

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS**

Letícia Vasques dos Reis Portella Nascimento

**HIDRODINÂMICA TEMPORAL E RESIDUAL DE UMA PRAIA DE  
ENSEADA SUBTROPICAL:  
ESTUDO DE CASO DA ENSEADA DO ITAPOCORÓI**

Florianópolis

2017

Letícia Vasques dos Reis Portella Nascimento

**HIDRODINÂMICA TEMPORAL E RESIDUAL DE UMA PRAIA DE  
ENSEADA SUBTROPICAL:  
ESTUDO DE CASO DA ENSEADA DO ITAPOCORÓI**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia para a obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia.  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho

Florianópolis

2017

Este trabalho é dedicado à minha mãe, que me ensinou o que é lutar de verdade.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar com um agradecimento especial genérico a todos aqueles que aguentaram os choros, as indecisões e os desesperos... que tiraram um pouquinho do seu tempo para me ajudar, pra me acalmar ou pra me ensinar. Vocês fizeram com que as coisas fossem melhores. Obrigada.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Fetter, por todo ensinamento que me foi passado com tanta paciência e por acreditar que seria possível realizar esse mestrado.

Agradeço ao Prof. Dr. Antonio H. da F. Klein e ao Professor João Luiz Baptista de Carvalho por terem gentilmente cedido os dados medidos imprescindíveis para o desenvolvimento do atual trabalho. Também devo agradecer à CB&I por toda a compreensão que foi necessária para que eu pudesse participar deste mestrado, bem como todo o apoio durante o processo.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Eric, por estar sempre disponível para me ajudar, 24/7. Obrigada por ter sido um anjo de guarda.

Ao meu irmão, Joninhos, que me apoiou na caminhada dura e em inúmeras noites de estudo. Por sempre me ajudar a analisar as coisas via whatsapp. Você sabe o quanto te amo.

Aos queridos Felipe (Mineiro) e Lucas por me salvarem em mec flu. Obrigada pela parceria.

À Gabi, Charline, Jacqueline, Amanda e Fernando, Jessica, Marina, Juliana, Guilherme e Camila, Augusto, Marcelo, Ivana... pela parceria, amizade e amor. Amo vocês.

À Sara, pela amizade e pela cuia sem a qual eu não conseguiria terminar o mestrado.

Aos queridos Gui Diego, Jonathan, Naomi, Feijão, Mainha, Luis, João Boquinha e todo o pessoal da Crave e Conéctar, por terem me feito me sentir em casa em uma cidade totalmente estranha.

À mais algumas pessoas especiais que também fizeram diferença em algum momento da minha vida: Fernando, Godô, Júlia, Corinne, Quel e Alce, Luiz, Elisa, Luana, Victor...

Ao meu querido Mário que me ajudou a começar trilhar caminhos que eu jamais imaginei seguir. Você é demais!

Aos meus queridos amigos pythonicos: Vanessa, Elias, Masanori, Valdir, Leite, Jairo, Ivan, Henrique Bastos, Shiga, João, Biguá e todo “clube dos mozaum” por terem acreditado em mim e me ajudado a criar asas pra ir mais longe. Por todos os ensinamentos, por todas as lições.

Ao Sérgio que acreditou no meu potencial para me trazer pro time da Crave e por sempre ter as ferramentas de trabalho que eu preciso desesperadamente :)

Ao Wandrey e à Lu, por terem me dado energia em um momento que eu estava prestes a desabar.

Ao Nery, que me salvou nos minutos finais da partida.

Ao meu amor, Marco, por toda paciência, carinho e amor. Meu amor é todo seu :)

Aos meus queridos pais postiços, Nádia e Marcos, Geca e Victor. O apoio e amor de vocês foram fundamentais. Obrigada por fazerem parte da família que eu escolhi para mim.

À minha querida Consuelo... obrigada por me ouvir falar 300 vezes as mesmas coisas, por me amar, por rezar e estar sempre acreditando que eu vou conseguir.

Ao amor da minha vida, minha mãe, que me apoiou em todos os momentos, até nos sonhos mais loucos. Que me ensinou como lutar de verdade por essa vida tão difícil. Você é meu exemplo e motivação. Obrigada por tudo.

E ao meu pai, pois o seu amor é sentido até hoje apesar de tanto tempo ter se passado.

