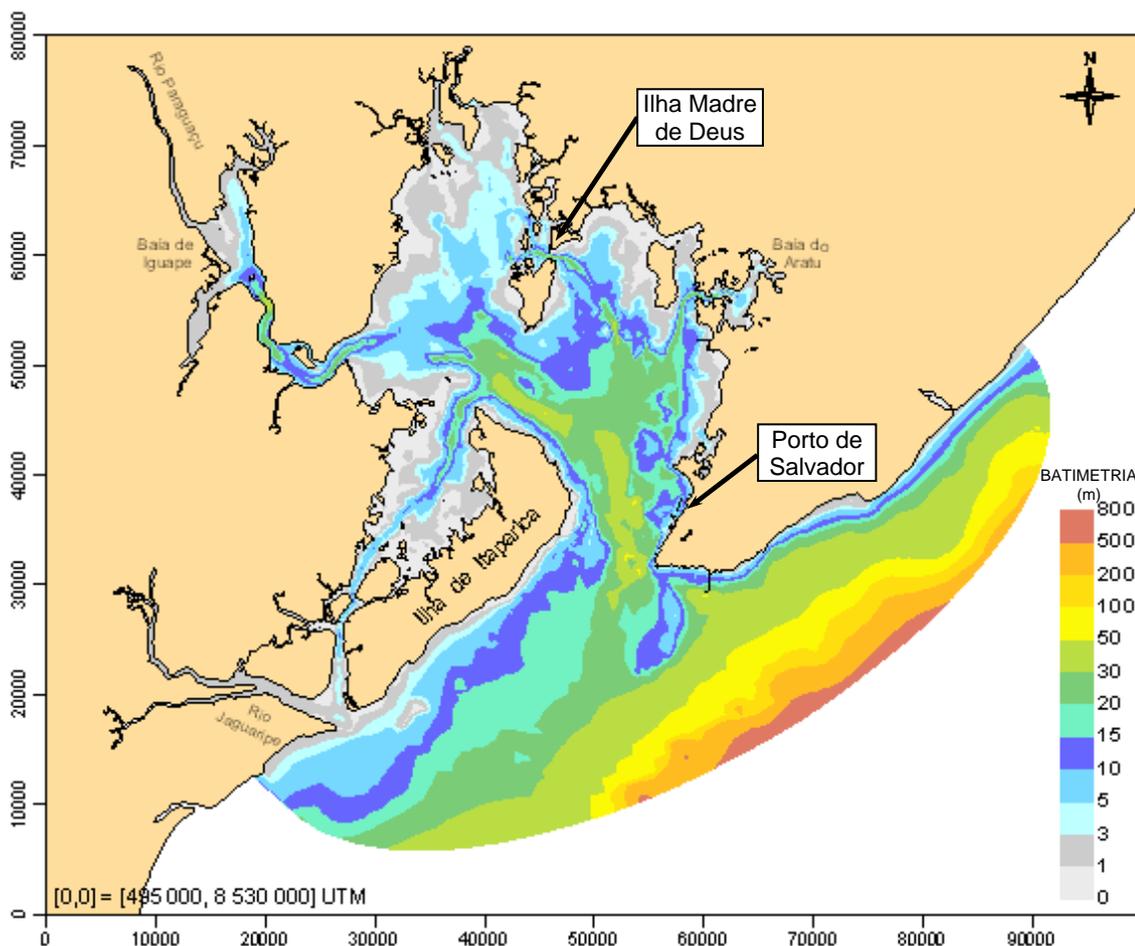


Figura 15 – Batimetria interpretada pelo modelo referenciada ao Nível de Redução médio entre a Ilha Madre de Deus e o Porto de Salvador, ou seja, 1,41 m abaixo do nível médio do mar intermediário entre as duas localidades.

## 6.4 Rugosidade equivalente do fundo

Conforme descrito na Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN *et al.*, 2008), o modelo hidrodinâmico admite especificação pontual da amplitude da rugosidade equivalente ( $\epsilon$ ), em função do tipo de material de fundo, e.g. pedra, areia, lama, vegetação, etc. É usada interpolação biquadrática<sup>15</sup> para valores de rugosidade

<sup>15</sup> A interpolação de variáveis no SisBaHiA será biquadrática se a discretização espacial for feita com elementos finitos quadrangulares biquadráticos, conforme ocorre no trabalho em tela. Entretanto, se o modelador optar por usar elementos triangulares quadráticos, as interpolações seguirão o tipo do elemento (ROSMAN *et al.*, 2008).

equivalente do fundo, permitindo ótima acurácia na representação física do leito. A amplitude da rugosidade equivalente do fundo é um parâmetro básico de calibração. Se as amplitudes da rugosidade forem muito grandes, as alturas de maré calculadas pelo modelo serão menores do que as observadas no campo. Por outro lado, se as amplitudes forem muito pequenas, as alturas de maré calculadas pelo modelo deverão ser maiores que as medidas.

Isso se deve ao fato de que, na propagação de ondas longas, assim como ondas de maré, o quadrado da altura da onda da maré em um determinado local é proporcional à diferença de energia entre instantes de PM e BM. Conseqüentemente, se a amplitude de maré calculada pelo modelo for menor ou maior do que os valores medidos, haverá um indicativo de muita ou pouca perda de energia ao longo do percurso de propagação da onda de maré. Geralmente, isto pode ser corrigido através do incremento ou redução da amplitude equivalente da rugosidade do fundo (ROSMAN *et al.*, 2000). O valor da amplitude da rugosidade está diretamente associado à dissipação de energia e tem importante papel no cálculo das tensões de atrito do fundo.

No SisBaHiA, o coeficiente de atrito computado varia dinamicamente no tempo e no espaço. Tal realismo é extremamente relevante para simulações de escoamentos em regiões costeiras, baías, estuários, rios e lagos. Com a fidelidade conseguida no mapeamento da batimetria e contornos, bem como das tensões de atrito, diminuí-se enormemente discrepâncias entre resultados medidos e modelados, minimizando o processo de calibração.

No presente trabalho, a amplitude da rugosidade equivalente do fundo foi prescrita com base na rugosidade com a qual o modelo já foi aplicado, calibrado e validado no ano de 2000. Naquela ocasião, foram realizados estudos de diagnóstico e prognóstico ambientais para BTS cf. descrito no relatório Coppetec PENO-565 “Sistema BTS – Relatório de Calibração e Validação” (ROSMAN *et al.*, 2000). Vale ressaltar que esse mesmo critério de prescrição de amplitude da rugosidade também foi adotado posteriormente por ocasião do trabalho “Modelagem Computacional para Análise da Dinâmica de Sedimentos na Baía de Todos os Santos, BA” (ROSMAN, 2003).

A Tabela 1 que se segue apresenta os dados de amplitude de rugosidade inicialmente empregados (antes da presente calibração).

Tabela 1 – Amplitude equivalente da rugosidade do fundo empregada na calibração e validação do modelo realizada no ano de 2000.

Tipo de Sedimento	Amplitude da rugosidade Equivalente do fundo (m)
Lama e areia fina	0,010 a 0,015
Areia fina e média	0,015 a 0,0225
Areia média e grossa	0,0225 a 0,0325

Fonte: Coppetec (ROSMAN *et al.*, 2000).

Os valores de amplitude da rugosidade equivalente do fundo acima apresentados foram reajustados na fase de calibração e receberam tratamento especial em algumas áreas com afloramento cf. descrito no item a seguir.

#### 6.4.1 Tratamento de áreas com afloramento

No interior de muitas baías, estuários e rios, é comum a existência de áreas relativamente extensas que cobrem e descobrem de acordo com a variação da maré, i.e., áreas do estirâncio. Geralmente, são áreas de tipo de fundo de areia, pedras, cascalho ou recifes de corais com fácil identificação nas Cartas Náuticas, usando simbologia específica (cf. DHN, 2008). Essas áreas, normalmente, são delimitadas entre a linha de costa e a isobatimétrica de zero metro.

No caso da BTS, sobretudo em regiões adjacentes às margens e ilhas, existem algumas dessas áreas de estirâncio representadas na Carta Náutica que cobrem cerca de 5% da área do domínio de modelagem. Nessas áreas, o valor da batimetria prescrito para o modelo é superior ao existente de fato na natureza (na ordem de algumas dezenas de centímetros). Caso assim não fosse, tornar-se-ia necessária uma discretização extremamente refinada da malha na área sujeita a secar, a fim de evitar problemas de secamento do modelo e capturar o efeito do alagamento e secamento real.

Somado a esse fator, as áreas de estirâncio representadas nas Cartas Náuticas são, em geral, áreas de batimetria pobremente conhecida ou até mesmo totalmente desconhecida. Isso se deve ao fato dessas áreas não apresentarem interesse significativo em termos de navegação.

Assim sendo, uma discretização extremamente refinada da malha na área de estirâncio resultaria em um processo de modelagem extremamente custoso e ineficiente para os objetivos do presente trabalho, cujo foco principal está nos padrões de correntes em áreas navegáveis, e não nos detalhamentos próximos aos contornos terrestres.

Dessa forma, foram prescritos, para alguns nós do domínio de modelagem localizados sobre áreas com afloramento, rugosidades equivalentes do fundo maiores que as existentes de fato na natureza, aqui denominada macrorugosidade ou rugosidade compensada. O uso da macrorugosidade visa compensar o efeito da existência de profundidades reais inferiores às consideradas pelo modelo e representar o efeito do aumento do atrito na área de estirâncio.

Os valores das macrorugosidades foram calculados com base na formulação da tensão de atrito do fundo, dada pela expressão (1) - pág. 40. O procedimento empregado para se chegar à formulação da macrorugosidade parte da imposição da igualdade entre as tensões de atrito no fundo calculado pelo modelo ( $\tau_{MOD}^F$ ) e a real ( $\tau_{REAL}^F$ ), próxima a existente de fato na natureza, ou seja:

$$\tau_{MOD}^F = \tau_{REAL}^F \quad \text{ou} \quad \rho_0 \cdot \frac{\sqrt{g}}{C_{hMOD}} |U| \cdot U = \rho_0 \cdot \frac{\sqrt{g}}{C_{hREAL}} |U| \cdot U \quad \therefore$$

$$C_{hMOD} = C_{hREAL} \quad (3)$$

O Coeficiente de Chézy ( $C_h$ ) é dado pela expressão (2) - pág. 40, que permite reescrever a expressão (3) da forma:

$$18 \cdot \log\left(\frac{6\bar{H}_{MOD}}{\mathcal{E}_{MOD}}\right) = 18 \cdot \log\left(\frac{6\bar{H}_{REAL}}{\mathcal{E}_{REAL}}\right) \quad \therefore \quad \frac{\bar{H}_{MOD}}{\mathcal{E}_{MOD}} = \frac{\bar{H}_{REAL}}{\mathcal{E}_{REAL}} \quad \therefore$$

$$\boxed{\mathcal{E}_{MOD} = \frac{\bar{H}_{MOD} \cdot \mathcal{E}_{REAL}}{\bar{H}_{REAL}}} \quad (4)$$

- onde:  $\mathcal{E}_{MOD}$  = Amplitude da macrorugosidade gerada (ou rugosidade compensada) prescrita para o modelo nos nós localizados sobre áreas com afloramento (m)
- $\mathcal{E}_{REAL}$  = Amplitude da rugosidade equivalente do fundo real, próxima à existente de fato na natureza nas áreas com afloramento (m)
- $\overline{H}_{MOD}$  = Profundidade média interpretada pelo modelo nos nós localizados sobre áreas com afloramento (m)
- $\overline{H}_{REAL}$  = Profundidade média real, próxima da existente de fato na natureza nas áreas com afloramento (m)

Fazendo o uso da expressão (4), os valores de macrorugosidade calculados ( $\mathcal{E}_{MOD}$ ) variaram entre 0,03 e 0,25 m.

#### 6.4.2 Calibração da rugosidade

A rugosidade equivalente do fundo prescrita na primeira rodada tentativa de calibração do modelo hidrodinâmico foi baseada nos valores apresentados na Tabela 1 (pág. 50) modificados. As modificações ocorreram, inicialmente, apenas nas áreas com afloramento, onde foi conferido tratamento especial cf. descrito no subitem anterior.

A análise harmônica de maré dos resultados dessa primeira rodada mostrou que o modelo calculou, em todas as estações de monitoramento, amplitudes de maré cerca de 12 % menores do que as observadas no campo. Certamente, a introdução de pontos de macrorugosidade contribuiu para uma maior perda de energia ao longo do percurso de propagação da onda de maré, fazendo com que as amplitudes de maré calculadas fossem menores. Outro fator que certamente contribuiu para a redução das amplitudes de maré foi o fato de adotar, no presente trabalho, um NMM 10 cm abaixo do NMM empregado na calibração realizada no ano de 2000, fato que acarreta um atrito no fundo ligeiramente maior.

Embora as diferenças encontradas fossem pequenas, foi realizada uma segunda rodada tentativa de calibração, com redução de toda a amplitude da rugosidade no valor de 10% do original. Ainda assim, os resultados obtidos continuaram apresentando alturas de maré menores do que as medidas, o que fez com que fosse implementada uma nova redução de 10% dos valores prescritos na segunda rodada, o que corresponde a 19% do valor originalmente utilizado na calibração realizada no ano de 2000.

A Tabela 2 apresenta as amplitudes finais da rugosidade equivalente do fundo considerada na terceira rodada.

Tabela 2 – Amplitude final da rugosidade equivalente do fundo adotada nas simulações com o modelo calibrado.

Tipo de Fundo	Amplitude da rugosidade equivalente do fundo (m)
lama e areia fina	ordem de 0,01
areia fina e média	0,01 ~ 0,02
areia média e grossa	0,02 ~ 0,03

A Figura 16 apresenta um mapa com a distribuição da amplitude da rugosidade equivalente do fundo na forma interpretada pelo modelo calibrado e considerada nas simulações.

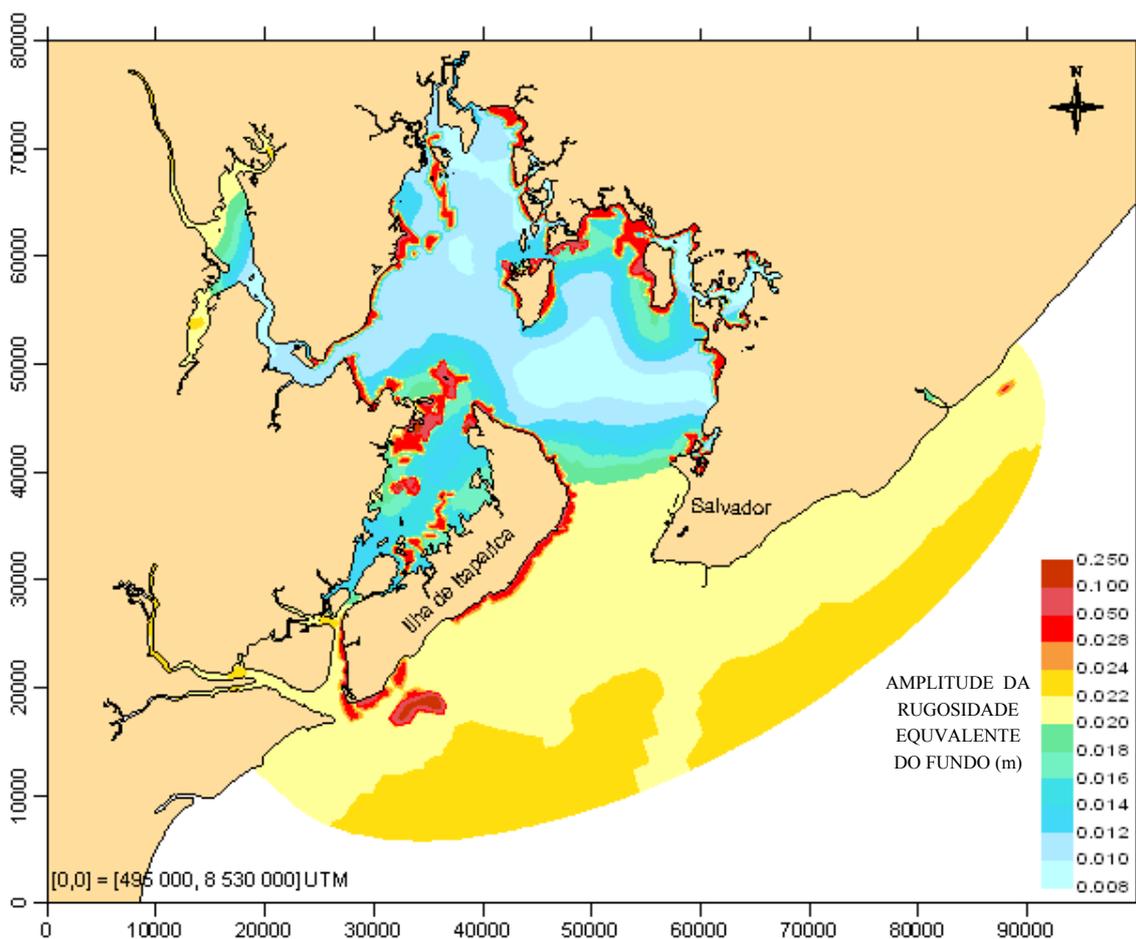


Figura 16 – Distribuição da amplitude da rugosidade equivalente do fundo considerada nas simulações com o modelo calibrado. Valores acima de 0,03 m correspondem às macrorugosidades geradas para representar o efeito de aumento da resistência ao escoamento cf. descrito no subitem 6.4.1.

## 6.5 Condições de contorno da fronteira aberta

Na prescrição das condições de contorno da fronteira aberta, optou-se pelo uso da maré prevista datada para janeiro de 1999, calculada por meio das constantes harmônicas de maré. Embora exista a disponibilidade de medições de níveis realizadas na área de plataforma da BTS durante janeiro de 1999, esses dados não foram empregados diretamente na prescrição das condições de contorno. Optou-se pelo uso da maré prevista na calibração devido aos seguintes fatores:

- nas simulações de geração das Cartas de Correntes, que indicarão prognósticos, serão utilizadas a maré prevista para prescrição das condições de contorno da fronteira aberta. Dessa forma, intencionou-se verificar qual seria o grau de coerência entre os dados medidos em campo e resultados obtidos pelo modelo na fase de calibração, empregando o mesmo critério de definição da fronteira aberta que seria posteriormente empregado nas simulações de geração das Cartas.

- a imensa disponibilidade de dados oceanográficos medidos conforme ocorre na BTS retrata uma situação particular incomum na grande maioria dos corpos d'água naturais brasileiros. O uso das constantes harmônicas de maré – dados normalmente de fácil acesso e disponíveis para os principais portos e estuários do Brasil – reforça o caráter genérico do trabalho em tela, permitindo sua aplicação aos demais casos.

Duas metodologias foram empregadas na tentativa da prescrição das melhores condições de contorno da fronteira aberta:

### 1ª METODOLOGIA

Para cada um dos 79 nós da fronteira aberta foram importados arquivos contendo séries sintéticas de variações de níveis. Cada série sintética foi gerada por meio de uma média ponderada realizada entre as marés previstas para janeiro de 1999 em duas estações localizadas em costa aberta próximas às extremidades opostas do contorno aberto.

As estações em costa aberta utilizadas foram Morro de São Paulo, ao sul e Garcia D'Ávila, ao norte da fronteira aberta. Nessas estações, foram utilizadas as constantes harmônicas de maré padrões de referência adotadas pela Marinha do Brasil, i.e., constantes determinadas por meio da análise harmônica de séries que melhor representem as características da maré nessas localidades. A Figura 17 ilustra um esquema da situação.

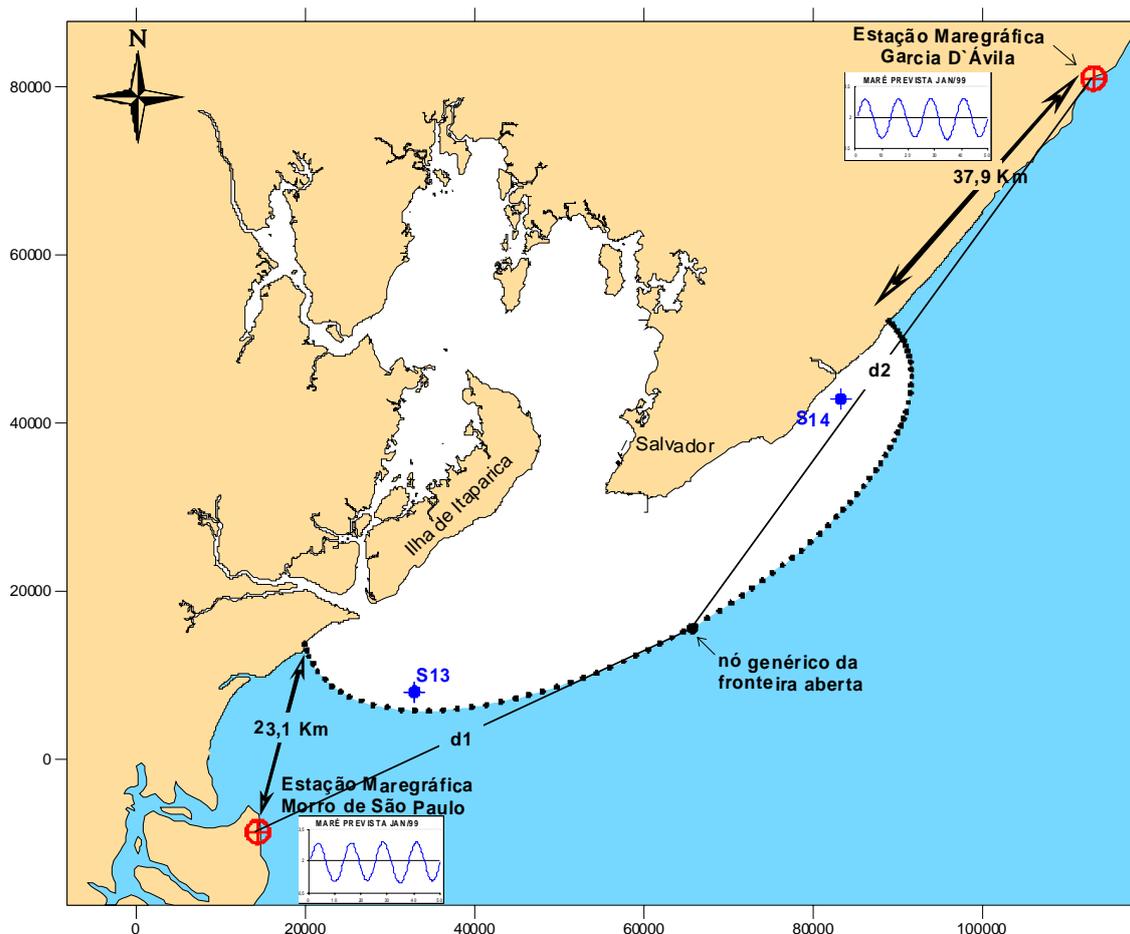


Figura 17 – Esquema da prescrição de dados de elevação para as condições de contorno da fronteira aberta utilizados na metodologia 1. A elevação dos nós da fronteira aberta foi calculada por meio de uma média, ponderada pelas distâncias  $d_1$  e  $d_2$ , das marés previstas para as estações Morro de São Paulo e Garcia D'Ávila (representadas pelos gráficos em azul).

O peso de ponderação adotado na média calculada para as séries sintéticas dos nós da fronteira aberta considera apenas a distância do nó em questão às estações de costa aberta. Naturalmente, é de se esperar que a estação de costa aberta que está mais próxima tenha um peso maior na ponderação na média. Dessa forma, foi adotado um peso de ponderação inversamente proporcional à distância elevada a um determinado expoente  $K$ , cf. expressão (5).

$$\zeta_n = \frac{\zeta_{SP} \cdot d_2^K + \zeta_{GD} \cdot d_1^K}{d_2^K + d_1^K} \quad (5)$$

- onde:  $\zeta_n$  = Elevação de nível calculada para o nó  $n$  pertencente à fronteira aberta (m)
- $\zeta_{SP}$  = Elevação de nível gerada pela maré prevista na Estação Maregráfica Morro São Paulo (m)
- $\zeta_{GD}$  = Elevação de nível gerada pela maré prevista na Estação Maregráfica Garcia D'Ávila (m)
- $d_1$  = Distância horizontal entre a Estação Maregráfica Morro São Paulo e o nó  $n$  pertencente à fronteira aberta (m), Figura 17
- $d_2$  = Distância horizontal entre a Estação Maregráfica Garcia D'Ávila e o nó  $n$  pertencente à fronteira aberta (m), Figura 17
- $K$  = Expoente estimativo do peso de ponderação pelas distâncias  $d_1$  e  $d_2$

O valor do expoente  $K$  foi calculado com base em um método iterativo que buscou o melhor resultado em uma comparação entre alturas de maré. Nesse critério, foram comparadas alturas de maré medidas nas estações S13 e S14 (durante 19 dias em janeiro de 1999) e alturas de maré calculadas (para o mesmo período) nos nós do contorno aberto localizados mais próximos dessas duas estações (Figura 17). A expressão (6) foi utilizada a fim de quantificar a diferença relativa percentual<sup>16</sup> ( $drp$ ) entre alturas observadas e calculadas.

$$drp = \frac{|altura\ medida - altura\ calculada|}{altura\ medida} \times 100\% \quad (6)$$

- onde:  $drp$  = Diferença relativa percentual entre alturas da onda de maré medidas na estação S13 (ou S14) durante 19 dias em janeiro de 1999 e alturas da onda de maré calculadas para o mesmo período no nó do contorno aberto localizado mais próximo dessa estação.
- $altura\ medida$  = Altura da onda de maré medida na estação S13 (ou S14) em cada ciclo de maré entre 08 e 27/jan/1999.
- $altura\ calculada$  = Altura da onda de maré calculada por meio da expressão (5) no nó de fronteira aberta localizado mais próximo da estação S13 ou (ou da estação S14) em cada ciclo de maré entre 08 e 27/jan/1999.

---

<sup>16</sup> O conceito de diferença relativa percentual é análogo ao conceito de erro relativo percentual. Entretanto, foi dada preferência ao uso da expressão “diferença” ao invés de “erro” porque foram utilizados os dados medidos nas campanhas de 1999 como referência das comparações, dados esses que apresentam inerentes suas imprecisões e incertezas características de medições de campo, além de alguns indícios de funcionamento inadequado, conforme será comentado mais detalhadamente adiante no capítulo 7.

Após diversas interações pelo método tentativa e acerto, o melhor resultado na comparação entre as alturas de maré foi obtido para o valor de  $K$  igual a zero, quando se chegou a uma diferença relativa percentual entre alturas de maré medidas e calculadas na ordem de 6%. Assim sendo, a expressão (5) ficaria reduzida para:

$$\zeta_n = \frac{\zeta_{SP} + \zeta_{GD}}{2} \quad (7)$$

Entretanto, pela expressão (7) acima, todos os nós ao longo da fronteira aberta estariam com a superfície livre variando ao mesmo tempo, independentemente das distâncias entre o nó e as estações maregráficas Morro de São Paulo e Garcia D'Ávila, o que, naturalmente, não representa um efeito real.

Paralelamente, constatou-se que a estação S13 apresenta melhor concordância entre dados de maré prevista e observada quando são usadas as constantes harmônicas da estação Garcia D'Ávila na previsão, ao invés das constantes do Morro de São Paulo. Vale ressaltar que a estação S13 está cerca de quatro vezes mais próxima do Morro de São Paulo de que de Garcia D'Ávila (cf. Figura 17, pág.55). Essa mesma constatação foi verificada em dois conjuntos distintos de dados de níveis, um coletado no verão e outro no inverno de 1999.

Tendo em vista os fatos acima mencionados, optou-se por abandonar essa primeira metodologia e realizar uma segunda tentativa apresentada a seguir. Essa segunda metodologia foi a empregada na prescrição dos dados das condições de contorno da fronteira aberta na fase de calibração do modelo.

## 2ª METODOLOGIA

Para apenas um nó, localizado na região central da fronteira aberta, foi gerada uma maré prevista com base nas constantes harmônicas padrões da estação Garcia D'Ávila, apresentadas na Tabela 3 que se segue.

Tabela 3 – Constantes harmônicas de maré da estação Garcia D'Ávila, BA, empregadas para geração da maré prevista para janeiro de 1999 no nó central da fronteira aberta – 1962.

Componente de maré	Amplitude (m)	Fase (°)
Mm	0,093	324
MSf	0,061	333
Q <sub>1</sub>	0,016	119
O <sub>1</sub>	0,069	118
M <sub>1</sub>	0,007	259
P <sub>1</sub>	0,012	199
K <sub>1</sub>	0,037	199
J <sub>1</sub>	0,005	36
OO <sub>1</sub>	0,008	311
2N <sub>2</sub>	0,018	96
mu <sub>2</sub>	0,033	71
N <sub>2</sub>	0,135	98
nu <sub>2</sub>	0,026	98
M <sub>2</sub>	0,670	101
L <sub>2</sub>	0,017	34
T <sub>2</sub>	0,015	114
S <sub>2</sub>	0,261	114
K <sub>2</sub>	0,071	114
MO <sub>3</sub>	0,004	147
M <sub>3</sub>	0,011	85
MK <sub>3</sub>	0,002	211
MN <sub>4</sub>	0,012	130
M <sub>4</sub>	0,025	142
SN <sub>4</sub>	0,009	291
MS <sub>4</sub>	0,007	166

Fonte: BNDO, Marinha do Brasil

Depois de realizada a previsão de maré para o nó central da fronteira aberta, essa mesma elevação foi prescrita para todos os demais nós da fronteira aberta a menos de uma defasagem imposta. A diferença de fase imposta aos nós do contorno aberto foi calculada em função da distância a ser percorrida pela frente de onda de maré e da velocidade de propagação. O tempo que a frente de onda usa para atingir um determinado nó da fronteira aberta (calculado por meio do quociente da distância pela

velocidade de propagação da onda de maré) foi considerado uma estimativa da diferença de fase nesse nó.

A Figura 18 ilustra um esquema representativo da prescrição de dados de elevação para as condições de contorno da fronteira aberta utilizados na calibração do modelo.

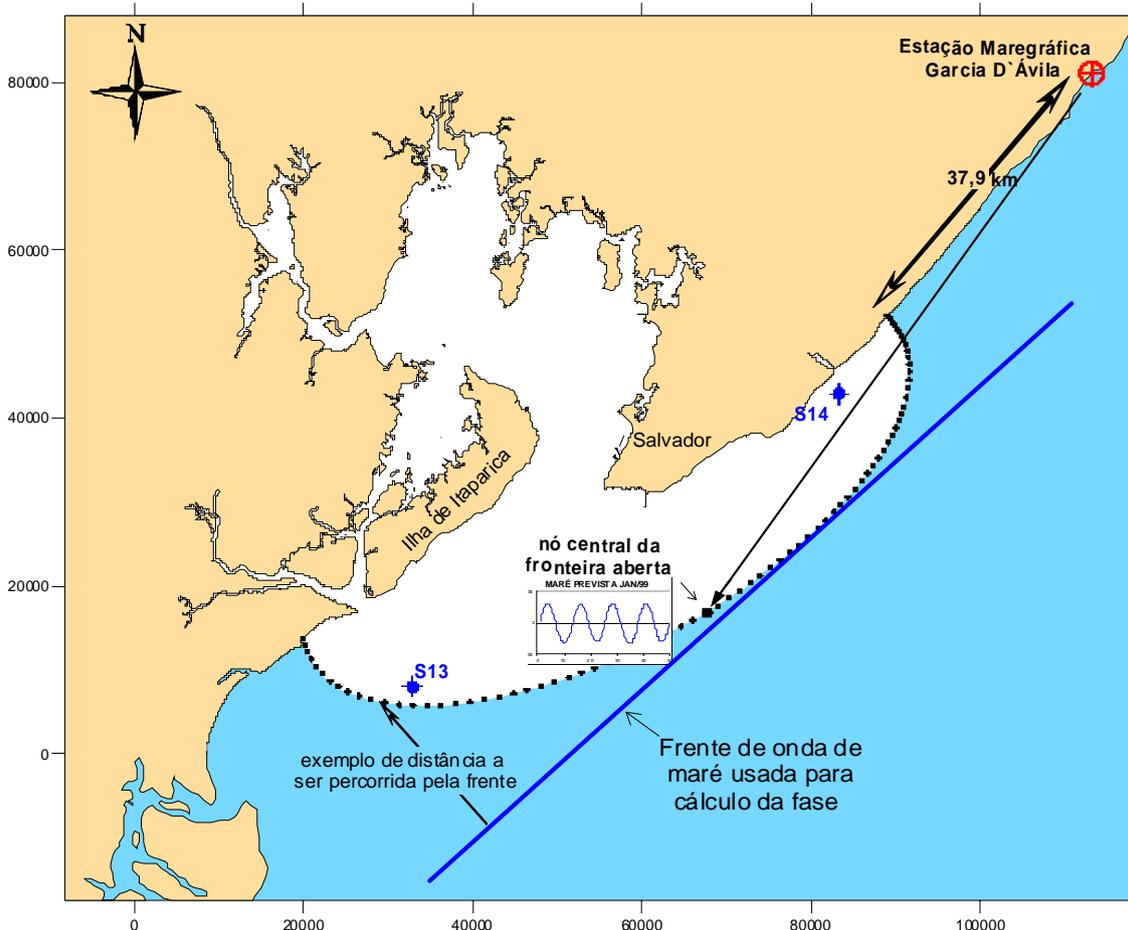


Figura 18 – Esquema da prescrição de dados de elevação para as condições de contorno da fronteira aberta utilizados na metodologia 2. Para todos os nós da fronteira aberta, foi prescrita a mesma elevação correspondente à maré prevista para o nó central do contorno aberto, usando as constantes harmônicas da estação Garcia D'Ávila. As defasagens da maré prescritas foram calculadas em função da distância a ser percorrida pela frente da onda de maré e da celeridade.

Para o cálculo das diferenças de fase, foi adotado o seguinte procedimento:

1 – Analisando as fases das constantes harmônicas de maré das estações Morro de São Paulo e Garcia D'Ávila, notou-se que seus valores são próximos, apresentando uma diferença angular média de  $3^\circ$  o que corresponde uma diferença temporal de 6,4 minutos. Assim sendo, foi estipulado um ângulo de incidência da frente de onda de maré paralelo a uma reta imaginária que une as duas estações, cf. Figura 18;

2 – Segundo a Teoria Linear de Ondas, sendo a onda de maré uma onda longa ou uma onda de águas rasas com superfície livre, a relação de dispersão (DEAN e DALRYMPLE, 1984) dada por:

$$\omega^2 = gK \cdot \tanh(K\bar{H}) \quad (8)$$

onde:  $\omega$  = Frequência angular da onda de superfície livre ( $s^{-1}$ ), dada por  $\omega = 2\pi/T$ , sendo T o período da onda.

$g$  = Aceleração da gravidade local. Adotado valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

$K$  = Número de onda ( $m^{-1}$ ), dado por  $K = 2\pi/L$ , sendo L o comprimento de onda.

$\bar{H}$  = Profundidade média (m)

Pode ser aproximada por:

$$\omega^2 = gK^2 \bar{H}, \text{ uma vez que } \tanh(K\bar{H}) \cong K\bar{H} \quad (9)$$

Fazendo  $\frac{\omega^2}{K^2} = g\bar{H} \quad \therefore \quad c^2 = g\bar{H}$ , chegamos a:

$$c = \sqrt{g\bar{H}} \quad (10)$$

onde:  $c$  = Velocidade de propagação da onda ou celeridade,  $c = L/T$

O valor de  $\bar{H}$  é a profundidade média, calculada, de modo aproximado, pela média das profundidades existentes ao longo da trajetória percorrida pela onda de maré, i.e., trajetória entre o nó considerado pertencente à fronteira aberta e a frente de onda incidente no contorno da fronteira aberta. A Figura 18 (pág. 59) ilustra um exemplo de distância a ser percorrida pela frente de onda de maré para um nó genérico pertencente à fronteira aberta.

3 – Foi imposto o valor nulo para a fase da maré no nó de fronteira aberta onde primeiro incide a frente de onda de maré, sendo atribuído valores negativos de fase para os demais nós, uma vez que o primeiro nó está adiantado em relação a todos os outros. A

Figura 19 apresenta um gráfico ilustrativo das diferenças de fase da onda de maré prescrita para os 79 nós pertencentes à fronteira aberta.

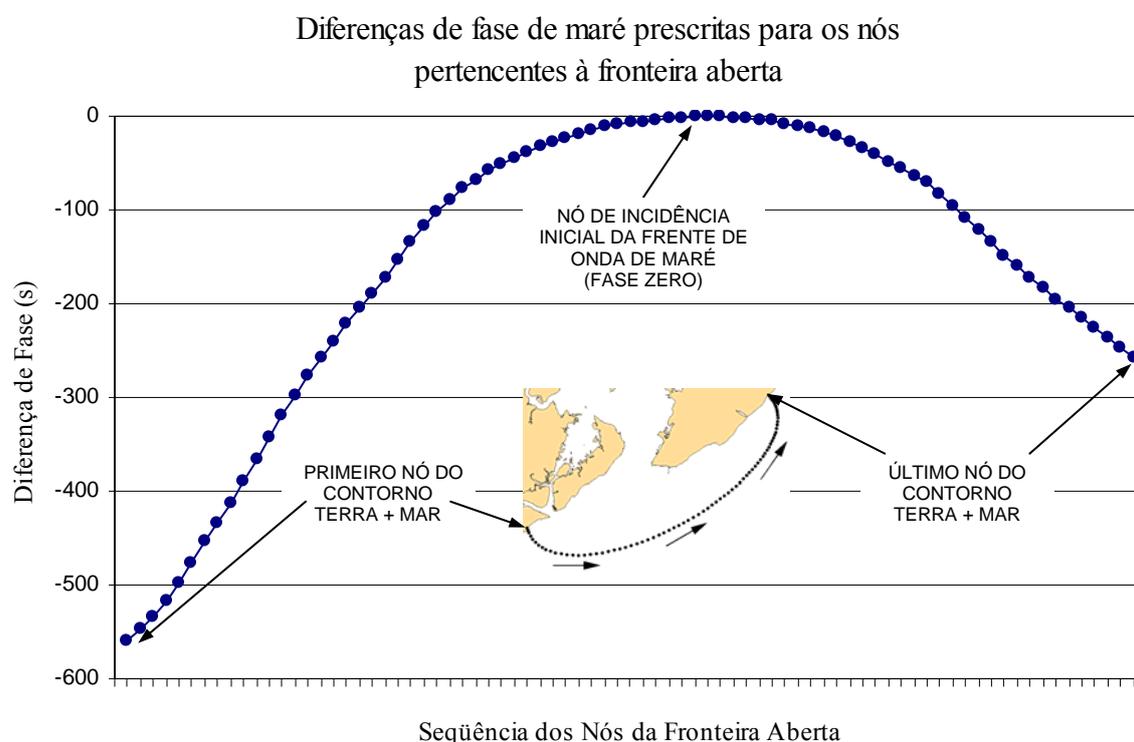


Figura 19 – Diferenças de fase das variações de níveis prescritas nas condições de contorno para os nós pertencentes à fronteira aberta. O eixo das abscissas representa a seqüência dos nós pertencentes à fronteira aberta no sentido anti-horário (conforme indicado no mapa localizado no centro do gráfico).

Por meio da aplicação dessa segunda metodologia, chegou-se a uma diferença relativa percentual entre alturas de maré medidas e calculadas de 4,8 %.

## 6.6 Dados de vento

De acordo com o Manual do Usuário do SisBaHiA (COPPE, 2007), os dados de vento podem ser fornecidos ao modelo hidrodinâmico de diversas formas. Os dados podem ser desde constantes no tempo e uniformes no espaço até totalmente variáveis no tempo e variados no espaço. A prescrição de dados de vento variados no espaço depende da disponibilidade de medições, que em geral só são efetuadas em pontos esparsos. Dessa forma, é mais comum alimentar o modelo com dados de vento variáveis no tempo, mas uniformes no espaço.

Assim foi feito nas simulações de calibração e validação do modelo no presente trabalho. Foram prescritos ventos variáveis no tempo e uniformes no espaço para todo domínio de modelagem. Esta aproximação é bastante aceitável para a BTS uma vez que dados de vento medidos em 1999 em três pontos distintos no interior da BTS indicaram intensidades e direções de vento semelhantes e as elevações de maior parte dos terrenos marginais da BTS são baixas. Os dados de vento utilizados foram medidos na ponta sul da Ilha do Frade (cf. Figura 20), região central da BTS.



Figura 20 – Localização da estação de coleta dos dados de vento prescritos para todo domínio de modelagem nas simulações de calibração.

As intensidades e direções de vento de verão utilizadas nas simulações são apresentadas na Figura 21. Pode-se notar, nos dados de campo, uma feição típica de verão que é a presença da brisa. Durante a primeira parte do dia, sopra a brisa terrestre vindo de nordeste e, a partir do meio dia, sopra a brisa marítima com ventos mais intensos de leste e sudeste.

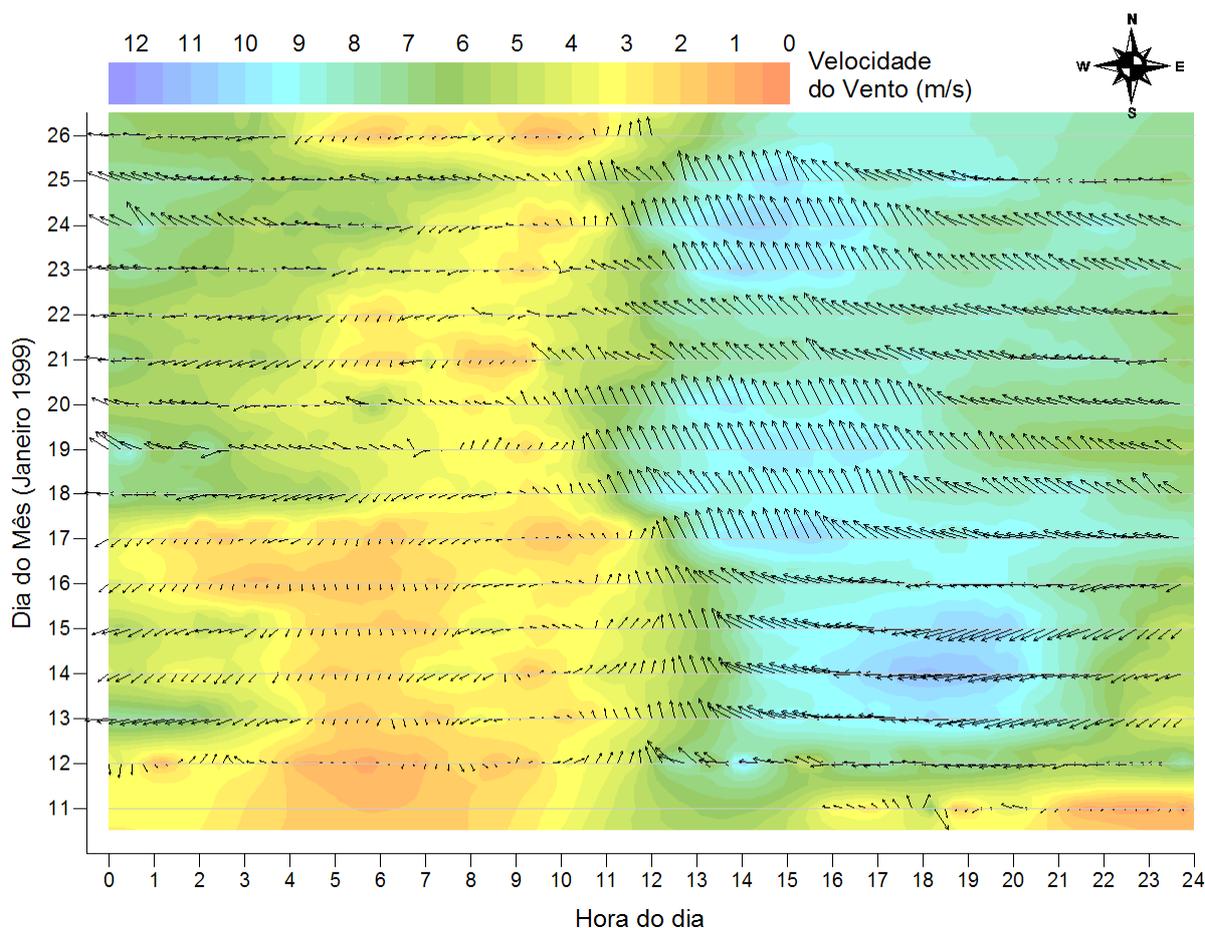


Figura 21 – intensidades e direções de vento usadas nas simulações de calibragem do modelo (cenário de verão). Dados medidos na ponta sul da Ilha do Frade, região central da BTS, pelo consórcio Hydros-CH2 Mhill, em janeiro de 1999. (Fonte: Relatório Final Coppetec PENO-4145 – “Modelagem Computacional para Análise de Aspectos da Dinâmica de Sedimentos na Baía de Todos os Santos, BA”, ROSMAN *et al.*, 2003).

