

# Modelagem Hidrodinâmica para os Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, Bacia de Pernambuco-Paraíba



Revisão 00  
Abril/2014



# **Modelagem Hidrodinâmica para os Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, Bacia de Pernambuco-Paraíba**

Revisão 00

Abril / 2014



A TETRA TECH é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da TETRA TECH como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da TETRA TECH for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da TETRA TECH”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a TETRA TECH.

TETRA TECH, 2014. Modelagem Hidrodinâmica para os Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, Bacia de Pernambuco-Paraíba. Relatório Técnico, Revisão 00 (30 de abril de 2014). 48pp+Anexo.





## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	1
I INTRODUÇÃO .....	I-1
II ANÁLISE DE DADOS.....	II-1
III MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	III-1
III.1 DESCRIÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO.....	III-1
III.1.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS .....	III-5
III.1.2 PERÍODO DAS SIMULAÇÕES .....	III-8
III.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	III-8
III.2.1 AVALIAÇÃO PARA A MARÉ.....	III-10
III.2.2 AVALIAÇÃO PARA AS CORRENTES.....	III-13
IV CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	IV-1
V BIBLIOGRAFIA .....	V-1
VI EQUIPE TÉCNICA .....	VI-1
ANEXO 1 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D.....	A1-1



## LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁG
<b>Tabela II-1</b> - Resumo dos dados de vento, corrente e elevação considerados no estudo de modelagem hidrodinâmica (datum SIRGAS2000).....	II-1
<b>Tabela II-2</b> - Resumo dos dados de vazão considerados no estudo de modelagem hidrodinâmica (datum SIRGAS2000).....	II-2
<b>Tabela III-1</b> - Características das grades numéricas. ....	III-2
<b>Tabela III-2</b> - Classificação do RMAE por ranges. ....	III-9
<b>Tabela III-3</b> - Parâmetros de comparação entre os dados e resultados do modelo, para as estações Fortaleza, Natal e Recife. ....	III-12
<b>Tabela III-4</b> - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012. ....	III-16
<b>Tabela III-5</b> - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012.....	III-17
<b>Tabela III-6</b> - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012. ....	III-21
<b>Tabela III-7</b> - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013....	III-22
<b>Tabela III-8</b> - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013.....	III-23



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG
<b>Figura I-1</b> - Área de Estudo e domínio computacional considerado pelo Delft3D. ... .....	I-1
<b>Figura III-1</b> - Domínio da grade computacional de maior extensão (Grade 1)....	III-2
<b>Figura III-2</b> - Domínio da Grade 2, com maior resolução nos estuários dos estados de PE, PB e RN.....	III-3
<b>Figura III-3</b> - Batimetria associada à Grade 1. A escala de cores representa a batimetria em metros. ....	III-4
<b>Figura III-4</b> - Batimetria associada à Grade 2. A escala de cores representa a batimetria em metros. ....	III-5
<b>Figura III-5</b> - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) em Fortaleza, para o período de 1 a 31 de maio de 2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul, e os resultados do modelo são apresentados em vermelho. ....	III-11
<b>Figura III-6</b> - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) em Natal, para o período de 1 a 31 de maio de 2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul, e os resultados do modelo são apresentados em vermelho.....	III-11
<b>Figura III-7</b> - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) em Recife, para o período de 1 a 31 de maio de 2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul, e os resultados do modelo são apresentados em vermelho.....	III-12
<b>Figura III-8</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. ....	III-14
<b>Figura III-9</b> - Diagramas <i>stick plot</i> para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo.....	III-14

FIGURA	PÁG
<b>Figura III-10</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.....	III-15
<b>Figura III-11</b> - Diagramas <i>stick plot</i> para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo. ....	III-15
<b>Figura III-12</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.....	III-18
<b>Figura III-13</b> - Diagramas <i>stick plot</i> para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo. ....	III-18
<b>Figura III-14</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. ....	III-19
<b>Figura III-15</b> - Diagramas <i>stick plot</i> para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo. ....	III-19
<b>Figura III-16</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.....	III-20
<b>Figura III-17</b> - Diagramas <i>stick plot</i> para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo. ....	III-20

FIGURA	PÁG
Figura III-18 - Resultado instantâneo do modelo, ilustrando o padrão de correntes da região. A barra de cores apresenta a magnitude da corrente (em m/s)...... .....III-24	III-24



## RESUMO

Este relatório apresenta a análise de dados, a implementação e os resultados da modelagem numérica da hidrodinâmica para os Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, localizados na Bacia de Pernambuco-Paraíba. Utilizou-se o sistema de modelos Delft3D, da Deltares, através de seu módulo Delft3D-FLOW (hidrodinâmico).

Os resultados do modelo hidrodinâmico foram avaliados através da sua comparação com dados de maré e correntes coletados na área de estudo.

Os campos de correntes superficiais resultantes destas simulações foram utilizados como base para as modelagens da trajetória de derrames de óleo.



## I INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte à PETROBRAS nas atividades de perfuração dos Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, na Bacia de Pernambuco-Paraíba, este estudo apresenta a modelagem hidrodinâmica implementada na região. Os campos hidrodinâmicos obtidos através da modelagem serão utilizados como base para a modelagem numérica da trajetória de derrames de óleo TETRA TECH (2014a).

Para obtenção da dinâmica em toda a região, utilizou-se o sistema de modelos Delft3D, através de seu módulo Delft3D-FLOW (DELTARES, 2013). Para este estudo, duas grades numéricas foram implementadas: uma grade maior cobrindo toda a região passível de ser alcançada por vazamentos de óleo a partir dos Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, e uma grade menor, compreendendo o litoral dos estados de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte, com maior resolução nos estuários da Bacia Marinha de Pernambuco-Paraíba.

A Figura I-1 apresenta a área de estudo e domínio computacional considerado na modelagem.



**Figura I-1** - Área de Estudo e domínio computacional considerado pelo Delft3D, representado pela grade maior.

A seguir, o Capítulo II resume os dados utilizados nesta etapa do estudo. O Capítulo III descreve o modelo hidrodinâmico implementado (domínio, batimetria, forçantes) e a avaliação do modelo através da comparação de seus resultados com os dados de maré e correntes. Por fim, o Capítulo IV apresenta as considerações finais do presente estudo. Em complementação, no Anexo 1 apresenta-se a descrição do modelo Delft3D.

A análise completa dos dados utilizados nesta etapa do estudo é apresentada em TETRA TECH (2014b).

## II ANÁLISE DE DADOS

A primeira etapa deste trabalho consistiu no levantamento de dados primários e secundários meteorológicos, oceanográficos e hidrológicos na região de estudo. Essa fase visou disponibilizar informações para: (1) uma melhor compreensão da dinâmica da área e (2) forçar e/ou validar o modelo hidrodinâmico.

A Tabela II-1 e a Tabela II-2 apresenta um resumo dos dados utilizados na modelagem hidrodinâmica. A ilustração com os pontos de coleta dos dados e suas respectivas descrições e análises foram apresentadas no “Diagnóstico do Meio Físico” (TETRA TECH, 2014b).

**Tabela II-1** - Resumo dos dados de vento, corrente e elevação considerados no estudo de modelagem hidrodinâmica (datum SIRGAS2000).

BASE DE DADOS	RESOL. ESPACIAL	RESOL. TEMPORAL	PARÂMETRO	NÍVEL VERTICAL	PERÍODO DE DADOS	COORDENADAS DO PONTO DE ANÁLISE
CFSv2	0,3°	6 horas	Vento	10 m	1 de maio de 2012 e 31 de maio de 2013	08,3°S / 34,4°W
BASE DE DADOS	IDENTIFICAÇÃO		PARÂMETRO	PERÍODO ANALISADO		COORDENADAS DO PONTO DE ANÁLISE
FEMAR	Estação Mucuripe – CE (Porto)		Elevação	13/07/77 – 13/08/77		03°42'55,36"S / 38°28'37,23"W
	Estação Natal – RN (Porto)		Elevação	01/07/77 – 30/04/79		05°46'19,43"S / 35°12'19,13"W
	Estação Recife – PE (Porto)		Elevação	01/07/57 – 23/06/58		08°03'25,49"S / 34°51'55,13" W
PEPB	PETROBRAS PEPB 90		Corrente	10-Jun-2012 a 10-Jul-2012 22-Nov-2012 a 22-Dez-2012		08,43°S / 34,67°W
	PETROBRAS PEPB 1600		Corrente	09-Jun-2012 a 09-Jul-2012 15-Dez-2012 a 14-Jan-2013 17-Abr-2013 a 17-Maio-2013		08,42°S / 34,40°W

CFSv2: *Climate Forecast System Reanalysis Version 2.*

FEMAR: Fundação de Estudos do Mar.

**Tabela II-2 - Resumo dos dados de vazão considerados no estudo de modelagem hidrodinâmica (datum SIRGAS2000).**

BASE DE DADOS	PREFIXO	NOME DO POSTO	RIO	MUNICÍPIO	UF	PERÍODO	COORDENADAS
ANA	38490000	São José do Mipibu	Trairi	São José do Mipibu	RN	1969 –1974	06° 06' 26,2714" S / 35° 15' 8,0012" W
	38590000	Goianinha	Jacu	Goianinha	RN	1969 - 1972	06° 14' 39,4755" S / 35° 13' 3,0804" W
	38680000	Pedro Velho	Curimataú	Pedro Velho	RN	1975 - 2006	06° 26' 43,4413" S / 35° 13' 15,3209" W)
	38792000	Ponte do Leitão - Jusante	Mamanguape	Monteiro	PB	1969 - 1971	06° 51' 1,4534" S, 35° 07' 1,1597" W
	38895000	Ponte da Batalha	Paraíba	Santa Teresinha	PB	1969 - 1997	07° 07' 49,4617" S / 35° 02' 52,1569" W
	39084000	Caricé	Capiberibe Mirim	Itambé	PE	2007 - 2013	07° 32' 35,5535" S / 35° 04' 8,1187" W
	39029100	Eng. Itapirema de Baixo	Itapirema	Goiana	PE	2007 - 2013	07° 41' 1,3580" S / 34° 53' 1,0330" W
	39188000	São Lourenço da Mata	Capiberibe	São Lourenço da Mata	PE	1956 - 1989	08° 01' 1,4883" S / 35° 03' 1,1594" W
	39220000	Destilaria Bom Jesus	Gurjau	Cabo de Santo Agostinho	PE	2007 - 2013	08° 15' 5,4539" S / 35° 00' 48,3188" W
	39370100	Engenho Maranhão	Ipojuca	Ipojuca	PE	2007 – 2013	08° 22' 12,4169" S / 35° 08' 33,0834" W
	17050000*	Óbidos	Solimões/ Amazonas	Óbidos	PA	1927 – 1998	01°56'51,20" S / 55°30'41,68" W
	33380000*	Aratoí Grande	Grajau	Vitória do Mearim	MA	2006 – 2007	03° 46' 12,26" S / 45° 13' 05,54" W
	33290000*	Bacabal	Mearim	Bacabal	MA	2006 – 2007	04° 13' 11,19" S / 44° 45' 56,52" W
	33680000*	Cantanhede	Itapecuru	Cantanhede	MA	2006 – 2007	03° 37' 41,42" S / 44° 22' 46,55" W
	33780000*	Nina Rodrigues	Munim	Nina Rodrigues	MA	2005 – 2007	03° 27' 35,18" S / 43° 53' 57,46" W
	33190000*	Pindaré-Mirim	Pindaré	Pindaré-Mirim	MA	2006 - 2007	03° 39' 41,30" S / 45° 27' 31,34" W

ANA: Agência Nacional de Águas.

Com relação aos dados de vazão, ressalta-se que as últimas 6 estações (\*) foram utilizadas apenas como forçantes da grade maior, pois não se encontram dentro do domínio da grade menor, por estarem localizadas nos estados Amazonas e Maranhão.

### **III MODELAGEM HIDRODINÂMICA**

O sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, foi selecionado como ferramenta para se atingir os objetivos propostos neste estudo, com relação à modelagem hidrodinâmica para os Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3. Este sistema de modelos é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, assim como a transferência de *momentum* ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. As principais características do Delft3D-FLOW, que justificam a escolha deste modelo para este estudo, são descritas no Anexo 1 deste documento.