## 6.7 Vazões fluviais

De acordo com Lima e Lessa (2002), os efeitos das descargas de água doce no interior da BTS somente são percebidos localmente. A descarga fluvial torna-se muito pequena quando comparada com o prisma de maré na embocadura. O prisma de maré de sizígia média através dos canais de Salvador e Itaparica é de aproximadamente  $1,3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  e a descarga média de água doce é da ordem de  $110 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondendo a 0,08% daquele valor.

Com o objetivo de generalizar os resultados obtidos pelo modelo na geração dos padrões de correntes, foram adotadas vazões fluviais médias constantes ao longo de todo o período de simulação. Os valores de vazões fornecidos ao modelo são

apresentados na Tabela 4 que se segue. A localização dos rios que tiveram vazão prescrita consta da Figura 22, pág. 67.

Tabela 4 – Descarga fluvial média prescrita nos rios considerados no domínio de modelagem

RIOS	VAZÃO PRESCRITA (m <sup>3</sup> /s)
Paraguaçu <sup>1</sup>	64,3
Jaguaripe <sup>2</sup>	11,2
Subaé <sup>2</sup>	4,5
da Dona <sup>2</sup>	3,8
Acupe <sup>3</sup>	1,5
São Paulo	1,2
Dão João	1,0
Paramirim	1,0
Mataripe	1,0
Caípe	0,8

FONTES: <sup>1</sup> Genz (2006) <sup>2</sup> Lima e Lessa (2002) <sup>3</sup> Rosman *et al.* (2000)

Conforme comentado no capítulo 4, a vazão afluente do Rio Paraguaçu para o estuário é controlada pela operação da Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo, implantada em 2005. A vazão sanitária é de 10 m<sup>3</sup>/s (GENZ, 2006). Esse valor de 10 m<sup>3</sup>/s (na realidade 60 m<sup>3</sup>/s durante quatro horas) é a média diária liderada durante a estação seca no interior do continente (de março a outubro). Na estação chuvosa (de novembro a fevereiro), dependendo do nível d'água no reservatório (SRH, 1996 *apud* Cirano e Lessa, 2007), a descarga pode alcançar um máximo de 1700 m<sup>3</sup>/s. No presente trabalho, foi adotado para vazão média anual do Rio Paraguaçu o valor de 64,3 m<sup>3</sup>/s, correspondente a média desse valor entre os anos de 1987 e 2003 (GENZ, 2006).

As vazões médias prescritas para os rios Jaguaripe, Subaé e da Dona são as apresentadas em Lima e Lessa (2002). A vazão do Rio Acupe foi obtida por meio de dados coletados pelo consórcio Hydros-CH2Mhill, em 1998, por ocasião do Programa Bahia Azul.

As vazões dos demais rios são estimadas e foram introduzidas apenas a fim de preservar o realismo dos escoamentos. Tendo em vista a pequena descarga desses rios, sua contribuição na circulação hidrodinâmica da BTS é praticamente desprezível. Sendo assim, foram adotados valores médios representativos, estimados com base na dimensão da área de suas respectivas bacias de drenagem.

## 6.8 Tipos de nós do contorno de terra

Atualmente, existem no SisBaHiA dez diferentes opções para especificação do tipo de nó do contorno de terra. Parâmetros do modelo, tais como direção normal ao contorno, fluxo ou velocidade normal e tangencial, talude do fundo e cota de alagamento podem ser automaticamente calculados pelo modelo ou especificados pelo usuário, de acordo com o tipo de nó selecionado. Maiores detalhes sobre tipos de nó de contorno de terra podem ser encontradas na Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN *et al.*, 2008) e no Manual do Usuário do SisBaHiA (COPPE, 2007).

No presente trabalho, os 1592 nós que compõe o contorno de terra estão distribuídos pelos seguintes tipos:

- Nó tipo 0: empregado nos nós do contorno de terra impermeável (com fluxo normal ao contorno nulo). Foi o tipo de nó empregado na maior parte do contorno de terra (em 65 % do número total de nós de terra).
- Nó tipo 2: empregado também nos nós do contorno de terra impermeável com fluxo normal nulo, assim como o nó tipo 0, mas com a direção do escoamento normal ao contorno fornecida explicitamente pelo modelador ao invés de calculada pelo modelo. Foi adotado em apenas sete nós, localizados em cantos convexos salientes da malha, onde a direção normal calculada inicialmente pelo modelo não reproduziu satisfatoriamente o sentido esperado do escoamento.
- Nó tipo 3: usado nos nós do contorno de terra onde houve intenção de se anular as velocidades normais e tangencias, visando preservar o realismo do escoamento. Foi adotado em 47 nós, tais como em alguns nós representativos de ilhas nodais.
- Nó tipo 5: também é um nó de velocidade nula, atribuído automaticamente pelo programa como indicativo de canto côncavo morto. Possui exatamente o mesmo efeito do nó tipo 3 com fluxo ou velocidade normal nula. Foi adotado em 120 nós do contorno de terra.
- Nó tipo 6: para nós com afluxo nas seções de rios onde não são mais sentidos os efeitos do refluxo causado pela maré. Foi utilizado apenas em um único nó do contorno de terra, localizado nas proximidades do pé da barragem Pedra do Cavalo, onde foi prescrita a vazão do Rio Paraguaçu.

- Nó tipo 8: para nós do contorno de terra em terrenos com predominância de vegetação tipo mangue; existente, sobretudo, nas margens da porção norte da BTS. Nesse tipo de nó, o talude na direção normal e uma cota de alagamento são fornecidos pelo usuário. Uma pequena componente na direção transversal ao escoamento é calculada pelo modelo, representando sentido do fluxo gerado pelo efeito do alagamento e secamento da bandeja de mangue. Foi o segundo tipo de nó mais empregado no contorno de terra (com 23 % do número total de nós de terra).
- Nó tipo 9: para nós com afluxo nas seções de rios onde ainda são sentidos os efeitos do refluxo causado pela maré. Nesse tipo de nó, o talude na direção normal também deverá ser explicitamente fornecido pelo usuário. Foi utilizado em todos os rios do domínio de modelagem, exceto no Rio Paraguaçu, que recebeu tipo de nó 6, conforme descrito anteriormente.

A Figura 22 ilustra um mapa com a localização dos diferentes tipos de nós utilizados na definição do contorno de terra. Destaca-se a presença de vegetação predominante do tipo mangue nas regiões norte da BTS. A localização dessas regiões foi obtida com base em informações constantes da Carta Náutica nº1110 e imagens aéreas visualizadas no programa *Google Earth*.

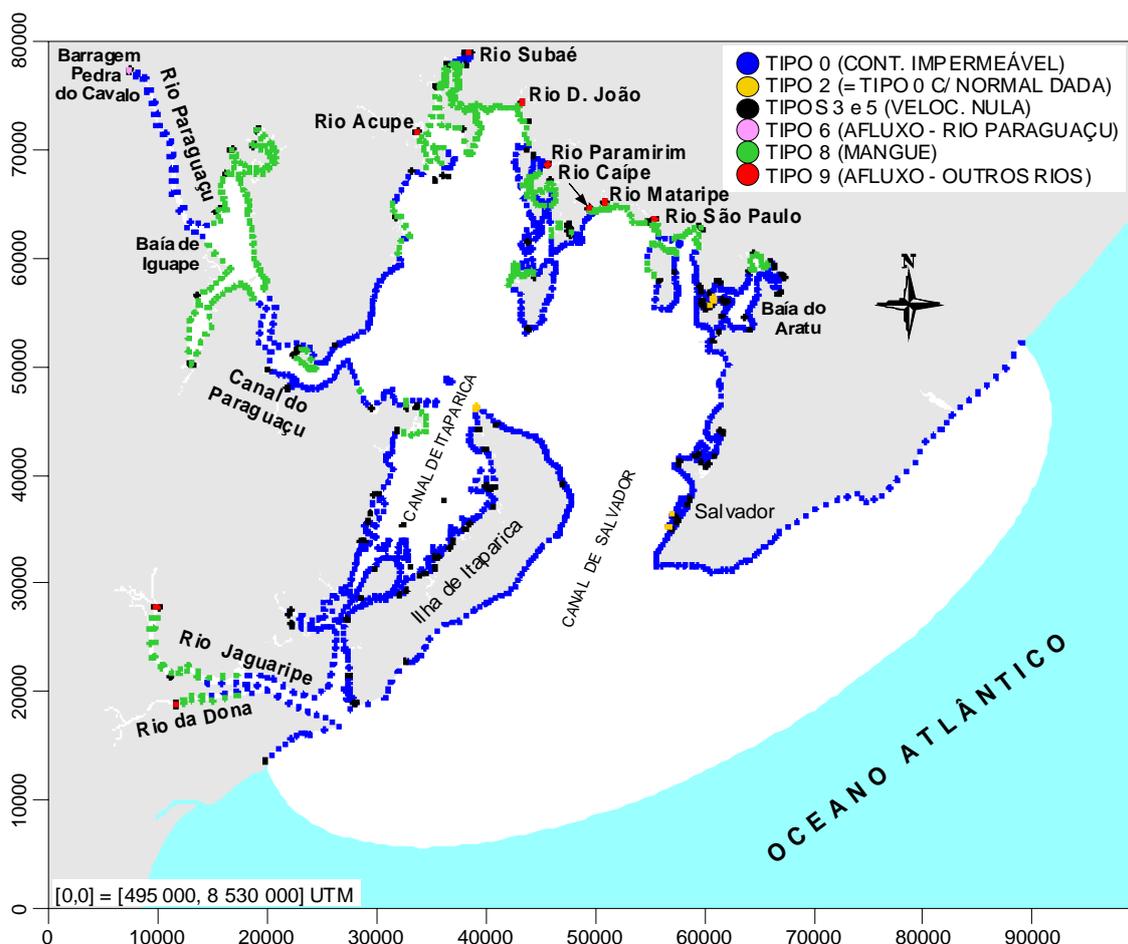


Figura 22 – Tipos de nós de contorno de terra empregados nas simulações e identificação dos rios que tiveram descargas líquidas consideradas nas prescrições das condições de contorno de terra com afluxo.

## 6.9 Outros parâmetros e desempenho do modelo

Outros parâmetros considerados na configuração do modelo hidrodinâmico são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Outros parâmetros utilizados na configuração do modelo hidrodinâmico.

PARÂMETRO	VALOR
Constante de Von Karman <sup>1</sup>	0,4040
Coefficiente de deslizamento das fronteiras de terra <sup>1</sup>	1
Intervalo de tempo entre valores de elevação prescritos na fronteira aberta	600 s
Intervalo de tempo entre valores de vento prescritos na fronteira aberta <sup>2</sup>	900 s
Intervalo de tempo para gravação de resultados temporais (nos gráficos)	1800 s
Intervalo de tempo para gravação de resultados espaciais (nos mapas)	3600 s
Total de níveis do modelo 3D	21
Passo de Tempo	75 s
Tolerância de convergência	$1 \times 10^{-5}$

<sup>1</sup> Valores presumidos do SisBaHiA

<sup>2</sup> Valor usado somente nas simulações de calibração e validação

A Tabela 6 que se segue apresenta alguns dados que permitem avaliar, de modo geral, o desempenho do modelo hidrodinâmico. Esses valores são parâmetros médios obtidos durante a execução das rodadas de calibração e validação do modelo.

Tabela 6 – Parâmetros médios de avaliação do desempenho do modelo hidrodinâmico nas rodadas de calibração e validação.

PARÂMETRO	VALOR <sup>1</sup>
Tempo aproximado de processamento (rodada de calibração)	15 h
Tempo aproximado de processamento (rodada de validação)	10 h
Número de Courant máximo ( $Cr_{máx}$ )	22,6
Número de Courant médio ( $Cr_{med}$ )	2,3
Ganho	53 ×
Desempenho	1,4 s/passos de tempo

<sup>1</sup> Utilizado computador Pentium IV - CPU 2,0 GHz.

Normalmente, em uma malha bem equilibrada, a relação Número de Courant máximo ( $Cr_{máx}$ ) versus Número de Courant médio ( $Cr_{med}$ ) varia entre  $4 \times 1$  e  $5 \times 1$ . No presente trabalho, a relação  $Cr_{máx} \times Cr_{med}$  atingiu quase  $10 \times 1$ , o que representa uma malha mal equilibrada. De fato, os maiores valores do  $Cr$  ocorreram nos elementos posicionados nos canais de acesso aos portos, regiões onde a profundidade é relativamente maior e onde também foi refinada a malha, uma vez que se tratam de regiões com interesse em navegação. Para compensar o desequilíbrio da malha e evitar que o modelo apresente instabilidades numéricas, a tolerância do critério de convergência do método de cálculo foi reduzida de  $1 \times 10^{-4}$  (valor presumido do SisBaHiA) para  $1 \times 10^{-5}$ .

## 7. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A calibração e validação de modelos é a etapa final do processo de modelagem. Consiste basicamente na verificação da coerência entre os dados medidos em campo a respeito de determinado fenômeno de interesse e os resultados calculados pelo modelo. Quando essa comparação não apresenta concordância satisfatória, ajustes em dados de entrada, parâmetros e coeficientes do modelo devem ser implementados, a fim de buscar uma melhor coerência dos resultados. Caso, após diversas tentativas, as alterações introduzidas não surjam ainda o efeito desejado, uma verificação no modelo conceptual deverá ser realizada.

No modelo hidrodinâmico do SisBaHiA, os processos de calibração são minimizados devido a:

- discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação sigma, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas;
- campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço; e
- modelagem de turbulência multiescala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES).

Comentários adicionais sobre calibração e validação de modelos podem ser encontrados na Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN *et al.*, 2008).

Embora o SisBaHiA já tenha sido calibrado e validado para a BTS no ano 2000, considera-se necessária, para os objetivos do presente trabalho, a realização de nova calibração e validação, tendo em vista as diversas modificações e atualizações implementadas na geometria do corpo de água, contornos de terra e batimetria.

Tal como realizado no ano de 2000, a atual calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada por meio da comparação dos resultados do modelo com dados medidos durante a campanha de verão de 1999, atinente ao Programa Bahia Azul. Na validação, idêntica comparação foi realizada com dados medidos durante a campanha de inverno

do mesmo ano. Os resultados numéricos utilizados para comparação com os dados de campo foram retirados exatamente do mesmo ponto onde estavam instaladas as estações de medição. Para isso, foi utilizada a interpolação quadrática no elemento da malha.

No presente trabalho, tanto na fase da calibração como na validação, das vinte estações oceanográficas garantidas por ocasião do Programa Bahia Azul, apenas seis foram selecionadas para realização das comparações entre dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo. Dessas seis estações selecionadas, em duas foram realizadas comparações de variações de níveis d'água e em outras quatro foram realizadas comparações de correntes. Verificações de constantes harmônicas de maré em estações da Marinha do Brasil também foram realizadas na fase de calibração, cf. detalhado mais adiante, no subitem 7.1.1.2.

O critério adotado para seleção das seis estações de comparação de resultados considerou, unicamente, a proximidade de regiões de maior interesse em navegação.

## **7.1 Calibração do modelo hidrodinâmico**

No processo de calibração do modelo hidrodinâmico, foi adotada a seguinte seqüência de comparação entre dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo:

- Verificação de elevação da superfície livre (níveis) nas estações S19 e S20, localizadas respectivamente à leste da Ilha de Itaparica, próximo à enseada Mar Grande, e à noroeste da BTS;
- Verificação de amplitude e fase das constantes harmônicas de maré calculadas pelo modelo nas estações Porto de Salvador, Base Naval de Aratu, Terminal Marítimo Madre de Deus, Ilha de Itaparica e Terminal de São Roque, localizado na margem direita do Canal do Paraguaçu; e
- Verificação de velocidades de correntes nas estações S08, S03, S15 e S07, localizadas respectivamente no Canal de Salvador, Baía do Aratu, norte da Ilha do Frade (próximo ao Temadre) e Canal de Itaparica.

A Figura 23 que se segue apresenta um mapa com a localização das estações empregadas na calibragem, onde foram feitas verificações de níveis e correntes.

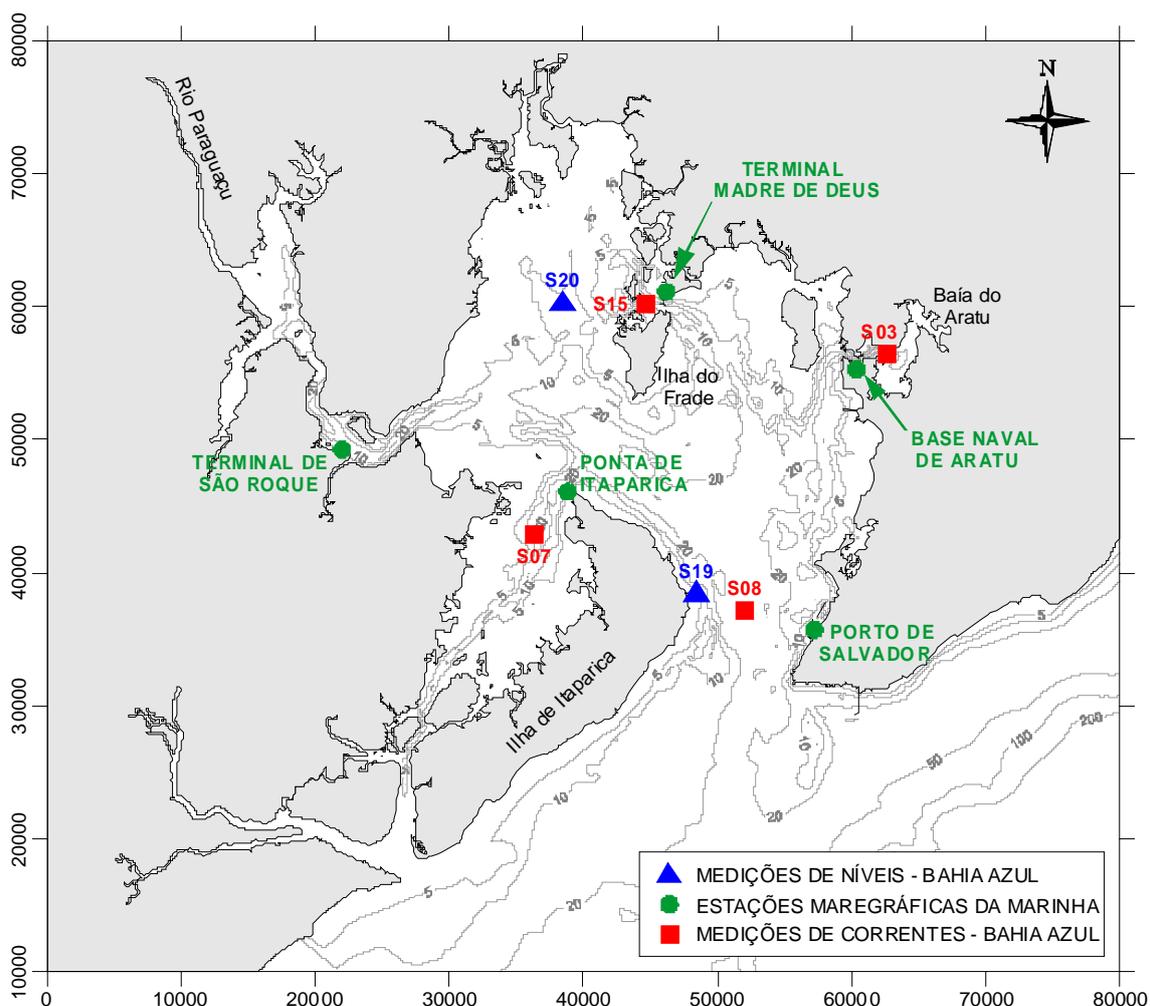


Figura 23 – Localização das estações maregráficas e correntométricas utilizadas na calibração do modelo hidrodinâmico. As estações de verão do Programa Bahia Azul (quadrados vermelhos e triângulos azuis) foram empregadas nas comparações entre dados medidos e calculados pelo modelo. As estações maregráficas da Marinha do Brasil (círculo em verde) foram empregadas nas comparações entre constantes harmônicas de maré medidas e calculadas pelo modelo.

## 7.1.1 Variações de níveis

### 7.1.1.1 Comparação entre séries temporais de níveis

Conforme já mencionado no subitem 7.1, a comparação entre séries temporais de níveis medidos em campo e calculados pelo modelo foi realizada em duas das três estações maregráficas de alta resolução ocupadas por ocasião do Programa Bahia Azul, estações S19 e S20 (cf. Figura 23 acima).

Pela análise dos resultados, pode-se notar que, de modo geral, as variações de elevação da superfície livre calculadas pelo modelo ajustam-se bem aos dados de campo medidos nas duas estações de medição.

As Figuras 24 e 26 que se seguem apresentam comparações entre séries temporais de elevação da superfície livre medidas nas estações de verão S19 e S20 e elevações obtidas pelo modelo no mesmo local das estações. Também são apresentadas, no mesmo gráfico, séries de variações do nível médio do mar (NMM) local calculados para os dados medidos e para os resultados do modelo. A idéia de representar as variações do NMM juntamente com as elevações da superfície livre visa buscar alguma correlação das diferenças observadas nas elevações entre dados medidos e calculados com as respectivas diferenças entre NMM.

O NMM foi estimado por meio de médias aritméticas móveis dos dados de elevação medidos e calculados em cada ciclo de maré. Ou seja, a cada intervalo de tempo de um ciclo de maré, foi feita uma média móvel de duração aproximada da 12,4h e obtido uma cota de NMM. Posteriormente, todas essas cotas de NMM foram interpoladas por uma curva de modo a representar a flutuação do NMM, conforme apresentado nos gráficos das Figuras 24 e 26.

Estudos de correntes de maré realizados na Baía de Guanabara por Oliveira (1998) e Malta (2005) demonstraram que para uma mesma altura de maré forçante do modelo (com diferentes valores absolutos de cotas de BM e PM) os padrões de correntes obtidos eram muito próximos. Assim sendo, a comparação entre alturas da onda de maré foi o critério adotado para calibrar os resultados de elevação de níveis calculados pelo modelo, uma vez que o valor do desnível entre PM e BM é muito mais significativo em termos de magnitudes de correntes do que o valor absoluto da cota da PM ou BM.

A comparação entre as alturas da onda de maré permite ainda que sejam desconsiderados efeitos meteorológicos não fornecidos ao modelo devido ao uso de maré sintética prevista para prescrição de níveis ao longo da fronteira aberta. Além disso, a comparação entre as alturas da onda de maré também desconsidera eventuais erros de fase que venham a ocorrer nos instrumentos de medição.

Visando permitir a comparação pura entre as alturas de maré medidas e calculadas, i.e., isentas das variações de NMM, foram elaborados os gráficos das Figuras 25 e 27 que se seguem. Esses gráficos apresentam as comparações entre séries temporais de elevação da superfície livre medidas e calculadas reduzidas das flutuações do NMM.

Além da avaliação dos resultados por meio da comparação de registros gráficos, buscou-se também uma avaliação matemática que quantificasse numericamente as coerências entre medições de campo e resultados calculados pelo modelo. Dessa forma, foi calculada, para cada estação, uma diferença relativa percentual média<sup>17</sup> entre alturas da onda de maré medida no campo e as alturas da onda de maré obtida pelo modelo.

A diferença relativa percentual média ( $\overline{drp}$ ) foi calculada por meio da média aritmética das diferenças relativas percentuais ( $drp_n$ ) observadas entre alturas da onda de maré medida ( $H_{m\ med}$ ) e calculada pelo modelo ( $H_{m\ mod}$ ) para cada ciclo de maré. Ou seja:

$$drp_n = \frac{|H_{m\ med} - H_{m\ mod}|}{H_{m\ med}} \cdot 100\%$$

$$\overline{drp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N drp_n \quad (11)$$

onde:  $drp_n$  = Diferença relativa percentual entre alturas de maré medidas e calculadas pelo modelo no  $n$ -ésimo ciclo de maré (%)  
 $H_{m\ med}$  = Altura da onda de maré dos dados medidos em campo no  $n$ -ésimo ciclo de maré  
 $H_{m\ mod}$  = Altura da onda de maré dos dados calculados pelo modelo no  $n$ -ésimo ciclo de maré  
 $N$  = Número total de ciclos de maré dos dados medidos em campo ou calculados pelo modelo  
 $\overline{drp}$  = Média aritmética de todas as  $N$   $drp_n$  observadas (%)

Os resultados calculados das diferenças relativas percentuais médias e comentários adicionais são apresentados nas legendas das figuras.

---

<sup>17</sup> O conceito de diferença relativa percentual média é análogo ao conceito de erro relativo percentual médio. Entretanto, foi dada preferência ao uso da expressão “diferença” ao invés de “erro” porque foram utilizados os dados medidos nas campanhas de 1999 como referência das comparações, dados esses que apresentam inerentes suas imprecisões e incertezas características de medições de campo, além de alguns indícios de funcionamento inadequado, conforme será comentado mais detalhadamente adiante nesse mesmo capítulo.

Comparação de Elevações da Superfície Livre e Variações do NMM  
Estação de Verão S19 - Mar Grande (pta. leste da Ilha de Itaparica)

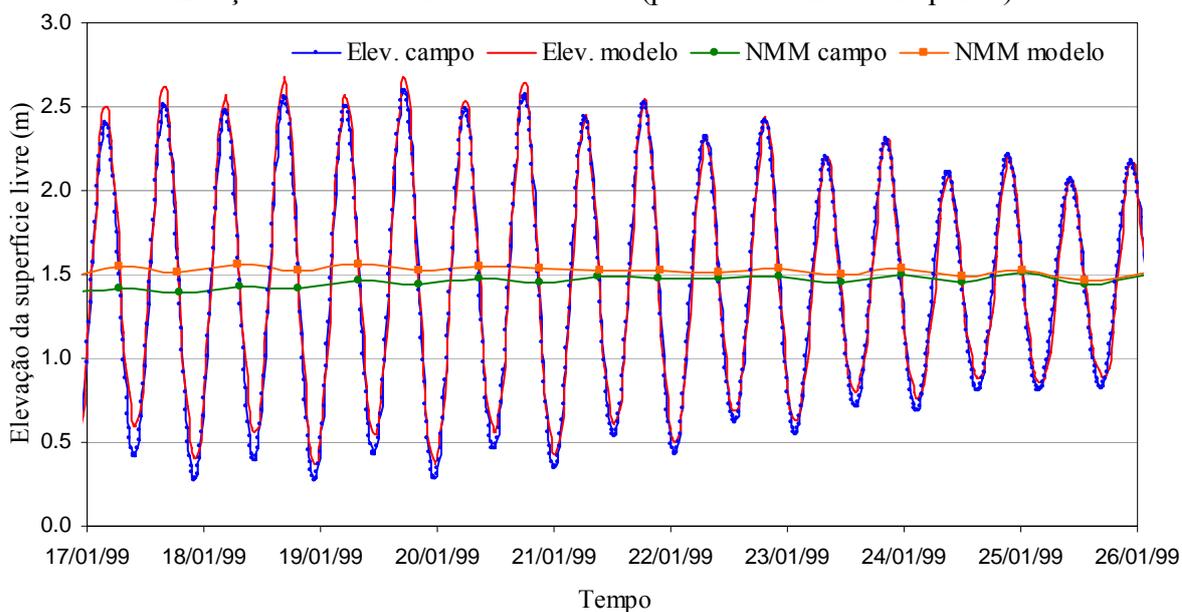


Figura 24 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM dos dados medidos na estação S19 e calculados pelo modelo. Percebe-se maior discordância entre elevações ocorrida durante a época de sizígia, no início da série, correlacionada à elevação de nível médio do mar (NMM) calculado pelo modelo. As diferenças entre NMM medidos e calculados estão certamente associadas a variações dinâmicas do NMM de longo período e efeitos meteorológicos.

Comparação de Elev. da Sup. Livre desconsiderando variações do NMM  
Estação de Verão S19 - Mar Grande (pta. leste da Ilha de Itaparica)

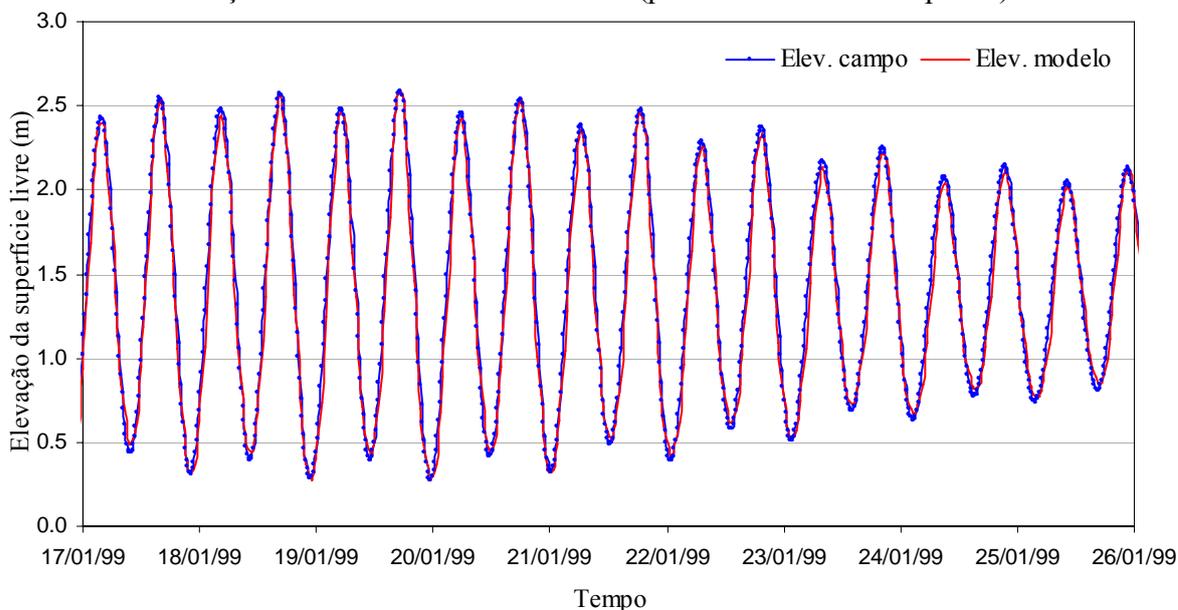


Figura 25 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação S19 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM. Percebe-se muito boa concordância dos dados, indicando que as alturas da maré calculadas pelo modelo estão de acordo com as alturas de maré medidas em campo. A diferença relativa percentual média entre ambas é da ordem de 5,1%.

Comparação de Elevações da Superfície Livre e Variações do NMM  
Estação de Verão S20 - NW da BTS

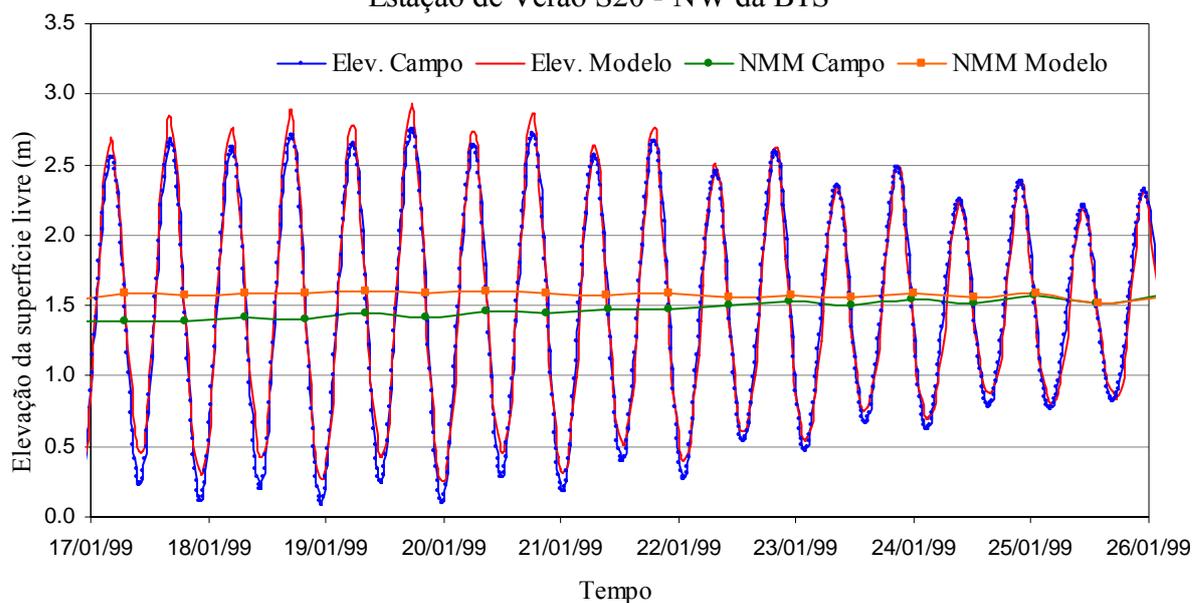


Figura 26 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM medidos na estação S20 e calculados pelo modelo. Semelhante ao já observado na estação S19, percebe-se também nessa estação, maior discordância entre elevações ocorrida durante a época de sizígia, no início da série, correlacionada à elevação de nível médio do mar (NMM) calculado pelo modelo. As variações dinâmicas do NMM são mais sensíveis na estação S20, localizada na região NW da baía, devido aos efeitos de pequeno fundo.

Comparação de Elev. da Sup. Livre desconsiderando variações do NMM  
Estação de Verão S20 - NW da BTS

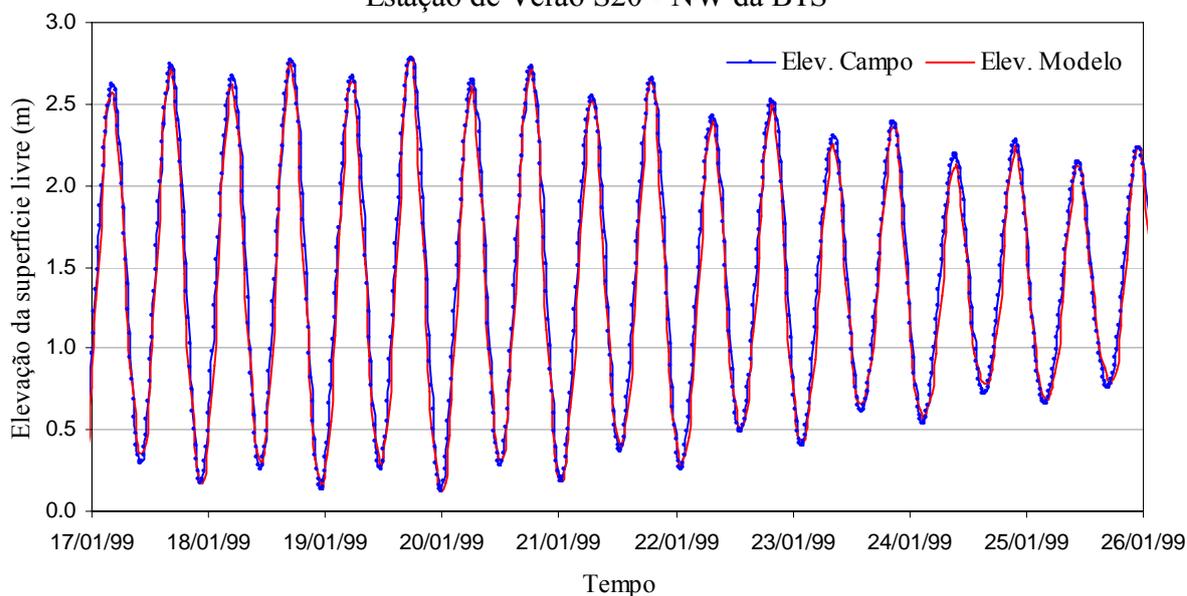


Figura 27 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação S20 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM. Percebe-se muito boa concordância dos resultados, o que indica que as alturas da maré calculadas pelo modelo estão de acordo com as alturas de maré medidas em campo. A diferença relativa percentual média entre ambas é da ordem de 4,5%.

Destacam-se, nas Figuras 24 e 26 acima, diferenças entre flutuações do nível médio dos dados de campo e resultados do modelo que variam de zero até cerca de 20 cm. Um dos principais fatores contribuintes para a ocorrência dessas diferenças é o fato de desconsiderar-se na modelagem quaisquer fenômenos externos à BTS, tais como efeitos meteorológicos remotos.

Além disso, as estações de medição não têm um nível de referência fixo amarrado entre si, i.e., cada estação possui seu próprio nível médio local calculado por uma média aritmética das elevações medidas ao longo do período de monitoramento dos dados. Os dados de campo, dessa forma medidos, não capturam o efeito dinâmico de longo prazo gerador da sobrelevação do NMM existente ao longo do corpo d'água.

Já no modelo, todas as estações de gravação de resultados estão niveladas entre si e com o NMM prescrito na fronteira aberta. O NMM do modelo é diferenciado ao longo da BTS, respondendo às variações do efeito dinâmico considerado na modelagem. Pode-se perceber, nos gráficos das Figuras 24 e 26, que o NMM calculado pelo modelo tende a subir na época de sizígia e descer na quadratura, gerando automaticamente uma componente de maré de longo prazo, com período da ordem de 14,6 dias.

#### **7.1.1.2 Comparação entre constantes harmônicas de maré**

Além das comparações de nível no domínio do tempo, foram realizadas comparações no domínio da frequência entre constantes harmônicas padrões de maré e constantes harmônicas de maré calculadas pelo programa para janeiro de 1999. As constantes harmônicas de maré padrões foram geradas por meio da análise de séries de referência obtidas junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da Marinha do Brasil. Foram realizadas comparações nas seguintes estações maregráficas (cf. Figura 23, pág. 71):

- Estação 40140 – Porto de Salvador;
- Estação 40135 – Base Naval de Aratu;
- Estação 40118 – Terminal Marítimo Alte. Alves Câmara (Temadre);
- Estação 40133 – Ilha de Itaparica; e
- Estação 40130 – Terminal de São Roque.

A numeração das estações aqui apresentadas segue o padrão estabelecido pelo BNDO para descrição de estações maregráficas.

Todas as análises harmônicas de maré foram realizadas por meio do Módulo de Análise e Previsão de Marés do SisBaHiA. Na Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN *et al.* 2008), Pecly afirma que:

Os módulos implementados no SisBaHiA foram elaborados a partir das rotinas propostas por M. Foreman do *Institute of Ocean Sciences*, British Columbia. Tais rotinas também constituem a base do sistema TOGA, utilizado pela Universidade de Honolulu - Hawaii para o controle de qualidade dos dados do programa GLOSS (*Global Sea Level Observing System*) que é gerenciado pelo IOC (*Intergovernmental Oceanographic Commission*) com o patrocínio da UNESCO. Acredita-se, atualmente, que esse conjunto de rotinas é o mais largamente utilizado em todo o mundo para a análise e previsão de dados de marés.

O método de análise harmônica de marés de uso oficial adotado pela Marinha do Brasil é o desenvolvido por Franco (1988). Para efeito de comparação, a partir de uma mesma série temporal de dados de maré medidos, foram realizadas análises harmônicas pelo método de Franco (1988) e pelo método adotado pelo SisBaHiA. Ambos os métodos apresentaram resultados muito próximos, sendo as diferenças observadas consideradas desprezíveis. No presente trabalho, foi dada preferência ao método de análise harmônica do SisBaHiA simplesmente pela facilidade de utilização.

Franco (1988) demonstrou também que as constantes harmônicas provenientes de análises de séries com duração mínima de 29 dias de registro são suficientes para gerar análises harmônicas consideradas satisfatórias para fins hidrográficos. Assim sendo, o modelo hidrodinâmico foi rodado por 32 dias úteis (descartado o período de aquecimento do modelo). Paralelamente, a análise dos dados medidos também teve duração de 32 dias, sendo esses períodos extraídos das séries padrões de referência de cada estação maregráfica.

Das Figuras 28 a 32 que se seguem, são apresentados gráficos de barras verticais que representam o resultado da comparação entre constantes harmônicas de maré. Foram realizadas comparações de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida nas estações maregráficas da Marinha e amplitudes e fases de constantes

harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local. Em cada estação maregráfica, foram comparadas as seis componentes de maior amplitude.

Das Tabelas 7 a 11 que se seguem são apresentados os dados numéricos que subsidiaram a elaboração dos gráficos de barras. Uma sexta coluna foi adicionada nessas tabelas indicando o percentual de energia associada a cada componente da onda de maré.

É importante destacar a forte dominância da componente  $M_2$ , com amplitudes aproximadamente duas vezes maiores do que a segunda componente mais importante, a  $S_2$ . Considerando que a energia da maré é proporcional ao quadrado da amplitude, a predominância da  $M_2$  fica ainda mais visível.

Analisando a seqüência de gráficos e tabelas a seguir no sentido de jusante para montante da BTS (cf. Figura 23, pág. 71), pode-se notar a amplificação sofrida pelas principais componentes de maré conforme esta se propaga para o interior da baía. A amplificação da maré aqui observada confirma fato já previamente conhecido na literatura a respeito da hidrodinâmica no interior da BTS.

Em geral, os resultados das comparações entre constantes harmônicas de maré foram considerados satisfatórios. Pode-se atribuir como um dos principais fatores causadores das discrepâncias observadas, as alterações morfológicas sofridas pelo sistema. Vale ressaltar que algumas das séries padrões de referência empregadas no cálculo das constantes são oriundas de medições de níveis realizadas nas décadas de 60 e 70. Eventuais modificações ocorridas na topografia do fundo e na geometria da linha de costa, desde essa época até a ocasião da coleta dos dados de batimetria e contorno fornecidos ao modelo, podem, certamente, ter influenciado a concordância entre valores medidos e computados.

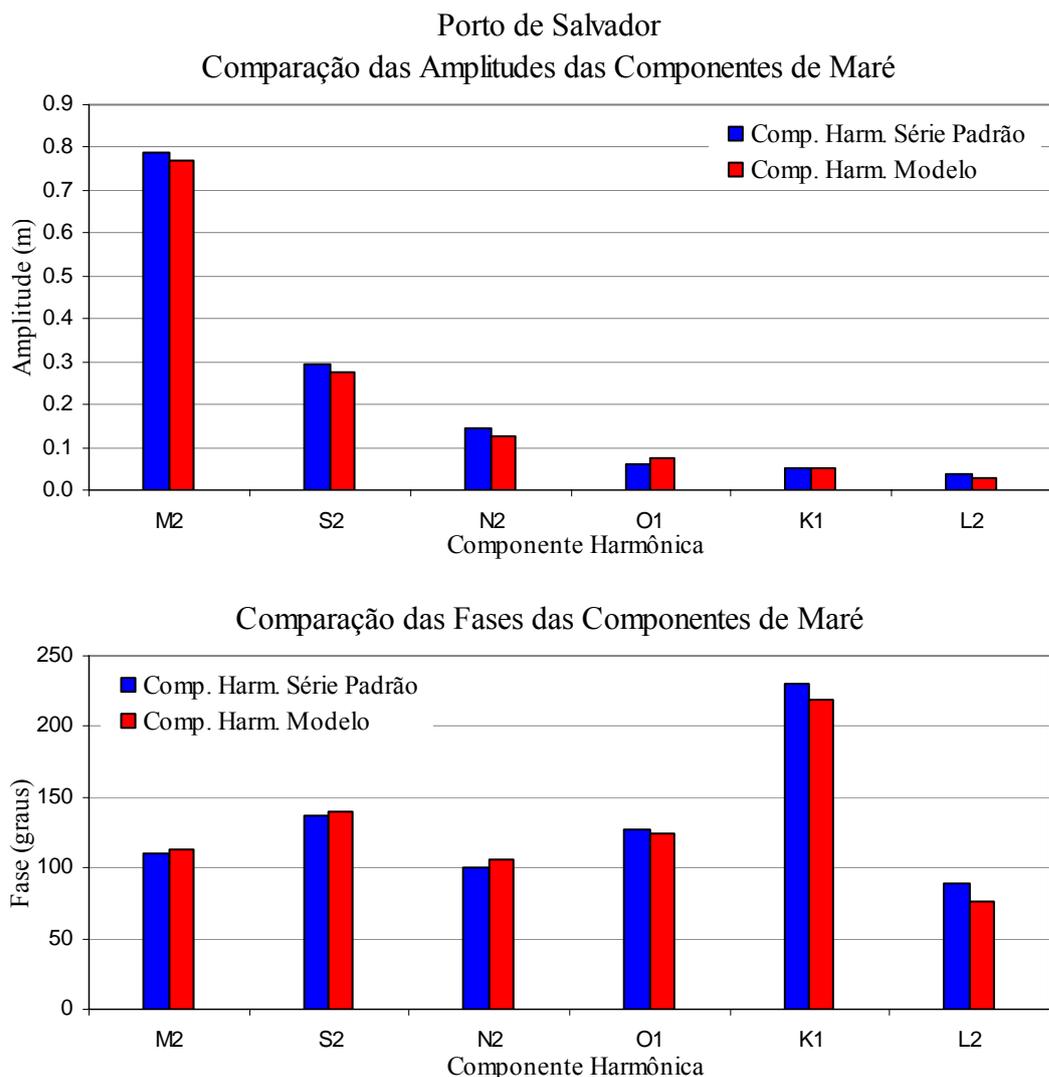


Figura 28 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida no Porto de Salvador e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local. A concordância entre ambos os gráficos foi considerada satisfatória em todas as componentes de maré analisadas.