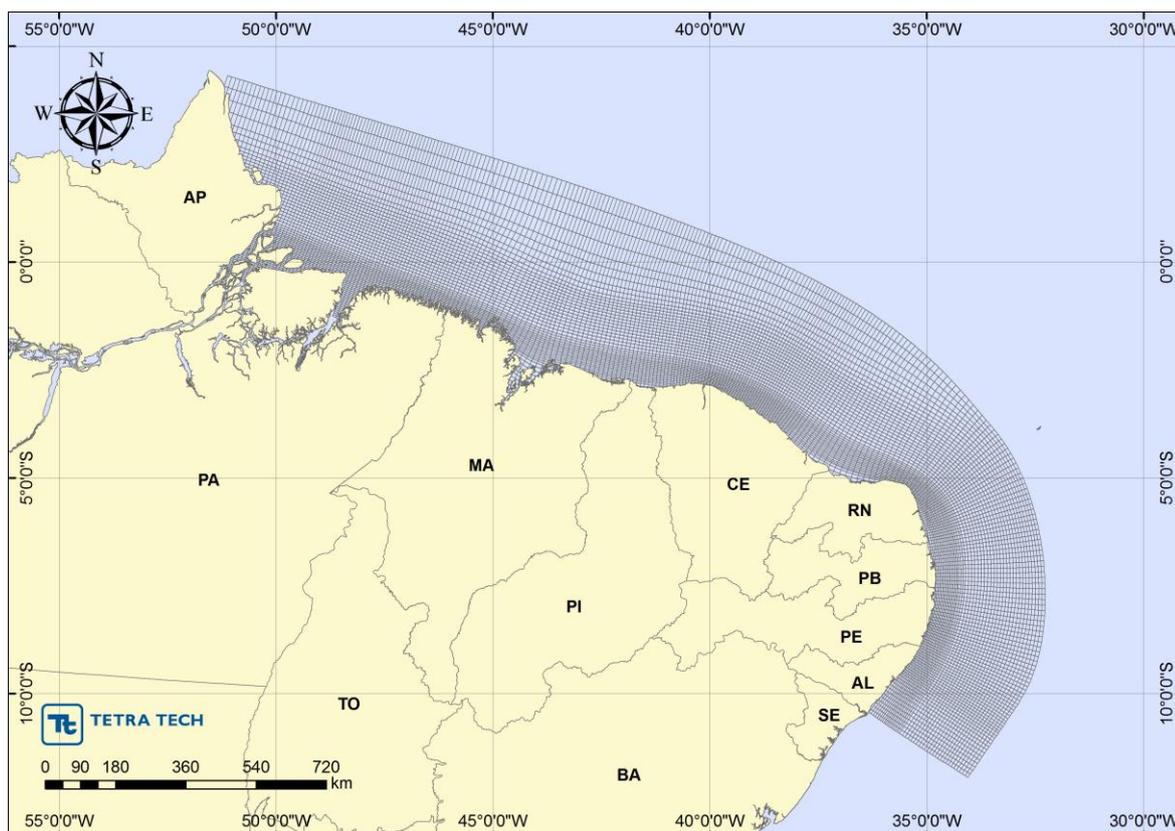
Os resultados obtidos com a modelagem numérica foram, então, comparados com os dados disponíveis (dados de correntes e elevação) para avaliação do modelo numérico.

#### **III.1 DESCRIÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO**

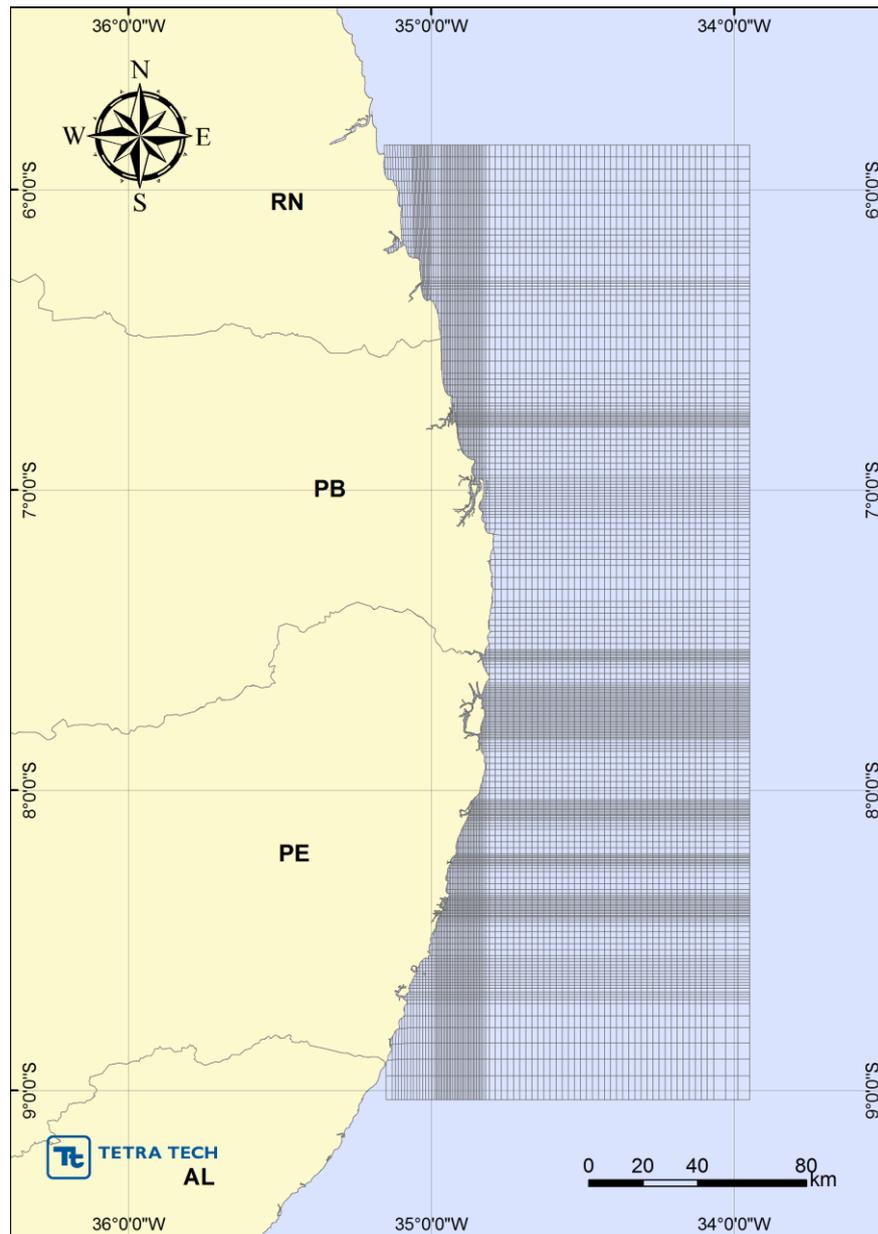
As grades implementadas representam um compromisso entre a descrição dos processos hidrodinâmicos presentes na região de interesse (escala temporal e espacial), dos recursos computacionais disponíveis no período de execução da simulação e do tempo de processamento necessário. Para este estudo, duas grades numéricas foram implementadas (Grade 1 - Figura III-1 e Grade 2 - Figura III-2): a Grade 1 compreende toda a região atingida pelo óleo, apresentando maior resolução na região costeira; a Grade 2 abrange os estados de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte, com maior resolução nos estuários da Bacia de Pernambuco-Paraíba. As características dessas grades são apresentadas na Tabela III-1.

**Tabela III-1 - Características das grades numéricas.**

GRADE	DIMENSÃO HORIZONTAL	ESPAÇAMENTO MÍNIMO	ESPAÇAMENTO MÁXIMO
Grade 1	291 x 65	~22 km	~4 km
Grade 2	102 x 229	~6 km	~300 m



**Figura III-1 - Domínio da grade computacional de maior extensão (Grade 1).**

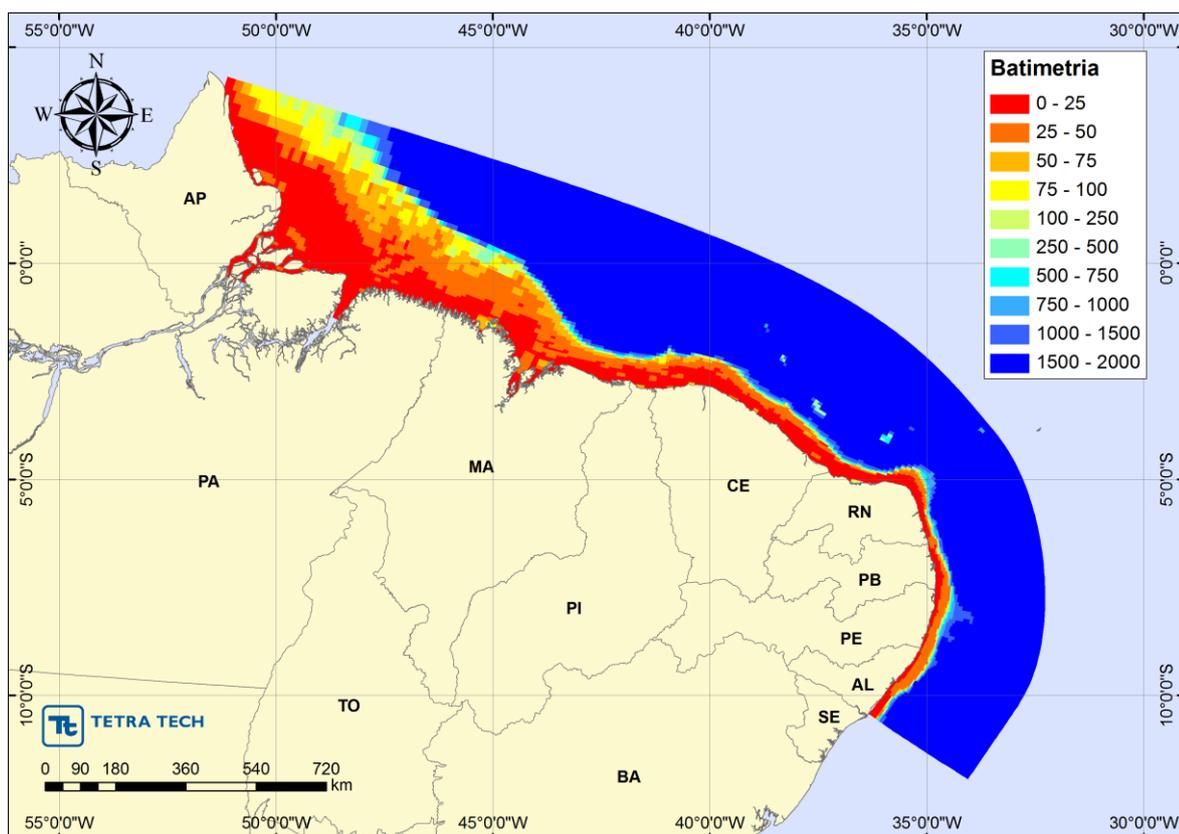


**Figura III-2** - Domínio da Grade 2, com maior resolução nos estuários dos estados de PE, PB e RN.

Os dados de profundidade foram obtidos através da digitalização dos valores batimétricos das cartas náuticas da DHN<sup>1</sup>, números 806 (Proximidades do Porto de Cabedelo), 906 (Porto de Suape) e 910 (Proximidades de Itapessoca). Foram também utilizadas informações batimétricas provenientes do banco de dados da TETRA TECH e, para as regiões mais profundas, foram

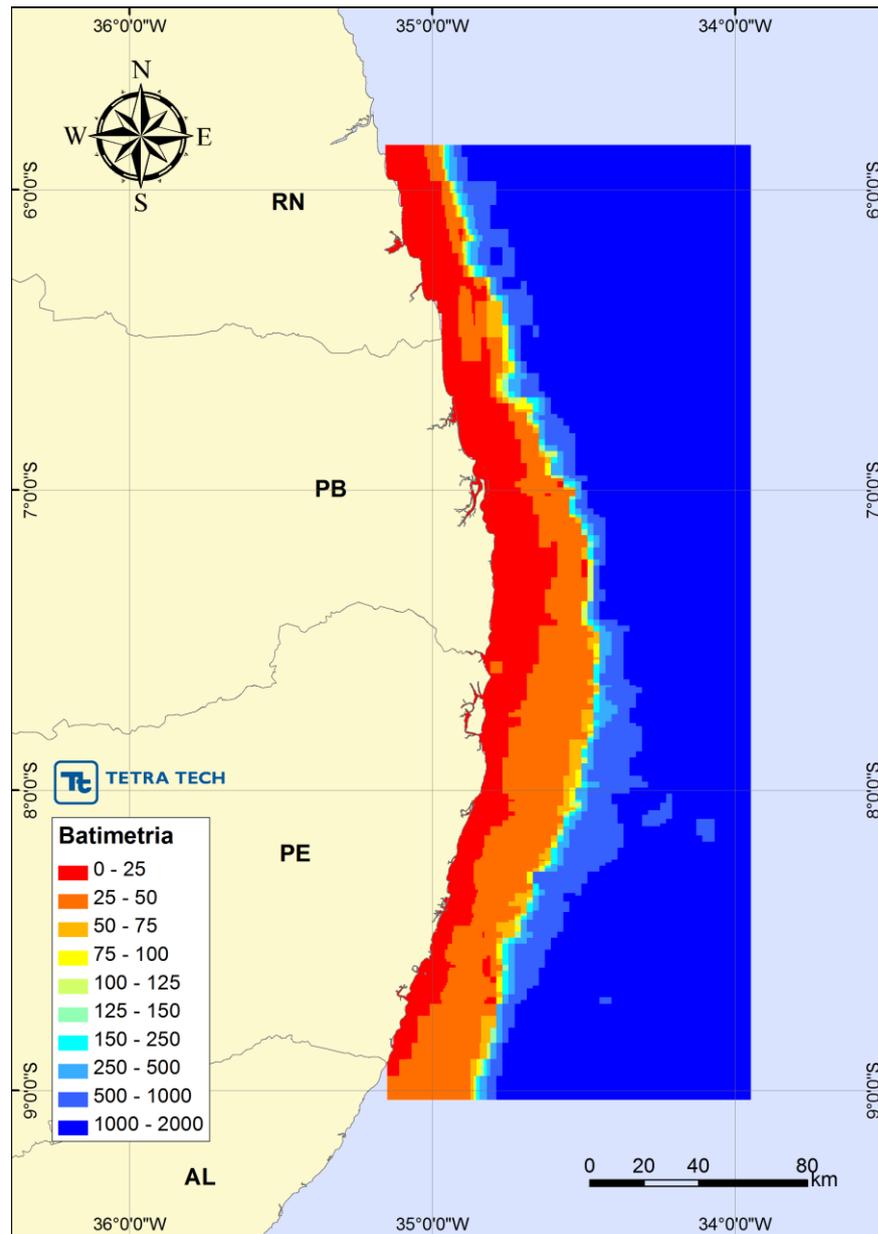
<sup>1</sup> Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

utilizadas as informações disponibilizadas pelo GEBCO<sup>2</sup>. Após a digitalização dos pontos de profundidade das cartas náuticas, o arquivo ASCII é interpolado na grade do modelo hidrodinâmico e gerado um arquivo com valores de profundidade para cada ponto de grade. Os resultados finais da projeção da batimetria estão ilustrados na Figura III-3 (Grade 1) e Figura III-4 (Grade 2).



**Figura III-3 - Batimetria associada à Grade 1. A escala de cores representa a batimetria em metros.**

<sup>2</sup> *General Bathymetric Chart of the Oceans*. Obtido em: <http://www.gebco.net/>. Data de último acesso: fevereiro de 2014.



**Figura III-4** - Batimetria associada à Grade 2. A escala de cores representa a batimetria em metros.

### III.1.1 Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno naturais do modelo são dadas pela velocidade normal nula nos contornos terrestres. Na superfície livre, além das condições dinâmicas locais (MELLOR & YAMADA, 1982), é também considerada a tensão de cisalhamento do vento. Opcionalmente, fluxos de calor e sal (evaporação) podem ser incluídos. No fundo, são aplicadas as condições dinâmicas descritas

em Mellor & Yamada (op. cit.). A velocidade de arrasto é calculada como uma função empírica da energia cinética turbulenta, por sua vez decorrente do fechamento turbulento de segunda ordem.

Nos contornos artificiais são aplicadas, ao modelo, condições de contorno para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2D), velocidades do modo interno (3D), temperatura, salinidade, velocidade vertical e energia cinética turbulenta.

Nas componentes perpendiculares à fronteira são aplicadas condições radiacionais em função da elevação, do tipo  $H\bar{U} \pm C_e \eta = BC^2$ , onde  $C_e = \sqrt{gH}$  é a velocidade de fase da onda que chega ao sistema,  $\eta$  é a elevação do nível do mar e B é um coeficiente empírico. Nos casos da temperatura e da salinidade, disponibiliza-se esquema que permita advecção através da fronteira, condição esta descrita por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (\text{condição análoga aplicada à salinidade})$$

O sistema de modelos Delft3D possibilita a utilização de contornos abertos. Nesses contornos abertos (ou bordas abertas) podem ser atribuídas condições forçantes (ativa) ou condições radiacionais (passivas). Quando são aplicadas forçantes nas bordas abertas, pode se utilizar séries temporais ou valores constantes para diferentes variáveis pertinentes ao sistema estudado.

Para as simulações numéricas da Grade 1 foi considerado um conjunto de 28 bordas abertas. Foram utilizados (1) dados de elevação da superfície do mar, oriundos do modelo global de maré TPXO<sup>3</sup> e (2) dados de elevação, correntes,

<sup>3</sup> <http://volkov.oce.orst.edu/tides/>

salinidade e temperatura em diversos níveis, provenientes da base de dados do consórcio HYCOM<sup>4</sup>.

As forçantes hidrodinâmicas de elevação e correntes foram impostas nas bordas do modelo através de uma condição de fronteira denominada Riemann. Esse tipo de condição de fronteira é usado para simular uma borda levemente reflexiva. A principal característica de uma fronteira levemente reflexiva é que esta, até um determinado nível, é transparente para ondas transmitidas, tais como distúrbios de ondas curtas. Assim ondas transmitidas podem cruzar a fronteira aberta, sem serem refletidas de volta para o domínio computacional como acontece com outros tipos de condição de fronteira (DELTARES, 2013).

A condição Riemann imposta na borda do modelo é obtida da seguinte equação:

$$f(t) = U + \zeta \sqrt{\frac{g}{d}}$$

onde,

- $f(t)$  é a condição Riemann no tempo;  
 $U$  é a velocidade da corrente (oriunda do modelo HYCOM);  
 $\zeta$  é a elevação do nível da água (oriunda dos modelos TPXO e HYCOM);  
 $g$  é a aceleração da gravidade;  
 $d$  é a profundidade.

A base de dados atmosféricos utilizados para forçar o modelo hidrodinâmico foi proveniente do produto de reanálise CFSv2, conforme descrito no item II deste documento.

---

<sup>4</sup> <http://hycom.org/>

### III.1.2 Período das Simulações

As simulações hidrodinâmicas foram conduzidas para um ano completo de maio de 2012 a maio de 2013, o mesmo período para o qual se dispõe de dados de corrente coletados na região dos blocos, incluindo os períodos representativos de verão e inverno considerados na modelagem de derrame de óleo (TETRA TECH, 2014a).

### III.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de avaliação utilizada fundamenta-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica na região em estudo. Com este intuito são apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e (1) previsões harmônicas realizadas para as estações Fortaleza, Natal e Recife, ambas da FEMAR, cujas análises são apresentadas no capítulo II; e (2) dados de corrente coletados em campo, apresentados em TETRA TECH (2014b).

A comparação entre os resultados da modelagem e os dados foi quantificada através dos seguintes parâmetros:

1. Erro Estatístico Relativo (*Relative Error Statistic*) O erro estatístico relativo entre o previsto pelo modelo e as observações é definido como (EPA, 2000):

$$E_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{modelo}_i|}{\sum_{i=1}^n \text{dado}_i} \quad (\text{Eq. III.2-1})$$

Como erro estatístico relativo é a razão entre o erro absoluto médio (o numerador da expressão acima) e a média das observações ele pode ser expresso como uma porcentagem. O erro estatístico relativo ideal é nulo.

Esta mesma definição é apresentada em Walstra *et al.* (2001), a qual é denominada pelos autores como: *Relative Mean Absolute Error* (RMAE). Os

autores apresentam, também, uma tabela na qual classificam (qualificam) os valores dos erros, Tabela III-2.

**Tabela III-2 - Classificação do RMAE por ranges.**

ERRO PERCENTUAL (RMAE) (%)	QUALIFICAÇÃO
RMAE < 20	Excelente
20 < RMAE < 40	Bom
40 < RMAE < 70	Razoável
70 < RMAE < 100	Ruim
RMAE > 100	Péssimo

2. Erro Estatístico Absoluto Médio (*Absolute Mean Error Statistic*). O erro estatístico absoluto médio é definido como (EPA, op. cit.; WILLMOTT, 1982):

$$E_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{modelo}_i| \quad (\text{Eq. III.2-2})$$

O erro estatístico absoluto médio é o desvio médio entre o previsto pelo modelo e o observado nos dados. O desvio médio ideal é zero. O erro estatístico absoluto tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

3. Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root-Mean-Square Error Statistic*). A raiz do erro médio quadrático é definida como (EPA, op. cit., Willmott, op. cit.):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2} \quad (\text{Eq. III.2-3})$$

A raiz do erro médio quadrático é um indicador do desvio entre o previsto pelo modelo e as observações assim como o desvio médio, contudo é em geral maior do que ele. A raiz do erro médio quadrático ideal é nula. A raiz do erro médio quadrático tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

4. Hess & Bosley (1992) propuseram o “*skill parameter*” uma forma de quantificar a capacidade do modelo de reproduzir os dados observados. O “*skill parameter*” é definido por:

$$\text{Skill} = 1 - D' \quad (\text{Eq. III.2-4})$$

O termo  $D'$  é dado pelo erro quadrático médio normalizado pelo range médio do dado:

$$D' = \frac{\text{RMS}}{\text{range médio do dado}} \quad (\text{Eq. III.2-5})$$

O range médio do dado é definido por:

$$\text{Range} - \text{médio} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{média do dado}| \quad (\text{Eq. III.2-6})$$

O “*skill parameter*” tem seu valor variando entre 0 e 1 e o valor ideal é 1 (um).

5. Willmott & Wicks, 1980 (*apud* WILLMOTT, 1982) propôs o “*index of agreement*” ( $d$ ) definido por:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left( |\text{modelo}_i - \overline{\text{dado}}| + |\text{dado}_i - \overline{\text{dado}}| \right)^2} \right] \quad (\text{Eq. III.2-7})$$

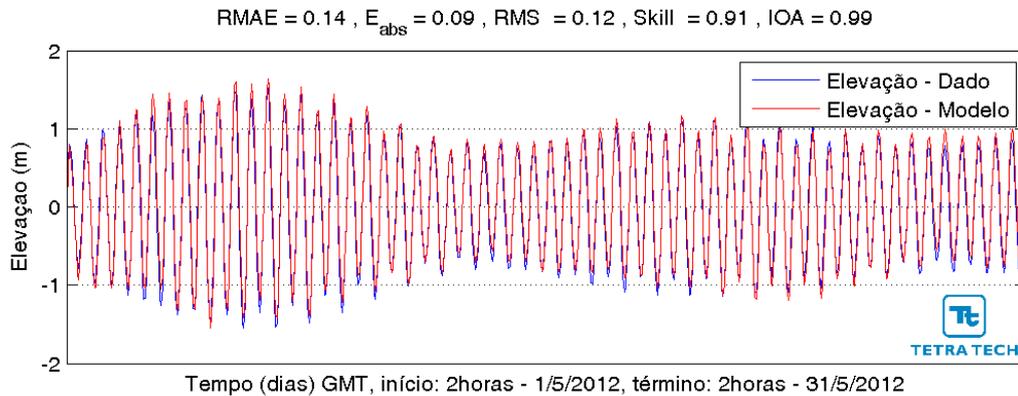
Onde:  $\overline{\text{dado}}$  = média do dado.

### III.2.1 Avaliação para a Maré

Para a avaliação da modelagem hidrodinâmica com relação à variável elevação do nível do mar, os resultados do modelo foram comparados com as previsões harmônicas realizadas para as estações da FEMAR: Fortaleza, Natal e Recife (análise apresentada em TETRA TECH, 2014b).