Tabela 7 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida no Porto de Salvador e maré calculada pelo modelo no mesmo local.

Componente de Maré	Dados da série padrão medida <sup>1</sup>		Dados Calculados pelo Modelo <sup>2</sup>		% Energia
	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)	
M <sub>2</sub>	0,79	110,6	0,77	113,0	83,8%
S <sub>2</sub>	0,29	137,7	0,28	139,3	11,3%
N <sub>2</sub>	0,14	100,6	0,13	106,3	2,5%
O <sub>1</sub>	0,06	126,6	0,07	123,9	0,6%
K <sub>1</sub>	0,05	230,0	0,05	218,9	0,4%
L <sub>2</sub>	0,04	89,1	0,03	76,1	0,1%

<sup>1</sup> Período analisado de dados medidos compreendido entre 04/01 e 05/02/1960.

<sup>2</sup> Período analisado de dados calculados pelo modelo compreendido entre 04/01 e 05/02/1999.

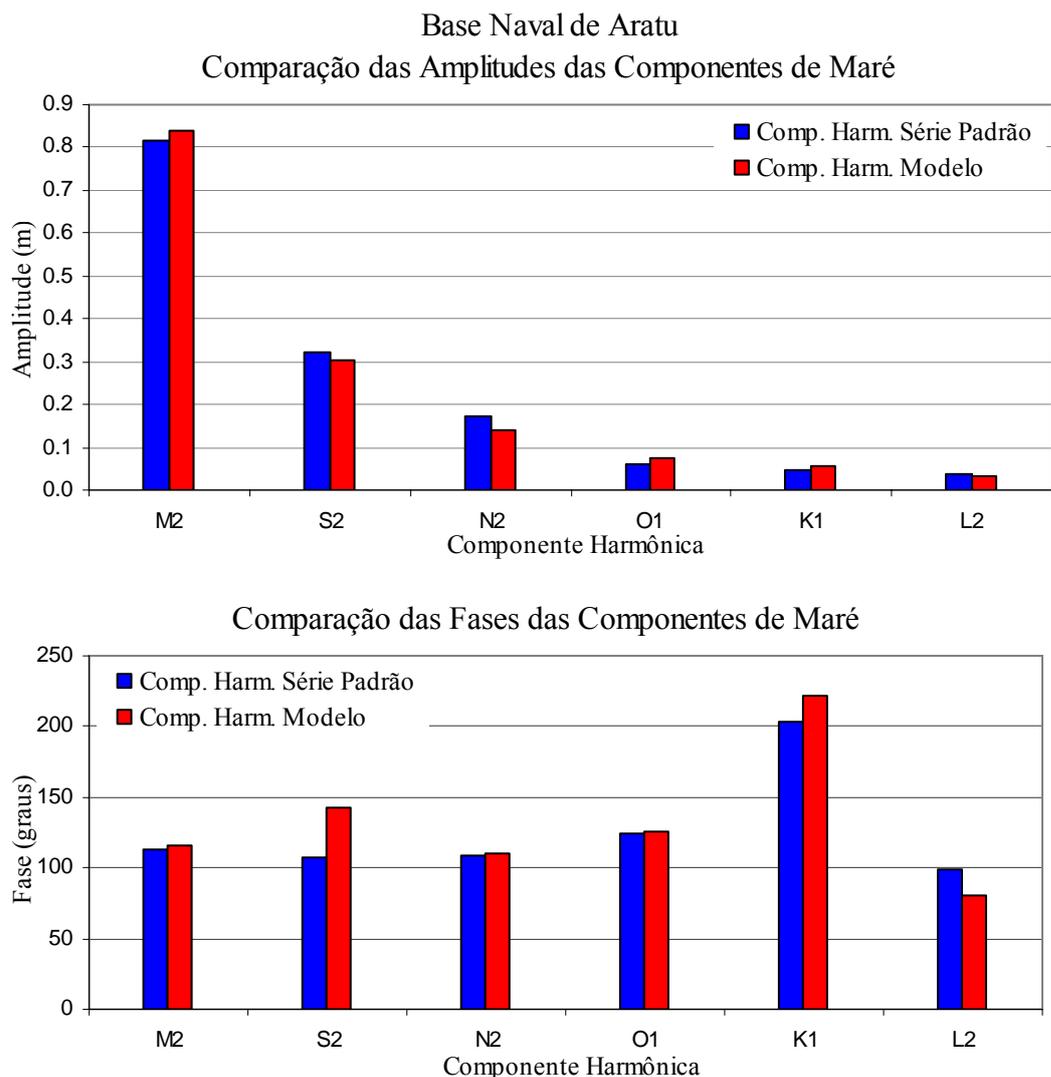


Figura 29 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida na Base Naval de Aratu e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local. A concordância entre ambos os gráficos foi considerada satisfatória em todas as componentes de maré analisadas.

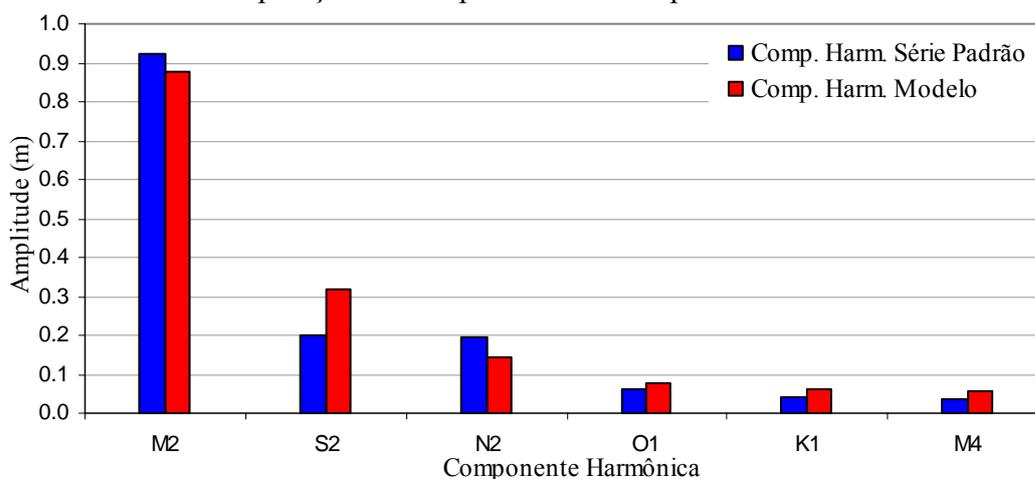
Tabela 8 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida na Base Naval de Aratu e maré calculada pelo modelo no mesmo local.

Componente de Maré	Dados da série padrão medida <sup>1</sup>		Dados Calculados pelo Modelo <sup>2</sup>		% Energia
	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)	
M <sub>2</sub>	0,82	113,4	0,84	115,7	82,3%
S <sub>2</sub>	0,32	106,7	0,30	142,6	11,8%
N <sub>2</sub>	0,17	108,3	0,14	110,0	2,9%
O <sub>1</sub>	0,06	124,3	0,08	125,2	0,6%
K <sub>1</sub>	0,05	203,1	0,06	221,3	0,3%
L <sub>2</sub>	0,04	98,9	0,03	80,2	0,1%

<sup>1</sup> Período analisado de dados medidos compreendido entre 02/11 e 03/12/2003.

<sup>2</sup> Período analisado de dados calculados pelo modelo compreendido entre 04/01 e 05/02/1999.

Terminal Marítimo Madre de Deus  
 Comparação das Amplitudes das Componentes de Maré



Comparação das Fases das Componentes de Maré

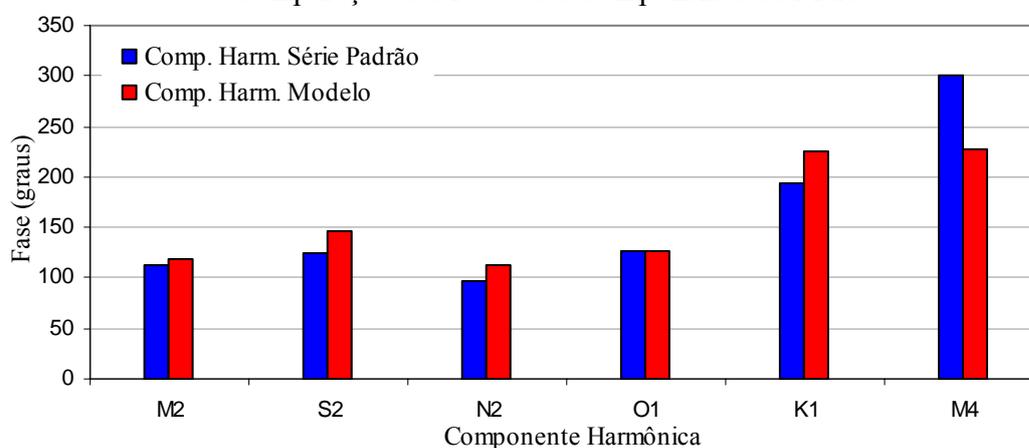


Figura 30 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida no Temadre e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local. A concordância entre ambos os gráficos foi considerada satisfatória nas componentes de maré analisadas, exceto na componente S<sub>2</sub>.

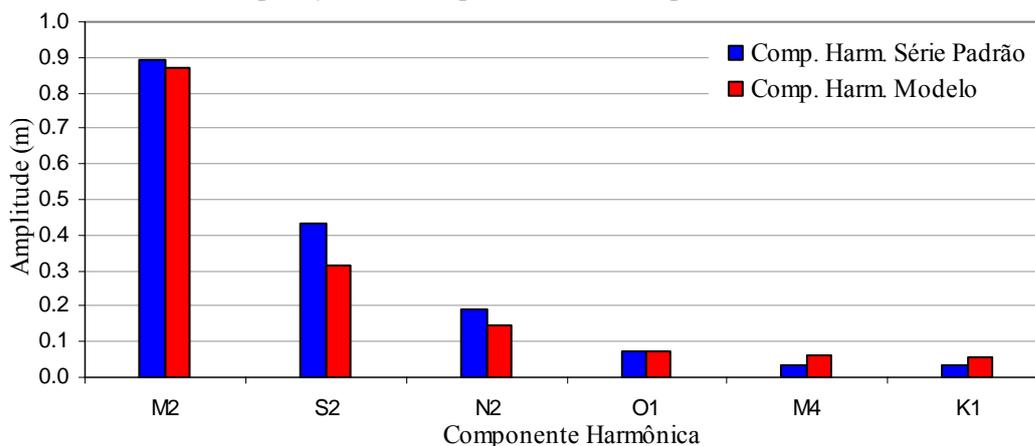
Tabela 9 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida no Terminal Marítimo de Madre de Deus (Temadre) e maré calculada pelo modelo no mesmo local.

Componente de Maré	Dados da série padrão medida <sup>1</sup>		Dados Calculados pelo Modelo <sup>2</sup>		% Energia
	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)	
M <sub>2</sub>	0,93	112,6	0,88	118,5	87,4%
S <sub>2</sub>	0,20	125,2	0,32	146,0	7,3%
N <sub>2</sub>	0,20	96,9	0,14	113,3	3,1%
O <sub>1</sub>	0,06	126,7	0,08	126,7	0,5%
K <sub>1</sub>	0,04	193,0	0,06	226,1	0,3%
M <sub>4</sub>	0,03	301,1	0,06	226,5	0,2%

<sup>1</sup> Período analisado de dados medidos compreendido entre 01/06 e 02/07/1968.

<sup>2</sup> Período analisado de dados calculados pelo modelo compreendido entre 04/01 e 05/02/1999.

Ponta de Itaparica - Ilha de Itaparica  
 Comparação das Amplitudes das Componentes de Maré



Comparação das Fases das Componentes de Maré

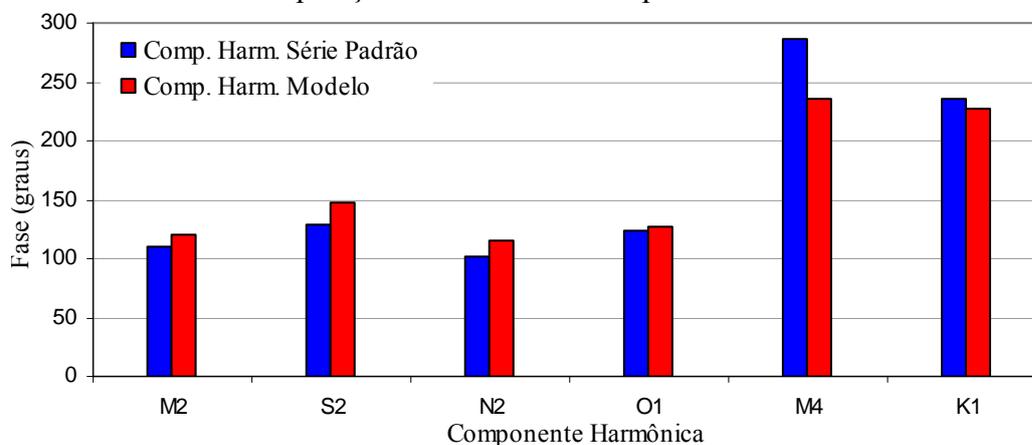


Figura 31 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida na Ponta de Itaparica e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local. A concordância entre ambos os gráficos foi considerada satisfatória nas componentes de maré analisadas.

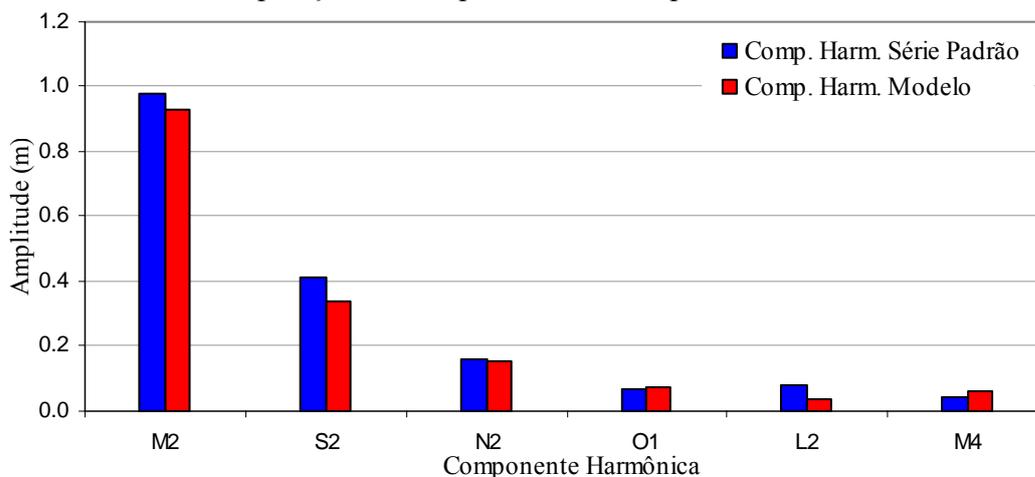
Tabela 10 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida na Ponta de Itaparica e maré calculada pelo modelo no mesmo local.

Componente de Maré	Dados da série padrão medida <sup>1</sup>		Dados Calculados pelo Modelo <sup>2</sup>		% Energia
	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)	
M <sub>2</sub>	0,90	110,2	0,87	120,0	80,3%
S <sub>2</sub>	0,43	129,3	0,32	148,1	14,5%
N <sub>2</sub>	0,19	102,0	0,14	114,5	2,9%
O <sub>1</sub>	0,07	123,4	0,08	127,3	0,6%
M <sub>4</sub>	0,04	285,6	0,06	234,9	0,3%
K <sub>1</sub>	0,04	236,2	0,06	227,2	0,2%

<sup>1</sup> Período analisado de dados medidos compreendido entre 06/08 e 07/09/1974.

<sup>2</sup> Período analisado de dados calculados pelo modelo compreendido entre 04/01 e 05/02/1999.

Terminal de São Roque - Canal do Paraguaçu  
 Comparação das Amplitudes das Componentes de Maré



Comparação das Fases das Componentes de Maré

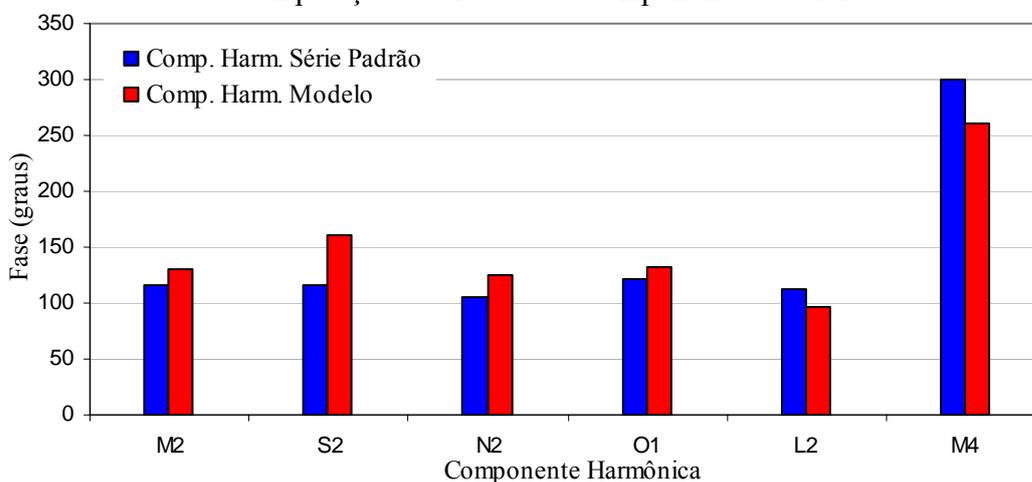


Figura 32 – Comparação de amplitudes e fases entre constantes harmônicas padrões de maré medida no Terminal de São Roque e amplitudes e fases de constantes harmônicas de maré calculada pelo modelo no mesmo local. A concordância entre ambos os gráficos foi considerada satisfatória nas componentes de maré analisadas.

Tabela 11 – Amplitudes e fases de constantes harmônicas padrões de maré medida no Terminal de São Roque e maré calculada pelo modelo no mesmo local.

Componente de Maré	Dados da série padrão medida <sup>1</sup>		Dados Calculados pelo Modelo <sup>2</sup>		% Energia
	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)	
M <sub>2</sub>	0,98	116,4	0,93	129,7	82,8%
S <sub>2</sub>	0,41	116,1	0,34	160,0	12,7%
N <sub>2</sub>	0,16	104,6	0,15	124,9	2,2%
O <sub>1</sub>	0,07	121,3	0,07	132,5	0,5%
L <sub>2</sub>	0,08	112,5	0,04	96,3	0,3%
M <sub>4</sub>	0,04	300,3	0,06	260,4	0,2%

<sup>1</sup> Período analisado de dados medidos compreendido entre 15/04 e 17/05/2006.

<sup>2</sup> Período analisado de dados calculados pelo modelo compreendido entre 04/01 e 05/02/1999.

### 7.1.2 Comparação de correntes

De forma análoga ao realizado na comparação de níveis, conforme apresentado no subitem 7.1.1.1, os resultados de variações de correntes calculados pelo modelo hidrodinâmico foram verificados com os dados oceanográficos de campo coletados durante a campanha de verão de 1999. O estudo de dados vetoriais, como é o caso de correntes, é facilitado pela decomposição do vetor velocidade em componentes ortogonais. Dessa forma, todas as operações de cálculos e plotagens foram feitas sobre as componentes ortogonais  $u$  e  $v$ , onde  $u$  representa a componente da velocidade na direção  $x$  (E-W) e  $v$  representa a componente da velocidade na direção  $y$  (N-S).

A comparação de correntes foi realizada em quatro das dezessete estações de correntometria ocupadas por ocasião do Programa Bahia Azul (cf. subitem 7.1). São elas:

- Estação S08 – Canal de Salvador, dados medidos com ADCP<sup>18</sup> ao longo de toda a coluna d'água;
- Estação S03 – Baía do Aratu, dados medidos em dois níveis distintos, nas profundidades de 8,7 e 24,2 m;
- Estação S15 – Temadre, dados medidos em dois níveis distintos, nas profundidades de 5,9 e 19,8 m; e
- Estação S07 – Canal de Itaparica, dados medidos em dois níveis distintos, nas profundidades de 10,4 e 20,0 m.

A localização dessas estações correntométricas, as quais serviram para verificação dos resultados do modelo na fase da calibração, pode ser visualizada no mapa da Figura 23.

Na estação S08, os dados foram coletados por meio do equipamento ADCP em 18 níveis ao longo da coluna d'água. Por esse motivo, foi dada preferência à comparação dos perfis de velocidades promediadas na vertical (2DH). O cálculo da velocidade 2DH dos dados coletados foi realizado por meio de uma média aritmética da coluna d'água, sendo descartados os níveis de aquisição do ADCP localizados acima de 20% e abaixo de 80% da coluna d'água. Esses níveis foram descartados a fim de prevenir a existência de dados espúrios.

---

<sup>18</sup> ADCP – Sigla do Inglês de *Acoustic Doppler Current Profiler*

Nas demais estações (S03, S15 e S07), os dados foram coletados em dois pontos discretos, localizados nas profundidades correspondentes, aproximadamente, a 20 e 80% da coluna d'água. Assim sendo, as comparações de velocidades foram realizadas nos níveis sigma do modelo correspondentes às mesmas profundidades percentuais da aquisição dos dados de campo.

Naturalmente, não é de se esperar que o modelo reproduza com absoluta perfeição a profundidade existente no local das estações. Logicamente, existem desigualdades entre a batimetria existente de fato na natureza e a batimetria interpretada pelo modelo. A topografia do fundo é mais suave no modelo do que na natureza. Dessa forma, pequenas irregularidades locais na topografia de fundo podem causar desvios na direção das correntes, os quais não serão capturados pelo modelo. Essas desigualdades acarretam também diferenças entre as profundidades de aquisição dos dados no campo e profundidades de cálculo da velocidade no nível sigma correspondente do modelo.

A Tabela 12 que se segue apresenta as profundidades das estações no campo e as correspondentes profundidades consideradas pelo modelo. Também são apresentadas as profundidades dos sensores e os níveis correspondentes onde os resultados de velocidade de corrente calculados pelo modelo foram gravados para comparação com os dados de campo.

Tabela 12 – Profundidades das estações utilizadas para comparação de correntes durante o procedimento de calibração e as correspondentes profundidades consideradas pelo modelo, profundidades de aquisição dos dados de campo e os correspondentes níveis sigma onde foram calculados os resultados do modelo para comparação com os dados de campo.

	PROFUNDIDADE MÉDIA DA COLUNA D'ÁGUA ( $\bar{H}$ )			PROF. DE COLETA DOS DADOS DE CORRENTOMETRIA			PROF. CÁLCULO VELOC. MODELO	
	Campo (m)	Modelo (m)	$\Delta\bar{H}$ (m)	Campo (m)	Equip. Empregado	% $\bar{H}$	Níveis Abaixo da Superfície	Prof. Modelo (m)
<b>S08</b> (Canal de Salvador)	40,0	39,6	-0,4	dados coletados ao longo de toda coluna d'água	ADCP	x x x	x x x	x x x
<b>S03</b> (Aratu)	29,6	30,8	1,2	8,7	S4	29%	6	9,2
				24,2	RCM-7	82%	16	24,6
<b>S15</b> (N Ilha do Frade)	24,3	24,4	0,1	5,9	S4	24%	5	6,1
				19,8	RCM-7	82%	16	19,5
<b>S07</b> (Canal de Itaparica)	24,3	25,0	0,7	10,4	RCM-7	43%	9	11,2
				20,0	RCM-7	82%	16	20,0

De acordo com o apresentado por Rosman *et al.* (2008),

O primeiro e mais fundamental passo de “calibração” é checar se as escalas características dos fenômenos de interesse e as escalas de discretização do modelo são compatíveis. [...]

Um modelo tem escalas de discretização compatíveis com um fenômeno de interesse quando o modelo pode resolver o fenômeno. Nesse sentido, deve-se lembrar que, se um determinado fenômeno de interesse tem escalas espaciais e temporais características dadas por  $\Delta s$  e  $\Delta t$ , para se resolver tal fenômeno, as escalas de discretização do modelo devem ser pelo menos 4 vezes menor<sup>19</sup>, i.e.  $\Delta s/4$  e  $\Delta t/4$ . Na verdade, para resolver bem tal fenômeno, e de fato ser passível de confrontação com dados medidos, o modelo deve ter uma malha ou grade com espaçamento entre os nós menor que  $\Delta s/8$ , e deve usar passos de tempo inferiores a  $\Delta t/8$ .

Uma vez que os dados de maré prescritos como forçantes do modelo, são fornecidos a cada 10 minutos, e os dados de vento a cada 15 minutos, não se deve esperar que o modelo represente com precisão fenômenos com período inferior a aproximadamente 2 horas.

Em algumas estações, os dados de corrente foram medidos a cada 5 minutos, e em outras, a cada 15 minutos. Evidentemente, em tais dados estão incluídos fenômenos com escalas temporais inferiores a 2 horas. Essa é a principal razão pela qual os resultados do modelo aparentam ser menos dispersos, ou mais “bem comportados”, quando comparados aos dados brutos medidos. Os gráficos de dispersão ilustram bem esse efeito.

Diante dessas considerações e seguindo procedimento semelhante ao aplicado anteriormente na calibração e validação realizada no ano de 2000 (Rosman *et al.* 1999, 2000), nos gráficos das séries temporais, os dados de campo foram promediados por uma hora. A promediação foi realizada por meio de um procedimento de média móvel centrada, de forma a eliminar oscilações de alta frequência que dificultariam a comparação com os resultados do modelo.

Nos gráficos de dispersão os dados medidos não foram promediados, i.e., estão plotados todos os dados originais. Assim sendo, dados medidos contêm fenômenos com escalas incompatíveis com as escalas de discretização do modelo. Desta forma, deve-se esperar

---

<sup>19</sup> As escalas teóricas de Nyquist  $\Delta s/2$  e  $\Delta t/2$  não são aplicáveis em termos práticos de modelagem.

que os dados medidos apresentem uma característica mais dispersa do que os resultados do modelo.

De forma semelhante ao realizado anteriormente na comparação de alturas da onda de maré (cf. subitem 7.1.1.1), além da avaliação dos resultados por meio da comparação de registros gráficos, buscou-se também uma avaliação matemática que quantificasse numericamente as coerências entre medições de campo e resultados calculados pelo modelo. Dessa forma, foi calculada, para cada estação e para cada profundidade de aquisição de dados, uma diferença relativa percentual média entre magnitudes máximas de correntes medidas no campo e magnitudes máximas de correntes calculadas pelo modelo. A operação foi realizada nas componentes  $u$  e  $v$ .

A diferença relativa percentual média nas componentes ( $\overline{drp}_u$  e  $\overline{drp}_v$ ) foi calculada por meio da média aritmética das diferenças relativas percentuais ( $drp_n^u$  e  $drp_n^v$ ) observadas entre magnitudes máximas de correntes medidas ( $u_{med}$  e  $v_{med}$ ) e calculadas pelo modelo ( $u_{mod}$  e  $v_{mod}$ ) para cada ciclo completo de corrente. Ou seja:

$$drp_n^u = \frac{|u_{med} - u_{mod}|}{O_g} \cdot 100\% \quad \text{e} \quad drp_n^v = \frac{|v_{med} - v_{mod}|}{O_g} \cdot 100\% \quad (12)$$

$$\overline{drp}_u = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N drp_n^u \quad \text{e} \quad \overline{drp}_v = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N drp_n^v$$

$$drp = \sqrt{(\overline{drp}_u)^2 + (\overline{drp}_v)^2} \quad (13)$$

onde:  $drp_n^u$  e  $drp_n^v$  = Diferença relativa percentual entre magnitudes máximas de correntes  $u$  (ou  $v$ ) medidas e calculadas pelo modelo no  $n$ -ésimo ciclo completo de correntes (%)

$u_{med}$  e  $v_{med}$  = Magnitudes máximas das correntes medidas em campo no  $n$ -ésimo ciclo de corrente nas direções  $u$  e  $v$

$u_{mod}$  e  $v_{mod}$  = Magnitudes máximas das correntes calculadas pelo modelo no  $n$ -ésimo ciclo de corrente nas direções  $u$  e  $v$

$O_g$  = Ordem de grandeza das magnitudes máximas das correntes observadas em cada estação e em cada nível considerado (cf. comentário abaixo)

$N$  = Número total de ciclos completos de correntes dos dados medidos em campo ou calculados pelo modelo

$$\overline{drp_u} \text{ e } \overline{drp_v} = \text{Média aritmética de todas as } N \text{ } drp_n^u \text{ (ou } N \text{ } drp_n^v \text{ ) observadas (\%)} \\ drp = \text{Soma vetorial de } \overline{drp_u} \text{ e } \overline{drp_v} \text{ (\%)}$$

A ordem de grandeza ( $O_g$ ) das magnitudes máximas das correntes observadas foi definida separadamente para cada estação e para cada nível de aquisição de dados. O critério adotado para cálculo dessa ordem de grandeza foi a média aritmética das magnitudes máximas observadas em na época de sizígia. No caso dos dados de verão, foi considerado época de sizígia o período compreendido entre 17/jan/1999 0h e 22/jan/1999 0h.

Os gráficos das Figuras 33 a 53 que se seguem apresentam as comparações entre séries temporais de velocidade (medidas em campo e calculadas pelo modelo) e diagramas de dispersão de correntes. Os valores calculados das diferenças relativas percentuais médias e comentários adicionais dos resultados obtidos são apresentados logo abaixo dos diagramas de dispersão e nas legendas das próprias figuras.

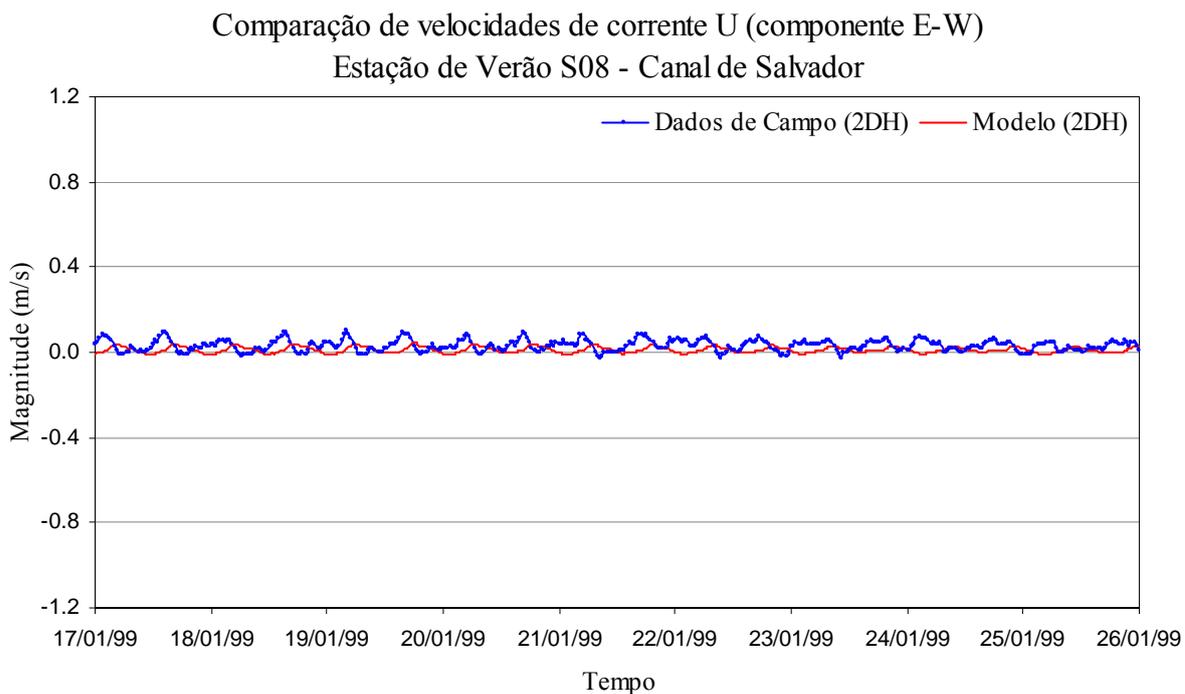


Figura 33 – Componente E-W da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S08. A comparação dos registros não sugere nenhum tipo de correlação entre ambos. Diante da pequena intensidade dessa componente, pode-se associar esse fato a efeitos de vento local não fornecido ao modelo e às aproximações realizadas na prescrição das condições de contorno da fronteira aberta, tais como uso de maré sintética prevista (isenta de qualquer efeito meteorológico) e uso do mesmo NMM para todos os pontos da fronteira aberta.

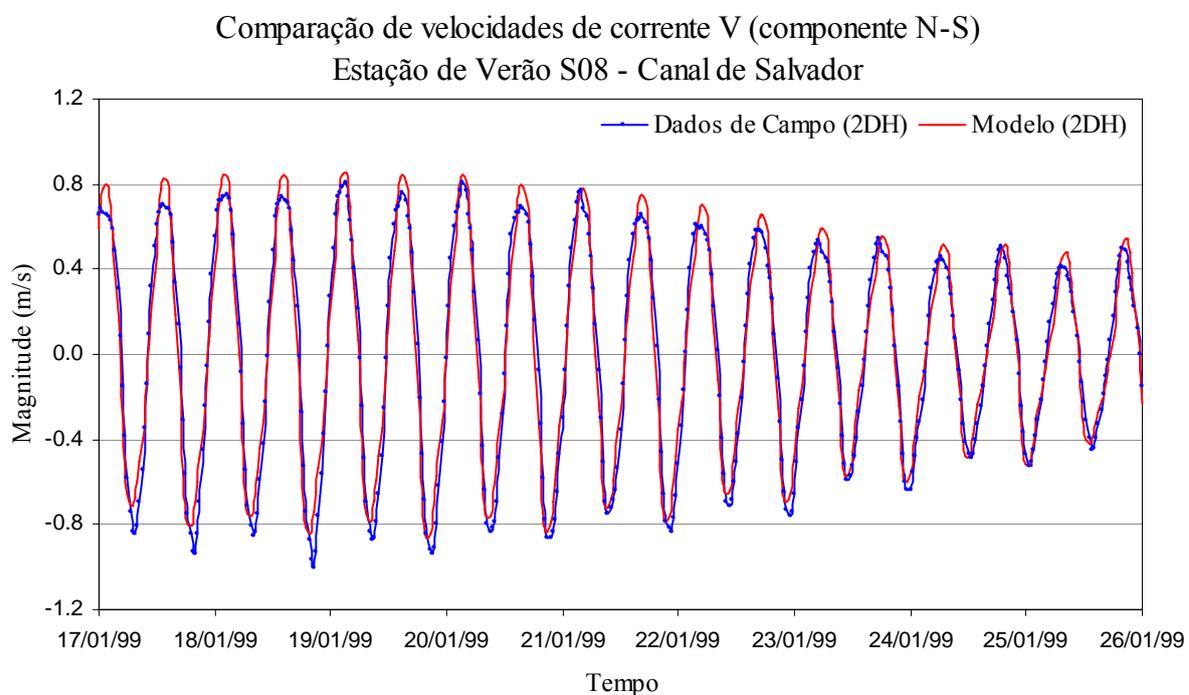


Figura 34 – Componente N-S da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S08. Os registros apresentam boa concordância. Pode-se notar que as velocidades de correntes de vazante medidas em campo são sensivelmente maiores do que os resultados do modelo ao contrário das velocidades de correntes de enchente.

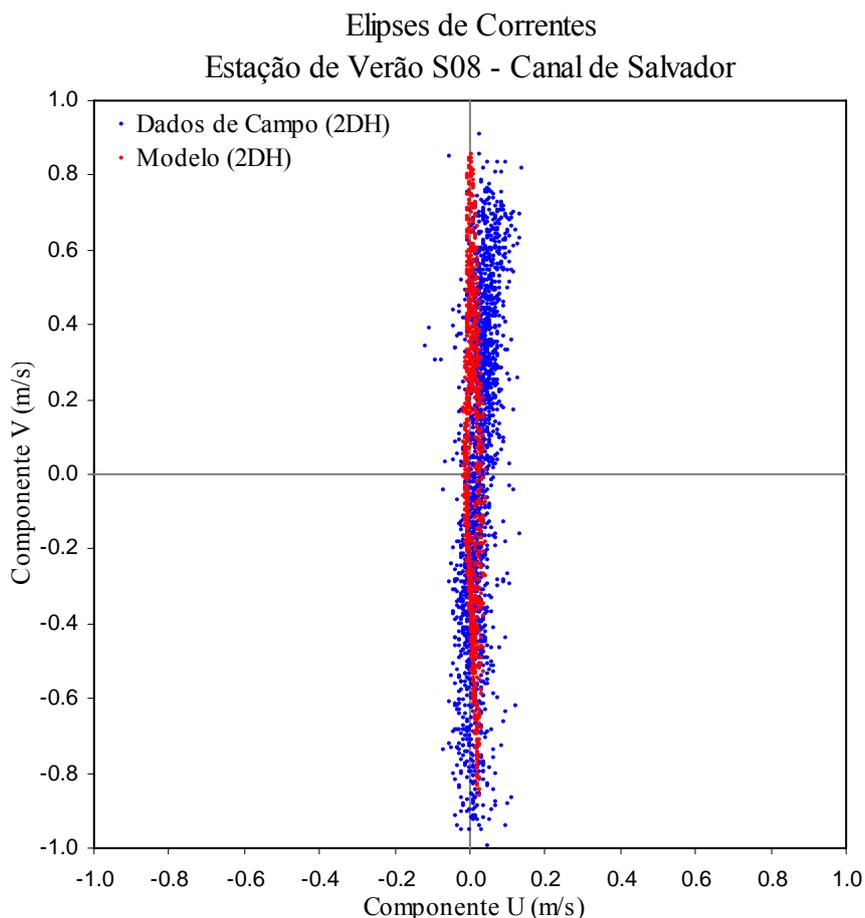


Figura 35 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes 2DH medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S08.

Pela análise dos gráficos acima, referentes à estação S08, pode-se notar que nessa estação, localizada na região central do Canal de Salvador, a corrente é predominantemente orientada na direção N-S. Essa constatação está de acordo com o esperado, uma vez que a tendência é que as correntes sigam o sentido axial do canal. Esse efeito foi bem capturado pelo modelo.

As diferenças entre os dados de campo e do modelo observadas na direção  $u$  não têm relevância significativa na magnitude das correntes devido à pequena contribuição dessa componente quando comparadas com as magnitudes das correntes na direção dominante do escoamento. A diferença relativa percentual média entre os dados de campo e do modelo nessa estação é da ordem de 7.5%, valor considerado muito bom.

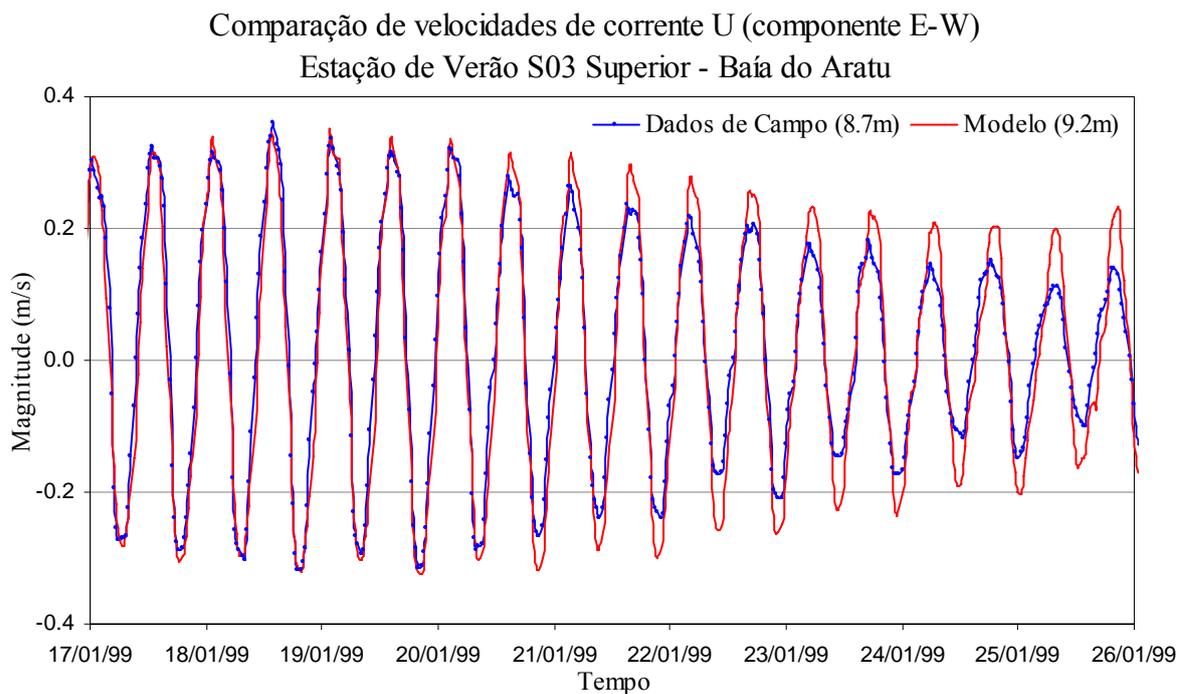


Figura 36 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 superior. A comparação dos registros apresenta concordância muito boa nas correntes de sizígia. Durante a quadratura, na fase final da série, ocorre uma superestimativa nos resultados do modelo, degradando a concordância dos registros. Ambas as séries apresentam velocidades de enchente maiores do que as velocidades de vazante.