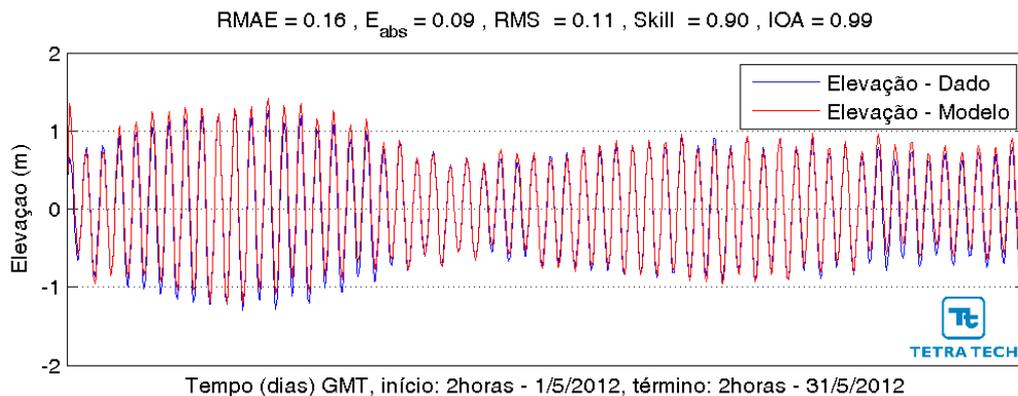
A Figura III-5 apresenta as séries temporais de elevação do nível do mar para a estação Fortaleza, para o período compreendido entre 1 e 31 de maio de

2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul (dados), e os resultados gerados pelo Delft3D são apresentados em vermelho (modelo).



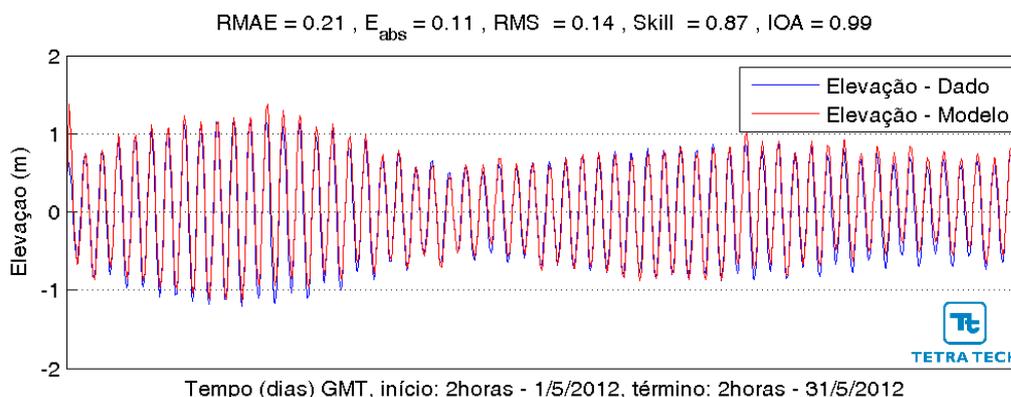
**Figura III-5** - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) em Fortaleza, para o período de 1 a 31 de maio de 2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul, e os resultados do modelo são apresentados em vermelho.

De forma análoga, a Figura III-6 apresenta as séries temporais de elevação do nível do mar para a estação Natal, para o período compreendido entre 01 e 31 de maio de 2012.



**Figura III-6** - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) em Natal, para o período de 1 a 31 de maio de 2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul, e os resultados do modelo são apresentados em vermelho.

Finalmente, a Figura III-7 apresenta as séries temporais de elevação do nível do mar para a estação Recife, para o período compreendido entre 1 e 31 de maio de 2012.



**Figura III-7** - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) em Recife, para o período de 1 a 31 de maio de 2012. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul, e os resultados do modelo são apresentados em vermelho.

Observa-se que o modelo implementado representa a maré de forma extremamente satisfatória, tanto em amplitude quanto em fase, para as três estações analisadas. A Tabela III-3 apresenta os erros e índices obtidos, todos indicam um desempenho excelente do modelo.

**Tabela III-3** - Parâmetros de comparação entre os dados e resultados do modelo, para as estações Fortaleza, Natal e Recife.

PARÂMETRO	FORTALEZA	NATAL	RECIFE
RMAE	0,14	0,16	0,21
Eabs	0,09	0,09	0,11
RMS	0,12	0,11	0,14
Skill	0,91	0,90	0,87
Index of Agreement	0,99	0,99	0,99

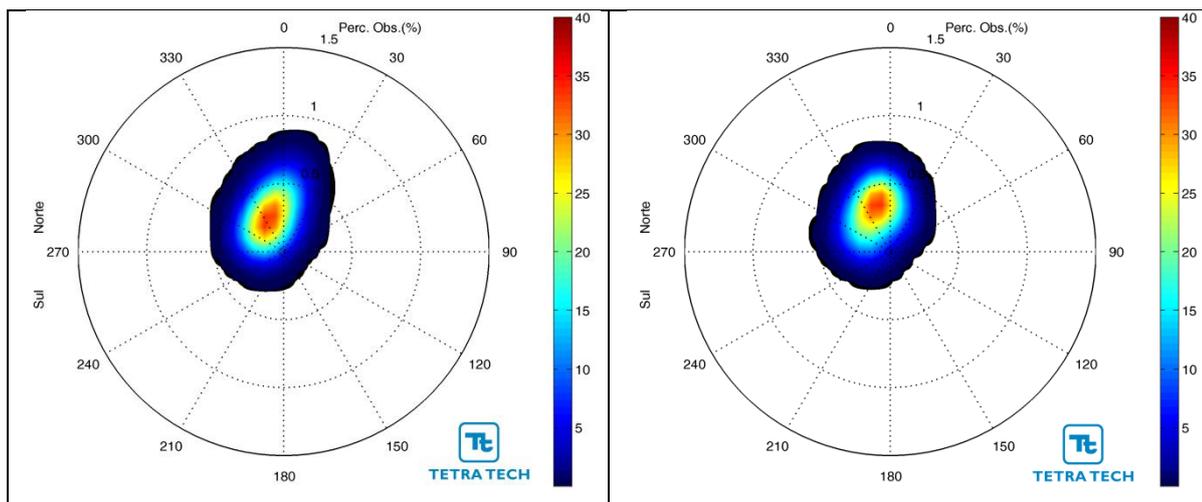
### III.2.2 Avaliação para as Correntes

Para a avaliação do modelo com relação às correntes foram utilizados os dados descritos como PETROBRAS – PEPB 90 e PETROBRAS – PEPB 1600 em TETRA TECH (2014B). Para as comparações com o dado PETROBRAS – PEPB 90 utilizou-se o primeiro nível de coleta, referente à 25 metros de profundidade. Para os dados PETROBRAS – PEPB 1600 utilizou-se uma média dos primeiros níveis coletados (da superfície para o fundo), referentes a 131, 139 e 145 metros de profundidade. A comparação com os resultados do modelo foi realizada para os níveis equivalentes.

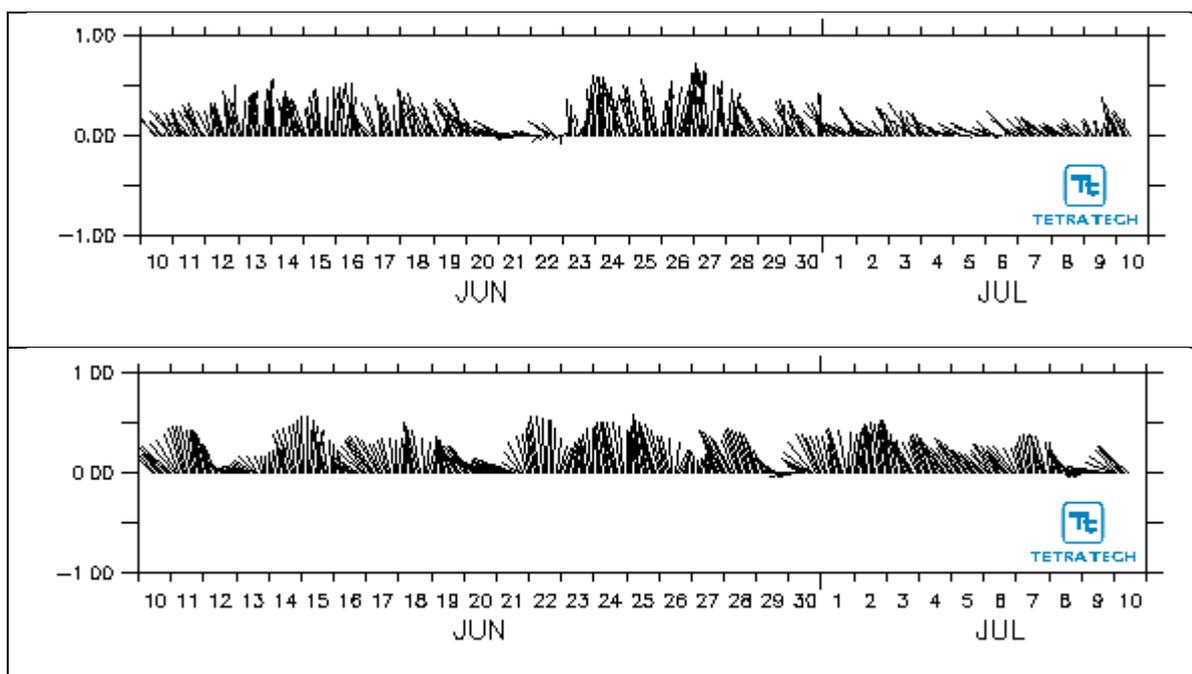
As figuras, a seguir, ilustram histogramas direcionais e diagramas do tipo *stick plot* dos vetores de corrente, obtidos para os dados medidos e resultados do modelo. Nos histogramas direcionais, os círculos concêntricos representam a velocidade da corrente (em m/s) e a escala de cores ilustra a porcentagem de observações (%). A direção é apresentada em graus a partir do norte geográfico e utiliza-se a convenção vetorial.

#### PETROBRAS – PEPB 90

A Figura III-12 apresenta o histograma direcional dos vetores de corrente, obtido para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. A Figura III-13 apresenta os diagramas *stick plot*, calculados para os mesmos conjuntos de dado, onde o painel superior ilustra os dados medidos em campo, e o inferior os resultados do Delft3D.



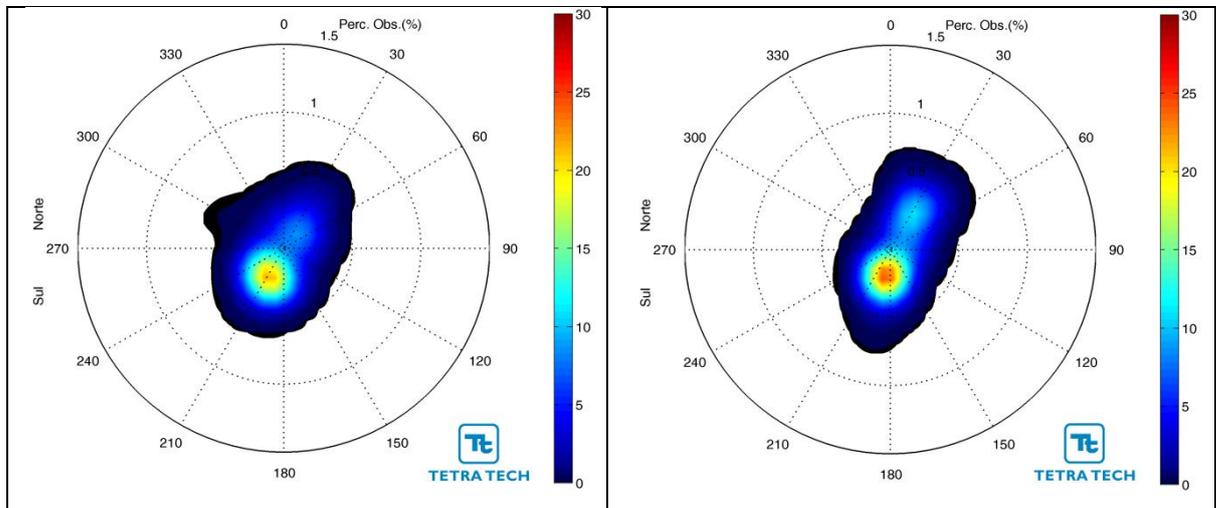
**Figura III-8** - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.