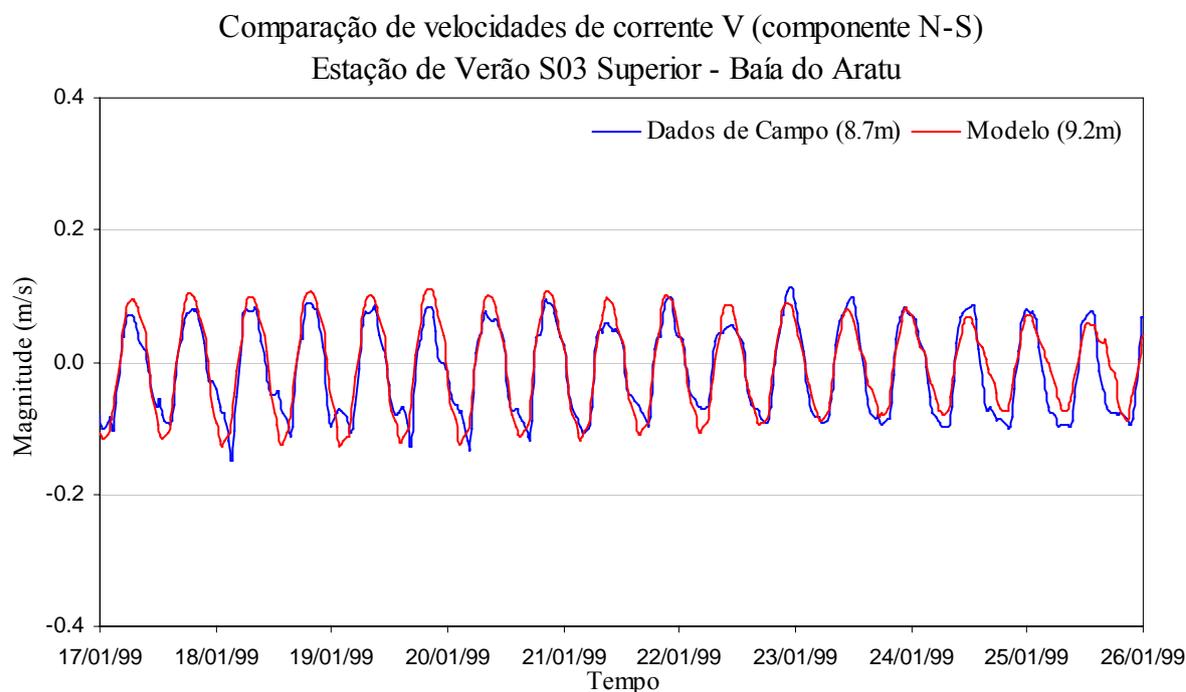


Figura 37 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 superior. Os registros apresentam boa concordância.

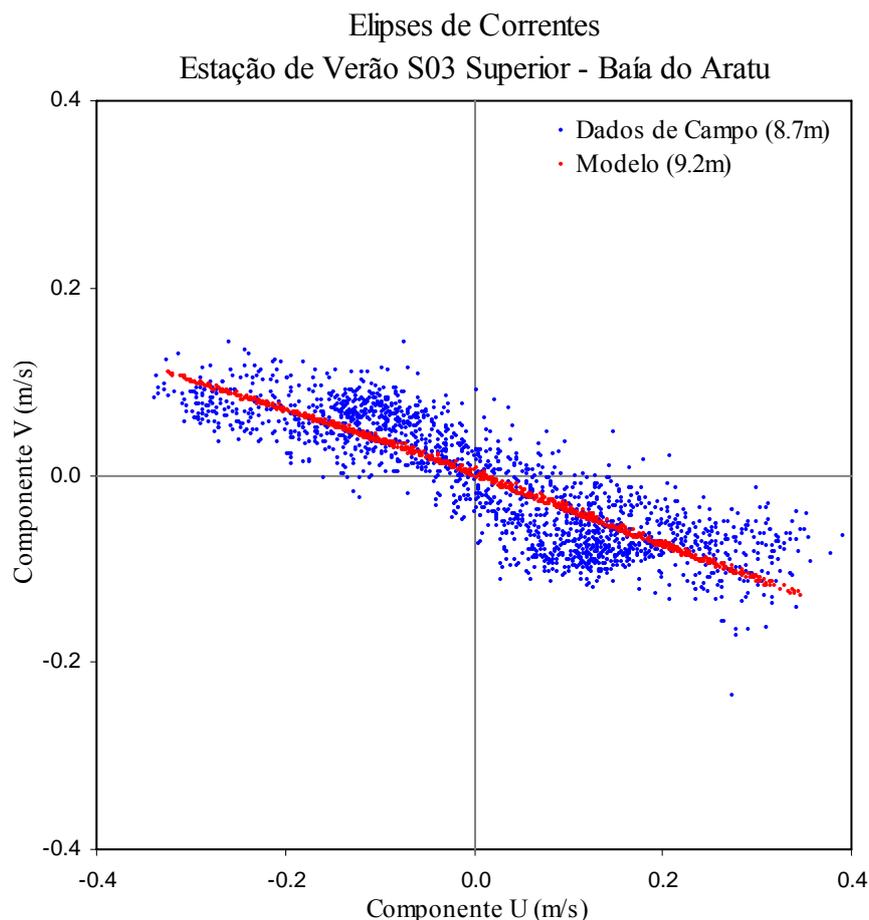


Figura 38 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S03 superior. A direção dominante e magnitude das correntes calculadas pelo modelo se ajustam bem as dados de campo medidos, apesar da dispersão maior.

De maneira geral, as comparações entre velocidades medidas e calculadas pelo modelo apresentaram boa coerência na estação S03 superior. Pode-se atribuir como causa provável das discrepâncias observadas, o forte gradiente de batimetria existente nessa região, difícil de ser capturado pelo modelo, a menos que use uma malha mais refinada para região em torno dessa estação, a fim de contemplar o relevo complexo do fundo. Considerando que as diferenças relativamente pequenas entre os dados de campo e resultados do modelo não comprometem a segurança à navegação, não se justifica um refinamento maior da região.

A diferença relativa percentual média entre os dados de campo e do modelo nessa estação é da ordem de 13,0 %, valor considerado bom.

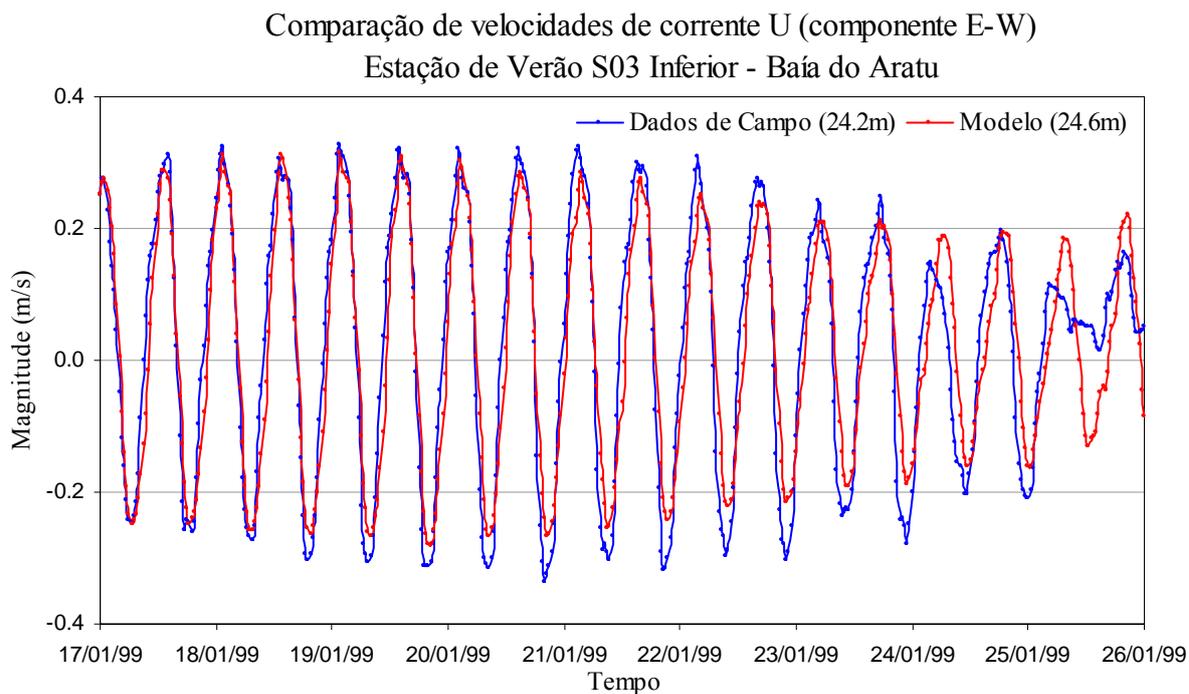


Figura 39 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 inferior. Percebe-se uma boa coerência entre os dados com uma subestimativa das magnitudes nos dados calculados do modelo. A partir do dia 25/01/1999, ocorre um comportamento muito incomum nos dados medidos, fato que acarreta suspeita de mau funcionamento do correntógrafo ocorrido durante o final do período de medição.

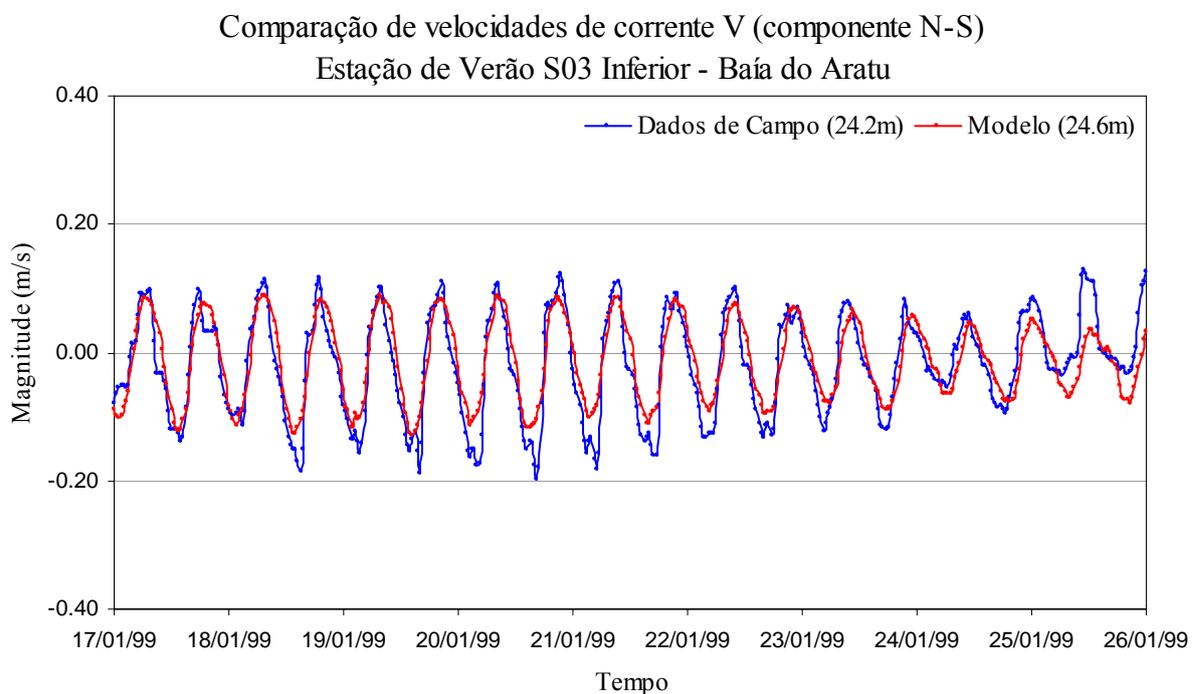


Figura 40 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S03 inferior. Os registros apresentam concordância satisfatória apesar da maior dispersão dos dados de campo. Observa-se também, nessa componente, suspeita de mau funcionamento do correntógrafo ocorrido durante o final do período de medição.

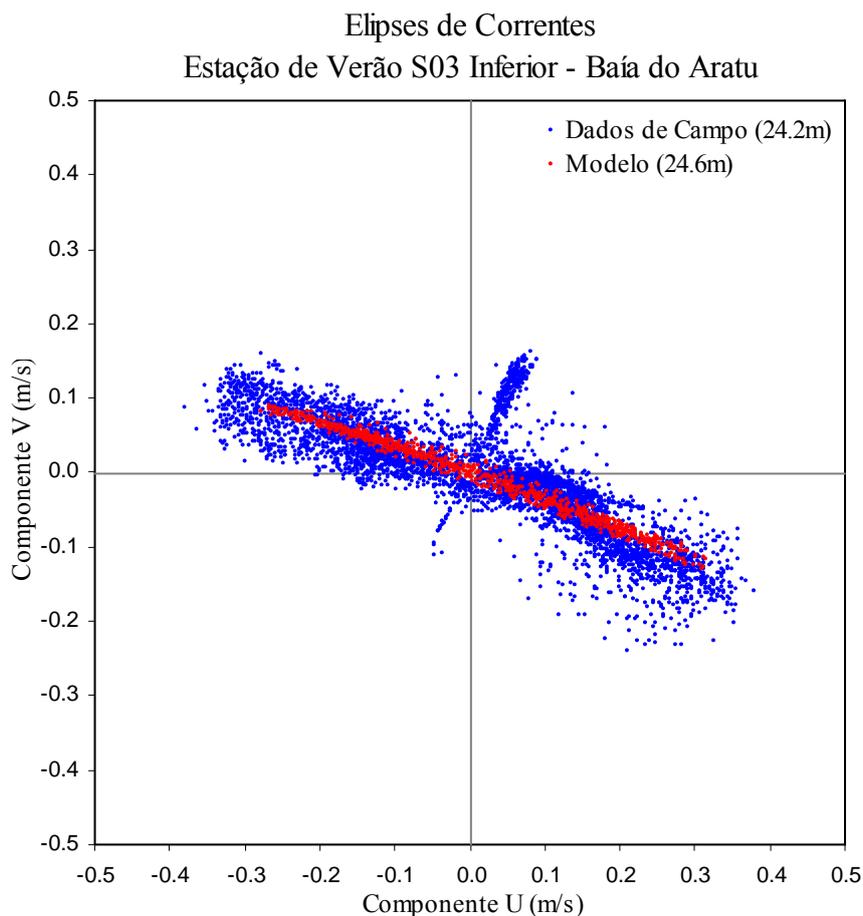


Figura 41 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S03 inferior. A direção dominante e magnitude das correntes do modelo se ajustam bem as dados de campo medidos. Destaca-se, nos dados de campo, a observação de correntes na direção ortogonal à direção dominante do escoamento, as quais podem estar associadas ao mau funcionamento do correntógrafo apontado nas legendas das Figuras 39 e 40.

Pode-se perceber que o resultado das comparações entre velocidades medidas e calculadas na estação S03 inferior está coerente com o resultado das comparações realizadas na estação S03 superior. Como causas prováveis das discrepâncias observadas na estação S03 inferior podem ser apontadas as mesmas considerações atinentes à S03 superior relativas ao acentuado gradiente de batimetria existente nessa região.

Tendo em vista as evidências de mau funcionamento do correntógrafo ocorrida durante a fase final de coleta dos dados nessa estação, o cálculo da diferença relativa percentual média entre velocidades de correntes medidas e calculadas pelo modelo foi realizado com dados coletados somente até às 10h30min do dia 25/jan/1999. A diferença relativa percentual média calculada nessa estação é da ordem de 12,8 %, valor considerado bom.

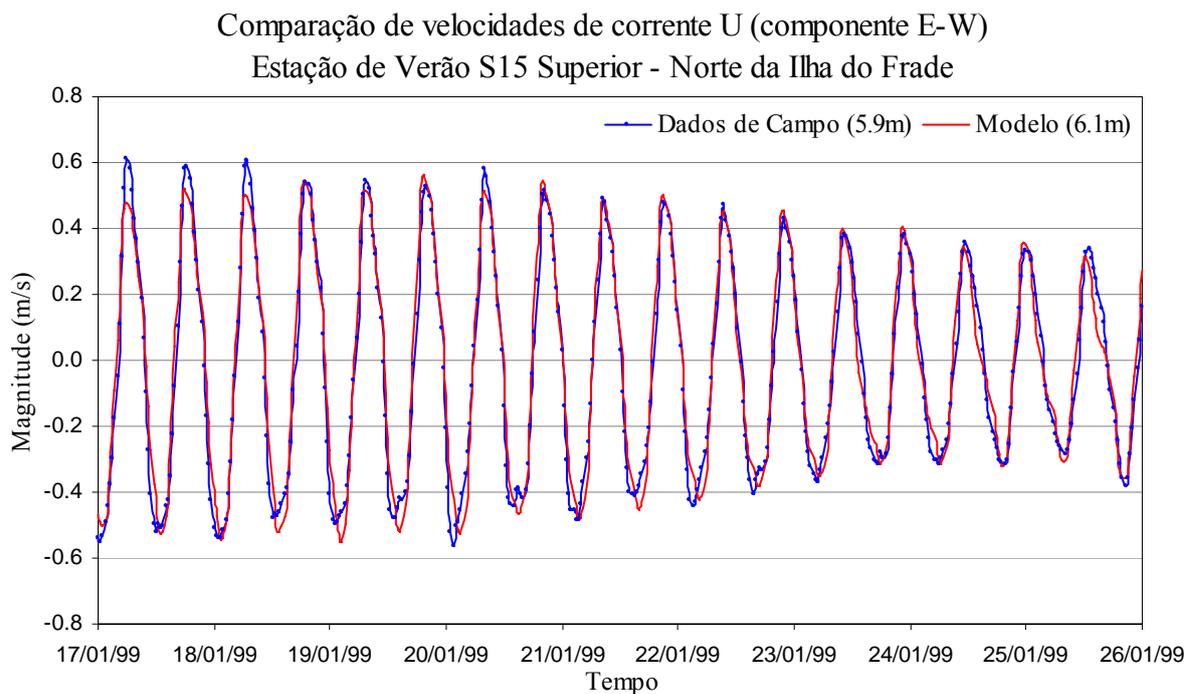


Figura 42 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 superior. Os resultados do modelo concordam muito bem com os dados de campo.

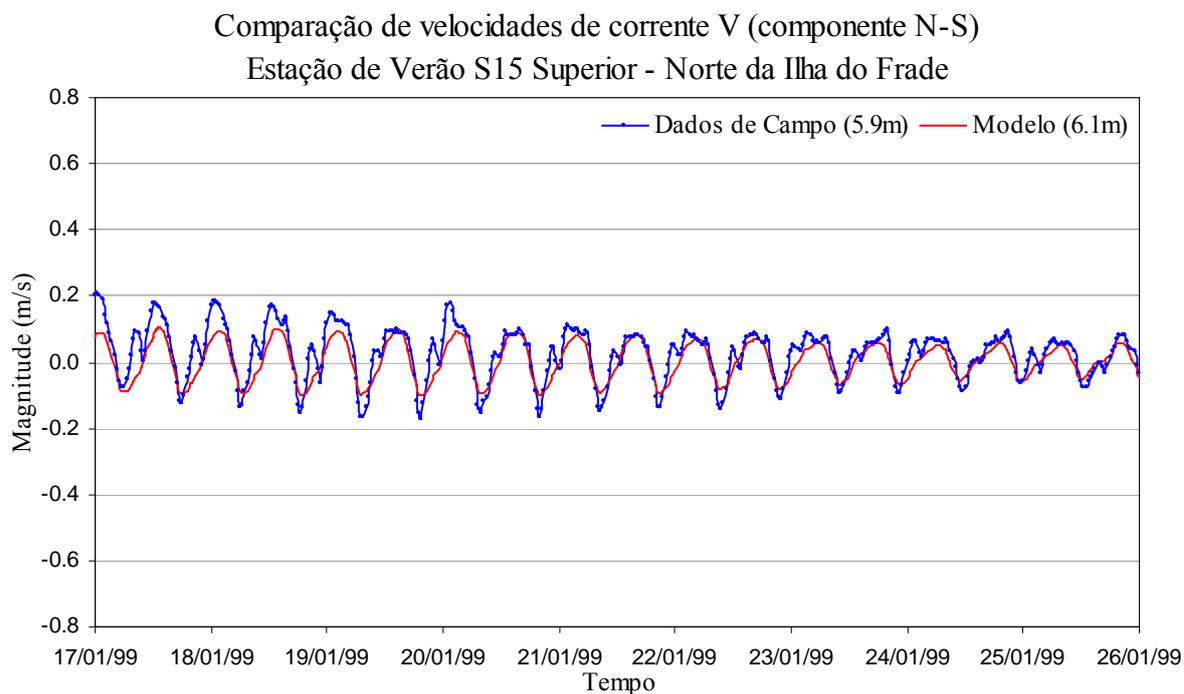


Figura 43 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 superior. Os registros apresentam boa concordância com pequena subestimativa das magnitudes nos dados calculados do modelo.

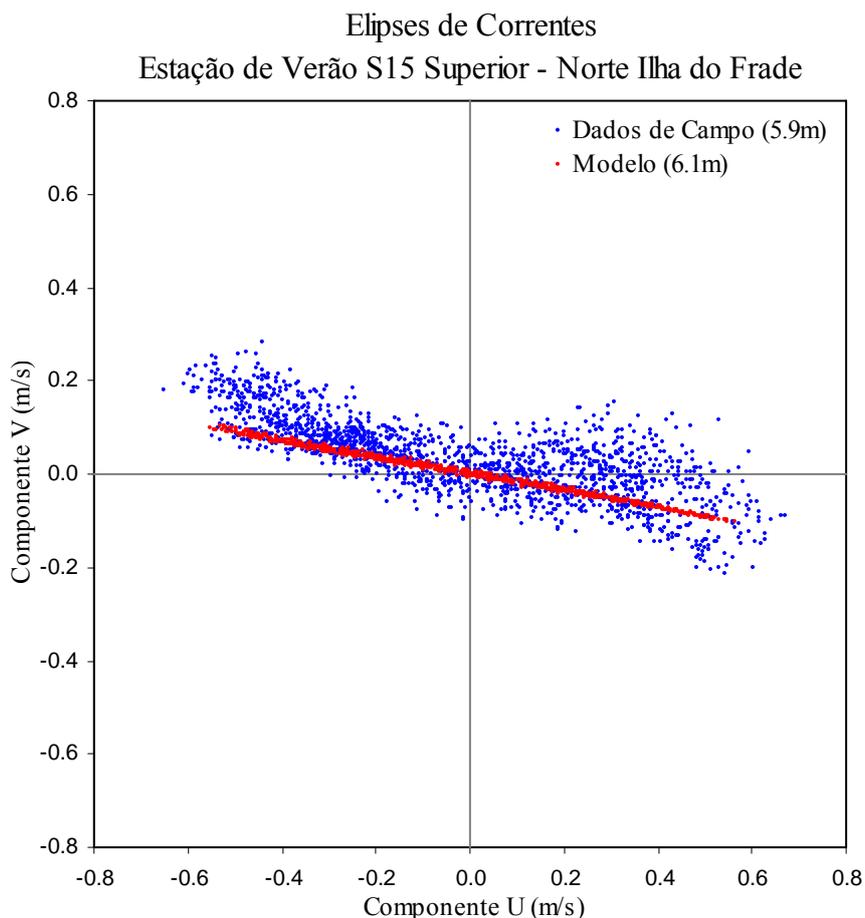


Figura 44 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S15 superior. Pode-se notar a predominância da direção E-W seguindo o sentido axial do trecho final do canal de acesso ao Temadre (cf. Figura 23, pág. 71).

Considerando a complexidade da topografia do fundo e da geometria da linha de costa na região ao redor da estação S15, pode-se considerar que os resultados do modelo apresentaram uma concordância muito boa com os dados medidos em campo na estação S15 superior.

A diferença relativa percentual média calculada nessa estação é da ordem de 14,5 %, valor considerado aceitável.

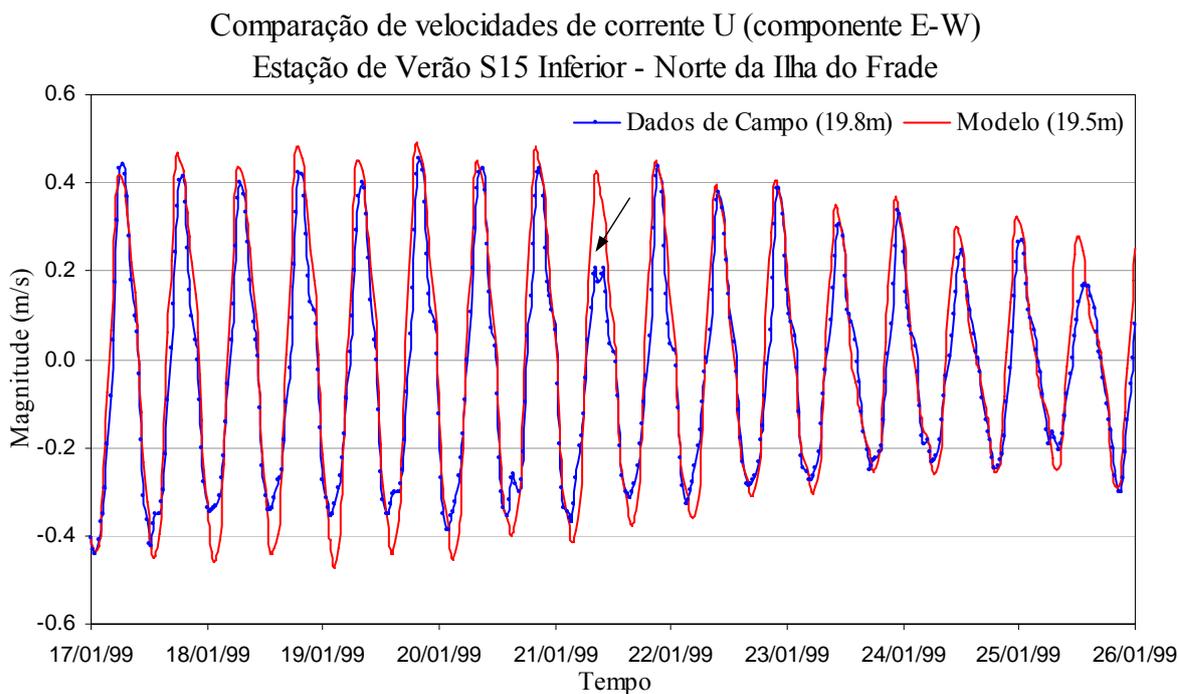


Figura 45 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 inferior. Os registros apresentam boa concordância, com superestimativa das intensidades das correntes obtidas pelo modelo na época da sizígia (início da série). Entre os dias 21 e 22/jan/1999, observa-se um comportamento incomum na magnitude máxima da corrente medida no sentido leste (indicado pela seta no gráfico), fato que indica suspeita de mau funcionamento do correntôgrafo ocorrida nesse instante.

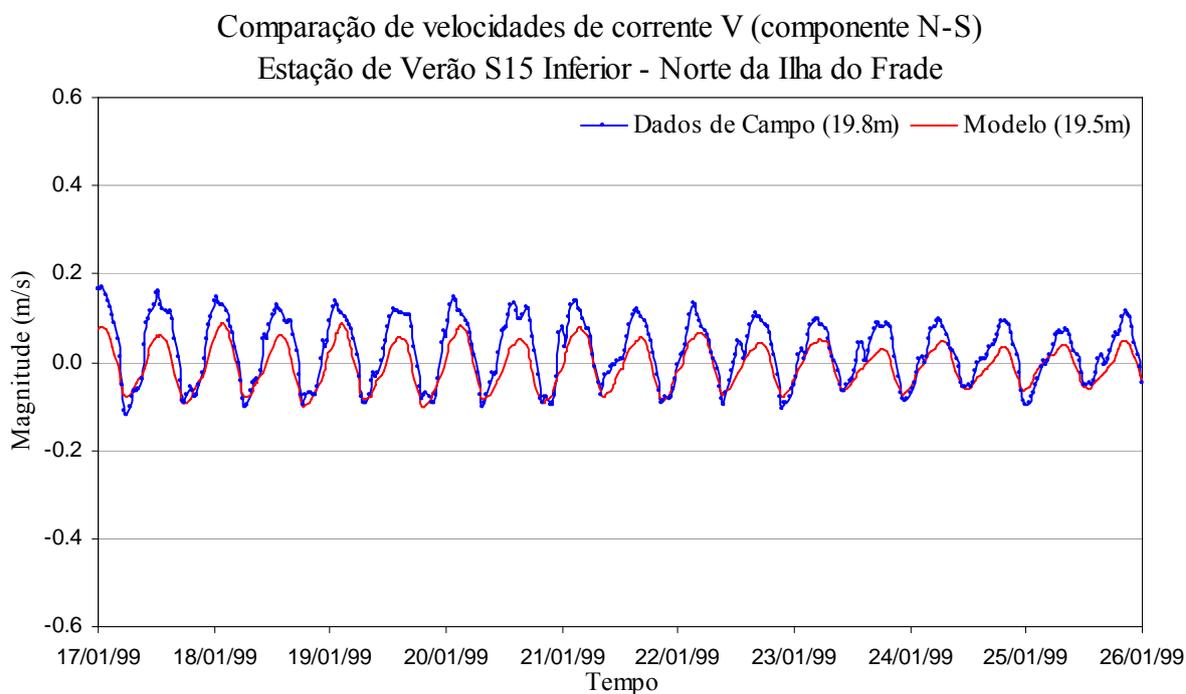


Figura 46 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S15 inferior. Os registros apresentam concordância satisfatória com subestimativa da intensidade das correntes obtidas pelo modelo, sobretudo nas correntes de sentido norte.

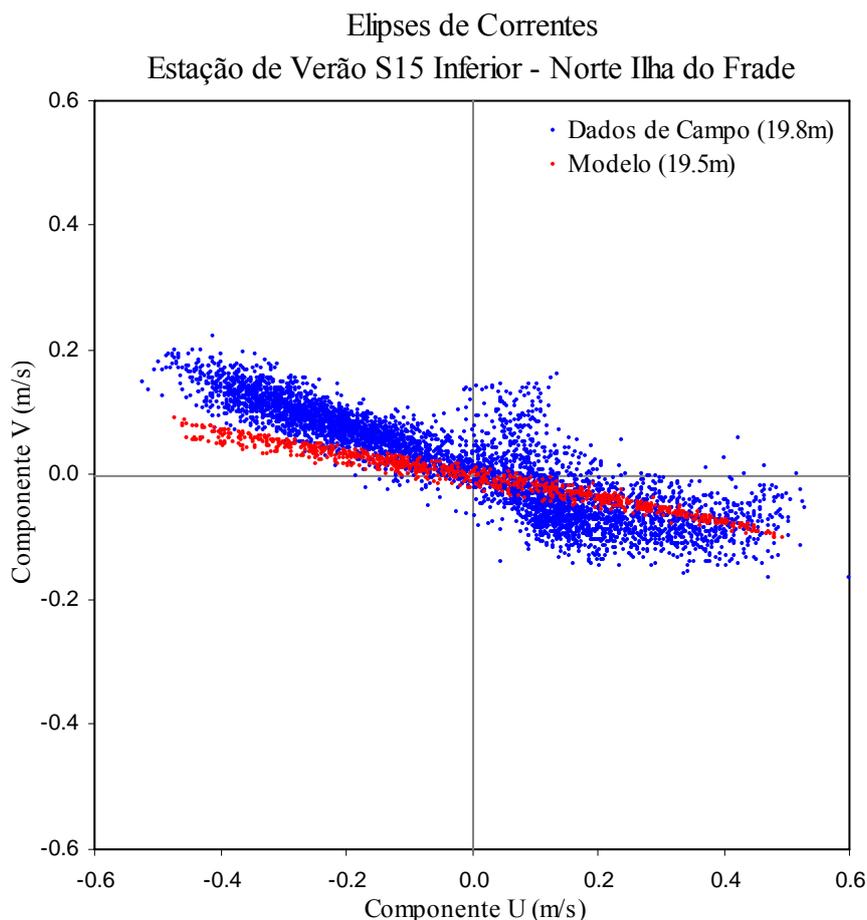


Figura 47 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S15 inferior. As magnitudes das correntes calculadas pelo modelo se ajustam bem as dados de campo medidos. A direção dominante das correntes calculadas pelo modelo sofre um pequeno desvio, na ordem de  $10^\circ$ .

De maneira geral, as comparações entre velocidades medidas e calculadas pelo modelo apresentaram boa coerência na estação S15 inferior. Pode-se atribuir como causa provável das discrepâncias observadas a complexidade da topografia do fundo e da geometria da linha de costa existente nessa região.

A diferença relativa percentual média calculada nessa estação é da ordem de 17.8 %, valor considerado aceitável.

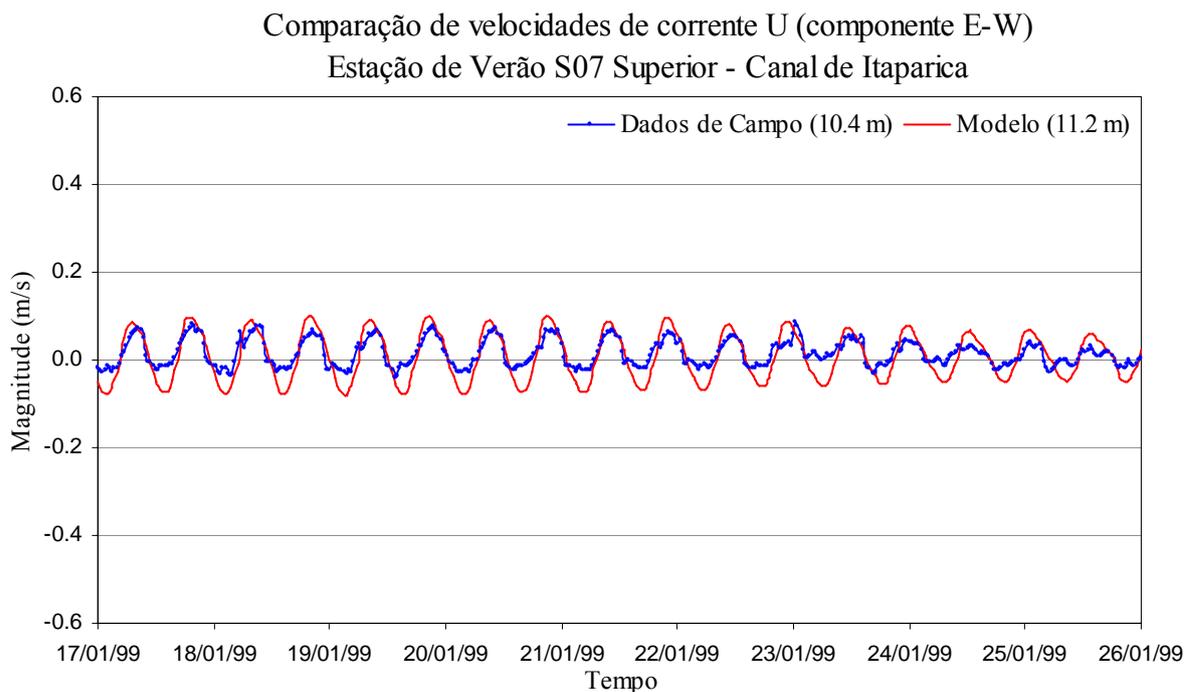


Figura 48 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 superior. Nota-se uma pequena superestimativa na intensidade das correntes calculadas pelo modelo.

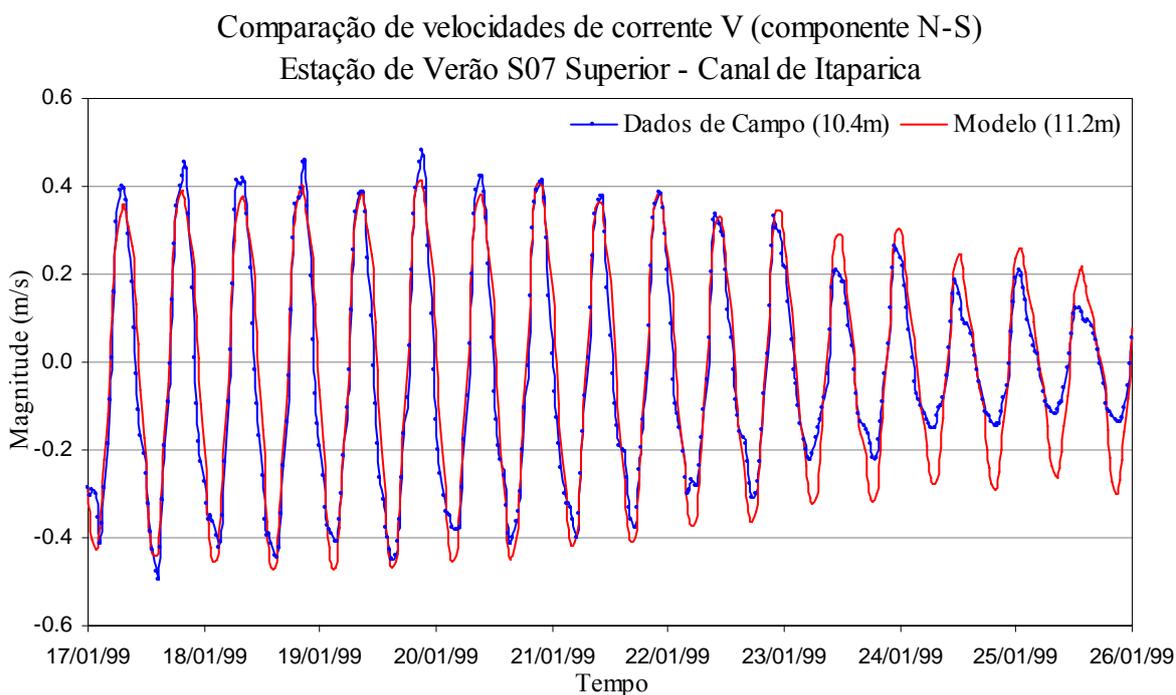


Figura 49 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 superior. Os registros apresentam concordância satisfatória, exceto na época da quadratura (final da série), quando ocorre uma superestimativa na intensidade das correntes  $v$  calculadas pelo modelo.

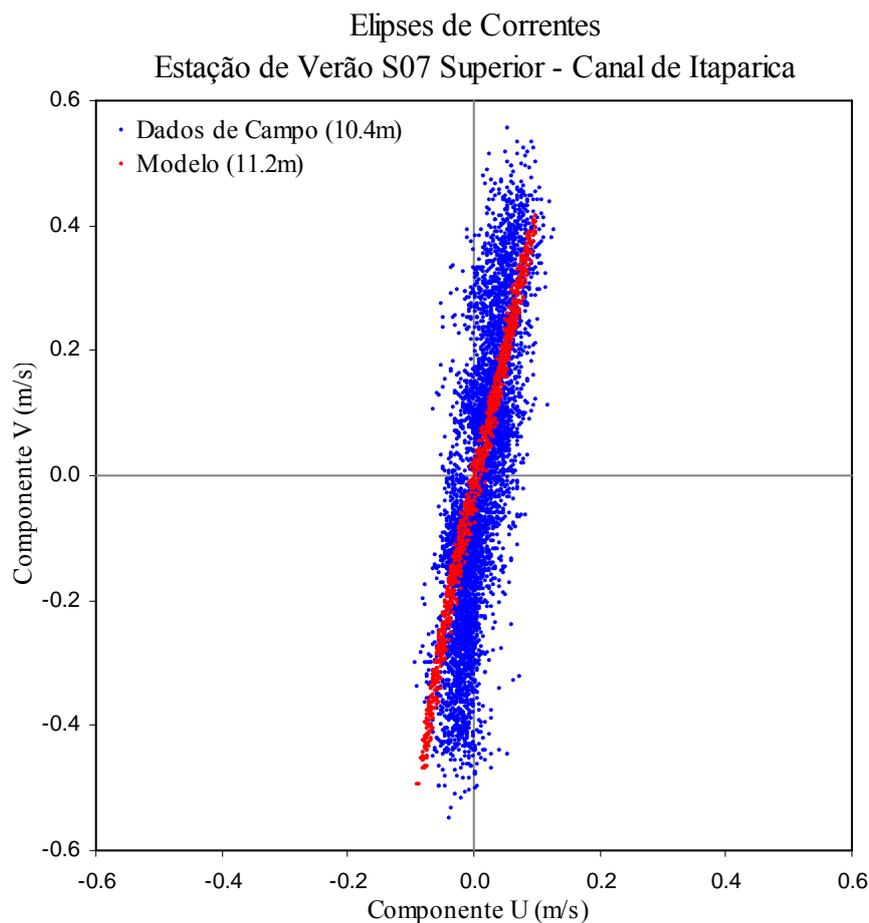


Figura 50 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S07 superior. A direção dominante e magnitude das correntes calculadas pelo modelo se ajustam bem aos dados de campo medidos, apesar de um leve desvio na direção dominante. Destaca-se a forte predominância da direção N-S das correntes, seguindo o sentido axial do Canal de Itaparica (cf.Figura 23, pág. 71). Esse efeito foi bem representado pelo modelo.

Tal como já ocorrido na estação S03 (Figuras 36, 39 e 40), localizada na Baía do Aratu, observa-se, também na estação S07 superior, diferenças mais acentuadas entre resultados do modelo e dados medidos apenas durante a fase final dos registros (cf. Figura 49). Um forte argumento usado para explicar esse fato é o funcionamento inadequado de alguns correntógrafos ao final dos períodos de monitoramento, causado pela ação de incrustações. Vale ressaltar que a atividade biológica no interior da BTS é intensa, motivada pelas condições ambientais favoráveis.

A despeito dessas discrepâncias, a diferença relativa percentual média calculada na estação S07 superior é da ordem de 14,4 %, valor considerado satisfatório.

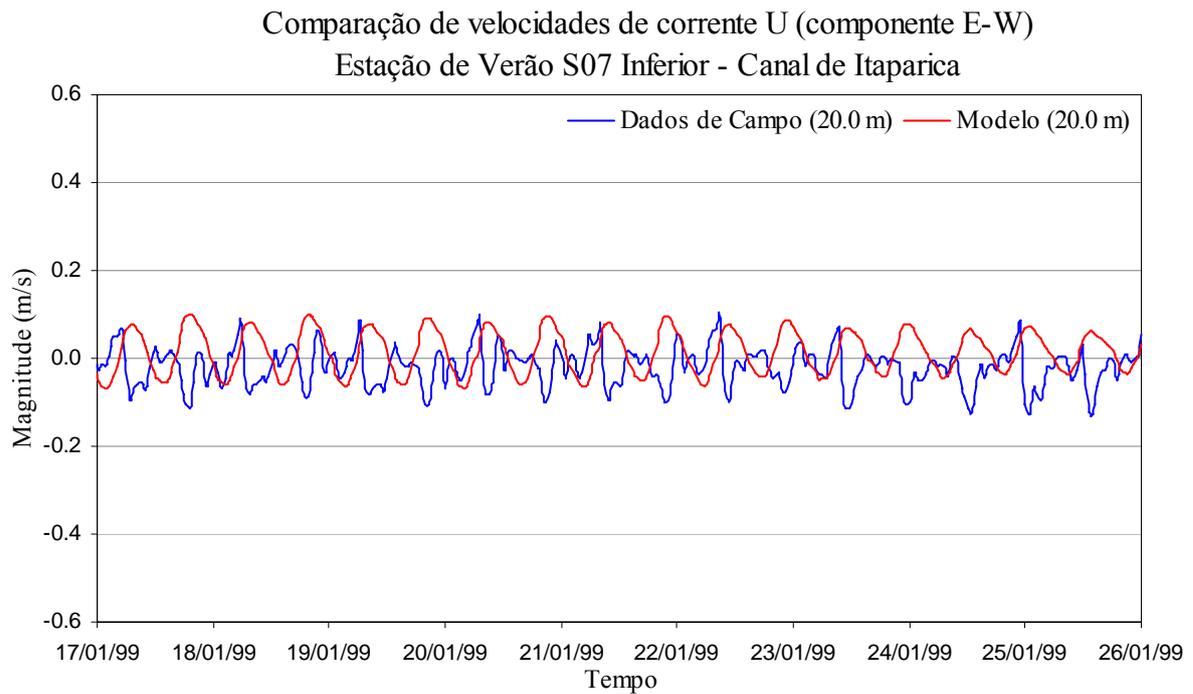


Figura 51 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 inferior. Por meio da análise gráfica, não se pode estabelecer nenhum tipo de correlação entre ambos os registros. Os dados de campo apresentam comportamento assimétrico e sem periodicidade característica, ao contrário dos resultados do modelo.