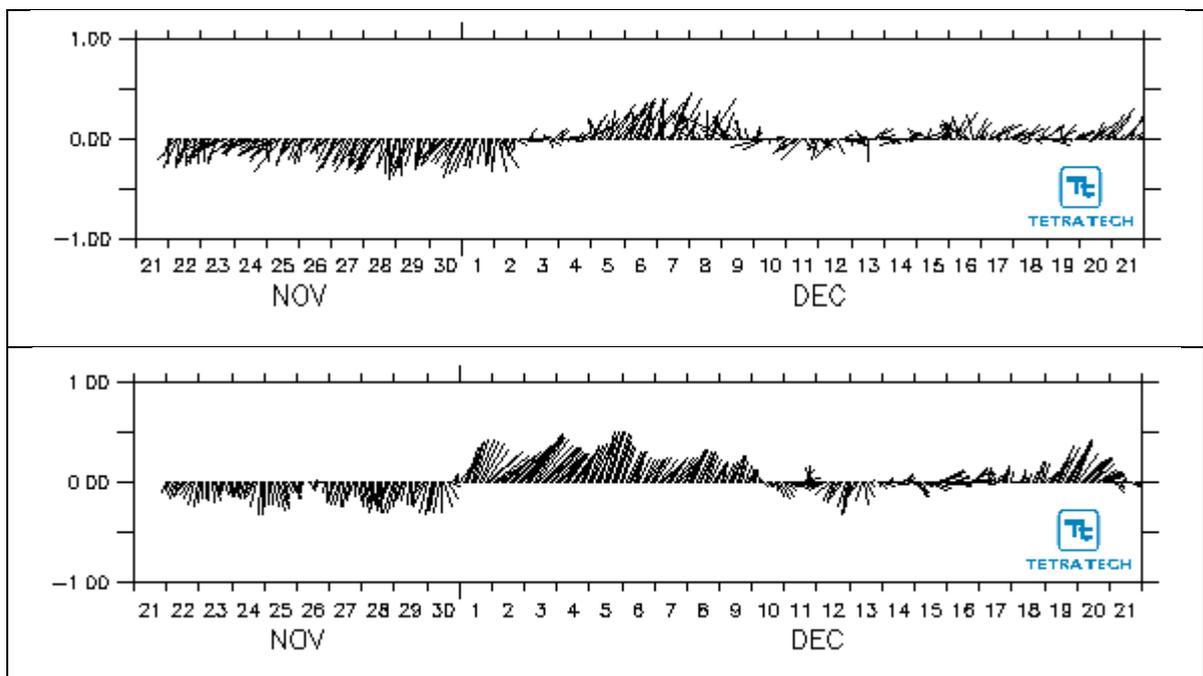
**Figura III-9** - Diagramas stick plot para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo.

A Figura III-14 apresenta o histograma direcional dos vetores de corrente, obtido para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. A Figura III-15 apresenta os diagramas stick plot,

calculados para os mesmos conjuntos de dado, onde o painel superior ilustra os dados medidos em campo, e o inferior os resultados do Delft3D.



**Figura III-10** - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.



**Figura III-11** - Diagramas stick plot para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo.

Através das comparações realizadas, observa-se que o modelo representa o padrão direcional observado nos dados medidos. Além disso, na Figura III-11 fica evidente que o modelo consegue representar as inversões da corrente ao longo do tempo.

Além das comparações entre modelo e dado feitas acima, estatisticamente através dos histogramas direcionais e "ponto a ponto", através das comparações das séries temporais vetoriais (*stick plots*), é importante avaliar, também, como se comportam os padrões médios e extremos obtidos com a modelagem. Deve-se verificar também, se o modelo tem capacidade de reproduzir o comportamento dos fenômenos mais frequentes e mais energéticos observados nos dados. Para tal, apresentamos a seguir, uma comparação entre os valores máximos, médios e os desvios padrão entre dados e resultados do modelo para os dois períodos analisados (Tabela III-4 e Tabela III-5).

**Tabela III-4 - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 10 de junho e 10 de julho de 2012 (PEPP90).**

Média da velocidade (m/s) do dado	0,2862
Média da velocidade (m/s) do modelo	0,3347
<b>Erro percentual (%) na média da velocidade</b>	<b>16,93</b>
Velocidade máxima (m/s) do dado	0,7470
Velocidade máxima (m/s) do modelo	0,5972
<b>Erro percentual (%) na velocidade máxima</b>	<b>20,06</b>
Média da componente U (m/s) do dado	0,1013
Média da componente U (m/s) do modelo	0,1206
<b>Erro percentual (%) na média da componente U</b>	<b>19,02</b>
Média da componente V (m/s) do dado	0,2464
Média da componente V (m/s) do modelo	0,2893
<b>Erro percentual (%) na média da componente V</b>	<b>17,40</b>
DP da componente U do dado	0,0735
DP da componente U do modelo	0,0795
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente U</b>	<b>8,13</b>
DP da componente V do dado	0,1618
DP da componente V do modelo	0,1408
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente V</b>	<b>13,00</b>
Direção (graus) mais frequente do dado	344,8750
Direção (graus) mais frequente do modelo	351,1062
<b>Erro percentual (%) na direção Modelo x Dado</b>	<b>1,81</b>

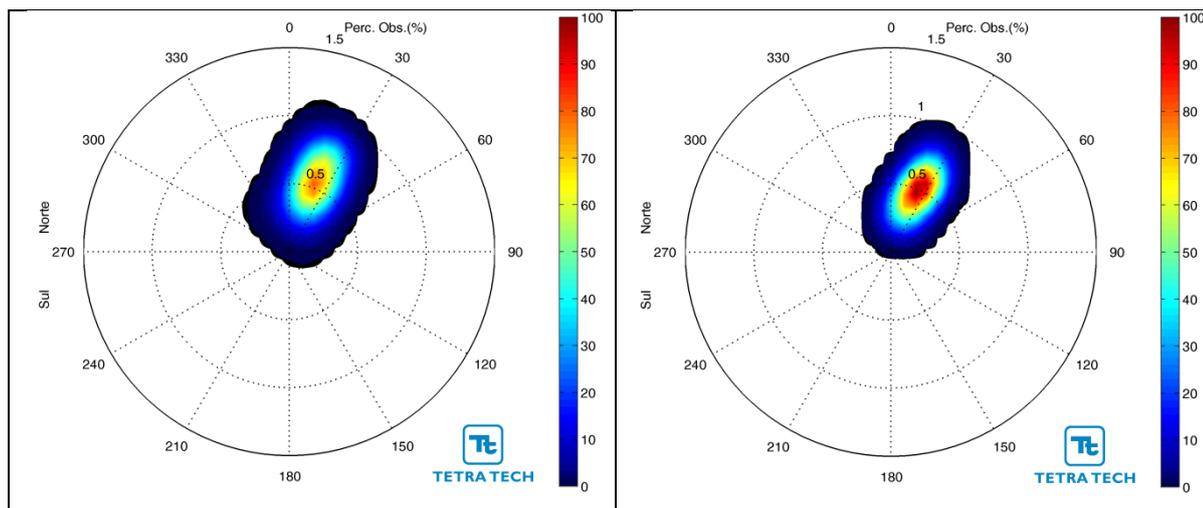
**Tabela III-5 - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 22 de novembro e 22 de dezembro de 2012 (PEPP90).**

Média da velocidade (m/s) do dado	0,2191
Média da velocidade (m/s) do modelo	0,2245
<b>Erro percentual (%) na média da velocidade</b>	<b>2,48</b>
Velocidade máxima (m/s) do dado	0,5620
Velocidade máxima (m/s) do modelo	0,6051
<b>Erro percentual (%) na velocidade máxima</b>	<b>7,67</b>
Média da componente U (m/s) do dado	0,1109
Média da componente U (m/s) do modelo	0,0908
<b>Erro percentual (%) na média da componente U</b>	<b>18,08</b>
Média da componente V (m/s) do dado	0,1721
Média da componente V (m/s) do modelo	0,1920
<b>Erro percentual (%) na média da componente V</b>	<b>11,55</b>
DP da componente U do dado	0,0725
DP da componente U do modelo	0,0806
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente U</b>	<b>11,14</b>
DP da componente V do dado	0,1080
DP da componente V do modelo	0,1177
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente V</b>	<b>8,92</b>
Direção (graus) mais frequente do dado	206,5770
Direção (graus) mais frequente do modelo	200,2500
<b>Erro percentual (%) na direção Modelo x Dado</b>	<b>3,06</b>

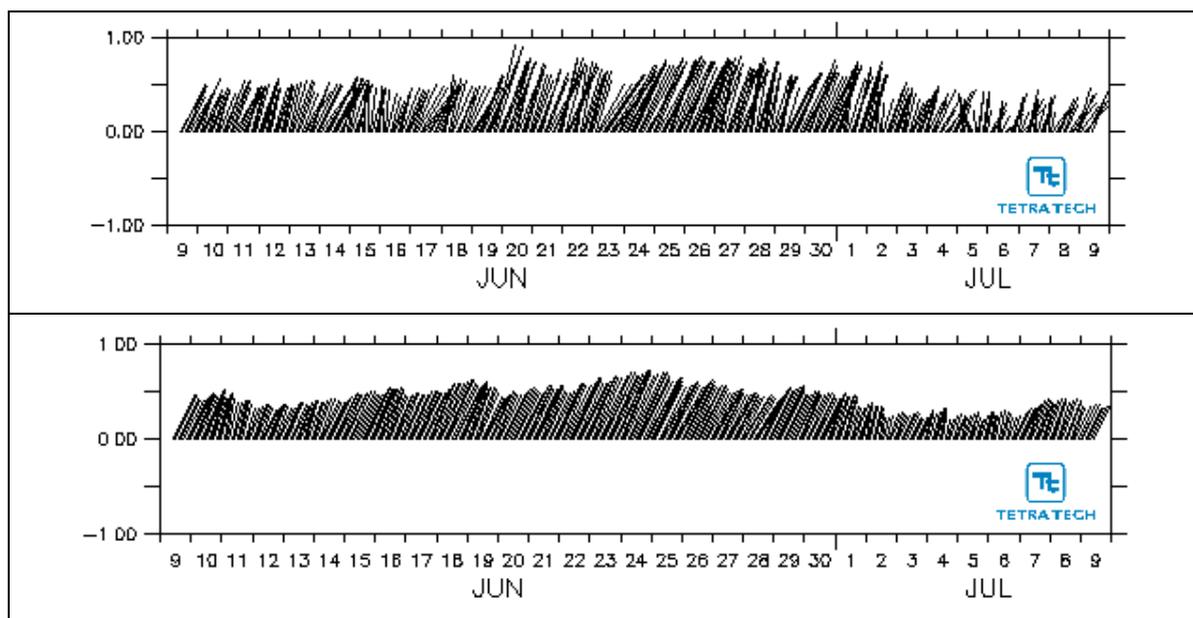
Analisando os resultados apresentados nas tabelas, e supondo que o critério de qualificação proposto por Walstra *et al.* (2001) seja válido para a estimativa do erro percentual, temos que a maioria das características da corrente simulada pelo modelo apresentou-se excelente.

### PETROBRAS – PEPB 1600

A Figura III-12 apresenta o histograma direcional dos vetores de corrente, obtido para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. A Figura III-13 apresenta os diagramas *stick plot*, calculados para os mesmos conjuntos de dado, onde o painel superior ilustra os dados medidos em campo, e o inferior os resultados do Delft3D.



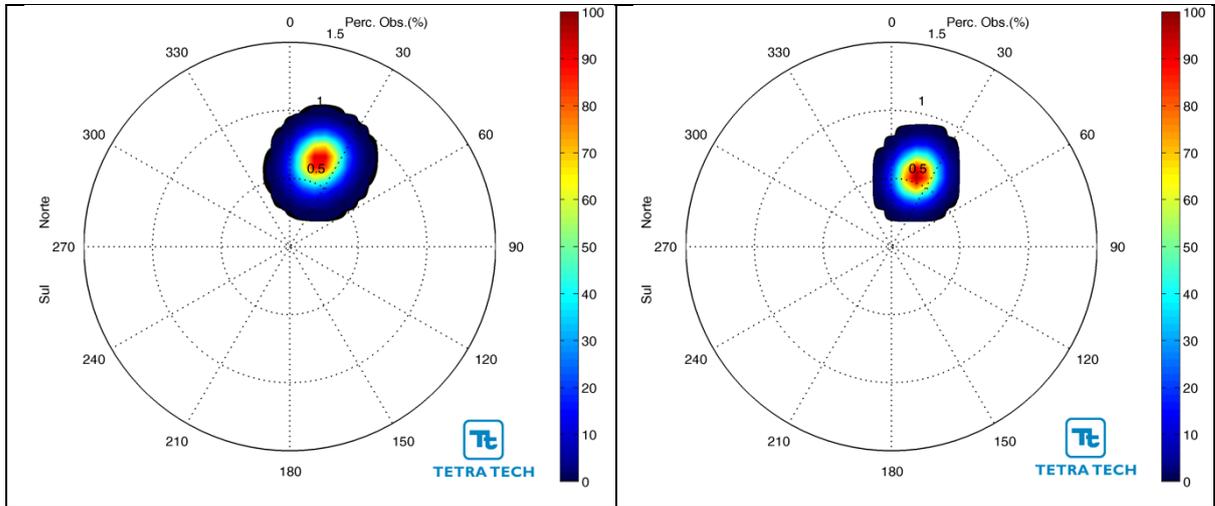
**Figura III-12** - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.



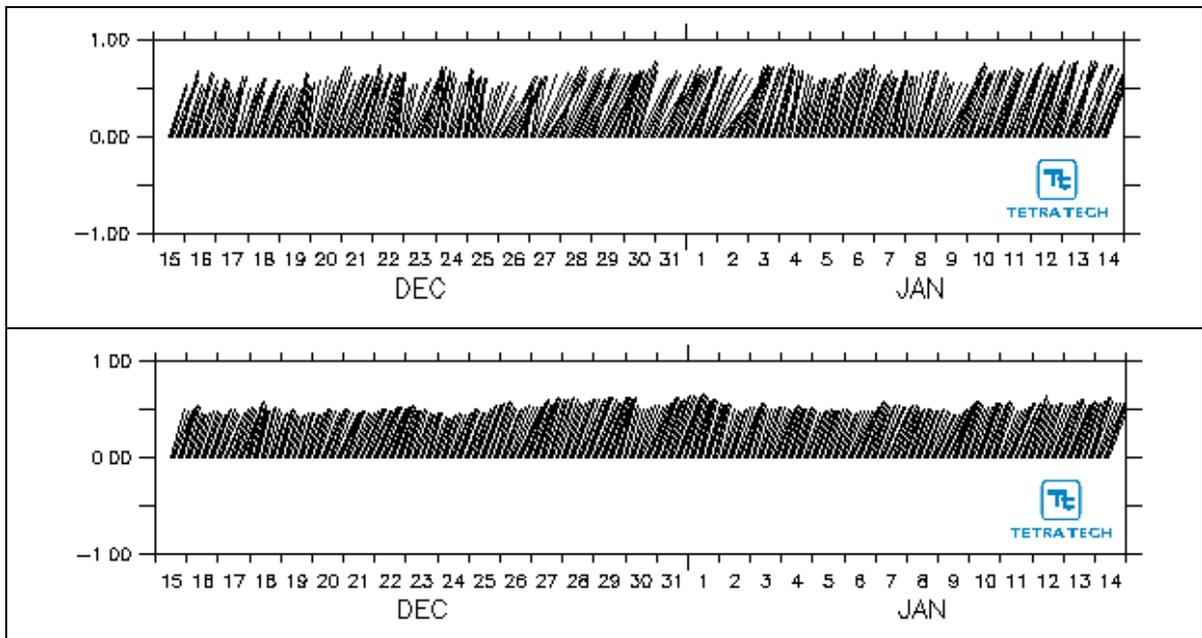
**Figura III-13** - Diagramas stick plot para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo.

A Figura III-14 apresenta o histograma direcional dos vetores de corrente, obtido para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. A Figura III-15 apresenta os diagramas

*stick plot*, calculados para os mesmos conjuntos de dado, onde o painel superior ilustra os dados medidos em campo, e o inferior os resultados do Delft3D.



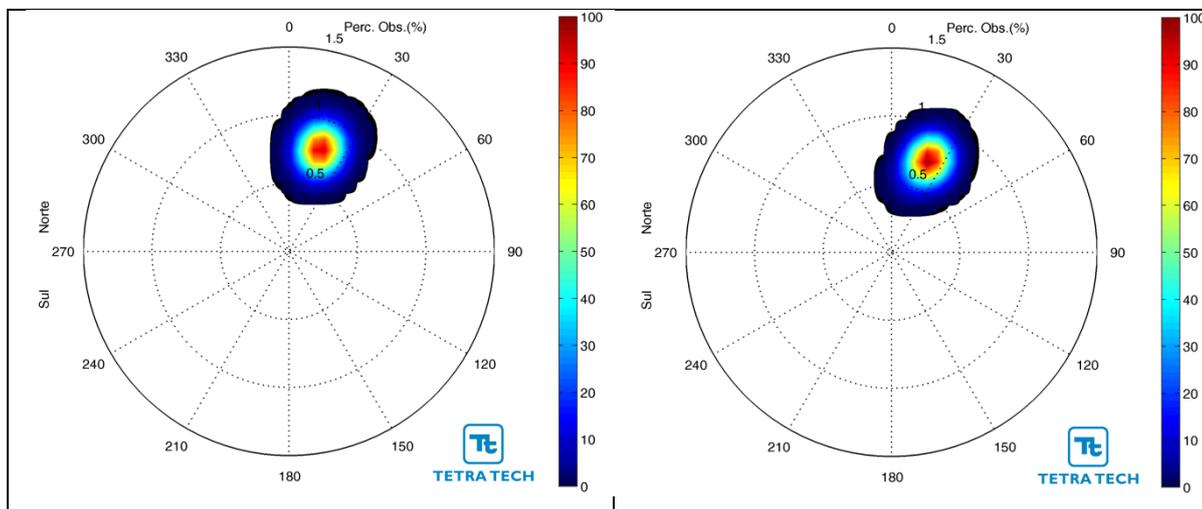
**Figura III-14** - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.



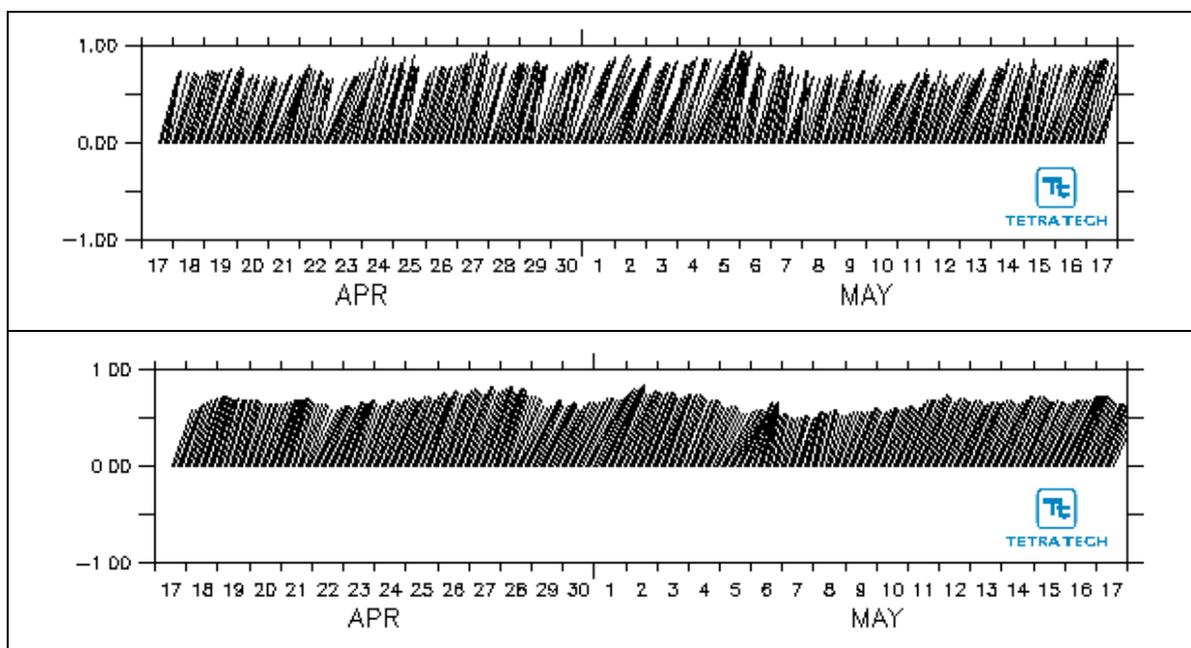
**Figura III-15** - Diagramas *stick plot* para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo.

A Figura III-16 apresenta o histograma direcional dos vetores de corrente, obtido para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013. O

painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo. A Figura III-17 apresenta os diagramas *stickplot*, calculados para os mesmos conjuntos de dado, onde o painel superior ilustra os dados medidos em campo, e o inferior os resultados do Delft3D.



**Figura III-16** - Histograma direcional dos vetores de corrente, para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013. O painel esquerdo ilustra os dados medidos em campo e o painel direito, os resultados do modelo.



**Figura III-17** - Diagramas *stick plot* para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013. O painel superior ilustra os dados medidos em campo e o painel inferior, os resultados do modelo.

De maneira geral, verifica-se que o modelo representa o padrão direcional observado nos dados medidos. Além disso, na Figura III-13 fica evidente que o modelo consegue representar as intensificações e reduções da velocidade da corrente ao longo do tempo.

A fim de verificar se o modelo tem capacidade de reproduzir o comportamento dos fenômenos mais frequentes e mais energéticos observados nos dados, apresenta-se, a seguir, uma comparação entre os valores máximos, médios e os desvios padrão entre dados e resultados do modelo para cada um dos três períodos analisados (Tabela III-6, Tabela III-7 e Tabela III-8).

**Tabela III-6 - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 9 de junho e 9 de julho de 2012 (PEPP1600).**

Média da velocidade (m/s) do dado	0,5562
Média da velocidade (m/s) do modelo	0,4918
<b>Erro percentual (%) na média da velocidade</b>	<b>11,58</b>
Velocidade máxima (m/s) do dado	0,9786
Velocidade máxima (m/s) do modelo	0,7932
<b>Erro percentual (%) na velocidade máxima</b>	<b>18,94</b>
Média da componente U (m/s) do dado	0,1953
Média da componente U (m/s) do modelo	0,1968
<b>Erro percentual (%) na média da componente U</b>	<b>0,76</b>
Média da componente V (m/s) do dado	0,5158
Média da componente V (m/s) do modelo	0,4493
<b>Erro percentual (%) na média da componente V</b>	<b>12,88</b>
DP da componente U do dado	0,0909
DP da componente U do modelo	0,0768
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente U</b>	<b>15,51</b>
DP da componente V do dado	0,1550
DP da componente V do modelo	0,1222
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente V</b>	<b>21,20</b>
Direção (graus) mais frequente do dado	20,8456
Direção (graus) mais frequente do modelo	26,7553
<b>Erro percentual (%) na direção Modelo x Dado</b>	<b>28,35</b>

**Tabela III-7 - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 15 de dezembro de 2012 e 14 de janeiro de 2013 (PEPB1600).**