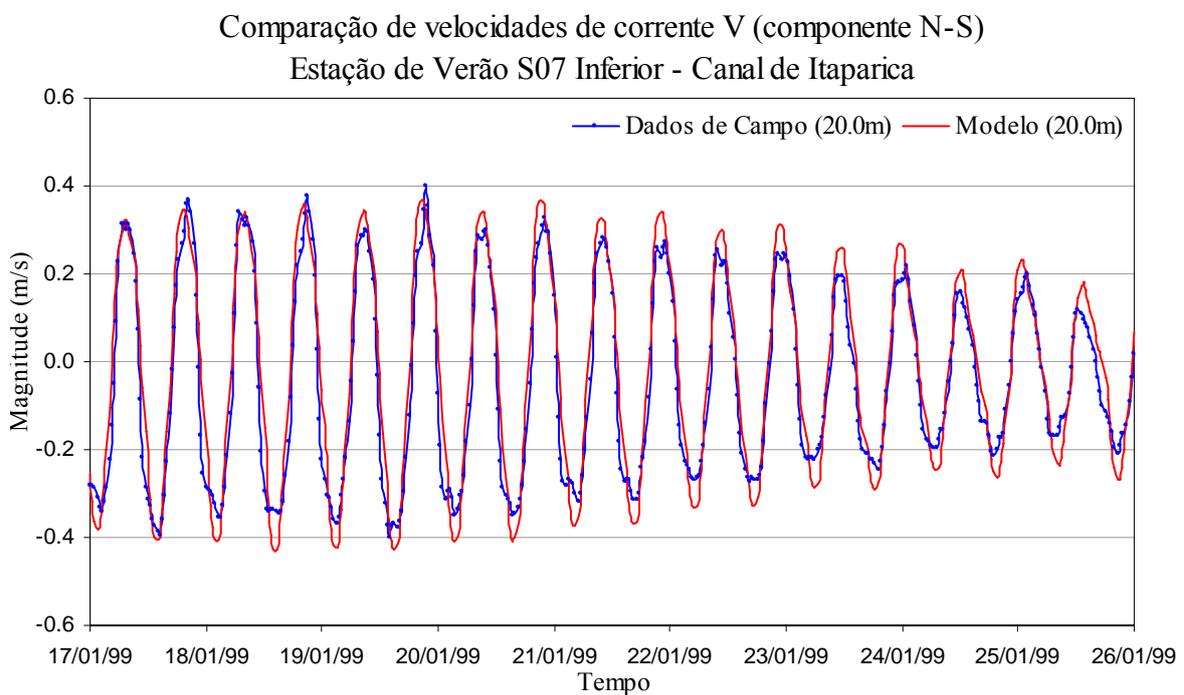


Figura 52 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação S07 inferior. Os registros apresentam boa coerência com pequena superestimativa das intensidades das correntes nos resultados do modelo.

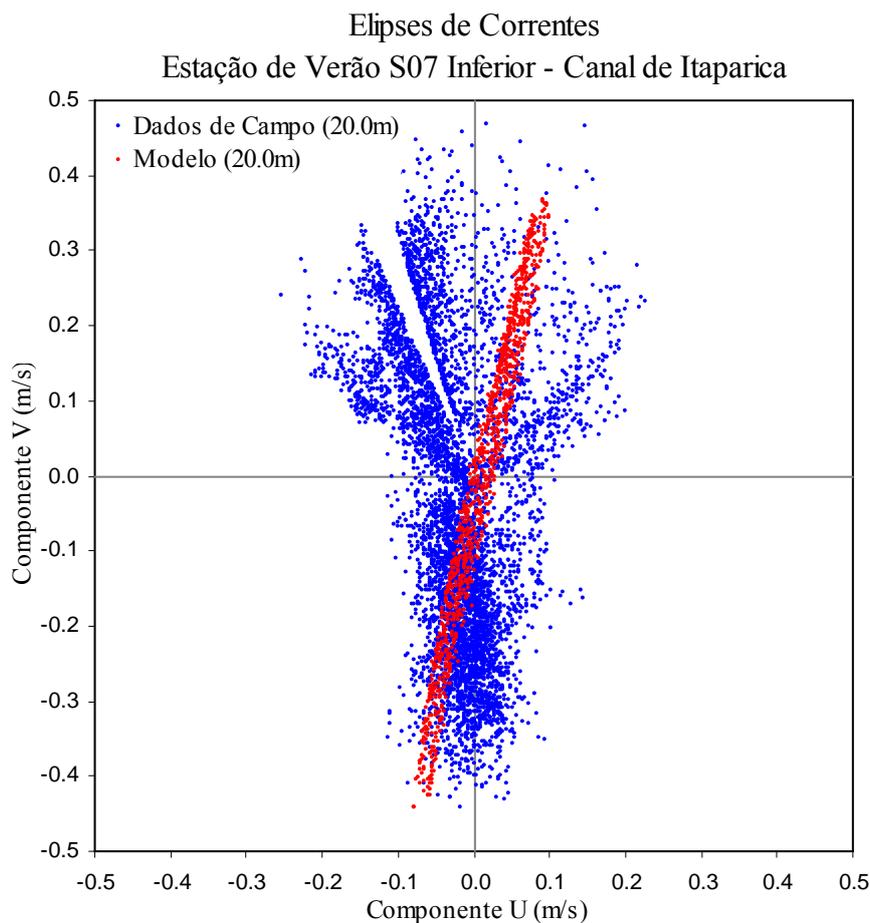


Figura 53 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação S07 inferior. A nuvem de pontos dos dados medidos em campo apresenta comportamento duvidoso. A existência de setores totalmente sem informação, conforme pode ser observado no quadrante NW, indica certamente a ocorrência de falha no equipamento de medição.

Tendo em vista as evidências de mau funcionamento do correntógrafo, ocorrida durante a coleta dos dados na estação S07 inferior, as diferenças entre medições e resultados do modelo encontradas na componente  $u$  não foram consideradas para efeito de cálculo da diferença relativa percentual média entre as correntes. O valor da diferença em  $u$  da estação S07 inferior foi estimado com base nas diferenças observadas em  $u$  na estação S07 superior.

Dessa forma, a diferença relativa percentual média calculada na estação S07 inferior foi da ordem de 14,2 %, valor considerado satisfatório.

### 7.1.3 Síntese da calibração

Foram utilizados sete registros de dados de correntometria para servirem como referência de comparação das velocidades de correntes obtidas pelo modelo na fase de calibração. Desses sete registros, três apresentaram discordâncias maiores no final da série (S03 sup., S03 inf. e S07 sup.) e um (S07 inf.) apresentou evidências claras de mau funcionamento durante todo o período de monitoramento.

A Tabela 13 e Tabela 14 que se seguem apresentam um resumo dos valores calculados, por meio das expressões (11) e (13), para as diferenças relativas percentuais médias entre dados medidos e calculados pelo modelo.

Tabela 13 – Diferenças relativas percentuais médias entre alturas da onda de maré dos dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de calibração

ESTAÇÕES	DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL
S19 (Mar Grande)	5,1%
S20 (NW da BTS)	4,5%

Ambas as estações onde foram realizadas de comparação entre dados de altura da onda de maré apresentaram resultados muito bons, com concordâncias na ordem de 95%.

Tabela 14 – Diferenças relativas percentuais médias entre velocidades máximas de dados de correntes medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de calibração

ESTAÇÕES	DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL		
	PROFUNDIDADES ESPECÍFICAS		2DH <sup>1</sup>
	Est. Superior	Est. Inferior	
S08 (Canal de Salvador)	x x x		7.5%
S03 (Aratu)	13,0%	12,8%	10,4 %
S15 (N Ilha do Frade)	14,5%	17.8%	13,4 %
S07 (Canal de Itaparica)	14,4%	14,2%	12,0 %

<sup>1</sup>Para calcular a velocidade 2DH dos dados de campo das estações S03, S15 e S07, as quais tiveram medições realizadas apenas em dois níveis discretos da coluna d'água, foi assumido um perfil vertical de velocidades de formato logaritmo passando pelas duas medições e pela velocidade nula no fundo. Em seguida, foi realizada a média das velocidades ao longo de toda coluna d'água.

As quatro estações onde foram realizadas comparações entre dados de correntes máximas apresentaram resultados satisfatórios, com concordâncias na ordem de 85% para correntes em níveis específicos, e na ordem de 89% para correntes promediadas na

vertical. Como resultado satisfatório entende-se resultado que apresente concordância superior a 80% (ou diferença relativa percentual média inferior a 20%).

A coerência entre medições de campo e resultados do modelo depende diretamente da qualidade dos dados básicos de entrada fornecidos ao modelo, assim como forçantes e condições de contorno. Vale ressaltar mais uma vez que, no presente estudo, optou-se por fornecer dados de maré prevista na prescrição das condições de contorno da fronteira aberta (cf. subitem 6.5) e dados de vento variáveis no tempo e uniformes no espaço para toda região do domínio de modelagem (cf. subitem 6.6).

Outro fator que certamente muito contribuiu para as diferenças entre medições de campo e resultados do modelo é a complexidade da topografia do fundo e geometria da linha de costa nas regiões ao redor dos pontos de comparação. No caso das estações correntométricas, todas são localizadas nas proximidades de canais naturais ou canais dragados - regiões caracterizadas por fortes gradientes de batimetria. Exemplo típico pode ser encontrado nos arredores da estação S15, localizada ao norte da Ilha do Frade, nas proximidades do Temadre - região onde a isobatimétrica de 5 m se aproxima muito da isobatimétrica de 20 m. Nessa estação, foram identificadas as maiores discrepâncias.

Ainda sobre condições de contorno, embora menos relevante em termos de magnitude de correntes, os dados de aportes fluviais fornecidos ao modelo consideraram apenas valores permanentes, representativos da vazão média anual, dados isentos de variações sazonais. Destaca-se que a descarga fluvial característica da BTS é fortemente influenciada pela sazonalidade, conforme apresentado por Lima e Lessa (2002) e Cirano e Lessa (2007). A prescrição de vazões médias foi considerada uma boa aproximação nesse caso, face sua pequena contribuição na hidrodinâmica interna da BTS quando comparada com os efeitos ocasionados pelo prisma de maré na embocadura (cf. subitem 6.7).

Diante dos fatos acima mencionados e dos resultados das comparações entre dados de níveis e correntes medidos no campo e calculados pelo modelo (apresentados no subitem 7.1.1 e subitem 7.1.2), pode-se considerar que os resultados obtidos pelo modelo são de boa qualidade e o modelo está calibrado. Assim sendo, passamos para etapa seguinte - a fase de validação do modelo.

## 7.2 Validação do modelo hidrodinâmico

Para verificação de resultados no processo de validação do modelo hidrodinâmico, foi adotada idêntica metodologia já empregada na calibração (cf. subitem 7.1 - pág. 70).

Foi empregada a seguinte seqüência de comparação entre dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo:

- Verificação de elevação da superfície livre (níveis) nas estações W19 e W20, localizadas respectivamente à leste da Ilha de Itaparica e na porção NW da BTS; e
- Verificação de velocidades de correntes nas estações W08, W03, W15 e W07, localizadas respectivamente no Canal de Salvador, Baía do Aratu, norte da Ilha do Frade (próximo ao Temadre) e Canal de Itaparica. A Figura 54 que se segue apresenta um mapa com a localização das estações empregadas na calibragem.

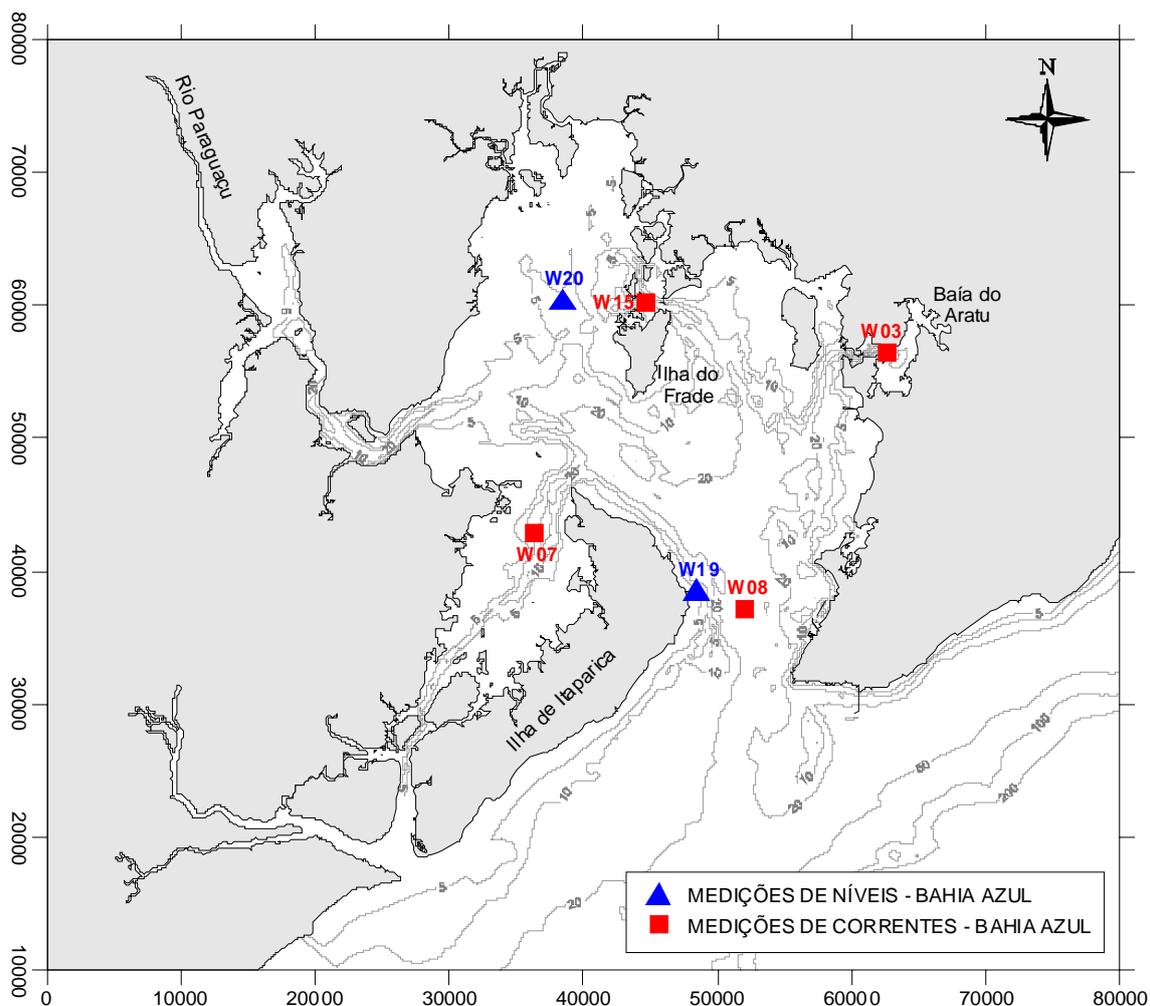


Figura 54 – Localização das estações maregráficas e correntométricas utilizadas na validação do modelo hidrodinâmico. As estações de inverno do Programa Bahia Azul (triângulos azuis e quadrados vermelhos) foram empregadas nas comparações entre dados medidos e calculados pelo modelo.

### **7.2.1 Comparação entre séries temporais de níveis**

Valem nesse tópico, para validação do modelo com dados de inverno, as mesmas considerações apresentadas no item 7.1.1.1, atinentes à calibração com dados de verão.

Os gráficos das Figuras 55 e 57 que se seguem apresentam comparações entre séries temporais de elevação da superfície livre medidas nas estações de inverno W19 e W20 e elevações calculadas pelo modelo no local dessas estações. Também são apresentadas, no mesmo gráfico, as variações do nível médio do mar (NMM) local dos dados medidos e calculados.

Os gráficos das Figuras 56 e 58 que se seguem apresentam as comparações entre séries temporais de elevação da superfície livre medidas e calculadas reduzidas das flutuações do NMM. Os valores calculados das diferenças relativas percentuais médias e comentários adicionais dos resultados obtidos são apresentados nas legendas das figuras.

Comparação de Elevações da Superfície Livre e Variações do NMM  
Estação de Inverno W19 - Mar Grande (leste da Ilha de Itaparica)

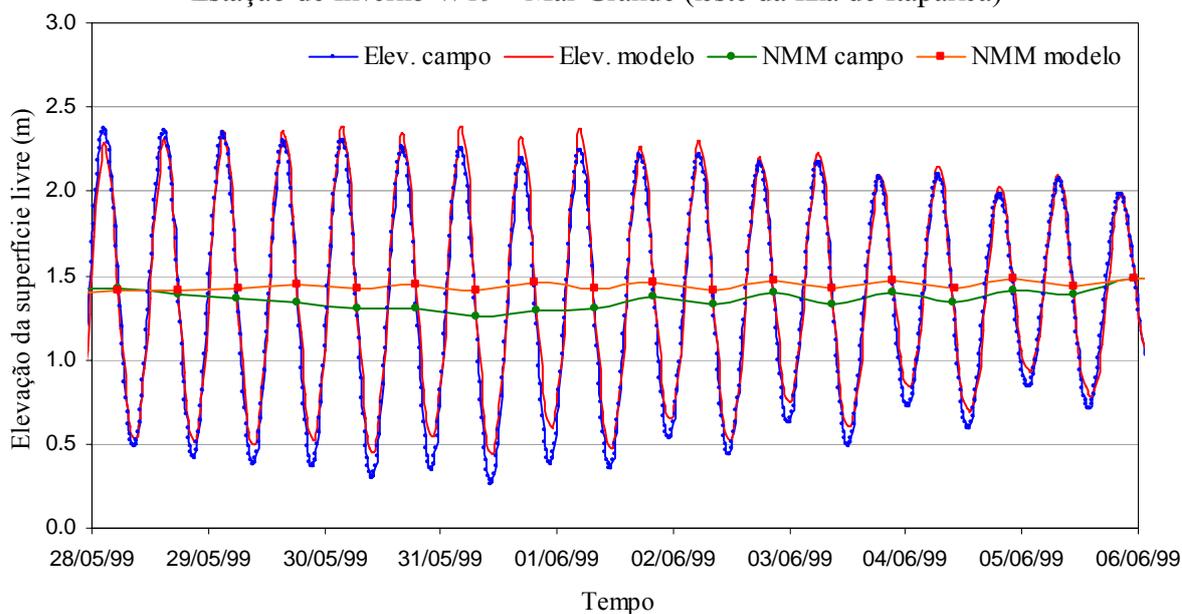


Figura 55 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM de dados medidos na estação W19 e calculados pelo modelo. Percebe-se, tal como ocorrido na calibração com os dados de verão, maior discordância entre elevações ocorrida durante a época de sizígia, correlacionada à elevação de nível médio do mar (NMM) calculado pelo modelo. As diferenças entre NMM medidos e calculados estão certamente associadas a variações dinâmicas do NMM de longo período e efeitos meteorológicos.

Comparação de Elev. da Sup. Livre desconsiderando variações do NMM  
Estação de Inverno W19 - Mar Grande (leste da Ilha de Itaparica)

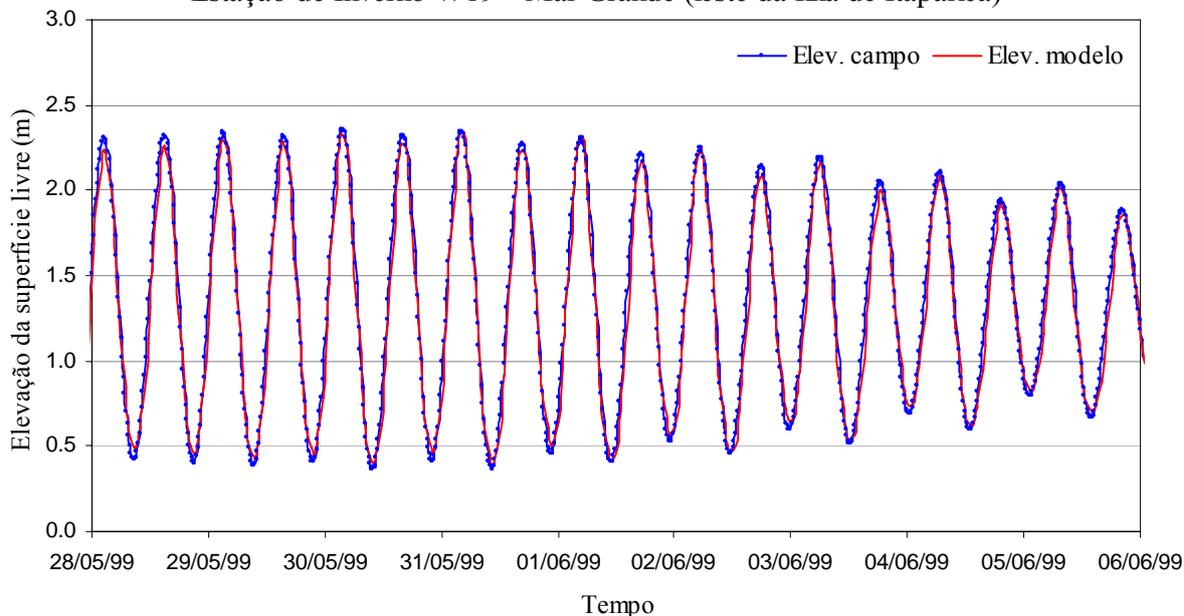


Figura 56 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação W19 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM. Percebe-se excelente concordância dos dados, o que indica que as alturas da onda de maré calculadas pelo modelo estão de acordo com as alturas da onda de maré medidas em campo. A diferença relativa percentual média entre ambas é da ordem de 4,8%

Comparação de Elevações da Superfície Livre e Variações do NMM  
Estação de Inverno W20 - NW da BTS

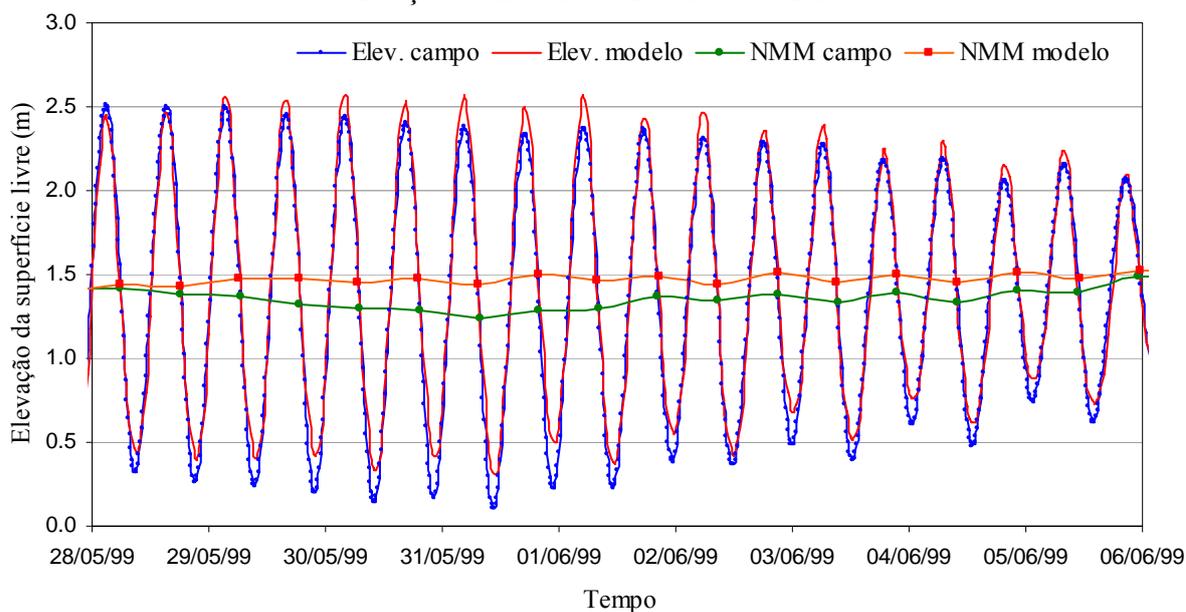


Figura 57 – Comparação de elevações da superfície livre e variações do NMM de dados medidos na estação W20 e calculados pelo modelo. Novamente, percebe-se maior discordância entre elevações ocorrida durante a época de sizígia, correlacionada à elevação de nível médio do mar (NMM) calculado pelo modelo. As variações dinâmicas do NMM são mais sensíveis na estação W20, localizada na região NW da baía, devido aos efeitos de pequeno fundo.

Comparação de Elev. da Sup. Livre desconsiderando variações do NMM  
Estação de Inverno W20 - NW da BTS

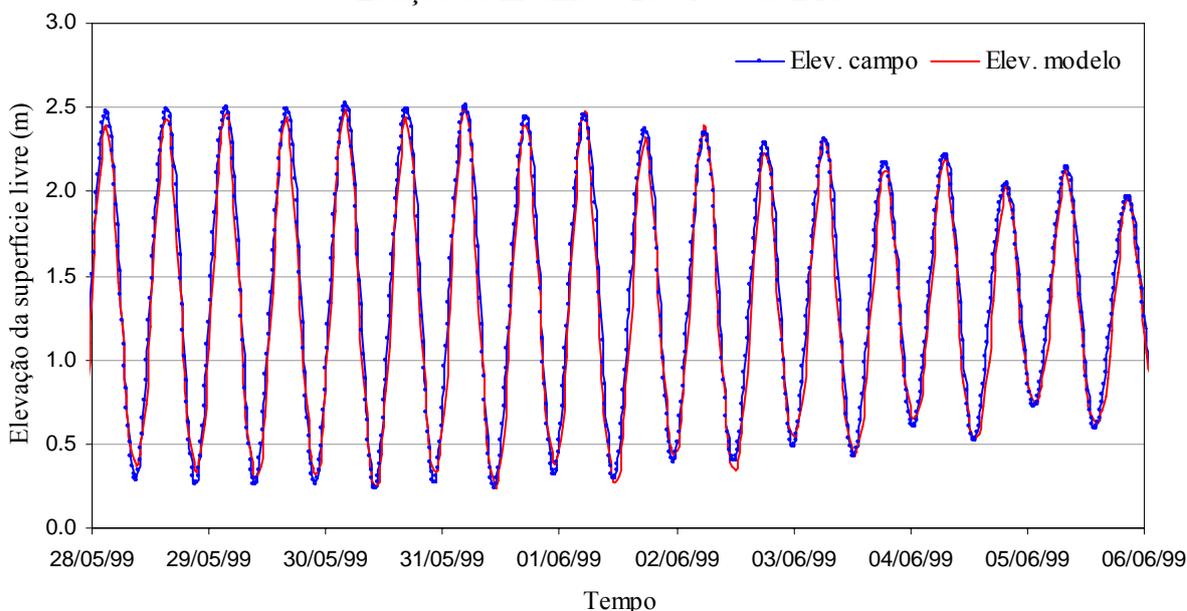


Figura 58 – Comparação de elevações da superfície livre medidas na estação W20 e calculadas pelo modelo reduzidas das variações do NMM. Percebe-se excelente concordância dos resultados, o que indica que as alturas da onda de maré calculadas pelo modelo estão de acordo com as alturas da onda de maré medidas em campo. A diferença relativa percentual média entre ambas é da ordem de 4,6 %.

### 7.2.2 Comparação de Correntes

Valem neste tópico, para validação do modelo com dados de inverno, as mesmas considerações apresentadas no subitem 7.1.2, atinentes à calibração com dados de verão.

A comparação de correntes foi realizada em quatro das dezessete estações de correntometria ocupadas por ocasião da campanha de inverno do Programa Bahia Azul. São elas:

- Estação W08 – Canal de Salvador, dados medidos com ADCP ao longo de toda a coluna d'água;
- Estação W03 – Baía do Aratu, dados medidos em dois níveis distintos, nas profundidades de 6,8 e 25,0 m;
- Estação W15 – Norte da Ilha do Frade (próximo ao Temadre), dados medidos em dois níveis distintos, nas profundidades de 8,5 e 20,6 m; e
- Estação W07 – Canal de Itaparica, dados medidos em dois níveis distintos, nas profundidades de 12,3 e 21,5 m.

A localização dessas estações correntométricas, as quais serviram para verificação dos resultados do modelo na fase de validação, pode ser visualizada no mapa da Figura 54 - (pág.105)

A Tabela 15 que se segue apresenta as profundidades das estações no campo e as correspondentes profundidades consideradas pelo modelo. Também são apresentadas as profundidades dos sensores e os níveis correspondentes onde os resultados de velocidade de corrente calculados pelo modelo foram gravados para comparação com os dados de campo.

Tabela 15 – Profundidades das estações utilizadas para comparação de correntes durante o procedimento de validação e as correspondentes profundidades consideradas pelo modelo, profundidades de aquisição dos dados de campo e os correspondentes níveis sigma onde foram calculados os resultados do modelo para comparação com os dados de campo.

	PROFUNDIDADE MÉDIA DA COLUNA D'ÁGUA ( $\bar{H}$ )			PROF. DE COLETA DOS DADOS DE CORRENTOMETRIA			PROF. CÁLCULO VELOC. MODELO	
	Campo (m)	Modelo (m)	$\Delta\bar{H}$ (m)	Campo (m)	Equip. Empregado	% $\bar{H}$	Níveis Abaixo da Superfície	Prof. Modelo (m)
<b>W08</b> (Canal de Salvador)	36,0	39,2	3,2	dados coletados ao longo de toda coluna d'água	ADCP	x x x	x x x	x x x
<b>W03</b> (Aratu)	29,2	24,0	-5,2	6,8	S4	23%	5	6,0
				25,0	RCM-7	86%	17	20,4
<b>W15</b> (N Ilha do Frade)	25,2	20,8	-4,4	8,5	S4	34%	7	7,3
				20,6	RCM-7	82%	16	16,7
<b>W07</b> (Canal de Itaparica)	25,1	24,4	-0,7	12,3	RCM-7	49%	10	12,2
				21,5	RCM-7	86%	17	20,8

Para efeito de cálculo da ordem de grandeza ( $O_g$ ) das magnitudes máximas das correntes observadas - parâmetro usado no cálculo da diferenças relativas percentuais, cf. expressão (12) - foi considerado como época de sizígia o período compreendido entre 28/mai 0h e 02/jun/1999 0h.

Os gráficos das Figuras 59 a 79 que se seguem apresentam as comparações entre séries temporais de velocidade (medidas em campo e calculadas pelo modelo) e diagramas de dispersão de correntes. Os valores calculados das diferenças relativas percentuais médias e comentários adicionais dos resultados obtidos são apresentados logo abaixo dos diagramas de dispersão e nas legendas das próprias figuras.

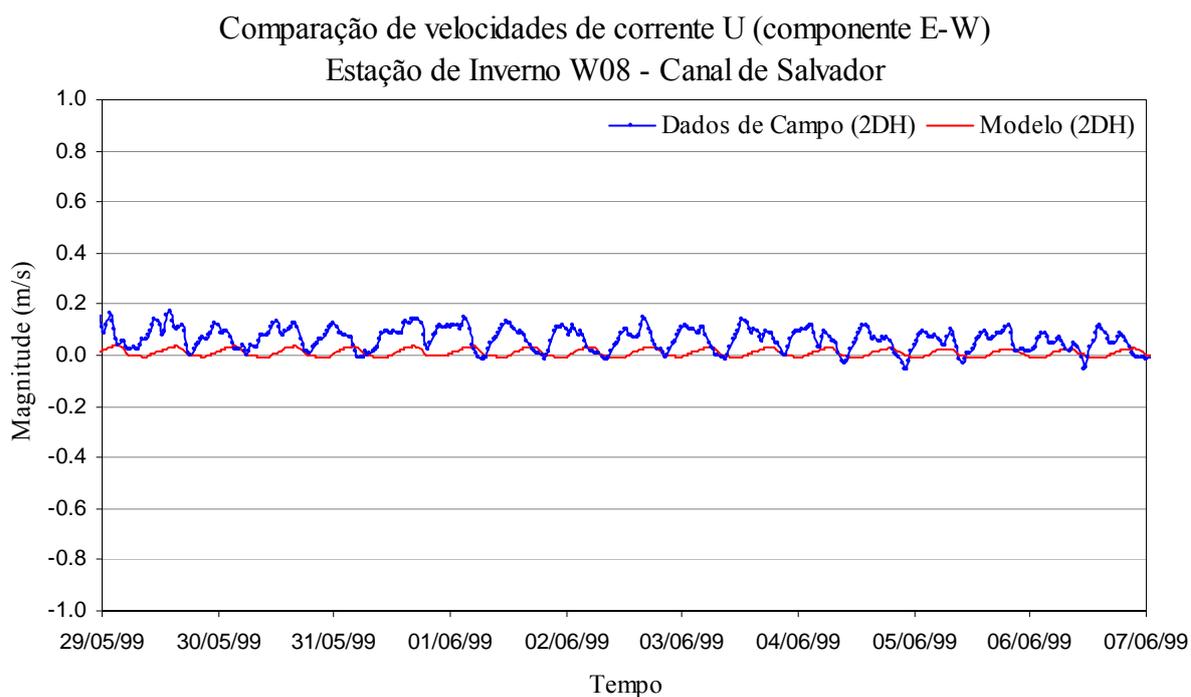


Figura 59 – Componente E-W da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W08. Nota-se, tanto nos dados de campo assim como nos dados do modelo, uma corrente residual da direção leste. Tal corrente é bem mais pronunciada nos dados de campo. As diferenças obtidas entre ambos os registros pode estar associada a efeitos de vento local não fornecido ao modelo e às aproximações realizadas na prescrição das condições de contorno da fronteira aberta (cf. subitem 6.5, pág. 54).

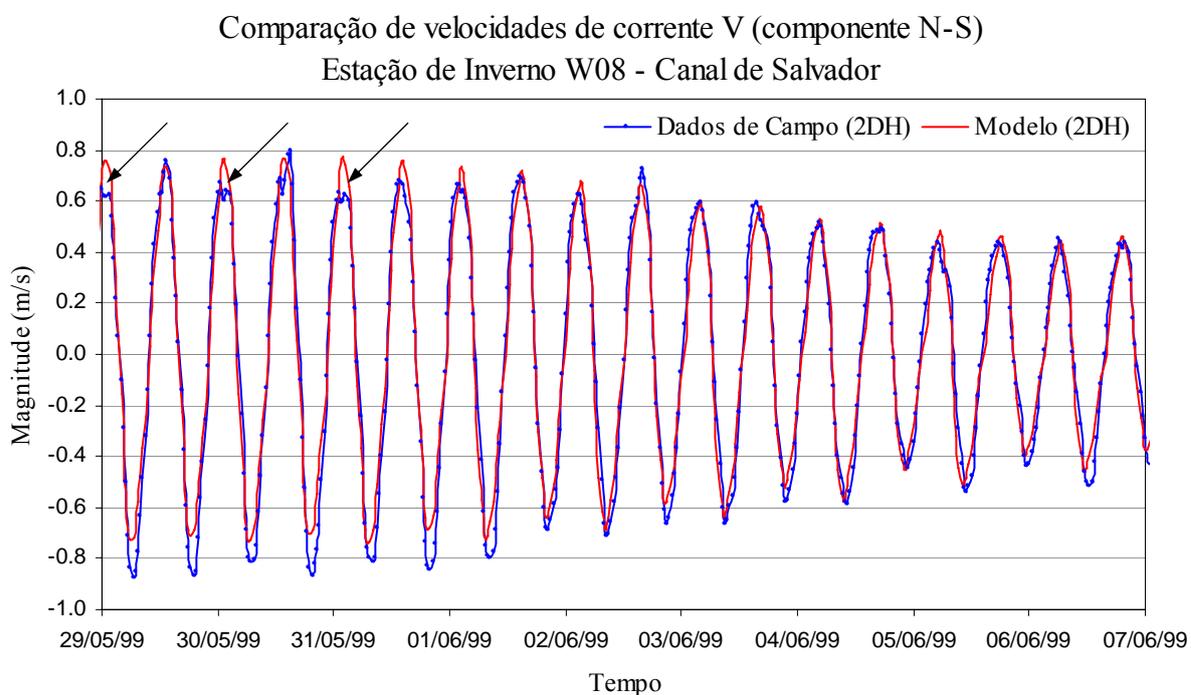


Figura 60 – Componente N-S da velocidade 2DH de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W08. Os registros apresentam boa concordância. Pode-se perceber, no início da série dos dados de campo, comportamento incomum nas intensidades de corrente máximas de direção norte (indicado pela seta na figura), quando ocorrem flutuações de curto período nos picos de velocidade.

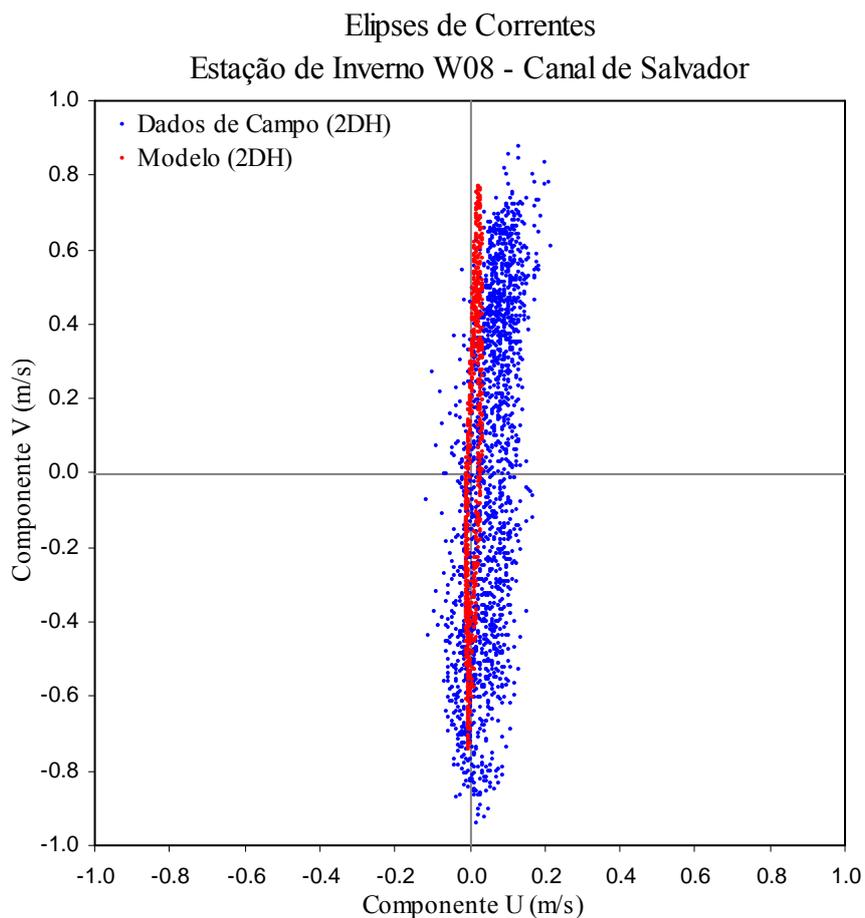


Figura 61 – Diagrama de Dispersão de velocidades de correntes 2DH medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W08.

Conforme ocorrido nos dados de verão, pode-se notar, nos dados de campo e dados do modelo na estação W08, uma direção dominante nas correntes orientada no eixo N-S, seguindo o sentido axial do Canal de Salvador.

Flutuações de curto período notadas nos valores extremos de direção norte (apontadas pelas setas no gráfico da Figura 60) podem estar associadas ao mau funcionamento do equipamento ocorrido somente durante a aquisição de algumas correntes mais intensas. Maiores investigações seriam necessárias para se chegar a uma justificativa conclusiva.

A diferença relativa percentual média entre os dados de campo e do modelo nessa estação é da ordem de 10,5%, valor considerado muito bom.

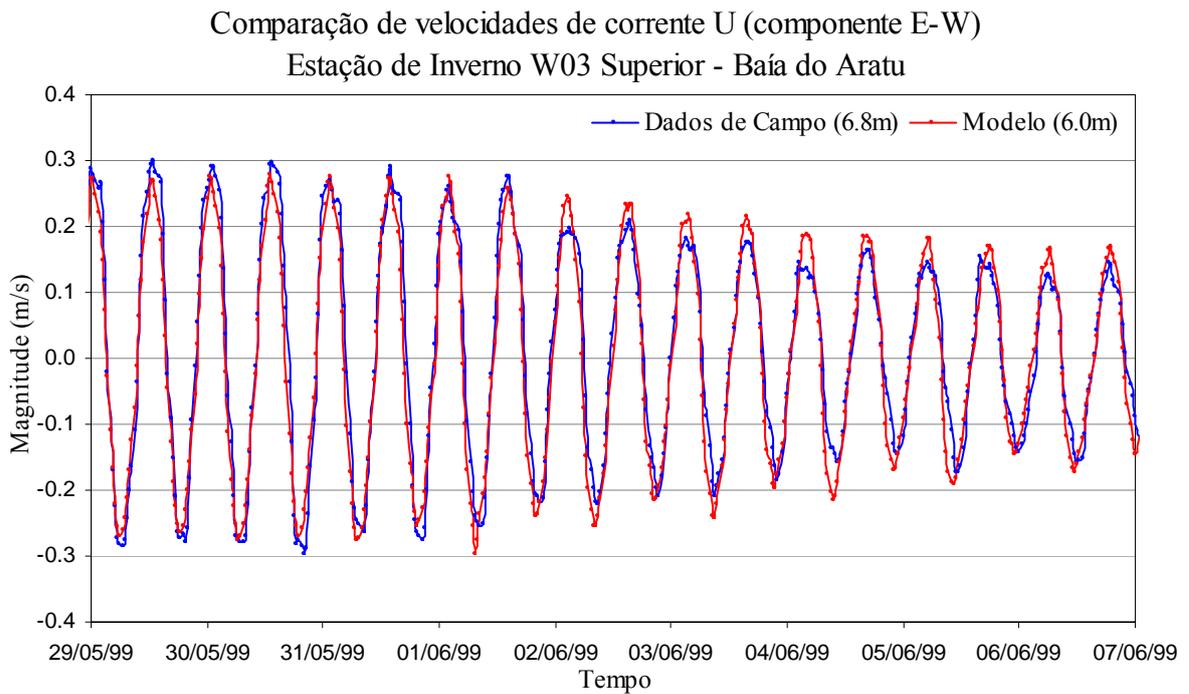


Figura 62 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 superior. A comparação dos registros apresenta boa concordância.

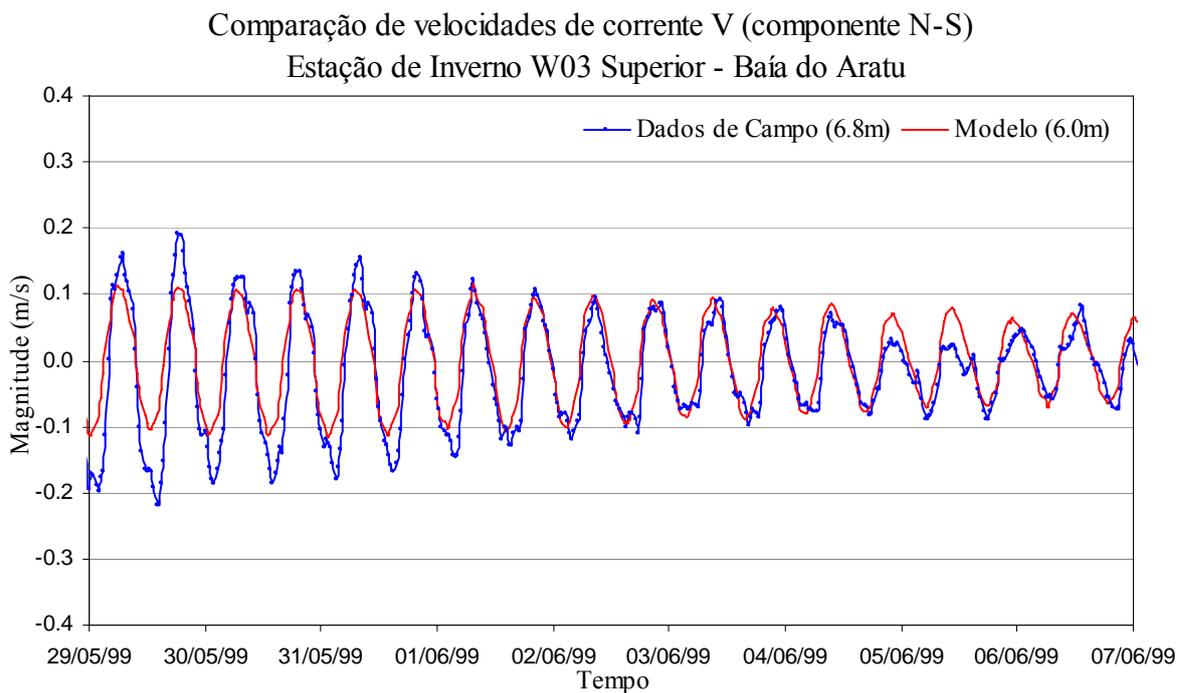


Figura 63 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 superior. Nota-se, sobretudo no início da série, subestimativa das intensidades das correntes laterais calculadas pelo modelo.

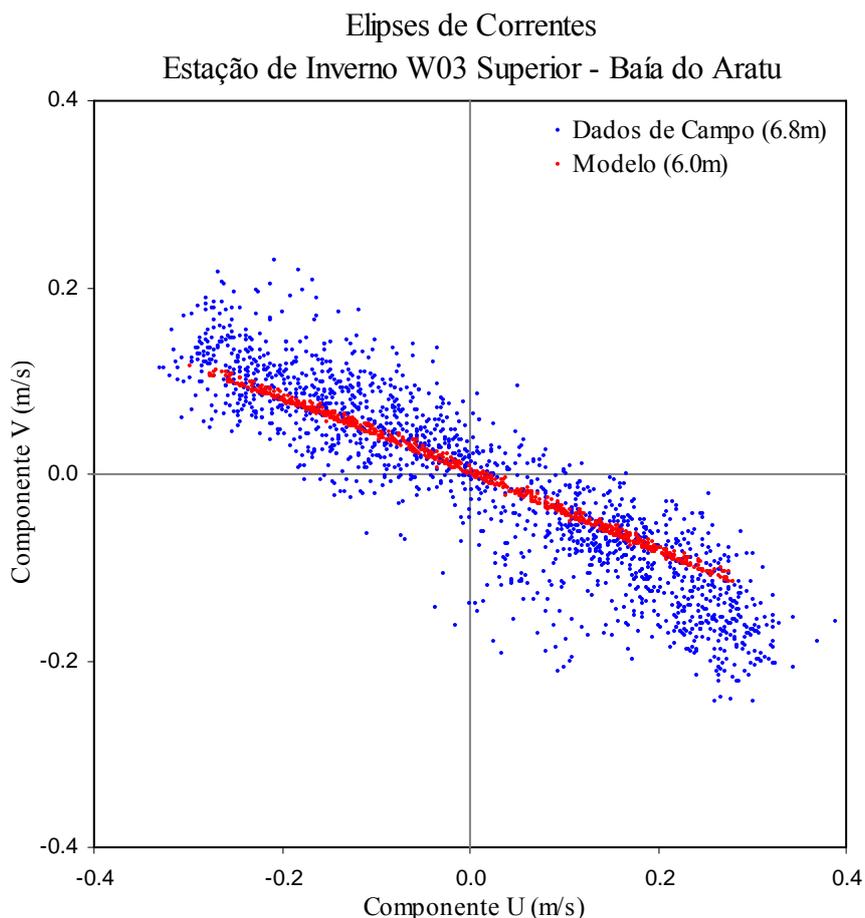


Figura 64 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W03 superior. A magnitude das correntes calculadas pelo modelo se ajusta bem as dados de campo medidos. A direção dominante das correntes calculadas pelo modelo sofre um leve desvio.

Valem, para estação W03 superior, as mesmas considerações relativas ao gradiente de batimetria existente nessa região, comentadas na análise dos resultados de verão atinentes à estação S03 (cf. subitem 7.1.2 - pág. 84).

Semelhante ao constatado na calibração e validação realizadas no ano de 2000 (cf. ROSMAN *et al.* 2000), as correntes laterais secundárias criam certo espalhamento em relação à direção principal do escoamento, que não é bem reproduzido pelo modelo, uma vez que a discretização lateral do Canal do Cotegipe (ligação da Baía do Aratu à BTS) não é suficiente para resolver efeitos de pequena escala.

A diferença relativa percentual média entre os dados de campo e do modelo nessa estação é da ordem de 18,0 %, valor considerado aceitável.

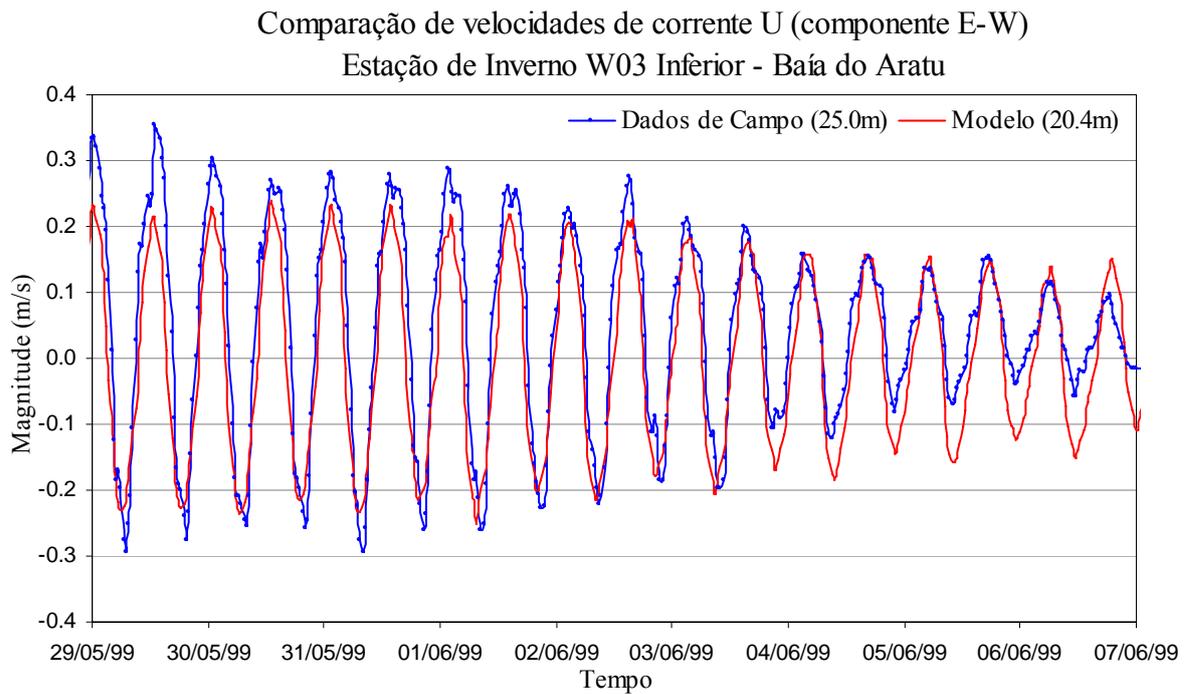


Figura 65 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 inferior. Percebem-se, nos dados calculados do modelo em relação aos dados de campo, menores intensidades na sizígia e maiores intensidades na quadratura.

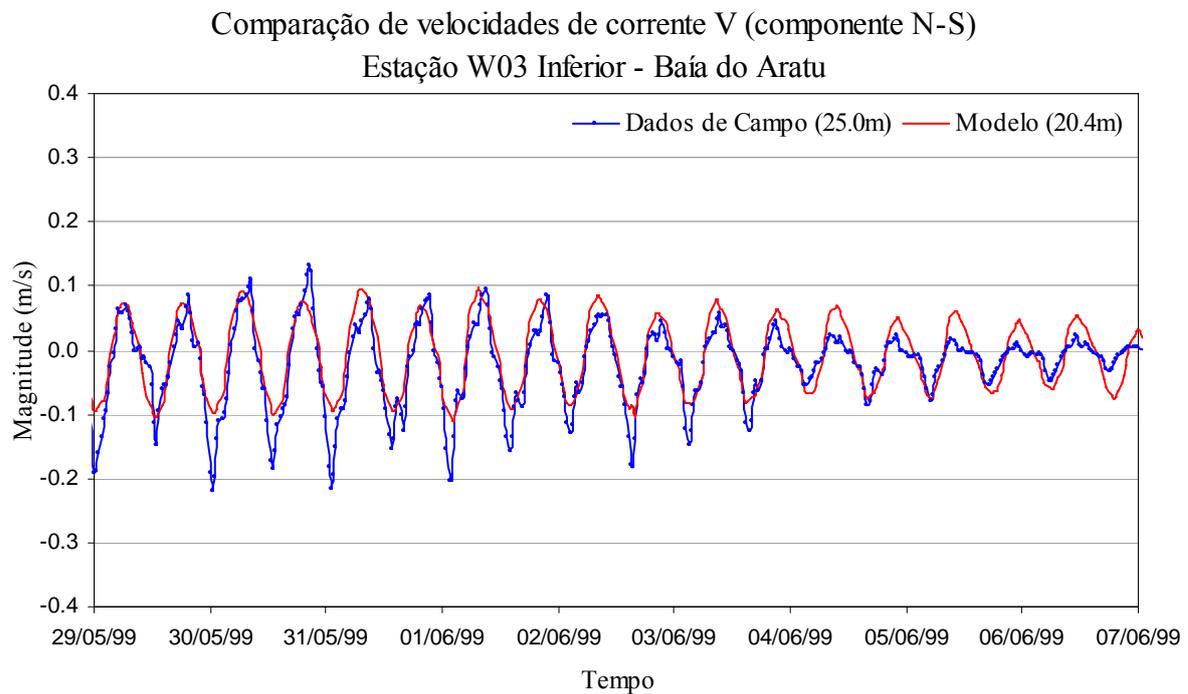


Figura 66 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W03 inferior. Percebem-se também nessa componente, nos dados calculados do modelo em relação aos dados de campo, menores intensidades na sizígia e maiores intensidades na quadratura.

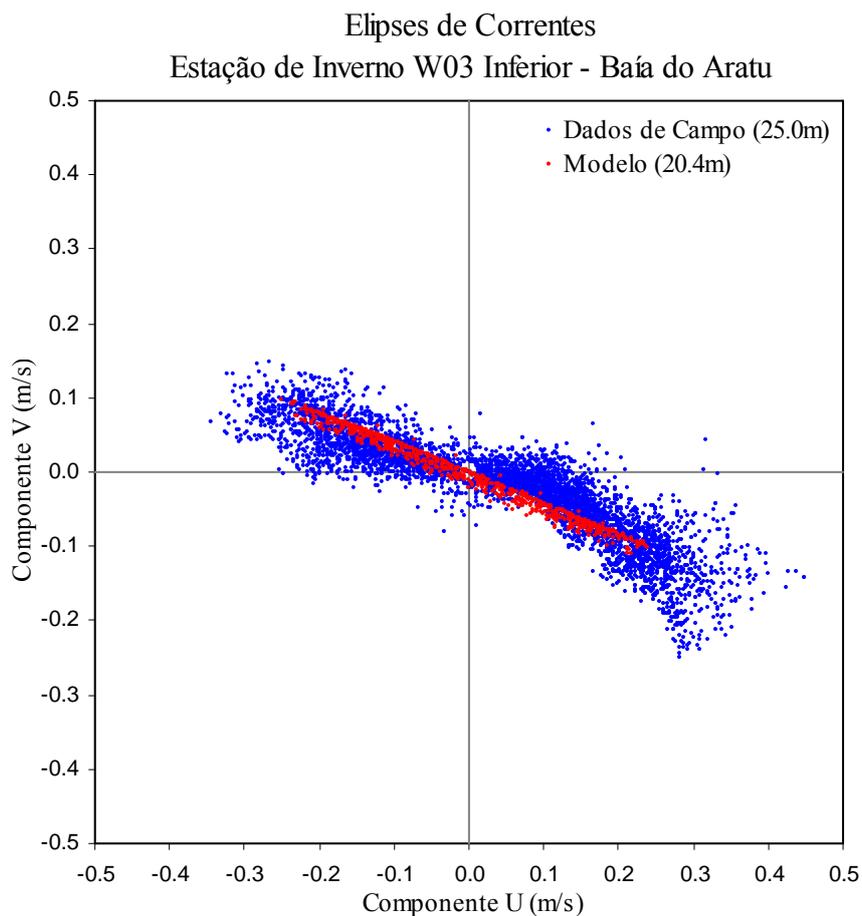


Figura 67 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W03 inferior. As correntes apresentam uma boa concordância na direção e uma significativa subestimativa nas intensidades, mais visíveis no quadrante SE.

Somado à complexidade da batimetria no local, observa-se nos dados dessa estação maiores discordâncias ocorridas principalmente no período final da série, semelhante ao observado anteriormente nas estações de verão S03 (superior e inferior) e S07 (superior), fato que corrobora as suspeitas de mau funcionamento do equipamento por ação de incrustações.

A diferença relativa percentual média calculada nessa estação é da ordem de 20,0 %. Esse valor foi adotado como sendo o limite do máximo valor considerado como aceitável para os propósitos do presente trabalho.

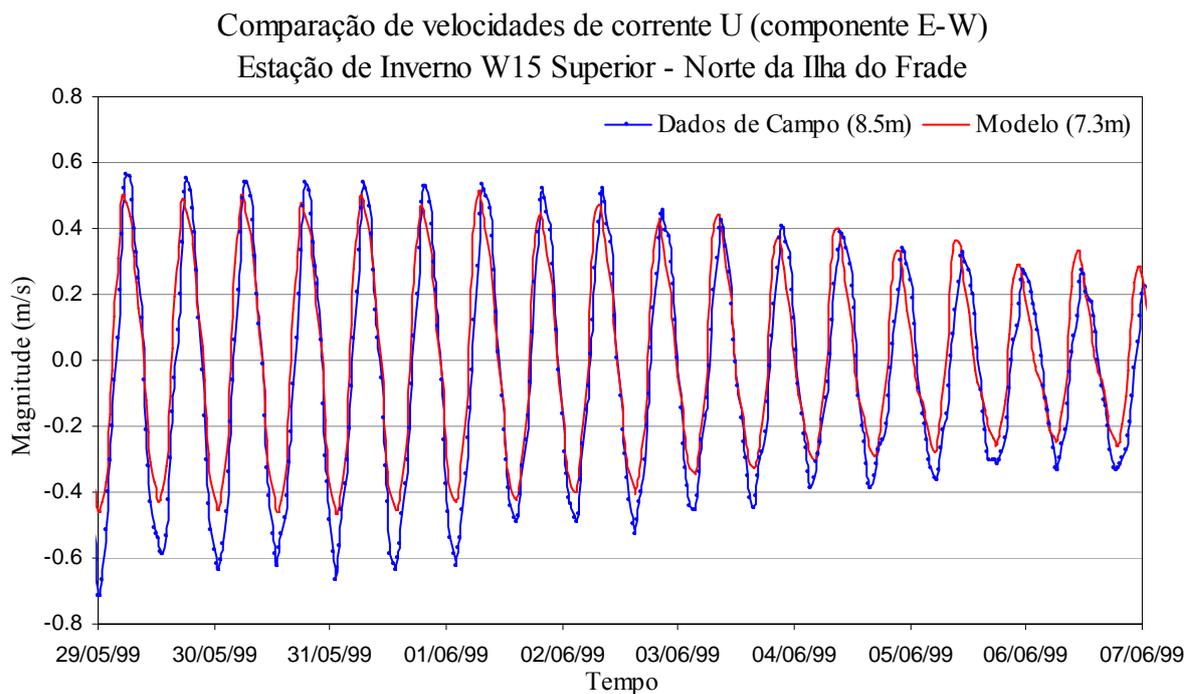


Figura 68 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 superior. Os resultados do modelo apresentam uma boa concordância em fase, porém ocorre uma subestimativa das intensidades, mais visível nas correntes de direção oeste.

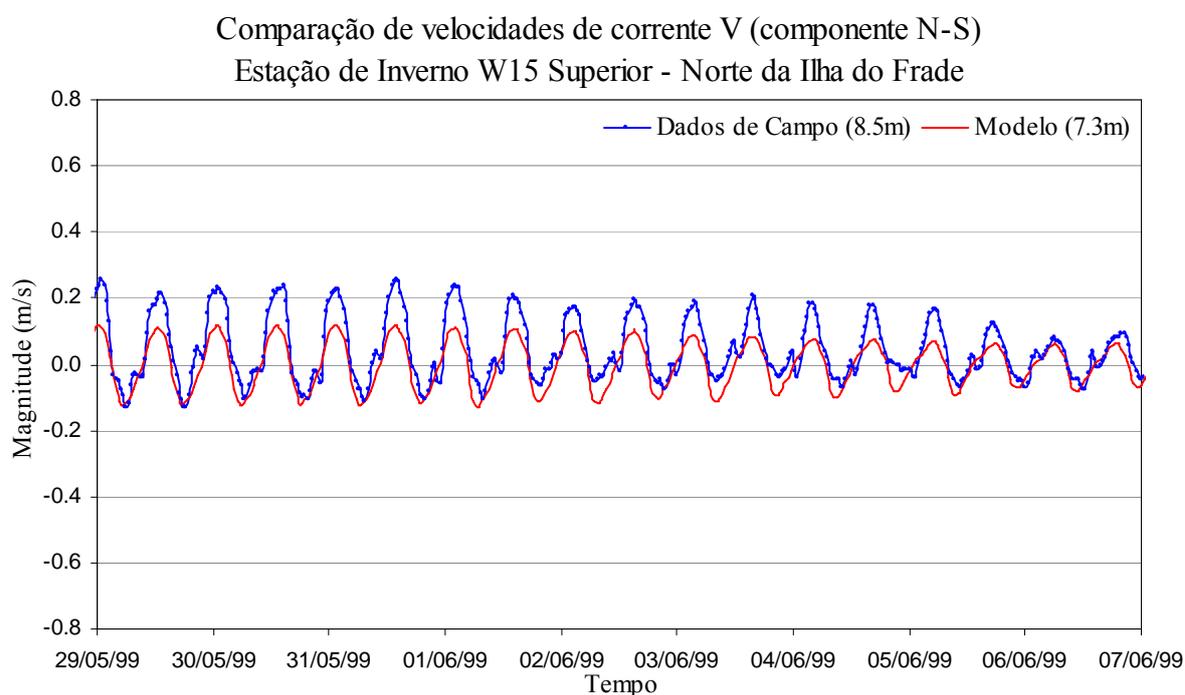


Figura 69 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 superior. Tal como ocorrido na componente  $u$ , percebem-se também na componente  $v$  que os resultados do modelo apresentam uma boa concordância em fase, porém com subestimativa das intensidades nas correntes de direção norte.

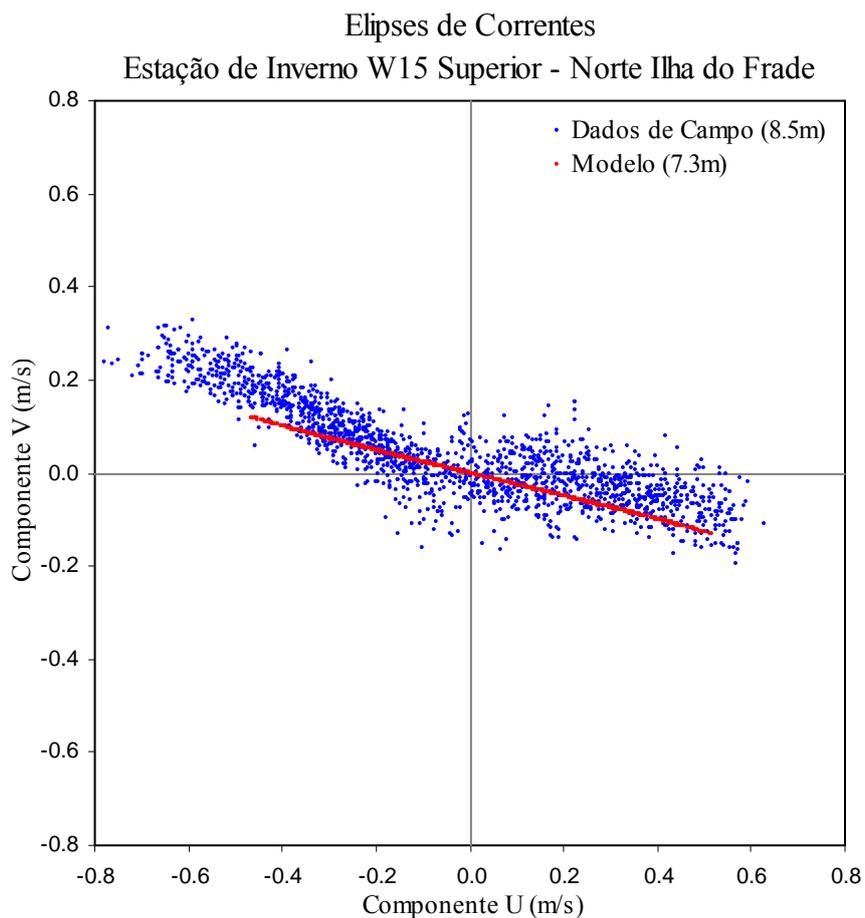


Figura 70 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W15 superior. As correntes apresentam uma boa coerência em relação à direção. Em relação à magnitude, ocorre uma subestimativa no quadrante NW.

Tal como observado da estação W03 (Figura 64), destaca-se, também nessa estação, a dificuldade de reprodução pelo modelo das correntes laterais que criam o espalhamento em relação à direção principal do escoamento. Para capturar tais efeitos, seriam necessárias maior riqueza de dados batimétricos, discretização mais refinada da região (de modo a reproduzir a complexa topografia do fundo) e maior acurácia na prescrição dos dados vento local fornecidos ao modelo.

A diferença relativa percentual média calculada nessa estação é da ordem de 19,5 %, valor considerado aceitável, mas próximo da tolerância máxima admitida de 20%.

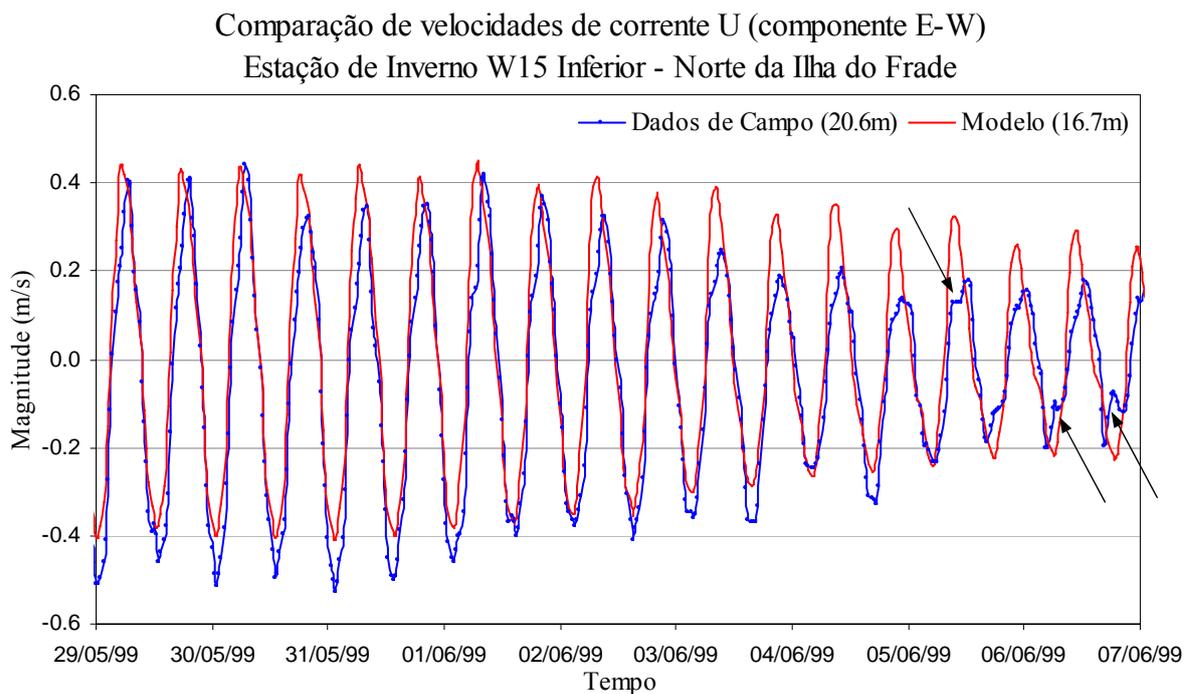


Figura 71 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 inferior. Os registros apresentam boa concordância até o dia 03/jun/1999. A partir dessa data até ao final da série, ocorre uma superestimativa no sentido leste das intensidades das correntes do modelo. Observam-se também alguns comportamentos inesperados nos últimos ciclos da série de dados medidos (indicado pela seta na figura).

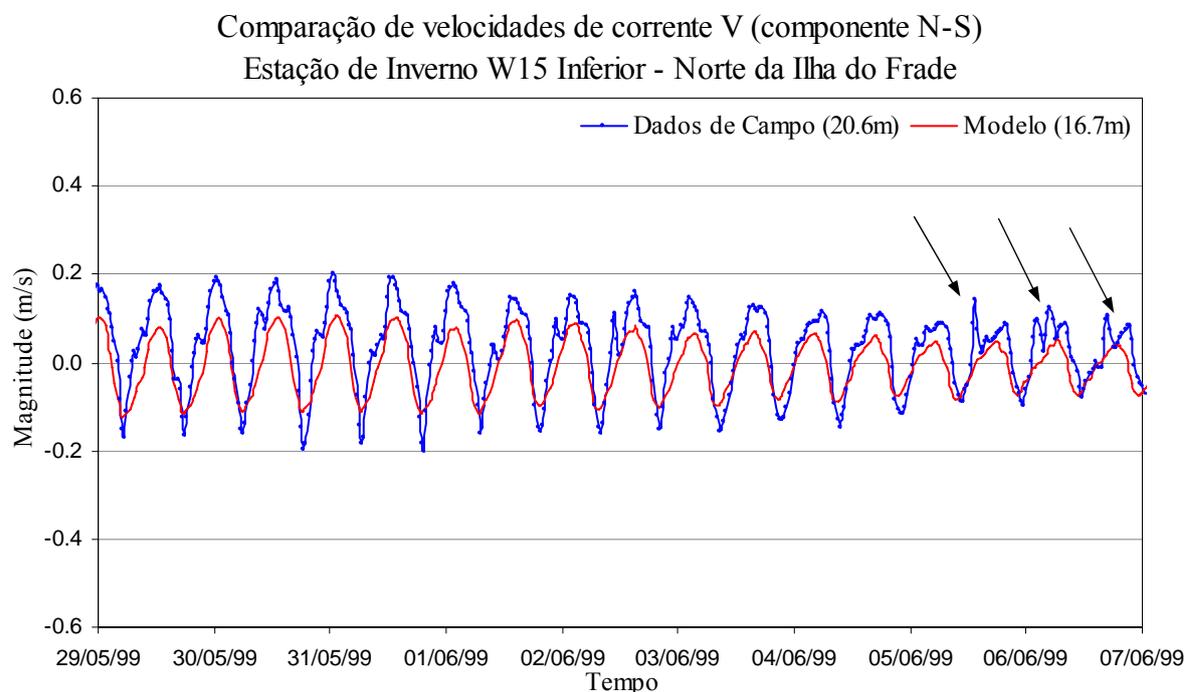


Figura 72 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W15 inferior. Os registros apresentam boa concordância em fase, porém com subestimativa das intensidades das correntes calculadas pelo modelo. Tal como ocorrido na componente  $u$ , também são observados na componente  $v$  alguns comportamentos inesperados nos últimos ciclos da série de dados medidos (indicado pela seta na figura).

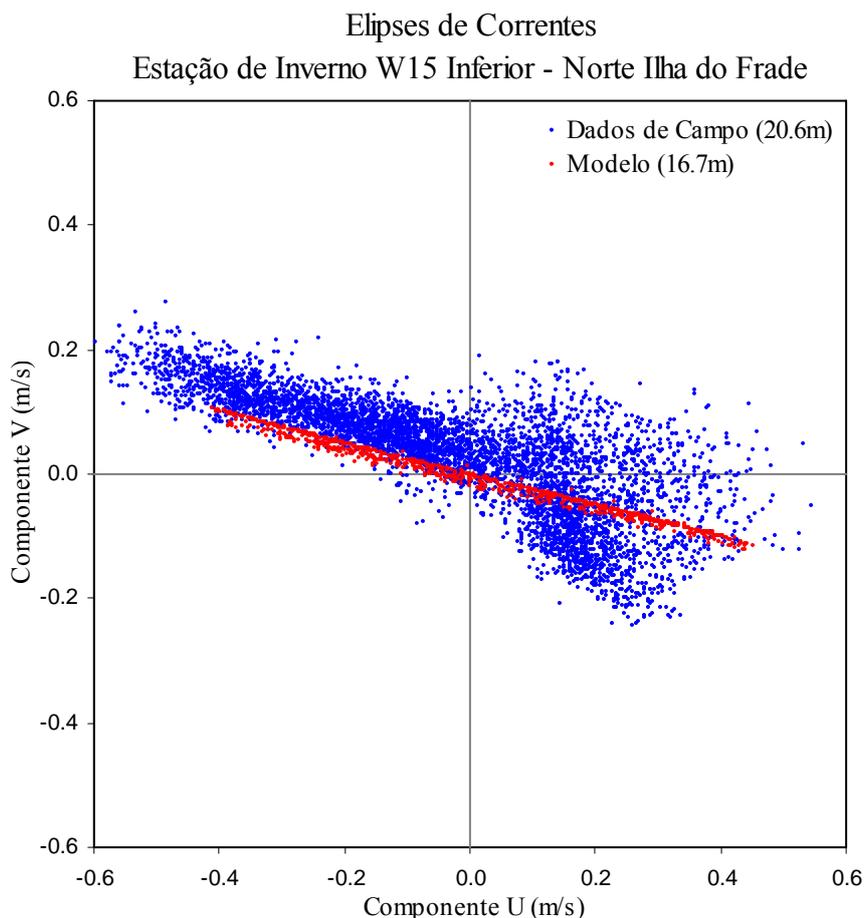


Figura 73 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W15 inferior. Nota-se grande dispersão nos dados de campo, influenciados por correntes residuais ascendentes que deslocam a nuvem de pontos na direção norte.

Pode-se atribuir como causa provável das discrepâncias observadas na estação W15 inferior as mesmas considerações apresentadas anteriormente na análise dos resultados atinentes à estação W15 superior (referentes ao espalhamento dos dados e à complexidade da batimetria do local).

Mais uma vez, observam-se, nos dados dessa estação, maiores discordâncias ocorridas no período final da série, semelhante ao observado anteriormente nas estações de verão S03 e S07 e na estação de inverno W03 inferior. Essa constatação corrobora as suspeitas de mau funcionamento do equipamento por ação de incrustações. Relembra-se que a atividade biológica no interior da BTS é intensa, motivada pelas condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento de organismos.

A diferença relativa percentual média calculada nessa estação é da ordem de 19,1 %, valor considerado aceitável.

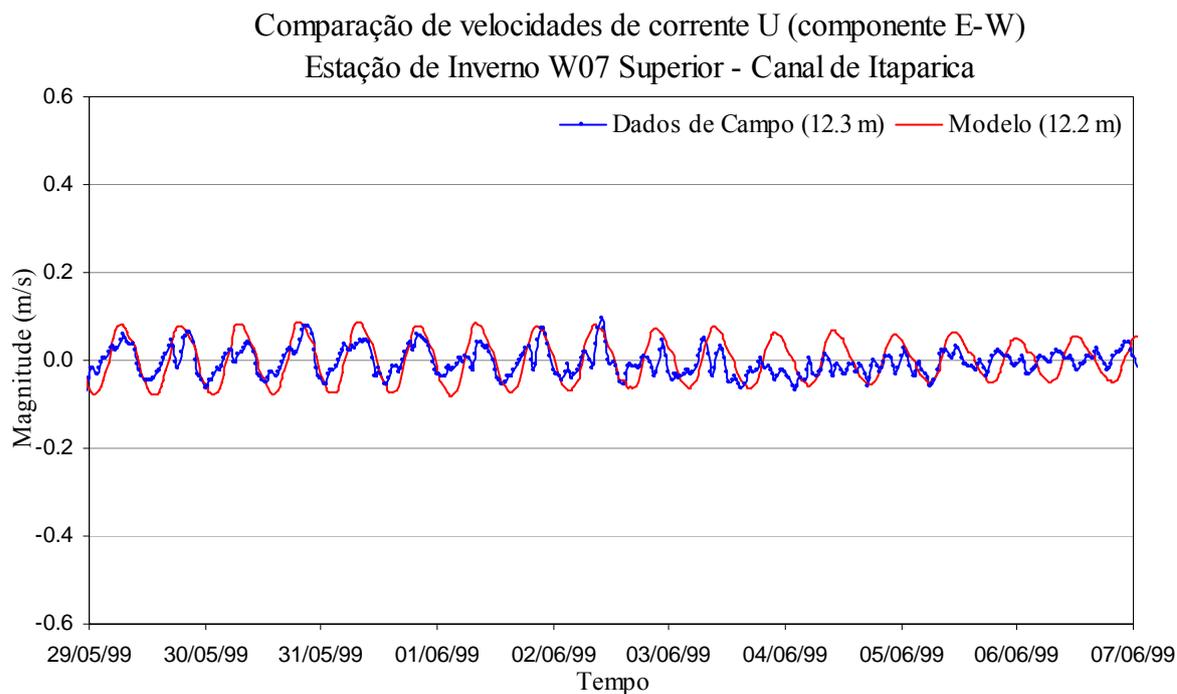


Figura 74 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 superior. Percebe-se, nos dados de campo, influência de efeitos de pequena escala que geram correntes laterais secundárias, difíceis de serem reproduzidas pelo modelo.

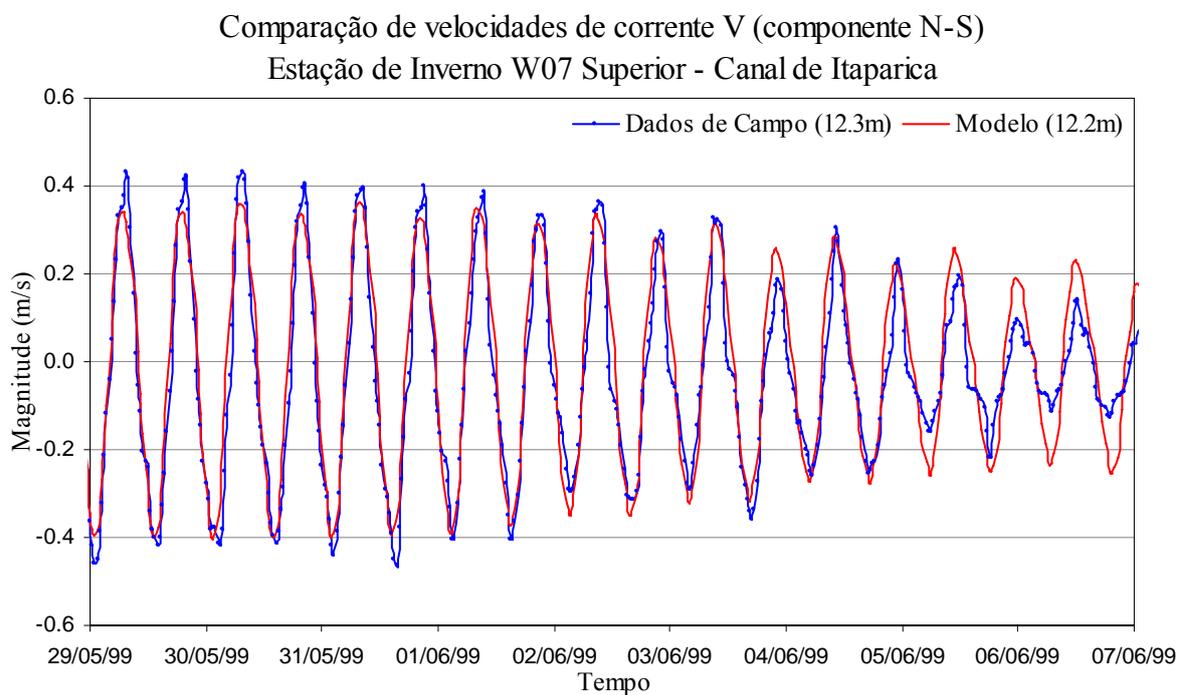


Figura 75 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 superior. Os registros apresentam concordância satisfatória, exceto na época da quadratura (final da série), quando ocorre uma superestimativa na intensidade das correntes calculadas pelo modelo. Resultado de comparação muito semelhante a esse foi encontrado na análise dos dados de verão na mesma estação (cf. Figura 49 - pág. 99).

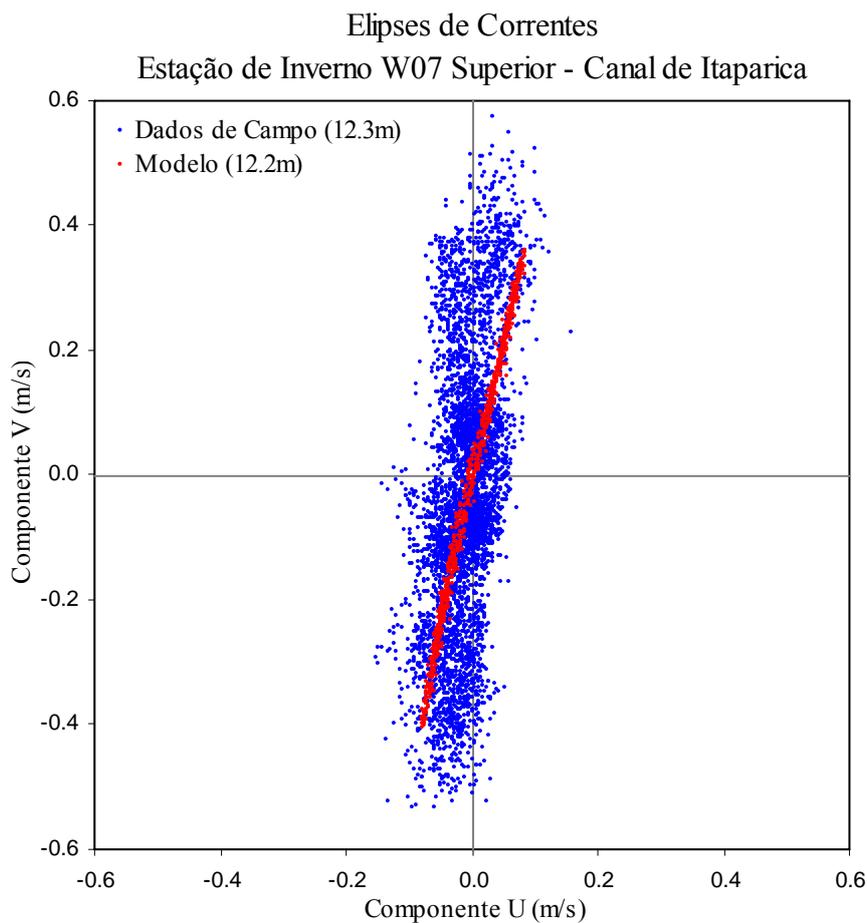


Figura 76 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W07 superior. As magnitudes das correntes são coerentes. Nota-se leve desvio na direção dominante das correntes calculadas pelo modelo. Destaca-se a forte predominância da direção N-S das correntes, seguindo o sentido axial do Canal de Itaparica.

Novamente, são observadas diferenças mais acentuadas entre dados medidos e resultados do modelo apenas durante a fase final dos registros.

A diferença relativa percentual média calculada na estação W07 superior é da ordem de 16,3 %, valor considerado satisfatório.

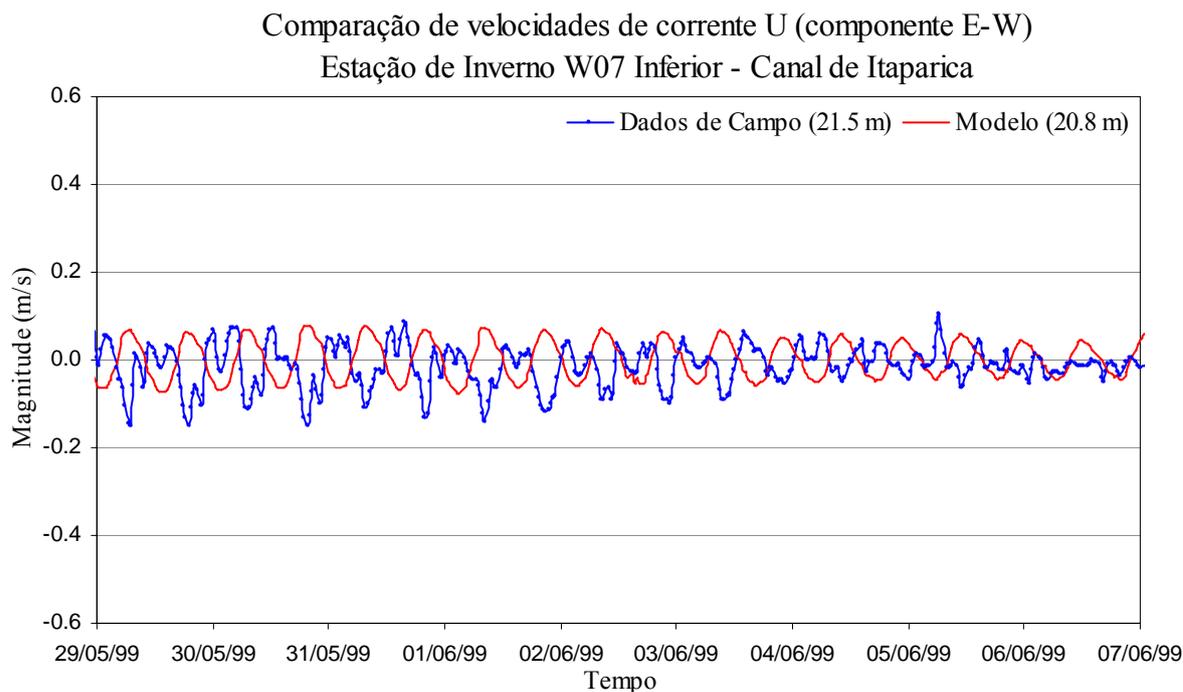


Figura 77 – Componente E-W da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 inferior. Por meio da comparação dos gráficos, pode-se perceber uma defasagem de aproximadamente  $180^\circ$ . Os dados de campo apresentam comportamento assimétrico, ao contrário dos resultados do modelo. Constatação muito semelhante pode ser encontrada na análise dos dados atinentes à estação de verão S07 inferior (cf. Figura 51 - pág. 101).

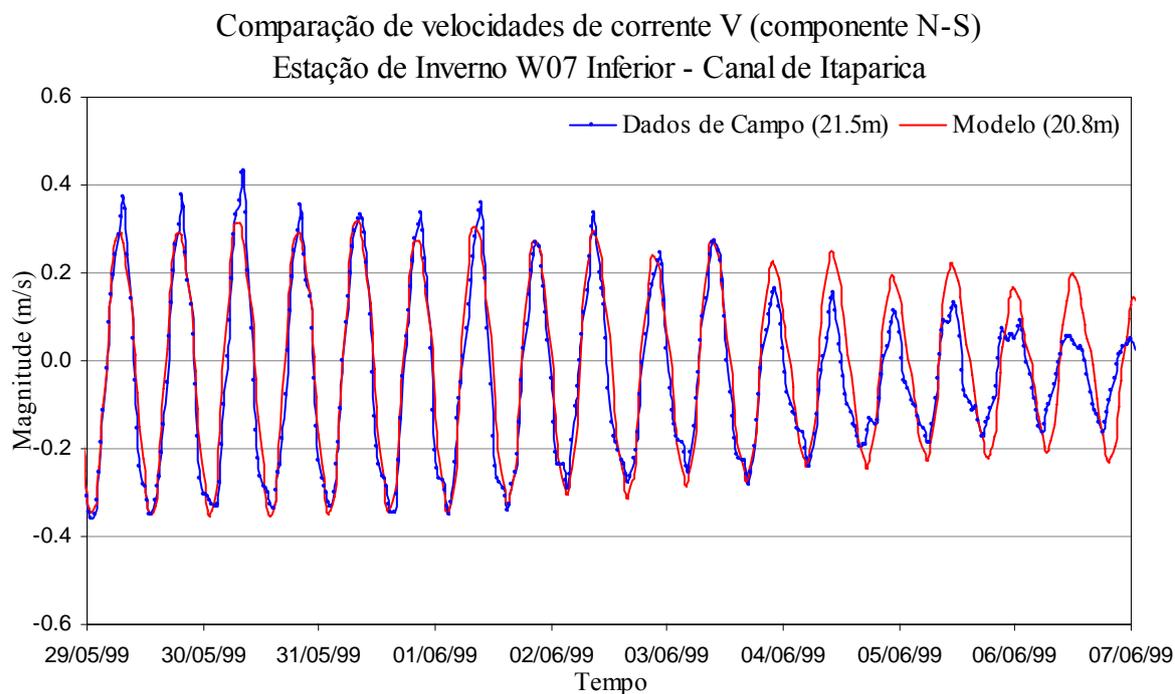


Figura 78 – Componente N-S da velocidade de corrente medida no campo e calculada pelo modelo na estação W07 inferior. Os registros apresentam boa coerência. Nos resultados do modelo, percebe-se pequena ampliação das intensidades das correntes ocorrida no final da série.