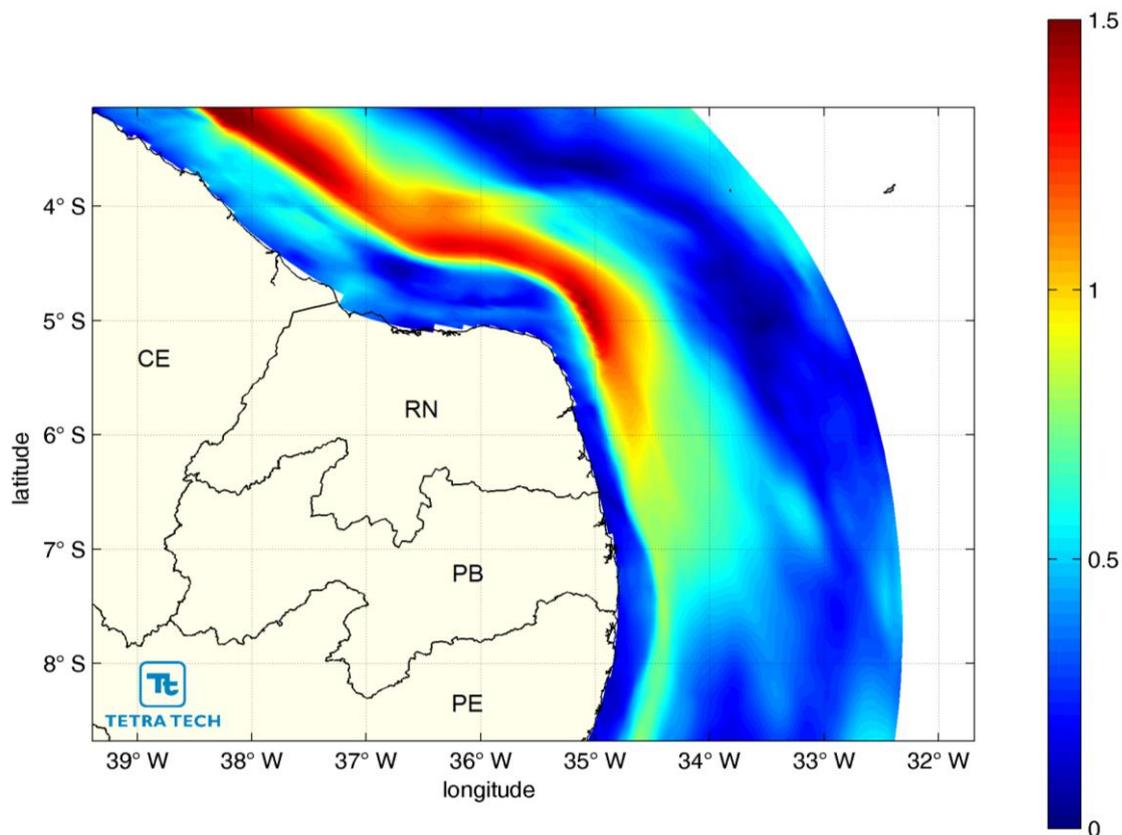
Média da velocidade (m/s) do dado	0,6608
Média da velocidade (m/s) do modelo	0,5598
<b>Erro percentual (%) na média da velocidade</b>	<b>15,29</b>
Velocidade máxima (m/s) do dado	0,8270
Velocidade máxima (m/s) do modelo	0,7039
<b>Erro percentual (%) na velocidade máxima</b>	<b>14,88</b>
Média da componente U (m/s) do dado	0,2167
Média da componente U (m/s) do modelo	0,1882
<b>Erro percentual (%) na média da componente U</b>	<b>13,13</b>
Média da componente V (m/s) do dado	0,6211
Média da componente V (m/s) do modelo	0,5266
<b>Erro percentual (%) na média da componente V</b>	<b>15,21</b>
DP da componente U do dado	0,0695
DP da componente U do modelo	0,0316
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente U</b>	<b>54,62</b>
DP da componente V do dado	0,0780
DP da componente V do modelo	0,0546
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente V</b>	<b>29,96</b>
Direção (graus) mais frequente do dado	16,3158
Direção (graus) mais frequente do modelo	19,4872
<b>Erro percentual (%) na direção Modelo x Dado</b>	<b>19,44</b>

**Tabela III-8 - Análise estatística dos resultados do modelo, para o período compreendido entre 17 de abril e 17 de maio de 2013 (PEPB1600).**

Média da velocidade (m/s) do dado	0,7870
Média da velocidade (m/s) do modelo	0,7192
<b>Erro percentual (%) na média da velocidade</b>	<b>8,62</b>
Velocidade máxima (m/s) do dado	1,0098
Velocidade máxima (m/s) do modelo	0,9170
<b>Erro percentual (%) na velocidade máxima</b>	<b>9,19</b>
Média da componente U (m/s) do dado	0,2312
Média da componente U (m/s) do modelo	0,2656
<b>Erro percentual (%) na média da componente U</b>	<b>14,89</b>
Média da componente V (m/s) do dado	0,7504
Média da componente V (m/s) do modelo	0,6671
<b>Erro percentual (%) na média da componente V</b>	<b>11,10</b>
DP da componente U do dado	0,0566
DP da componente U do modelo	0,0532
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente U</b>	<b>6,04</b>
DP da componente V do dado	0,0803
DP da componente V do modelo	0,0697
<b>Erro percentual (%) no desvio padrão da componente V</b>	<b>13,14</b>
Direção (graus) mais frequente do dado	16,1695
Direção (graus) mais frequente do modelo	22,8751
<b>Erro percentual (%) na direção Modelo x Dado</b>	<b>41,47</b>

Analisando os resultados apresentados na três tabelas, e supondo que o critério de qualificação proposto por Walstra *et al.* (2001) seja válido para a estimativa do erro percentual, temos que a maioria das características da corrente simulada pelo modelo apresentou-se excelente.

Finalmente, conforme descrito em TETRA TECH (2014b), a região é bastante influenciada pela Subcorrente Norte do Brasil (SNB) e pela Corrente Norte do Brasil (CNB). Verifica-se que o modelo teve a capacidade de representar esta circulação, conforme é ilustrado no resultado instantâneo de velocidades da Figura III-18.



**Figura III-18** - Resultado instantâneo do modelo, ilustrando o padrão de correntes da região. A barra de cores apresenta a magnitude da corrente (em m/s).

## ***IV CONSIDERAÇÕES FINAIS***

Com o intuito de auxiliar a PETROBRAS nas atividades de perfuração dos Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, na Bacia de Pernambuco – Paraíba, este estudo apresenta o modelo hidrodinâmico implementado na região utilizando o Sistema de Modelos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW. O modelo hidrodinâmico será utilizado como base para a modelagem numérica da trajetória de derrames de óleo.

Com relação ao modelo hidrodinâmico, duas grades numéricas foram implementadas: uma cobrindo toda a região de trajetória do óleo e uma menor compreendendo os estados de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte, com maior resolução nos estuários da Bacia Marinha de Pernambuco-Paraíba.

Os resultados do modelo foram avaliados através da sua comparação com dados de corrente apresentados em TETRA TECH (2014b) e com previsões harmônicas para estações localizadas em Fortaleza, Natal e Recife. As comparações demonstraram que a base hidrodinâmica apresentada tem a capacidade de representar de forma coerente a dinâmica da região.



## V BIBLIOGRAFIA

EPA (Environmental Protection Agency), 2000. Hydrodynamic and Water Quality Model of Christina River Basin. Region III, Philadelphia, PA. Final Report. December 5, 2000.

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

HESS, K.W. & BOSLEY, K.T. 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.

MELLOR, G. L. & T. YAMADA, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical uid problems." **Review of Geophysics and Space Physics** 20 (4): 851-875.

SAHA et al., 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27, 2185–2208. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

TETRA TECH, 2014a. Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para os Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3, Bacia de Pernambuco-Paraíba. Relatório Técnico, Revisão 00 (30 de abril de 2014). 408pp+Anexos.

TETRA TECH, 2014b. Diagnóstico Meteo-Oceanográfico para a Região dos Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3. Relatório Técnico, Revisão 00 (30 de abril de 2014). 158pp.

---

WALSTRA. L.C., VAN RIJN. L.C.. BLOGG, H.. & VAN ORMONDT. M. 2001. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. Report TR121 - EC MAST Project No. MAS3- 0197-0086. HR Wallingford, UK."

WILLMOTT C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. **American Meteorological Society Bulletin**, 1309-1313.

**VI EQUIPE TÉCNICA****Equipe da Empresa Consultora Tetra Tech Consultoria Ltda.**

<b>Profissional</b>	Ana Carolina R. Lammardo
<b>Empresa</b>	Tetra Tech Consultoria Ltda.
<b>Formação</b>	Oceanógrafa
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	1.689 (AOCEANO)
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	325047
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODOS
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Breno M. Q. Sierra
<b>Empresa</b>	Tetra Tech Consultoria Ltda.
<b>Formação</b>	Oceanógrafo
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	1.389 (AOCEANO)
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	1988616
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODOS
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Eduardo Yassuda
<b>Empresa</b>	Tetra Tech Consultoria Ltda.
<b>Formação</b>	Engenheiro Mecânico
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	060.184.738.5 (CREA)
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	94066
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODOS
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Gabriel Clauzet
<b>Empresa</b>	Tetra Tech Consultoria Ltda.
<b>Formação</b>	Físico
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	1031373
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODOS
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Marco Antonio Corrêa
<b>Empresa</b>	Tetra Tech Consultoria Ltda.
<b>Formação</b>	Físico
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434236
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODOS
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Maria Fernanda Mendes Fiedler
<b>Empresa</b>	Tetra Tech Consultoria Ltda.
<b>Formação</b>	Oceanógrafa
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	4968902
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODOS
<b>Assinatura</b>	_____

## **ANEXO 1 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D**

O sistema de modelos Delft3D (DELTARES, 2013) é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, bem como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. Além disso, este sistema pode atualizar a cada passo de tempo as cotas batimétricas decorrentes de alterações geomorfológicas de fundo (erosão e deposição de sedimentos), além do transporte de sedimentos (de fundo e em suspensão na coluna d'água).

A seguir, são descritas as principais características do modelo, através de seu módulo hidrodinâmico.

### **A1.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-FLOW**

Para resolver o problema de hidrodinâmica em escala espacial e temporal adequada para as aplicações finais (determinação do campo de correntes e elevação de nível da superfície d'água) e, simultaneamente, manter os custos computacionais em níveis razoáveis, optou-se pela utilização do modelo Delft3D.

A possibilidade de se trabalhar com grades altamente ajustáveis aos contornos foi a característica determinante para a escolha deste modelo. A acomodação da grade numérica à linha de costa permite uma apurada representação do corpo d'água em estudo. Para a solução do problema dinâmico são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, além da utilização das aproximações hidrostáticas e de Boussinesq.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. A estrutura vertical, quando ativada na formulação, é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão horizontal.

A grade implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos dinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

### **A1.1.1 - Processos Físicos**

A implementação do modelo hidrodinâmico foi baseada em um sistema de equações de águas rasas tridimensionais. O sistema de equações consiste nas equações horizontais da quantidade de movimento, na equação de continuidade e nas equações de transporte para constituintes conservativos. Tal conjunto de equações é derivado das equações tridimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A seguir, são descritas as considerações e aproximações do modelo:

- O Delft3D permite que se adote o sistema de coordenadas sigma ( $\sigma$ ) ou coordenadas Z no eixo vertical. A profundidade é assumida como sendo muito menor do que a escala horizontal. Então, devido à reduzida razão de aspecto, as aproximações para o sistema de águas rasas tornam-se válidas e, por conseguinte, a equação vertical do movimento reduz-se à equação hidrostática;
- O efeito da densidade é considerado somente através de seu efeito na pressão (aproximação de Boussinesq);
- Utiliza-se o sistema de coordenadas cartesianas, não considerando o efeito da curvatura da Terra. Além disso, o parâmetro de Coriolis é assumido como uniforme;
- Assume-se uma condição de deslizamento no fundo (*slip boundary condition*) e é aplicada uma formulação de segunda ordem (quadrática) ao cisalhamento no fundo;
- A formulação para a tensão de cisalhamento no fundo devido à ação conjunta das ondas e correntes é baseada num campo de fluxo 2D, gerado a partir da velocidade próxima ao fundo, utilizando uma aproximação logarítmica;

- As equações do Delft3D-FLOW são capazes de resolver as escalas turbulentas (*large eddy simulation*). No entanto, as grades são geralmente muito grosseiras para resolver estas flutuações. Desta forma, as equações utilizadas são baseadas nas tensões de Reynolds;
- No Delft3D-FLOW os vórtices turbulentos são definidos pela profundidade da água. Sua contribuição à troca vertical da quantidade de movimento horizontal e da massa é modelada através de um coeficiente de viscosidade vertical turbulenta e difusividade turbulenta. Assume-se que os coeficientes são proporcionais à escala de velocidade e comprimento. Os coeficientes devem ser especificados (valor constante) ou computados por modelos algébricos, de turbulência k-L ou k- $\epsilon$ , onde k representa a energia cinética turbulenta, L é o máximo comprimento e  $\epsilon$ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;
- Em concordância com a razão de aspecto para consideração da formulação de águas rasas, a geração de turbulência é baseada no gradiente vertical do fluxo horizontal;
- A velocidade em um ponto de grade assume magnitude zero quando a altura da coluna d'água atinge cotas inferiores à metade daquela definida pelo usuário<sup>5</sup>. A velocidade pode retornar a magnitudes diferentes de zero quando a altura da coluna d'água atingir valores acima da metade do valor de corte;
- Uma célula é considerada "seca" quando os quatro pontos de velocidade nas extremidades da célula secarem, ou quando a profundidade da água no centro da célula for menor que zero (volume negativo);
- O fluxo de massa através dos contornos laterais e de fundo é nulo;
- Quando não é especificado o campo de temperaturas, a troca de calor com a atmosfera é anulada. A troca de calor através do fundo é nula.
- Se a troca de calor com a superfície da água é computada, utilizando um modelo de temperatura, o coeficiente de troca é função da temperatura e da velocidade do vento e, é determinado de acordo com Sweers (1976).

---

<sup>5</sup> Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

Assume-se que a temperatura do ambiente é constante no espaço e pode variar no tempo. Em outras formulações de troca de calor, os fluxos devido à radiação solar, atmosférica e radiação de fundo, convecção e perdas de calor devido à evaporação são modelados separadamente;

- O efeito da precipitação na temperatura da água é representado.

No próximo subitem, são apresentadas as equações básicas que governam o modelo implementado.

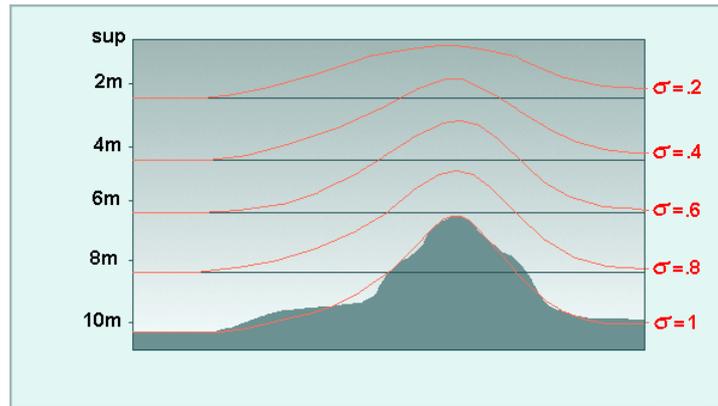
### **A1.1.2 - Equações Básicas**

O modelo adotado resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e de Boussinesq. A aceleração vertical é desprezada na equação da quantidade de movimento vertical, resultando na aproximação hidrostática. Desse modo, a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

#### O Sistema de Coordenadas Sigma ( $\sigma$ )

O sistema de coordenadas sigma ( $\sigma$ ) foi introduzido em modelos atmosféricos (PHILLIPS, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos  $\sigma$ , não exatamente horizontais, que acompanham as variações da batimetria e do nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma feição suavizada para a batimetria (Figura A1).

O número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada  $\sigma$  é usualmente não uniforme. Esta propriedade permite maior resolução nas áreas de interesse, como em regiões superficiais (importante para fluxos devido ao vento e trocas de calor com a atmosfera) e áreas próximas ao fundo (para cálculos de transporte de sedimentos).



**Figura 1.1.2 -1-** Exemplo de uma aplicação de coordenadas.

O sistema de coordenadas  $\sigma$  é definido como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

onde:

- $z$  a coordenada vertical no espaço físico;
- $\zeta$  a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ( $z = 0$ );
- $d$  profundidade abaixo do plano de referência;
- $H$  profundidade local total ( $H = d + \zeta$ ).

No sistema de coordenadas  $\sigma$ , a coordenada vertical no fundo é definida como  $\sigma = -1$ , e na superfície como  $\sigma = 0$  (ver Figura 1.1.1-1). As derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas são expressas em coordenadas  $\sigma$  após modificações (“regra da cadeia”) e termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994).

O domínio de modelagem tridimensional para o fluxo consiste em um plano horizontal de uma área restrita (limitada) composta de contornos abertos e fechados (terra) e vertical (número de camadas). No sistema de coordenadas  $\sigma$  o número de camadas é constante em todos os locais do plano horizontal. Para cada camada vertical, um sistema de equações conservativas é resolvido.

### Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

onde:

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$  coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$  coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\xi, \eta$  coordenadas no sistema cartesiano;

$U, V$  velocidades médias (na vertical) nas direções  $\xi, \eta$

$Q$  representa as contribuições por unidade de área devido à fonte ou sumidouro de água, precipitação e evaporação:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E$$

onde:

$q_{in}$  fonte de água por unidade de volume;

$q_{out}$  sumidouro de água por unidade de volume;

$P$  precipitação;

$E$  evaporação.

A tomada d'água de uma usina, por exemplo, deve ser modelada como um sumidouro. Na superfície pode haver uma fonte devido à precipitação ou um sumidouro devido à evaporação.

### Equações da Quantidade de Movimento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de movimento, nas direções  $\xi$  e  $\eta$ , são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned}$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas ( $P_\xi$  e  $P_\eta$ ). As forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$ , nas equações acima, representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds, enquanto  $M_\xi$  e  $M_\eta$  representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros).

### Velocidades Verticais

A velocidade vertical ( $\omega$ ) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas  $\sigma$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \\ = H(q_{in} - q_{out}) \end{aligned}$$

Na superfície o efeito da precipitação e evaporação é levado em conta. A velocidade vertical  $\omega$  é definida nas superfícies  $\sigma$ . A velocidade vertical ( $\omega$ ) é referente ao movimento em  $\sigma$ , e pode ser interpretada como a velocidade

associada aos movimentos de subida e descida. As velocidades verticais  $w$  (em sua “concepção física”), no sistema de coordenadas cartesianas, não são consideradas nas equações do modelo e são computadas apenas para fins de pós-processamento. Estas velocidades podem ser expressas em função das velocidades horizontais ( $u$  e  $v$ ), profundidade da coluna d’água ( $H$ ), elevação do nível d’água ( $\zeta$ ) e velocidade vertical ( $\omega$ ), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[ u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right)$$

### Pressão hidrostática

Ao se adotar a aproximação das equações de águas rasas para o sistema em estudo, a equação vertical para a quantidade de movimento é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de fluutuabilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto,

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H$$

Após a integração da equação acima, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma'$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi}$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta}$$

### Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis ( $f$ ) depende da latitude geográfica ( $\phi$ ) e da velocidade angular de rotação da Terra ( $\Omega$ ). Portanto,

$$f = 2\Omega \sin\phi$$

### Tensões de Reynolds

As forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$  nas equações da quantidade de movimento representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta, e pode ser observada em maiores detalhes em Rodi (1984). Dento deste conceito, as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação.

Considerando águas rasas, o tensor de Reynolds é anisotrópico. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta ( $\nu_H$ ) é muito maior de que sua contra parte vertical ( $\nu_V$ ). O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes:

1. uma parte devido a “turbulência de escala subgrade”;
2. uma parte devido a “turbulência tridimensional (3D)”;
3. uma parte devido a dispersão, para simulações representando médias na coluna d’água.

Em simulações onde as equações de quantidade de movimento e transporte são médias na coluna d’água, a distribuição da quantidade de movimento e material devido à variação vertical da velocidade horizontal, é denominada dispersão. Como o perfil vertical da velocidade horizontal não é resolvido nas simulações 2D, a dispersão não é simulada. O efeito dispersivo pode ser modelado como o produto do coeficiente de viscosidade e o gradiente de velocidade. O termo dispersivo pode ser estimado pela formulação de Elder.

Se o perfil vertical da velocidade horizontal não se aproximar de um perfil logarítmico (devido à estratificação ou a forçante do vento), recomenda-se utilizar um modelo 3D para o transporte de materiais.

A viscosidade turbulenta na horizontal é principalmente associada à contribuição dos movimentos turbulentos na horizontal e forçantes não resolvíveis na malha horizontal (“turbulência de escala subgrade”) ou por equações de águas rasas com médias de Reynolds. É introduzida a viscosidade turbulenta na horizontal na escala de subgrade ( $v_{SGS}$ ) e a viscosidade turbulenta na horizontal ( $v_H^{amb}$ ). O Delft3D-FLOW simula os movimentos turbulentos na horizontal (em larga escala) através da metodologia denominada *Horizontal Large Eddy Simulation (HLES)*. O  $v_{SGS}$  será computado por um modelo de turbulência.

A viscosidade horizontal do meio, definida pelo usuário é representada pela  $v_H^{amb}$ . Conseqüentemente, no Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade turbulento na horizontal é definido por:

$$v_H = v_{SGS} + v_V + v_H^{amb}$$

A parte  $v_V$  se refere à turbulência tridimensional e, nas simulações 3D, é computada a partir de um modelo de fechamento turbulento 3D.

Para modelos de fechamento turbulento que respondem apenas ao cisalhamento gerado, é conveniente especificar um coeficiente de mistura vertical de forma a contabilizar outras formas de mistura não resolvíveis, ( $v_V^{amb}$ ). Por isso, além de todos os modelos de fechamento turbulento, no Delft3D-FLOW deve-se especificar uma constante (no espaço e no tempo) que represente o coeficiente de mistura do ambiente (valor referente à viscosidade turbulenta na vertical das equações de quantidade de movimento). Conseqüentemente, o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical é definido por:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb})$$

onde  $v_{mol}$  é a viscosidade cinemática da água. A parte  $v_{3D}$  é computada através de um modelo de fechamento turbulento.

A fim de modelar o fluxo secundário em simulações 2D em curvas de rios, o Delft3D-FLOW contém uma formulação para levar em conta o efeito do

movimento espiral. Assim, a tensão de cisalhamento na horizontal é estendida considerando um termo adicional.

O sistema de coordenadas  $\sigma$  rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica na adição de termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (BLUMBERG & MELLOR, 1985). Então, as forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$  são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta}$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta}$$

Para fluxos em pequena escala, quando o cisalhamento nos contornos fechados precisar ser levado em conta, os tensores de cisalhamento  $\tau_{\xi\xi}$ ,  $\tau_{\xi\eta}$ ,  $\tau_{\eta\xi}$ ,  $\tau_{\eta\eta}$  são determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left( \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{G_{\eta\eta}} \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left( \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\}$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left( \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right)$$

Para simular fluxos em larga escala, com grades horizontais grosseiras, quando o cisalhamento nos contornos fechados puder ser negligenciado, as forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$  são simplificadas. Os termos de viscosidade horizontal, no Delft-

FLOW, são então reduzidos para o operador de Laplace ao longo das linhas da grade:

$$F_{\xi} = \nu_H \left( \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right)$$

$$F_{\eta} = \nu_H \left( \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right)$$

Onde se assume que a viscosidade turbulenta é constante.

### Equação de Estado

A densidade da água ( $\rho$ ) é uma função da salinidade ( $s$ ) e da temperatura ( $t$ ). O modelo Delft3D utiliza uma relação empírica (ECKART, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_0}{\lambda + \alpha_0 P_0}$$

onde:

$$\lambda = 1779,5 + 11,25t - 0,0745t^2 - (3,80 + 0,01 t) s$$

$$\alpha_0 = 0,6980$$

$$P_0 = 5890 + 38 t - 0,375t^2 + 3 s$$

com a salinidade ( $s$ ) em ‰ e a temperatura da água ( $t$ ) em °C.

## **A1.2 - BIBLIOGRAFIA**

BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L., 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. **Monthly Weather Review**, 113(8).

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

ECKART, C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. **American Journal of Science**, 256, 225-240.

PHILLIPS, N.A., 1957. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting, **J. of Meteorology**, vol. 14.

RODI, W. 1984. Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'etat de connaissance. IAHR paper presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics, The Netherlands.

STELLING, G.S. & VAN KESTER, J.A.TH.M., 1994. On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, **Int. J. Num. Meth. Fluids**, Vol. 18, 915-955.

SWEERS, H.E. 1976. A nomogram to estimate the heat exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. **Journal of Hydrology**, Vol. 30:4, 375-401.