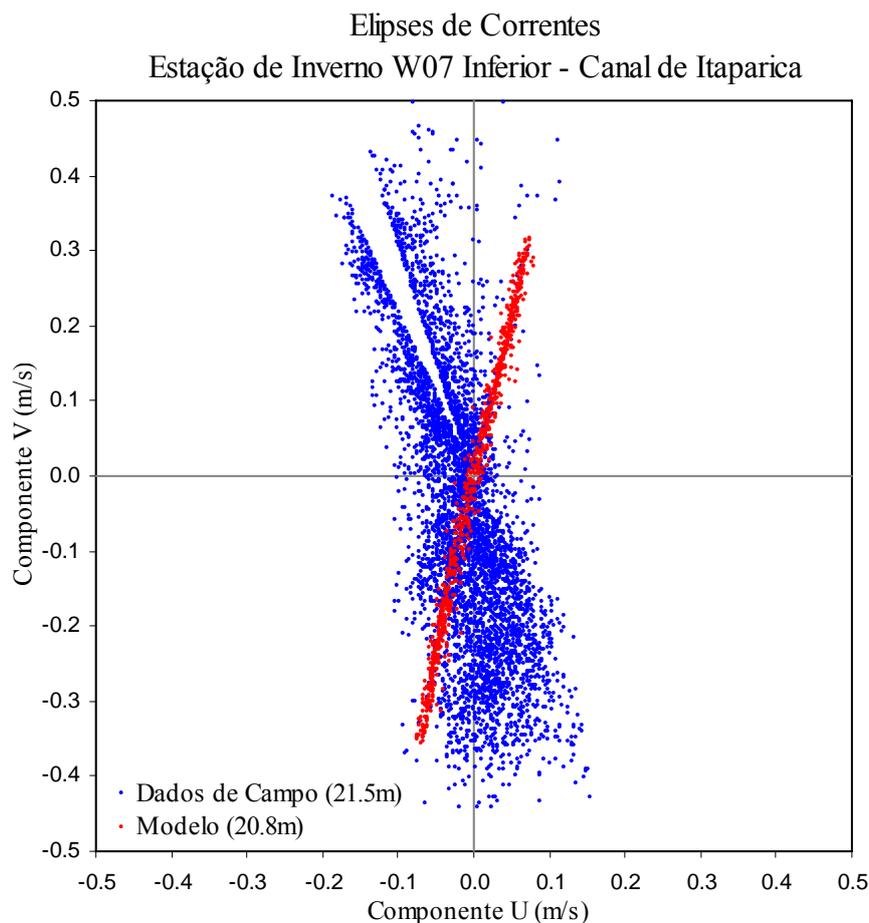


Figura 79 – Diagrama de dispersão de velocidades de correntes medidas no campo e calculadas pelo modelo na estação W07 inferior. Da mesma forma que ocorreu nessa estação durante a campanha de verão (cf.Figura 53 - pág. 102), a nuvem de pontos dos dados medidos em campo apresenta comportamento duvidoso. A existência de setores totalmente sem informação, conforme pode ser observado no quadrante NW, indica certamente a ocorrência de falha no equipamento de medição.

Tendo em vista as evidências de mau funcionamento do correntógrafo, ocorrida durante a coleta dos dados na estação W07 inferior, as diferenças entre medições e resultados do modelo encontradas na componente  $u$  não foram consideradas para efeito de cálculo da diferença relativa percentual média entre correntes. O valor da diferença em  $u$  da estação W07 inferior foi estimado com base nas diferenças observadas em  $u$  na estação W07 superior.

Dessa forma, a diferença relativa percentual média calculada na estação W07 inferior foi da ordem de 15,7 %, valor considerado bom.

### 7.2.3 Síntese da validação

São válidos neste tópico os mesmos comentários apresentados na síntese da calibração (subitem 7.1.3, pág.103) referentes à qualidade dos dados básicos de entrada fornecidos ao modelo e condições de contorno.

Foram utilizados sete registros de dados de correntometria para servirem como referência de comparação das velocidades de correntes obtidas pelo modelo na fase de validação. Desses sete registros, três apresentaram discordâncias maiores no final da série (W03 inf., W15 inf. e W07 sup.) e um (W07 inf.) apresentou evidências claras de mau funcionamento durante todo o período de monitoramento. A estação W15 (próxima ao Temadre), seguida pela estação W03 (no Canal do Cotegipe) foram as estação que apresentaram maior espalhamento dos dados de correntes. A Figura 54 (pág. 105) ilustra a localização das estações.

A Tabela 16 e Tabela 17 que se seguem apresentam um resumo dos valores calculados para as diferenças relativas percentuais médias entre dados medidos e calculados pelo modelo, por meio das expressões (11) e (13).

Tabela 16 – Diferenças relativas percentuais médias entre alturas da onda de maré dos dados medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de validação

ESTAÇÕES	DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL
W19 (Mar Grande)	4,8%
W20 (NW da BTS)	4,6%

Ambas as estações onde foram realizadas de comparação entre dados de altura da onda de maré apresentaram resultados muito bons, com concordâncias na ordem de 95%.

Tabela 17 – Diferenças relativas percentuais médias entre velocidades máximas de dados de correntes medidos em campo e resultados calculados pelo modelo na fase de validação

ESTAÇÕES	DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL		
	PROFUNDIDADES ESPECÍFICAS		2DH <sup>1</sup>
	Est. Superior	Est. Inferior	
W08 (Canal de Salvador)	x x x		10,5 %
W03 (Aratu)	18,0 %	20,0 %	16,4 %
W15 (N Ilha do Frade)	19,5 %	19,1 %	16,8 %
W07 (Canal de Itaparica)	16,3 %	15,7 %	16,2 %

<sup>1</sup>Para calcular a velocidade 2DH dos dados de campo das estações W03, W15 e W07, as quais tiveram medições realizadas apenas em dois níveis discretos da coluna d'água, foi assumido um perfil vertical de velocidades de formato logaritmo passando pela velocidade nula no fundo e pelas duas medições. Em seguida, foi realizada a média das velocidades ao longo de toda coluna d'água.

As quatro estações onde foram realizadas comparações entre dados de correntes máximas apresentaram resultados satisfatórios, com concordâncias na ordem de 82% para correntes em níveis específicos, e na ordem de 85% para correntes promediadas na vertical. Como resultado satisfatório entende-se resultado que apresente concordância superior a 80% (ou diferença relativa percentual média inferior a 20%).

### 7.3 Resumo da calibração e validação

Consubstanciando os comentários anteriormente apresentados por ocasião da análise dos resultados do modelo nas fases da calibração e validação, podemos atribuir como principais origens das discrepâncias observadas:

- a complexidade da topografia do fundo e a geometria da linha da costa existentes nas regiões ao redor das estações de análise de resultados, difíceis de serem capturadas pela discretização do domínio de modelagem;
- falta de riqueza de informações disponíveis sobre a batimetria em algumas regiões da BTS, sobretudo em áreas localizadas fora da região de interesse em navegação. Ressalta-se também que a Carta Náutica nº 1110 (uma das fontes de dados batimétricos) é oriunda de levantamentos efetuados até 1979. Desta forma, alterações significativas podem ter ocorrido entre a geometria implementada no modelo e a existente de fato na época das medições (1999);

- incertezas e aproximações inerentes aos dados básicos de entrada fornecidos ao modelo (níveis, ventos e vazões); e
- evidências de mau funcionamento em alguns correntógrafos empregados na comparação dos resultados.

Analisando os dados da Tabela 14 (pág. 103), referidos à campanha de verão, juntamente com os dados da Tabela 17 acima, referidos à campanha de inverno, pode-se notar que, em geral, as concordâncias entre dados medidos e resultados do modelo são ligeiramente melhores nas estações inferiores (excetuam-se as estações S15 e W03). Essa constatação pode ser explicada pelas alterações dos padrões de correntes provocadas por efeitos de ventos locais não fornecidos ao modelo. Lembra-se que foi prescrito vento variável no tempo, mas espacialmente homogêneo para toda região do domínio de modelagem e que a ação do vento local é mais sensível nos níveis superiores da coluna d'água.

A despeito das dificuldades típicas de modelagem acima citadas, considerando uma média dos resultados obtidos tanto na calibração como na validação, podemos dimensionar as coerências obtidas entre dados medidos e calculados pelos seguintes valores:

- Alturas de ondas de maré → ~ 95%
- Correntes promediadas na vertical → ~ 87%
- Correntes em níveis específicos → ~ 84%

Vale ressaltar que o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA, após a calibração, pode apresentar coerências superiores a 95% para níveis e superiores a 90% para correntes (COPPE, 2007), em função logicamente das incertezas inerentes aos dados básicos de entrada fornecidos ao modelo.

Diante das considerações acima apresentadas e da análise das comparações entre dados de campo e do modelo, podemos considerar que os resultados obtidos pelo modelo são de boa qualidade e o modelo está calibrado e validado para BTS. Assim sendo, passamos para etapa final da metodologia aqui apresentada, que consiste na geração dos protótipos das Cartas de Correntes de Maré.

## 8. SIMULAÇÕES DE GERAÇÃO DAS CARTAS

A partir do momento em que o modelo foi considerado calibrado e validado para BTS, passamos para etapa de execução das simulações visando a geração dos padrões de correntes a serem representados nas Cartas de Correntes de Maré.

Embora o objetivo inicial do presente trabalho seja a geração de Cartas de Correntes considerando a maré puramente astronômica como principal forçante do sistema, foram conduzidas simulações considerando três regimes de vento distintos, de modo a oferecer maior realismo às informações produzidas. Os regimes de vento representarão, de maneira genérica, os padrões típicos de vento característicos da região em cenários de calmaria, tempo bom e sob condições de entrada de frente fria. Dessa forma, o usuário poderá optar pela Carta que mais se aproxima do vento observado no seu instante de interesse. A Tabela 18 que se segue apresenta os valores de vento considerados nas simulações.

Tabela 18 – Diferentes regimes de vento considerados nas simulações de geração dos protótipos das Cartas de Correntes de Maré para BTS

CENÁRIO SIMULADO	VENTO CONSIDERADO
Calmaria	Vento nulo
Tempo Bom	Sentido E com intensidade 9 m/s
Entrada de Frente Fria	Sentido S com intensidade 5 m/s

Esses valores representam, de modo geral, o vento reinante em cada cenário simulado, i.e., o vento mais freqüente. Os dados foram extraídos de análises do clima de ondas, realizados por ocasião do estudo da dinâmica de sedimentos na BTS realizado em 2003, pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ (ROSMAN, 2003).

Ressalta-se que os diferentes regimes de vento considerados nas simulações de geração das cartas são permanentes no tempo e uniformes no espaço. Essa aproximação é válida para o caso da BTS, tendo em vista o papel secundário desempenhado pelos ventos na circulação no interior da BTS, conforme explicado mais detalhadamente no tópico que se segue.

Seguindo o proposto inicialmente por Cavalcante e Maluf (2006), além de informações promediadas na vertical (2DH), as Cartas de Correntes também irão oferecer informações em níveis específicos distribuídos ao longo da coluna d'água. Assim sendo, analogamente ao já realizado nas fases de calibração e validação, foi empregada a modelagem tridimensional (3D) acoplada à modelagem bidimensional em planta (2DH).

A gravação de resultados em níveis específicos para geração de mapas nos modelos 3D do SisBaHiA pode ser feita de duas formas: em relação à superfície livre instantânea local ou em relação à coluna d'água. Assim sendo, o usuário poderá definir uma profundidade (em metros), referenciada à superfície livre local ( $\zeta$ ) ou poderá definir um nível sigma em termos percentuais da coluna d'água total (H).

Para gravação de resultados, foram escolhidas as profundidades de 0,5, 3, 6 e 10 m em relação à superfície livre e nível Z “19 abaixo” correspondente a 95% da coluna d'água<sup>20</sup>. O intervalo de tempo de gravação dos resultados espaciais é de 3600 s, ou seja, a cada hora cheia serão gravados resultados para geração de mapas.

## 8.1 Interferência dos ventos nas correntes

Visando avaliar o grau de influência dos diferentes regimes de vento nos resultados de correntes 2DH obtidos pelo modelo, foram elaborados os mapas das Figuras 80 e 81. Os mapas apresentam, respectivamente, uma situação próxima a meia-maré enchente de sizígia e uma situação de maré enchente de quadratura, 1h após a ocorrência da BM. A escolha dos instantes de tempo dos mapas foi feita de modo a apresentar duas situações extremas: a primeira de correntes mais intensas e a segunda de correntes mais fracas.

---

<sup>20</sup> O nível “19 abaixo” corresponde a 95% da coluna d'água porque optou-se por definir 21 níveis de cálculo ao longo da coluna d'água. Sendo assim, cada nível sigma corresponde a uma camada de 5% do total da coluna d'água.

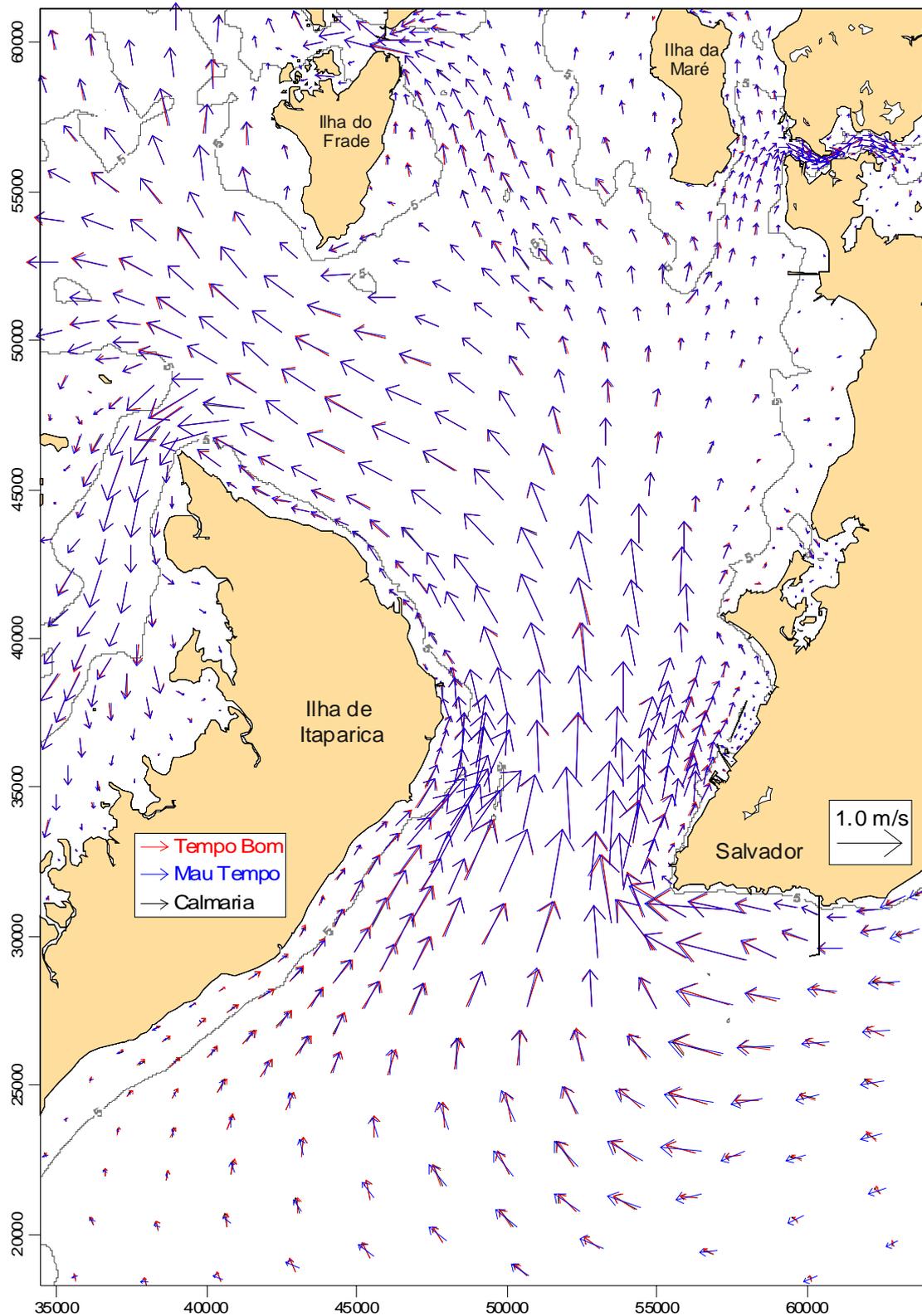


Figura 80 – Campos de velocidade 2DH calculados pelo modelo relativos aos três regimes de vento considerados nas simulações de geração das Cartas: vento de tempo bom (E com 9 m/s), entrada de frente fria (S com 5 m/s) e calmaria (vento nulo). O instante de tempo corresponde a uma situação de meia-maré enchente de sizígia no Canal de Salvador.

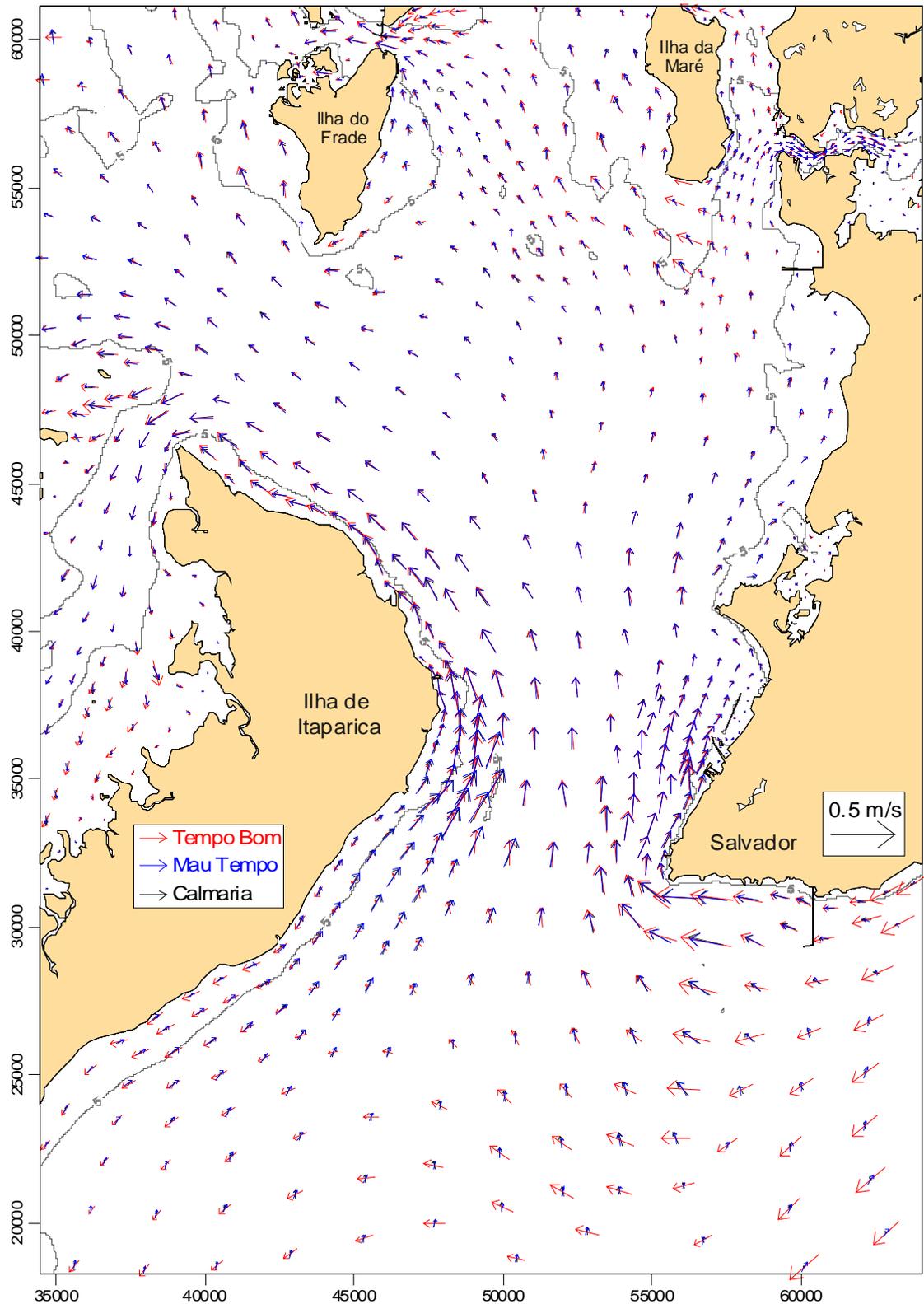


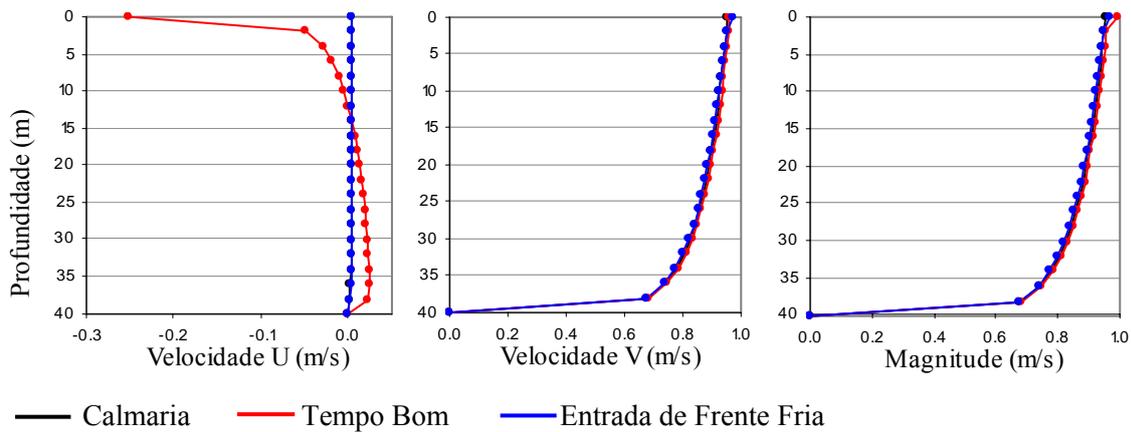
Figura 81 – Campos de velocidade 2DH calculados pelo modelo relativos aos três regimes de vento considerados nas simulações de geração das Cartas: vento de tempo bom (E com 9 m/s), entrada de frente fria (S com 5 m/s) e calmaria (vento nulo). O instante de tempo corresponde a uma situação de maré enchente de quadratura no Canal de Salvador.

Pela análise dos mapas acima, verifica-se, tanto na época de sizígia como na de quadratura, que, de modo geral, não ocorrem modificações relevantes, no interior da BTS entre os padrões de correntes 2DH obtidos com os três regimes distintos de vento considerados. Modificações mais visíveis podem ser observadas na ocorrência de correntes mais fracas nas regiões mais rasas (com batimetria inferior a 5 m) e na região oceânica de plataforma. Correntes associadas à calmaria (seta de cor preta nos dois mapas acima) chegam a ser de difícil identificação, devido à aparente superposição com as setas azuis (representativas das correntes sob condições de entrada de frente fria) na escala de representação utilizada.

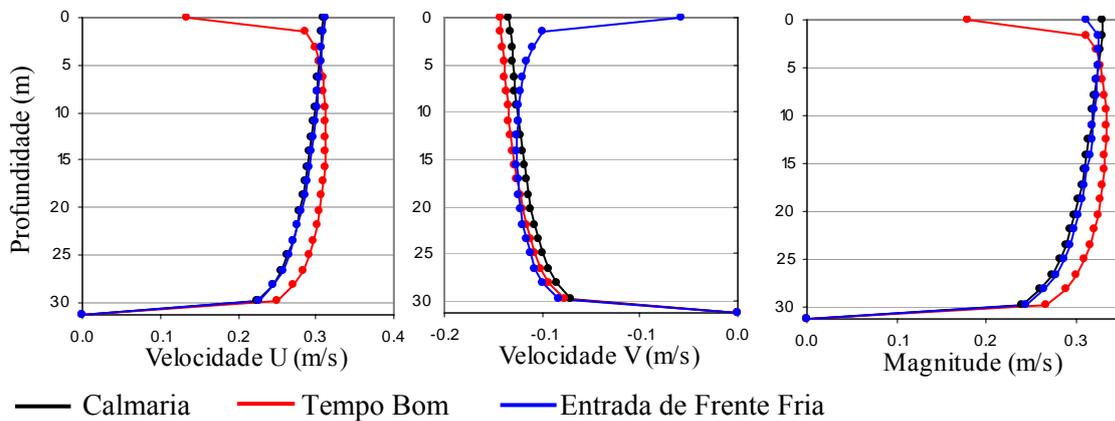
Uma vez que as Cartas de Correntes também irão oferecer informações em níveis específicos distribuídos ao longo da coluna d'água (por meio do uso da modelagem 3D) buscou-se avaliar o grau de influência dos diferentes regimes de vento nos perfis verticais de velocidades de correntes. Assim sendo, foram elaborados os gráficos das Figuras 82 e 83.

Analogamente aos mapas das Figuras 80 e 81 acima, os conjuntos de gráficos que se seguem apresentam uma situação de meia-maré enchente de sizígia e uma situação de maré enchente de quadratura, 1h após a ocorrência da BM.

Estação 08 – Canal de Salvador  
Perfis Verticais de Velocidade



Estação 03 – Baía do Aratu  
Perfis Verticais de Velocidade



Estação 15 – Norte da Ilha do Frade  
Perfis Verticais de Velocidade

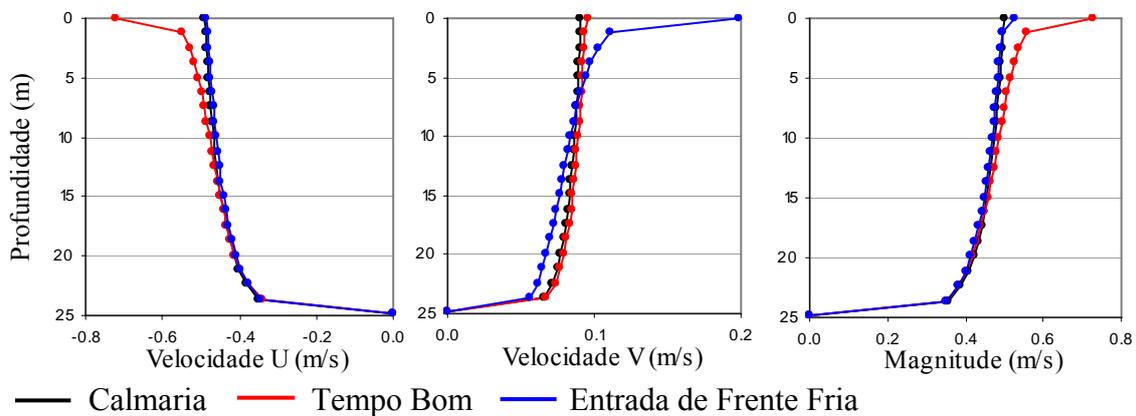
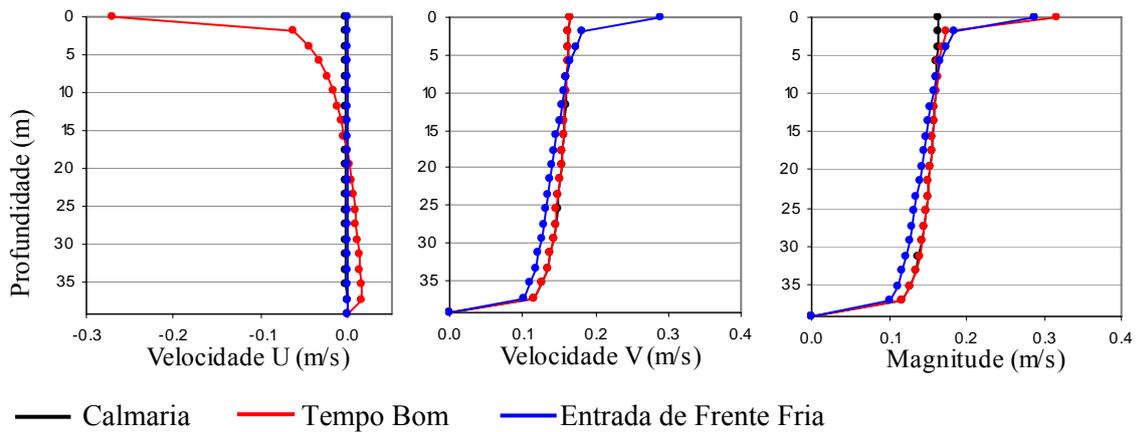
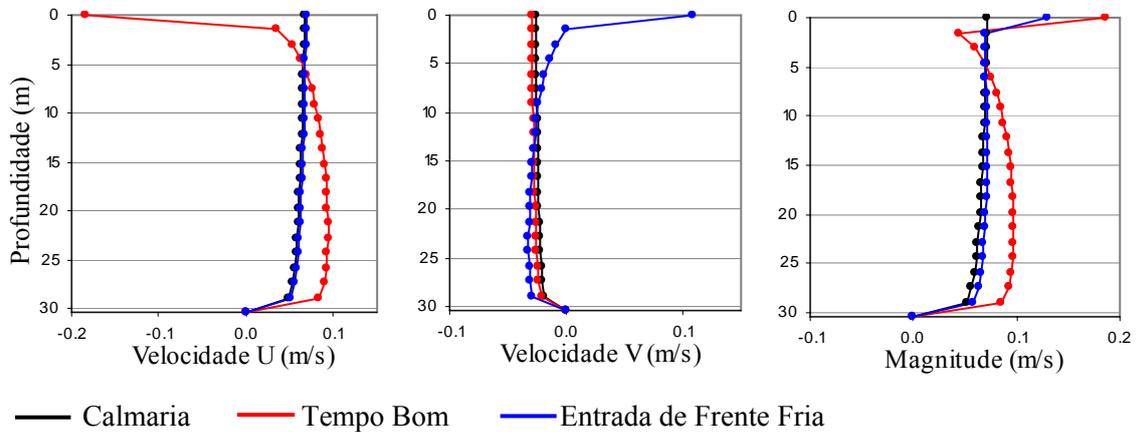


Figura 82 – Perfis verticais de correntes obtidos pelo modelo nas simulações de geração das Cartas de Correntes. Os locais de análise apresentados são os correspondentes às estações 08, 03 e 15. O instante de tempo das plotagens é o mesmo da Figura 80, corresponde a uma situação de meia-maré enchente de sizígia no Canal de Salvador.

Estação 08 – Canal de Salvador  
Perfis Verticais de Velocidade



Estação 03 – Baía do Aratu  
Perfis Verticais de Velocidade



Estação 15 – Norte da Ilha do Frade  
Perfis Verticais de Velocidade

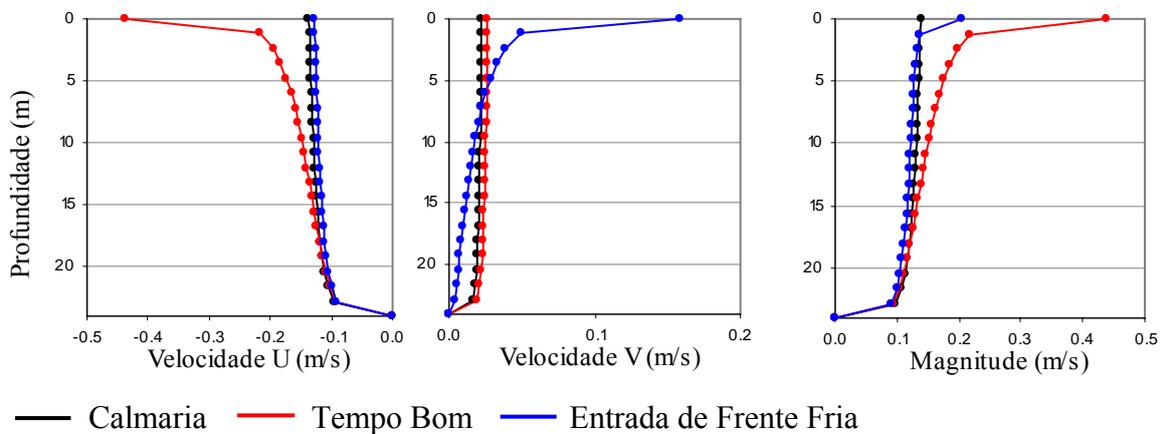


Figura 83 – Perfis verticais de correntes obtidos pelo modelo nas simulações de geração das Cartas de Correntes. Os locais de análise apresentados são os correspondentes às estações 08, 03 e 15. O instante de tempo das plotagens é o mesmo da Figura 81, corresponde a uma situação de maré enchente de quadratura no Canal de Salvador.

Analisando os gráficos anteriores, podemos constatar que as maiores diferenças entre os padrões de correntes associados aos três regimes de vento considerados são percebidas apenas nas camadas superficiais do escoamento e na ocorrência de correntes mais fracas. No instante de meia-maré de sizígia (Figura 82), são notadas alterações mais relevantes nos perfis verticais de velocidade aproximadamente nos dois primeiros metros da coluna d'água. No instante de maré quadratura (Figura 83), as alterações dos perfis verticais de velocidade mais relevantes podem ser percebidos aproximadamente até os 5 primeiros metros da coluna d'água. Destaca-se, durante a maré de quadratura, a ocorrência de inversão do perfil na estação S03, localizada no Canal do Cotegipe, no acesso à Baía do Aratu.

## **8.2 Interferência de variações do NMM nas correntes**

Há de se considerar que a incidência do vento local sobre a superfície livre pode proporcionar o empilhamento ou rebaixamento do nível d'água em função de seu sentido de incidência. Esse fenômeno somado a efeitos remotos de maré meteorológica e variações da pressão atmosférica ocasionam variações de nível médio do mar (NMM). Xavier (2002) analisou as alterações provocadas por esses efeitos em cinco estações distribuídas pela BTS, usando dados das campanhas de verão e inverno de 1999. Em ambas as campanhas, os resultados apresentaram flutuações do NMM com períodos de oscilação variando entre 8 e 10 dias, com amplitudes médias de 5 cm no verão e 10 cm no inverno. Resultado semelhante foi obtido também por Cirano e Lessa (2007).

Considerando que variações de níveis decorrentes da onda de maré na BTS possuem período aproximado de 12,4 h e amplitudes médias da ordem de 1 metro, as flutuações de NMM decorrentes de efeitos meteorológicos correspondem, respectivamente no verão e no inverno, a 5% e 10% desse valor. Relembrando que as correntes são predominantemente forçadas por variações de níveis no interior da BTS, há de se admitir que, em função da acurácia requerida para representação de correntes em um documento de auxílio à navegação, o fato de se prescrever um vento permanente e uniforme e negligenciar efeitos meteorológicos constituem uma boa aproximação para o caso da BTS.

### 8.3 Interferência de correntes residuais

Xavier (2002) e Cirano e Lessa (2007) analisaram dados coletados na BTS durante as campanhas de verão e inverno de 1999 e constataram que as velocidades de correntes residuais no interior da BTS não excederam 0,05 m/s, apresentando comportamento similar em ambos os conjuntos de dados analisados. Cirano e Lessa (2007) observaram também, em um ponto de medição localizado entre a Ilha de Itaparica e a Ilha do Frade, que efeitos relacionados à circulação gravitacional ocasionaram correntes residuais em direções opostas na superfície e no fundo, na ordem de 0,05 m/s.

Tendo em vista os propósitos do presente trabalho, as pequenas alterações provocadas pelas correntes residuais nas magnitudes das correntes instantâneas puderam ser desprezadas.

### 8.4 Resumo da coerência dos resultados obtidos com características da circulação interna na BTS

A análise de resultados do modelo obtidos nas simulações de geração das Cartas de Correntes, validação e calibração demonstra a obtenção de alguns resultados já esperados, os quais corroboram o conhecimento disponível na literatura a respeito da circulação interna da BTS (cf. LESSA *et al.*, 2001, XAVIER, 2002, CIRANO e LESSA, 2007). Podemos citar:

- a circulação no interior da BTS é predominantemente forçada pelas marés, tendo os ventos locais papel secundário sobre a circulação na maior parte interior da BTS. Em geral, os perfis verticais de velocidade não apresentam variação significativa ao longo da coluna d'água. Maiores alterações provocadas pelo vento são notadas apenas no escoamento superficial, atingindo, no máximo, os primeiros 5 m da coluna d'água. Nas regiões mais rasas (de batimetria inferior a 5 m) e na ocorrência de correntes menos intensas (inferiores a 0,25 m/s), o vento passa a ter papel mais importante na medida em que a profundidade vai reduzindo. Na área da plataforma oceânica, as correntes passam a sofrer maior influência do vento;

- as correntes de maré no interior da baía apresentam sentido predominantemente unidirecional com sentidos alternantes. Nas estações analisadas em ambos os cenários (verão e inverno de 1999), localizadas em canais de acesso, as correntes apresentaram uma direção dominante orientada de acordo com o eixo axial dos canais, sendo responsável por cerca de 80% da magnitude total das correntes. Uma componente secundária ortogonal, responsável por cerca de 20% da magnitude total das correntes, gera uma dispersão lateral de correntes;

- maiores intensidades de correntes foram obtidas nas seguintes localidades em ordem decrescente de magnitudes:

- Canal de Salvador;
- Região localizada entre o Banco de Santo Antônio e a costa de Salvador;
- Canal de Itaparica; e
- Regiões de estrangulamento do escoamento como: Canal do Paraguaçu, canal ao norte da Ilha do Frade e Canal do Cotegipe.

O máximo valor de magnitude de correntes 2DH obtido nas simulações foi de 1,35 m/s, no Canal de Salvador, em um instante de meia-maré vazante de sizígia. O fato das maiores intensidades de correntes serem obtidas por ocasião das vazantes corrobora a tendência de vazante dominante encontrada na embocadura. O fato dos picos de correntes serem observadas nas proximidades do instante de ocorrência da meia-maré indica que a BTS é, em sua maior parte, um corpo d'água com onda de maré tendendo a ser predominantemente estacionária;

- em geral, as correntes na maior parte da BTS são fracas (inferiores 0,5 m/s) e não apresentam variação sazonal significativa. Em situação de maré de quadratura, as correntes obtidas apresentaram velocidades aproximadamente 40% inferiores às observadas em situação de maré de sizígia. Correntes mais fracas foram obtidas na região nordeste da BTS, apresentando altas probabilidades de magnitudes inferiores a 0,25 m/s (ou  $\frac{1}{2}$  nó). Também se enquadram nesse cenário as regiões dos portos principais de Aratu e Salvador, demonstrando que esses recintos são áreas abrigadas de correntes e, portanto, favoráveis para manobras e permanência de navios. Maiores



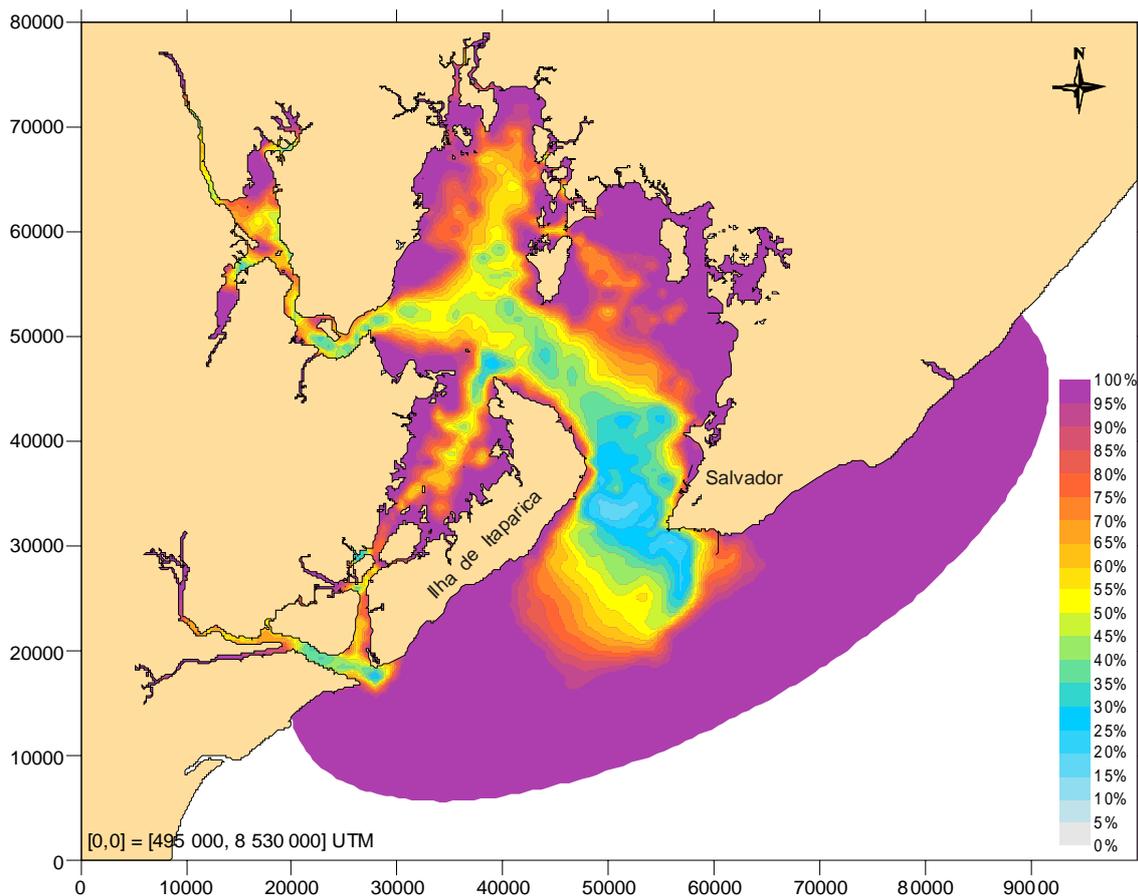


Figura 85 – Porcentagem de probabilidade de ocorrência de correntes de maré com magnitudes inferiores a 0,25 m/s no interior da BTS, em uma situação de calmaria.

- quanto às variações de níveis, a análise dos dados evidenciou que a principal forçante da circulação no interior da baía é a maré astronômica, sendo a componente  $M_2$  responsável por cerca de 83% de toda a energia associada a maré. A componente  $S_2$  (segunda mais importante) é responsável por cerca de 12% (cf. subitem 7.1.1.2 - pág. 76). A onda de maré é amplificada ao longo de sua propagação para o interior da baía, apresentando, em seu extremo norte, nas proximidades da desembocadura do Rio Subaé, alturas de maré aproximadamente 40% maiores do que as existentes na região oceânica adjacente; e

- o fato de se negligenciar o efeito da componente meteorológica no comportamento das correntes instantâneas constitui uma boa aproximação para o caso de estudo de correntes no interior da BTS. Isso se deve à pequena contribuição dos efeitos meteorológicos na magnitude das correntes interiores e por se tratar de um fenômeno de período relativamente longo quando comparado com o período da onda de maré. O

mesmo não tem validade para o estudo de correntes na área da plataforma oceânica adjacente à BTS, uma vez que essa região é bastante afetada por efeitos meteorológicos, sejam esses efeitos locais ou de mesoescala.

## 9. APRESENTAÇÃO DAS CARTAS DE CORRENTES

Este capítulo apresenta o produto final da metodologia aqui proposta – o protótipo das Cartas de Correntes de Maré. Diversas são as formas e métodos de apresentação dos resultados de dados oceanográficos em função das diferentes classes de usuários e das características da informação que se pretende oferecer. Optou-se aqui por apresentar os dados de correntes seguindo padronização básica semelhante às Cartas de Correntes atualmente em vigor, a menos das seguintes modificações introduzidas:

- 1) As velocidades das correntes representadas irão corresponder a um dia específico e a um instante de hora cheia definidos pelo usuário, e não mais corresponderão a intervalos de tempo referidos ao instante da preamar. Assim sendo, deixarão de existir os ábacos e tabelas para cálculo do fator de correção das intensidades de correntes (cf. Figura 8 - pág. 20 e Figura 9 - pág. 21);
- 2) As intensidades das correntes serão representadas por escalas de cores e não mais por números posicionados sobre as setas conforme ocorre nas Cartas atualmente em vigor, e.g. Figuras 6 e 7 (ambas na pág. 19). O tamanho da seta será proporcional à raiz quadrada da intensidade da corrente;
- 3) O espaçamento entre setas representativas das correntes será bem mais reduzido, de modo a oferecer maior riqueza e detalhamento das informações ao usuário. Faz-se necessário ressaltar que essa representação das setas é apenas uma das possibilidades do modelo. Pode-se ainda aumentar ou reduzir a densidade de informação, selecionando-se quantos nós da malha e/ou pontos intermediários entre nós terão suas respectivas setas apresentadas; e
- 4) Para cada instante de tempo data-hora definido pelo usuário, existirão diferentes profundidades a serem escolhidas pelo usuário e, para cada profundidade, existirão diferentes regimes de vento a serem escolhidos.

Os mapas das Figuras 86 a 90 que se seguem apresentam o protótipo das Cartas de Correntes de Maré da BTS e demais regiões de interesse no interior da baía. As escalas indicadas nos mapas são escalas sugeridas para construção das Cartas.

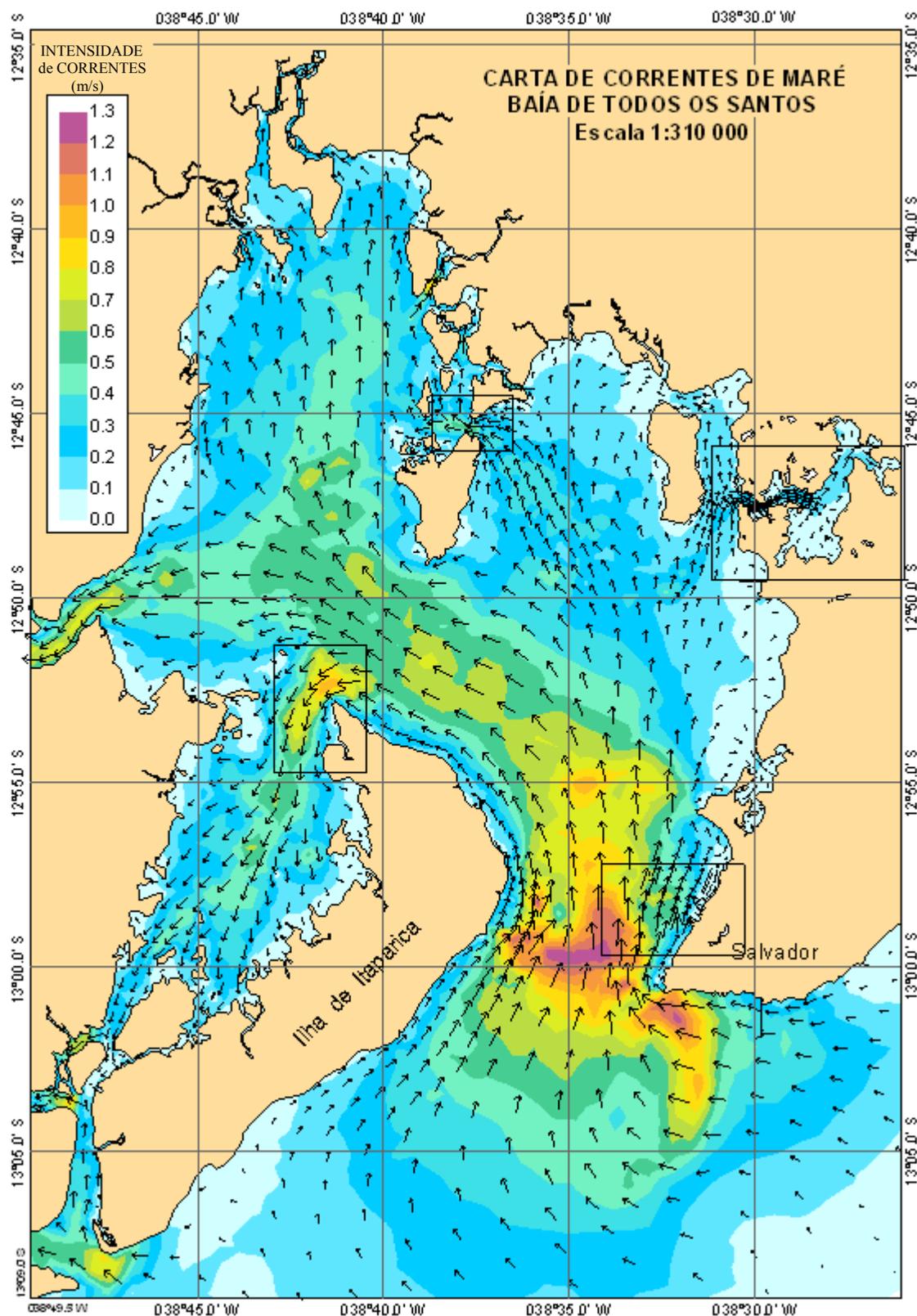


Figura 86 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para Baía de Todos os Santos referente às 3h do dia 19/jan/1999 (1h após a meia-maré enchente de sizígia no Canal de Salvador ou 2h antes da PM) com correntes promediadas na vertical (2DH) e regime de vento de calmaria. A fim de não densificar demasiadamente as setas representativas da direção das correntes, optou-se por posicionar apenas uma seta no centro de cada elemento da malha de discretização.

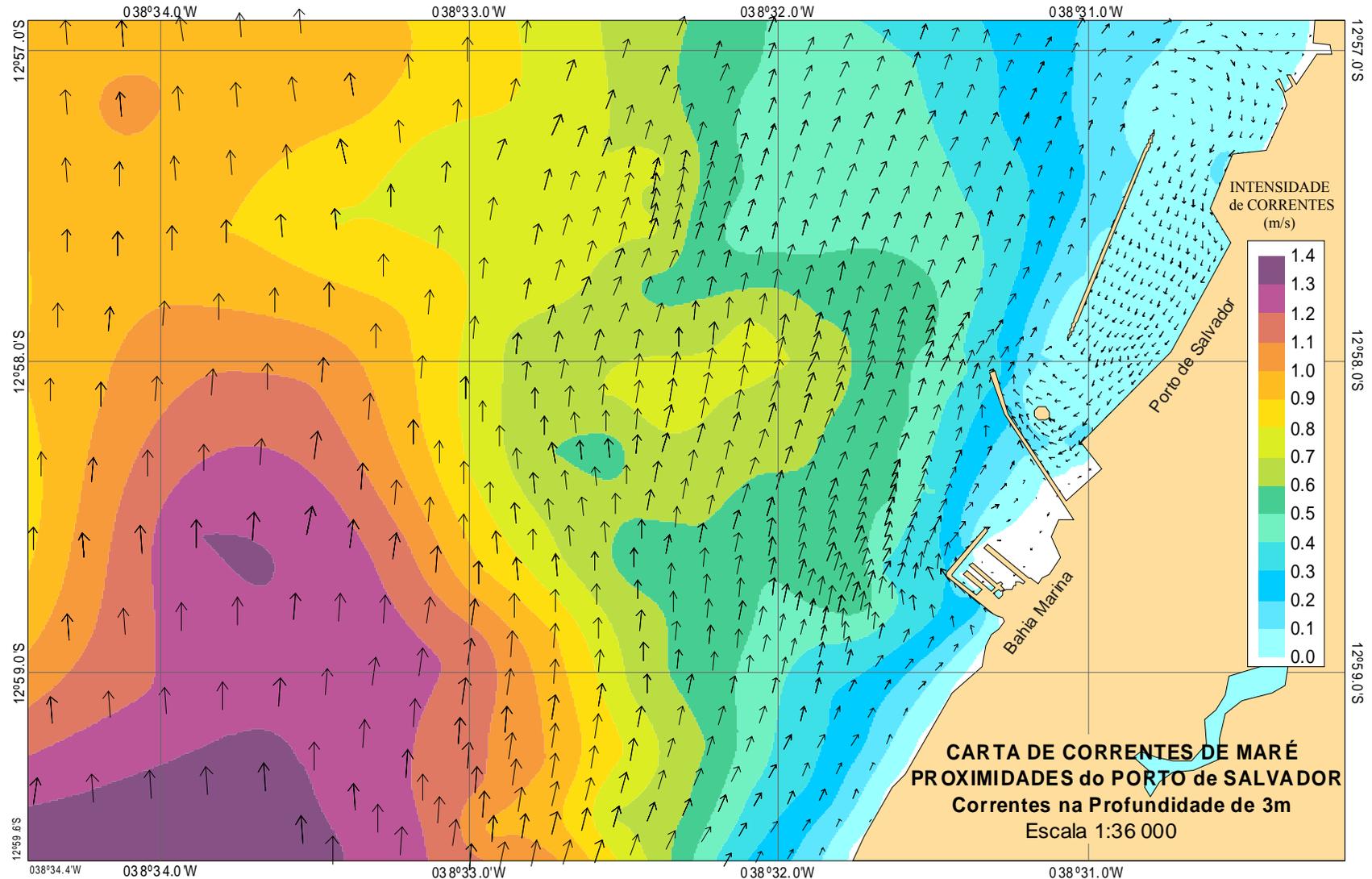


Figura 87 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para as proximidades do Porto de Salvador referente às 3h do dia 19/jan/1999 (1h após a meia-maré enchente de sizígia no Canal de Salvador ou 2h antes da PM), com correntes na profundidade de 3 m e regime de vento de calmaria. Nas regiões sem preenchimento (cor branca) não foram representadas correntes, por se tratarem de profundidades inferiores a 3 m.

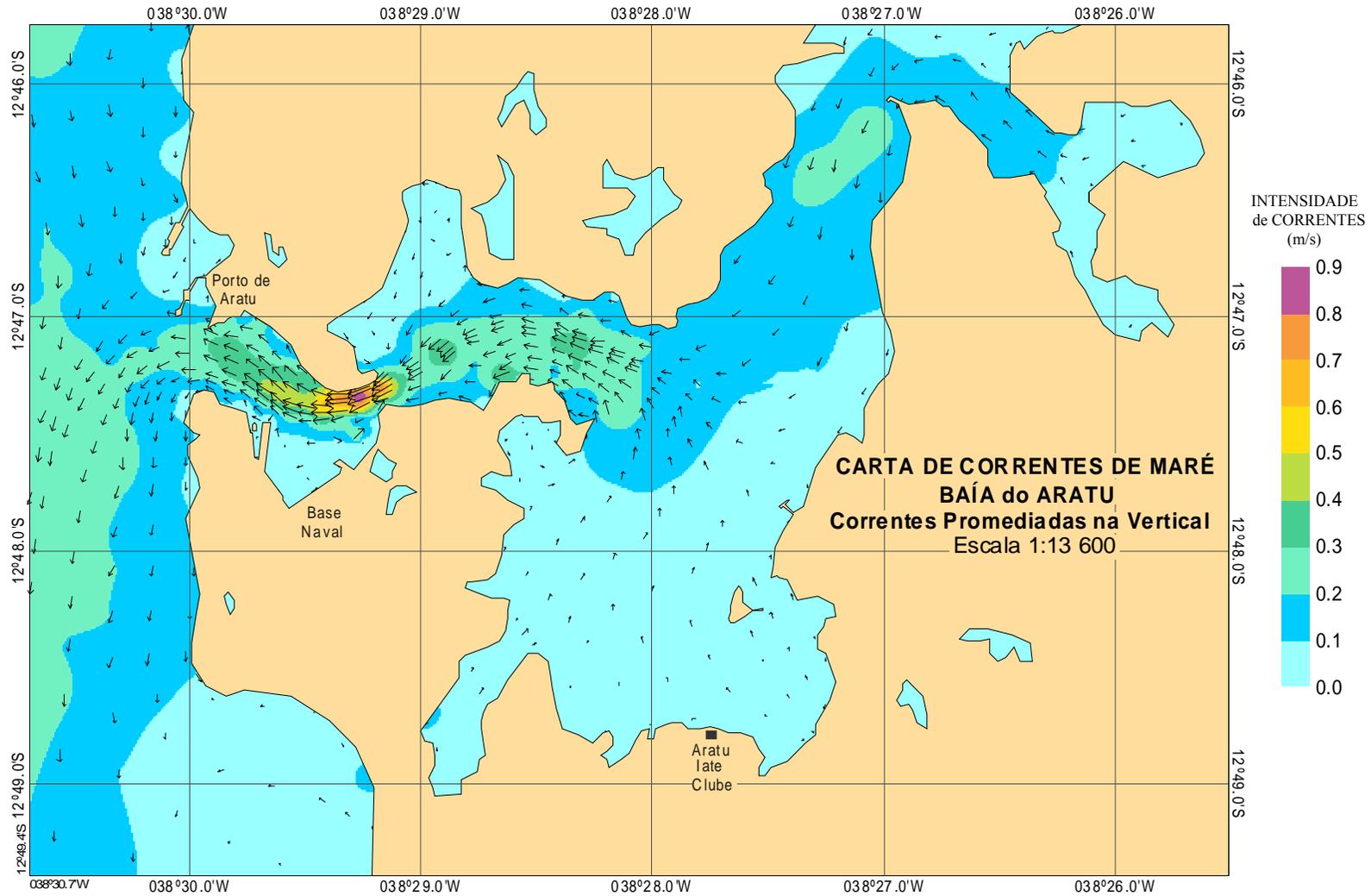


Figura 88 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré da Baía do Aratu referente às 20h do dia 19/jan/1999 (instante de meia maré vazante de sizígia no Canal do Cotegipe), com correntes promediadas na vertical e regime de vento de entrada de frente fria. Percebe-se que as intensidades de correntes são bastante baixas na maior parte da Baía do Aratu, com exceção do Canal do Cotegipe.

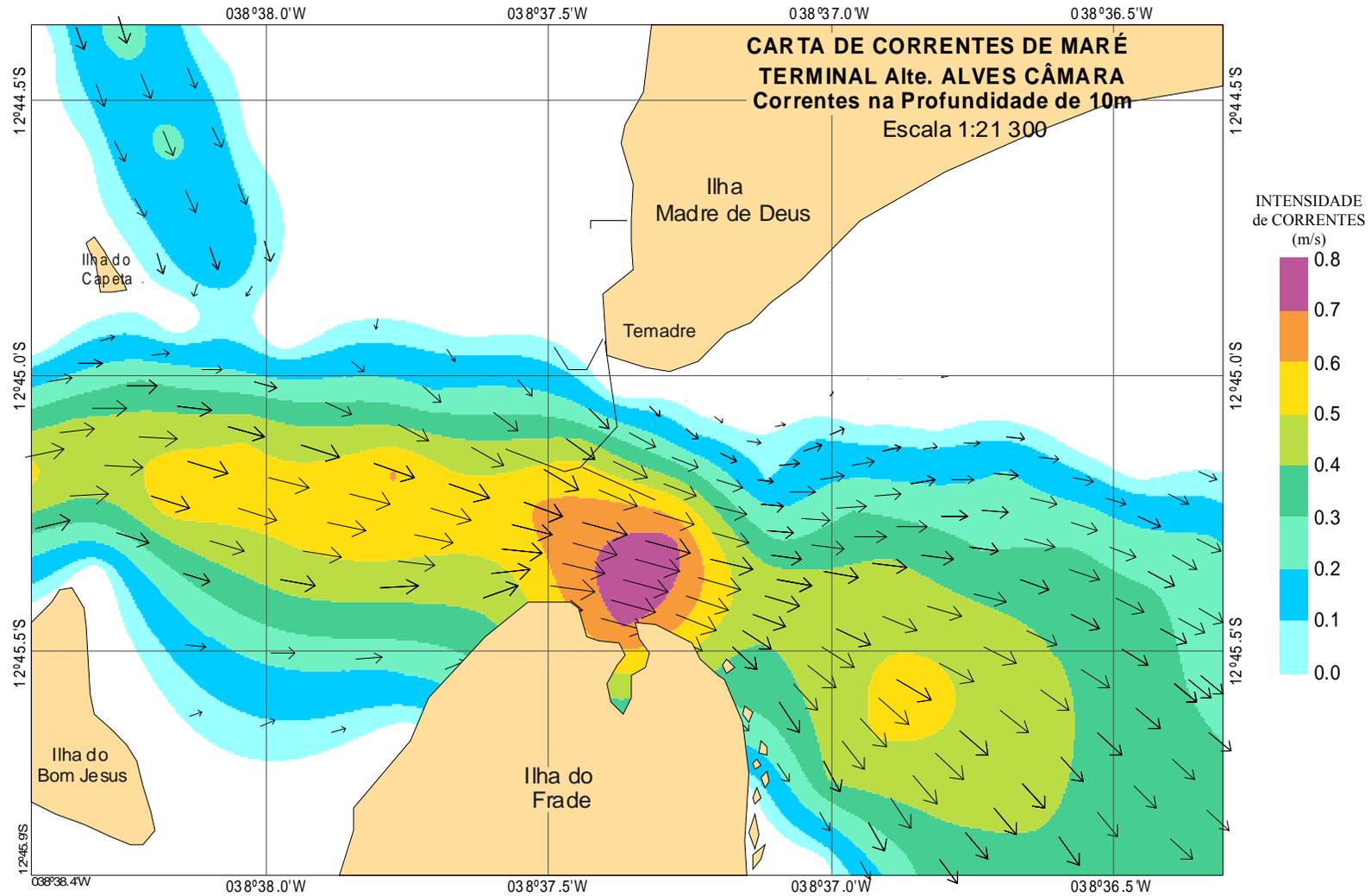


Figura 89 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para as proximidades do Terminal Marítimo Almirante Alves Câmara (Temadre), na Ilha Madre de Deus, referente às 19h do dia 19/jan/1999 (1h antes da meia-maré vazante de sizígia no Temadre ou 2h após a PM), com correntes na profundidade de 10 metros e regime de vento de tempo bom. Nas regiões sem preenchimento (cor branca) não foram representadas correntes, por se tratarem de profundidades inferiores a 10 metros.

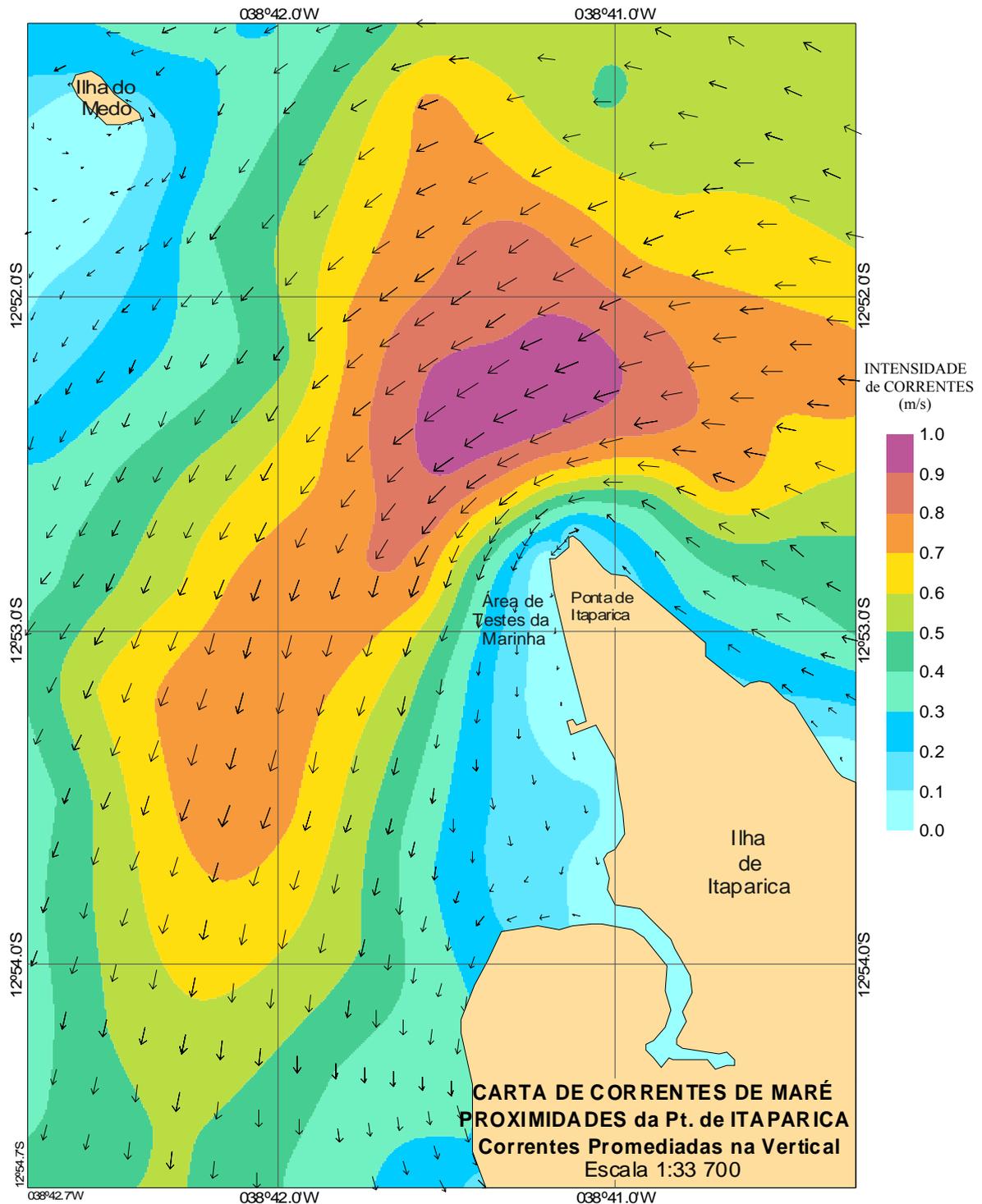


Figura 90 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré das proximidades da Ponta de Itaparica referente às 3h do dia 19/jan/1999 (1h após a meia-maré enchente de sizígia no Canal de Salvador ou 2h antes da PM), com correntes promediadas na vertical e regime de vento de calmaria.

Visando destacar o caráter prognóstico das Cartas de Correntes, a Figura 91 que se segue apresenta o padrão de correntes previstas para 14h do dia 13 de março de 2009 - instante previsto para a apresentação deste trabalho.

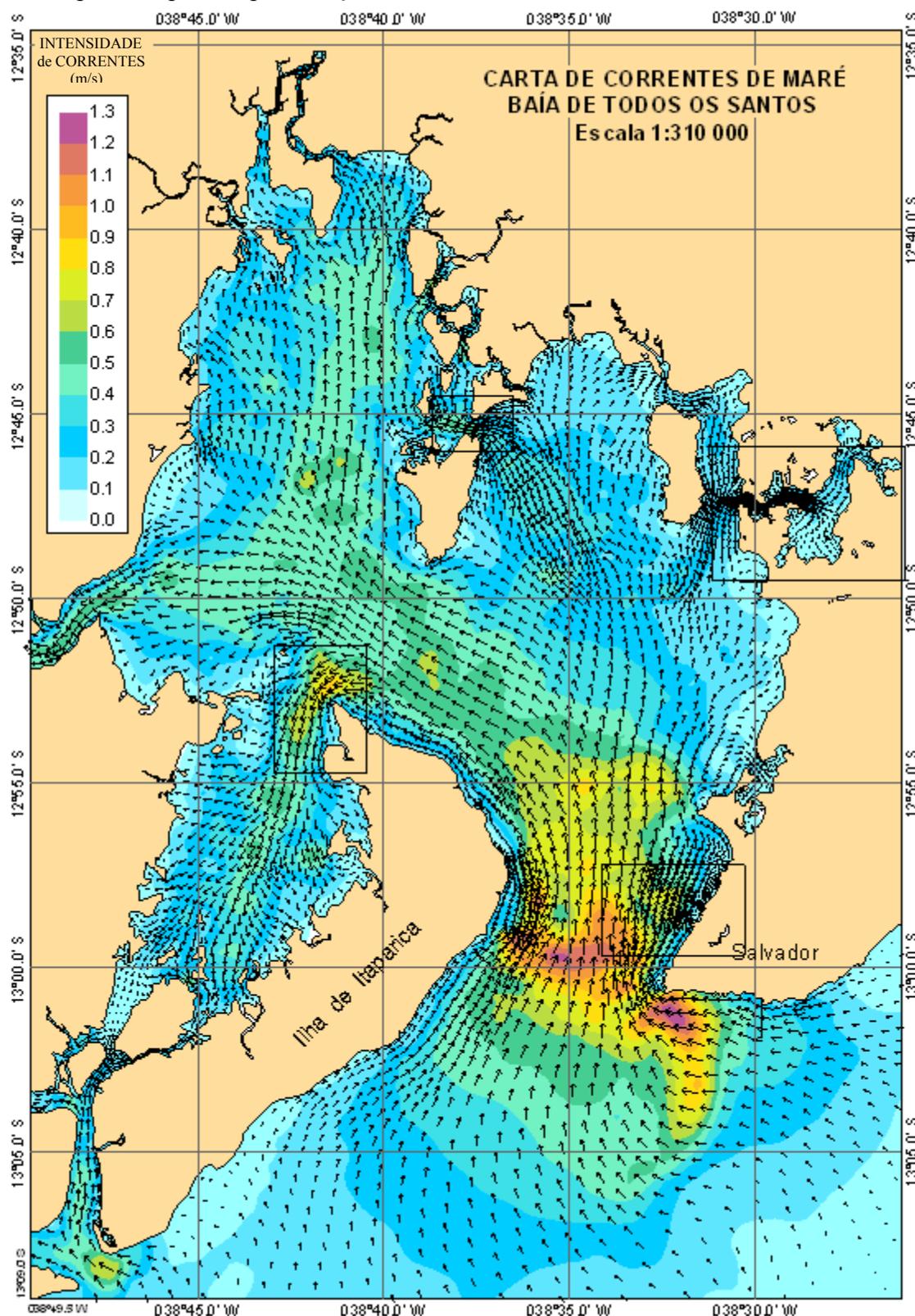


Figura 91 – Protótipo da Carta de Correntes de Maré para Baía de Todos os Santos referente às 14h do dia 13/mar/2009 (3h antes da PM) com correntes 2DH e regime de vento de calmaria. Optou-se por posicionar setas em pontos intermediários dos nós da malha de discretização.

## 10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A metodologia apresentada neste trabalho permite dar suporte ao desenvolvimento de novas Cartas de Correntes de Maré. O uso da modelagem numérica computacional permitiu produzir, satisfatoriamente, protótipos para geração das Cartas. Com base nos resultados obtidos nas fases de calibração e validação do modelo hidrodinâmico, podemos esperar uma acurácia na ordem de 13% para correntes promediadas na vertical e na ordem de 16% para correntes em profundidades específicas. Para alturas de onda de maré, a acurácia esperada é na ordem de 5%.

Imaginemos um exemplo prático, em uma situação na qual uma embarcação esteja navegando em uma área da Carta de Correntes onde encontre uma indicação de intensidade de correntes 2DH de 1 m/s (ou aproximadamente 2 nós). Esse navegante deverá encontrar de fato na natureza intensidades de correntes entre 0,87 e 1,13 m/s (ou entre 1,7 e 2,2 nós). Caso o interesse seja em determinada profundidade específica, a margem de segurança é ampliada para valores entre 0,84 e 1,16 m/s (ou entre 1,6 e 2,3 nós aproximadamente).

Melhores concordâncias entre dados de correntes medidos em campo e resultados calculados pelo modelo foram obtidas no Canal de Salvador. Piores concordâncias foram obtidas ao norte da Ilha do Frade (proximidades do Terminal Marítimo Almirante Alves Câmara) e no Canal do Cotegipe (ligação da BTS com a Baía do Aratu). De modo geral, os resultados obtidos pelo modelo nas simulações de calibração, validação e geração das Cartas de Correntes apresentam coerência com o conhecimento disponível a respeito da circulação interna da BTS.

Os principais fatores que contribuíram para discrepâncias observadas entre dados medidos em campo e resultados do modelo estão associados a dificuldades de reprodução da complexa batimetria da região ao redor das estações e geometria da linha de costa; aproximações impostas na prescrição de níveis da fronteira aberta por meio do uso de constantes harmônicas de maré; imprecisões dos dados básicos de entrada

fornecidos ao modelo; e, indícios de mau funcionamento encontrados em alguns equipamentos de medição.

Quanto às imprecisões dos dados básicos de entrada fornecidos ao modelo, destaca-se que os dados de nível não incorporam efeitos remotos associados à circulação, assim como também não são consideradas forçantes termo-halinas e nem variações sazonais de ventos e vazões.

A circulação no interior da BTS, assim como em muitas outras baías, é fortemente influenciada pela topografia do fundo e geometria do corpo d'água. Assim sendo, o rigor na prescrição dos dados batimétricos é fundamental para a obtenção de bons resultados. Porém, apenas isso não se faz suficiente, requer-se também um refinamento da malha de discretização compatível com o grau de detalhamento da topografia de fundo desejado pelo modelador.

O preciso posicionamento das estações, tanto durante a fase de coleta dos dados de campo como durante a fase de modelagem, também é fundamental. Visto que, em locais com acentuados gradientes batimétricos, pequenos desvios no posicionamento das estações (na ordem de algumas dezenas de metros) podem acarretar grandes discordâncias entre dados de campo e resultados do modelo.

Um dos maiores desafios da modelagem atual é, sem dúvida, o rigor na prescrição dos dados para condições de contorno da fronteira aberta. No presente trabalho, foram prescritas variações de níveis gerados pela maré prevista com as constantes harmônicas da estação maregráfica Garcia D'Ávila. Considera-se o uso de maré prevista o método mais recomendável para geração de prognósticos de correntes de maré. Entretanto, as constantes harmônicas utilizadas são oriundas de uma estação localizada a cerca de 38 km a nordeste do extremo leste do contorno aberto (cf. Figura 18 na pág. 59) e foram obtidas por meio da análise harmônica de uma série de dados coletados durante 32 dias no ano de 1962. Certamente, esses fatores acarretam incertezas nos dados de entrada fornecidos ao modelo, as quais, comumente, são amplificadas nos dados de saída.

Uma alternativa, que decerto muito melhoraria a qualidade dos resultados obtidos, embora um pouco mais dispendiosa, seria programar uma nova campanha de campo

com propósito específico de produzir Cartas de Correntes. Nessa campanha, seriam realizadas medições correntométricas e maregráficas em locais estratégicos em função do foco de interesse do trabalho e das exigências de modelagem.

Por ocasião do planejamento de futuras campanhas de campo, caso a série de maré empregada na geração das constantes harmônicas para fronteira aberta não seja uma série recente, i.e., medida nos últimos 10 anos, sugere-se a reocupação da estação maregráfica (ou a instalação de novas estações) e a medição de série de dados por período mínimo de 32 dias. Caso opte-se pela instalação de novas estações, recomenda-se a medição precisa de dados nas proximidades dos limites costeiros extremos da fronteira aberta ou na área oceânica da plataforma adjacente ao corpo d'água. O fato de instalar duas estações em pontos extremos do contorno aberto permitirá também melhor estimativa para o cálculo das diferenças de fase ao longo dos nós componentes da fronteira aberta. Seria desejável a operação permanente desses marégrafos, de modo a possibilitar uma constante atualização dos dados.

Para coleta de dados de correntometria, sugere-se instalar estações destinadas à calibração e validação do modelo, nas principais áreas de interesse em navegação, assim como no interior de recintos portuários e suas vias de acesso. Na medida do possível, seriam interessantes pontos de medição dentro das áreas reservadas para manobra, regiões em que os navios estão mais vulneráveis à ação das correntes, em virtude das baixas velocidades de manobra. Recomenda-se, nessas regiões, o uso do ADCP fundeado, de modo a minimizar os riscos à navegação intensa nessas áreas.

Outra vantagem oferecida pelo uso do ADCP na medição de correntes é a possibilidade do uso de tecnologia mais recente na medição de correntes em vários níveis distribuídos pela coluna d'água. Isso oferece ao modelador a alternativa de escolher a profundidade na qual deseja aferir o modelo ou calcular correntes promediadas na vertical com maior precisão. Ressalta-se o fato de que, nas comparações realizadas entre correntes 2DH medidas em campo e resultados do modelo, as maiores concordâncias (na ordem de 91%) ocorreram nas estações que empregaram o ADCP (estações S08 e W08), ao passo que, nas demais estações que usaram correntógrafos eletromagnéticos/mecânicos instalados em níveis específicos da coluna d'água, as concordâncias entre correntes 2DH

estimadas para os dados de campo e resultados do modelo foram na ordem de 85% (cf. Tabela 14 na pág.103 e Tabela 17 na pág. 126).

Outra forma de se avaliar a coerência entre correntes medidas em campo e resultados obtidos pelo modelo seria a comparação entre componentes da análise harmônica das correntes de maré. Em função da quantidade de componentes com frequências próximas que se deseja separar na geração da análise harmônica, recomenda-se um período de monitoramento de dados com duração mínima de 29 dias, não disponível atualmente. Maiores informações sobre análise harmônica de correntes de maré podem ser encontrados em Franco (1988) e Cirano e Lessa (2007).

## **Perspectivas**

Relembra-se que a metodologia aqui proposta é a continuação de um grande passo inicial dado por Oliveira (1998), em seu trabalho intitulado “Geração de Cartas de Correntes de Maré em recintos portuários através de Modelagem Computacional”. Naturalmente, não se almeja esgotar o assunto do uso da modelagem para geração de Cartas de Correntes com a técnica apresentada. Há de se considerar que muito ainda pode ser feito para o aprimoramento e ampliação dessa metodologia, seja em função da necessidade de adequação a outras regiões de interesse no País, seja pelo surgimento de novas idéias ou mesmo pela inexorável evolução das ferramentas computacionais.

Poderíamos considerar como encerrada essa primeira etapa de atualização das Cartas de Correntes no momento em que fossem aprovadas para uso oficial as Cartas de Correntes Digitais da Baía de Todos os Santos ou da Baía de Guanabara – área de aplicação da metodologia proposta por Oliveira (1998). Posteriormente, as Cartas passariam por um processo de padronização internacional e seriam disponibilizadas para consulta pela *internet* ou para serem usadas como uma das camadas de informação das modernas Cartas Náuticas Eletrônicas.

Em todos os seguimentos da comunidade marítima, o uso de Cartas Náuticas Eletrônicas (ENC) tem se ampliado cada vez mais. Ressalta-se que a Marinha do Brasil, por meio da DHN, assumiu o compromisso de disponibilizar aos navegantes, até

dezembro de 2010, as ENC para a navegação em toda região das águas jurisdicionais brasileiras. O compromisso assumido é fruto de decisão tomada em maio de 2007, por ocasião da XVII Conferência Hidrográfica Internacional, realizada em Monte Carlo, Mônaco.

Conforme proposto inicialmente por Alves *et al.* (2008), as cartas de correntes de maré, produzidas pela metodologia aqui apresentada, poderiam ser utilizadas como uma das camadas de informação das atuais ENC. Dessa forma, o navegante poderia posicionar sua embarcação em tempo real dentro do campo de correntes previsto. Por serem baseadas em banco de dados, as informações de correntes geradas pelo modelo, seriam incorporadas juntamente com outras informações já disponíveis, tais como: Tábuas das Marés, Meteorologia, Lista de Faróis, Roteiros, Avisos aos Navegantes e etc. Maiores informações sobre ENC podem ser encontradas nos sítios [www.ic-enc.org](http://www.ic-enc.org) e [www.dhn.mar.mil.br](http://www.dhn.mar.mil.br).

Assim sendo, acredita-se que o presente trabalho tenha oferecido sua pequena parcela de contribuição para modernização e atualização das Publicações de Auxílio à Navegação e, por conseguinte, para garantia da segurança da navegação e salvaguarda da vida humana em águas jurisdicionais brasileiras.

## REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

ALFREDINI, P., 2005, *Obras e gestão de portos e costas*. 1 ed. São Paulo, SP, Edgard Blücher, 688 p.

ALVES, A.R.; FARIA, A.F.G; NEVES, P.C.N. *et al.*, 2008, “Modelagem Numérica Aplicada à Hidrografia”. In: *Anais Hidrográficos*, v. 64, pp. 71-76, Rio de Janeiro, RJ, set.2008.

ANTAQ, 2007, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, *Anuário Estatístico Portuário-2007*. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/Portal/Anuarios/Portuario2007/Pdf/Tabela21.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2009.

BOWDITCH, N., 1995, *The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation*. Bethesda, Maryland, USA, National Imagery and Mapping Agency, chapter 9, pp. 143-164. Disponível em: <<http://www.irbs.com/bowditch/pdf/chapt09.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2007.

BRITO, R.R.C., 2001, “A gestão da Baía de Todos os Santos”, *Revista Bahia Análise & Dados*, v. 11, n. 2 (set.), pp. 98-100, Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI), Salvador, BA. Disponível em: <[http://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=80&Itemid=110](http://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=110)>. Acesso em: 23 nov. 2007.

CAVALCANTE, M. F., MALUF, V. C., 2006, “Cartas Digitais de Corrente de Maré na Baía de Guanabara”. In: *Workshop de Meteorologia Marinha e Oceanografia*, 1., Rio de Janeiro, RJ, Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), jul. 2006.

CIRANO, M., LESSA, G.C., 2007, “Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25 (4), pp. 363-387, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v25n4/a02v25n4.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2008.

COPPE, 2007, Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE/UFRJ - Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica. *Manual do Usuário do SisBaHiA*. - rev. jun. 2007, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisbahia.htm>>. Acesso em: 16 nov. 2007.

COPPETEC, 2008, *Selecting sites for tidal current power extraction in Brazil* – relatório Coppetec PENO-11297. Rio de Janeiro, RJ, 26 p.

DEAN, R.G., DALRYMPLE, R.A., 1984, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 353p.

DHN, 1963, Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação, *Carta de Correntes de Maré – Porto de Madre de Deus*, Pub. DG-10-III-1, 1. ed., Niterói, RJ.

\_\_\_\_\_, 1974, *Carta de Correntes de Maré - Baía de Guanabara*, Pub. DG-10-VI-2, 1. ed., Niterói, RJ.

\_\_\_\_\_, 1975, *Carta de Correntes de Maré - Porto de Salvador*, Pub. DG-10-VII-1, 1. ed., Niterói, RJ.

\_\_\_\_\_, 1984, *Carta Náutica n.1110 - Baía de Todos os Santos*, 2. ed., Niterói, RJ.

\_\_\_\_\_, 2006, *Roteiro Costa Leste*, Pub. DH1-II-12, Corr.1-06, Niterói, RJ.

\_\_\_\_\_, 2008, *Carta 12000 - Símbolos, Abreviaturas e Termos usados nas Cartas Náuticas brasileiras*, Pub. INT 1, 3. ed., Niterói, RJ. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>>. Acesso em: 25 mai. 2008.

\_\_\_\_\_, 2009, *Tábuas de Marés para 2009*, Pub. ISSN 1415-1049, 1. ed., Niterói, RJ. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>>. Acesso em: 10 fev. 2009.

DYER, K. R., 1997, *Estuaries: A Physical Introduction*. 2 ed. Baffins Lane, Chichester, England, John Wiley & Sons, 193 p.

FRANCO, A. S., 1988, *Tides – Fundamentals, Analysis and Prediction*. 2 ed. São Paulo, SP, FCTH – Fundação Centro-Tecnológico de Hidráulica, 251 p.

GENZ, F., 2006, *Avaliação dos efeitos da barragem Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape*. Tese de D.Sc., Instituto de Geociências/UFBA, Salvador, BA, 245 f. Disponível em: <[http://www.pggeologia.ufba.br/FTP/tese/tex\\_200118414.pdf](http://www.pggeologia.ufba.br/FTP/tese/tex_200118414.pdf)> Acesso em: 13 nov. 2007.

GENZ, F., LESSA, G.C., CIRANO, M., 2008, “Vazão mínima para estuários: um estudo de caso no Rio Paraguaçu-BA”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, ABRH, v. 13, nº 3 (jul./set. 2008), pp. 73-82, Porto Alegre, RS. Disponível em: <<http://www.goat.fis.ufba.br/uploads/userfiles/22.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2009.

GROSS, M.G., 1990, *Oceanography: A View of the Earth*. 5 ed. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 441p.

LESSA, G.C., DOMINGUEZ, J.M.L, BITTENCOURT, A.C.S.P. *et al.*, 2001, “The tides and tidal circulation of Todos os Santos bay, northeast Brazil: a general characterization”. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 73, nº 2 (jun.), pp. 245-261, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>. Acesso em: 02 nov. 2007.

LIMA, G.M.P., LESSA, G.C., 2002, “The fresh-water discharge in Todos os Santos Bay (BA) and its significance to the general water circulation”, *Revista Pesquisas*, v. 28, n. 2, pp. 85-98, Porto Alegre, RS.

MALTA, F. S., 2005, *Estudo de Correntes de Maré do Complexo Estuarino da Baía de Guanabara, RJ*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 132 f. Disponível em: <[http://teses.ufrj.br/coppe\\_M/FernandaSiqueiraMalta.pdf](http://teses.ufrj.br/coppe_M/FernandaSiqueiraMalta.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2007.

MIGUENS, A.P., 1996, *Navegação: a Ciência e a Arte*. Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil, Niterói, RJ, v. 1, 358 p. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>>. Acesso em: 2 nov. 2007.

MIRANDA, L.B., CASTRO, B.M., KJERFVE, B., 2002, *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo, Edusp, 414 p.

MOTTA, V.M., 1978, *Processos Sedimentológicos em Estuários*, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

OLIVEIRA FILHO, F.N. de, 1974, *Relatório Final da Operação Salvador*. Aviso Hidrográfico Camocim/DHN, Rio de Janeiro, RJ, 33 p.

OLIVEIRA, L. A., 1998, *Geração de Cartas de Correntes em Recintos Portuários através de Modelagem Computacional*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 67 f.

PARKER, B., 2005, "Tides". In: Schwartz, M. L. (ed), *Encyclopedia of Coastal Science*. Washington, WA, USA, Springer, pp. 987-996. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/m0232n>>. Acesso em: 27 jun. 2008.

POND, S., PICKARD, G.L., 1983, *Introductory Dynamical Oceanography*, 2 ed. Oxford, U.K., Pergamon Press Ltd., 329 p.

PUGH, D.T., 1987, *Tides, Surges and Mean Sea-Level - A Handbook for Engineers and Scientists*, Swindon, U.K., John Wiley & Sons Ltd., 472 p.

ROSMAN, P.C.C., 1989, "Modelos de Circulação em Corpos D'água Rasos". In: SILVA, R.C.V.(ed.), *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, v. 1, cap. 3, Porto Alegre, RS, Associação Brasileira de Recurso Hídricos (ABRH), pp. 156-221.

\_\_\_\_\_, 1997, "Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos". In: SILVA, R.C.V.(ed.), *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, v. 3, cap. 3, Porto Alegre, RS, Associação Brasileira de Recurso Hídricos (ABRH), nov./97, pp. 231-343.

\_\_\_\_\_, (Coord.), 1999, *Modelos BTS – Primeiro Relatório de Calibração – Dados de Janeiro de 1999* – relatório Coppetec ET-170377. Rio de Janeiro, RJ, 80 p.

\_\_\_\_\_, MARTINS, R.P., CUNHA, C.N. et al., 2000, *Sistema BTS – Relatório de Calibração e Validação* – relatório Coppetec PENO-565. Rio de Janeiro, RJ, 192 p.

\_\_\_\_\_, (Coord.), 2003, *Modelagem computacional para análise de aspectos da dinâmica de sedimentos na Baía de Todos os Santos, BA* – relatório final Coppetec PENO-4145. Rio de Janeiro, RJ, 144 p.

ROSMAN, P.C.C., CUNHA, C.L.N., CABRAL, M.M. *et al.*, 2008, *Referência Técnica do SisBaHiA* – versão 6.5, rev. jun. 2008, COPPE/UFRJ. Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, RJ, 208 p. Disponível em <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_TecRef\\_V65.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_TecRef_V65.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2008.

TRANSPETRO, 2006, Petrobras Transporte S. A., *Informações portuárias - Terminal de Madre de Deus*. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/TranspetroSite/appmanager/transpPortal>>. Acesso em: 28 nov. 2007.

VILLA, P.R.B., 2003, “A ‘Bahia’ de Todos os Santos: a plataforma logística do eixo leste-oeste”, *Revista Bahia Análise & Dados*, v. 13, n. 2 (set.), pp. 203-219, Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI), Salvador, BA. Disponível em: <[http://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=80&Itemid=110](http://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=110)>. Acesso em: 6 dez. 2007.

XAVIER, A. G., 2002, *Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos, BA*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 221 f.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)