Now is better than never

(The Zen of Python, 2004)

## RESUMO

O presente estudo tem o objetivo de avaliar a hidrodinâmica da Enseada do Itapocorói com foco na circulação residual e de longo período buscando compreender quais forçantes ambientais são mais relevantes na geração dessas correntes e qual é o padrão de circulação de longo prazo. Para alcançar este objetivo, fez-se a análise dos resultados de 3 perfiladores acústicos do tipo *Acoustic Doppler Current Profilers* (ADCPs) dispostos ao longo da enseada em posições com diferentes graus de ondulação e um marégrafo localizado na enseada ao lado, em Penha. Também foi utilizado o modelo hidrodinâmico, Delft3D para analisar o comportamento espacial das correntes locais. O modelo foi desenvolvido em escala local e calibrado com dados provenientes dos ADCPs. Verificou-se que as correntes na região possuem padrão bastante ameno, com velocidades abaixo de  $40\text{cm}.\text{s}^{-1}$  em todo domínio e abaixo de  $20\text{cm}.\text{s}^{-1}$  nas regiões mais internas, protegidas pelo promontório da Ponta da Penha. Ao menos 1/4 da energia local provém de períodos acima de 50h, indicando forte presença de ondas de plataforma e correntes residuais. Verificou-se também que o vento tem um papel mais relevante na circulação residual da Enseada e que, ventos da ordem de  $10\text{m}.\text{s}^{-1}$  geraram correntes residuais de até  $2\text{cm}.\text{s}^{-1}$ , o que indica que correntes residuais podem chegar a quase 20% das correntes que ocorrem na região. Também verificou-se a presença de vórtices em sentido horário para ventos de NE e anti-horário para ventos de S e SE. Ventos de E não geram vórtices na região da Enseada. A corrente residual tem padrão tipicamente de sul para norte em ventos de S, SE e E e de norte para sul em ventos de NE.

**Palavras-chave:** Circulação Residual. Modelagem Numérica. Delft3D.

## ABSTRACT

The current study has the goal of evaluating the hydrodynamic behavior of the Itapocorói Bay, with a focus on the residual and long-term circulation, in order to better understand which environment forcings are more important to its generation. To achieve this goal, data from 3 Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs) were analyzed as well as a tide gauge located on a bay nearby, Penha Bay. Also, it was made use of a numerical model called Delft3D to better comprehend the spacial dynamic of local currents. The model was developed with a local grid and calibrated with data from the ADCPs. The current in the bay are very mild, usually below  $40\text{cm}.\text{s}^{-1}$  in the entire region and below  $20\text{cm}.\text{s}^{-1}$  in sheltered areas inside the bay. At least a quarter of local energy is contained in periods greater than 50h, indicating a strong presence of platform waves and residual currents. Winds revealed to be the most influent parameter in residual current generation, and winds with velocity of  $10\text{m}.\text{s}^{-1}$  generated currents up to  $2\text{cm}.\text{s}^{-1}$ , which represents 20% of the typical current velocity of the study area. Two vortex were identified on the study area: a clockwise vortex with NE winds, and a counterclockwise vortex when winds are from S and SE. E winds do not generate any kind of vortex. The current pattern are typically from north to south in NE winds, and from south to north in winds from E, S and SE.

**Keywords:** Residual Circulation. Numerical Modelling. Delft3D.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização da Enseada do Itapocorói.....	16
Figura 2 Efeitos da erosão em Piçarras. Fonte: Maciel (2010).....	18
Figura 3 Imagem do Google Earth da Praia de Piçarras de 18 de Setembro de 2015. Fonte: Google Earth.....	19
Figura 4 Máxima elevação do nível do mar causada por marés meteorológicas e astronômicas. Fonte: Parise et al. (2009).....	20
Figura 5 Fluxograma da metodologia aplicada. ....	22
Figura 6 Localização das coletas de dados através de ADCPs.....	25
Figura 7 Dados medidos no ADCP ST001. Pontos em vermelho indicam que os dados foram obtidos através de interpolação linear e os dados em azul são dados medidos pelo ADCP. ....	26
Figura 8 Localização das variáveis calculadas em uma malha do tipo Arakawa C. ....	28
Figura 9 Interface gráfica do TMD para obtenção das constituintes harmônicas calculadas pelo modelo TPXO.....	29
Figura 10 Variação de Nível no ponto ST001 separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).....	35
Figura 11 Variação de Nível no ponto ST002 separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).....	36
Figura 12 Variação de Nível no ponto ST003 separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).....	37
Figura 13 Variação de nível medido em Penha separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).....	38
Figura 14 Evento de maré meteorológica negativa registrado .....	39
Figura 15 Espectro de energia em Piçarras - ST001 .....	42
Figura 16 Espectro de energia em Piçarras - ST002 .....	43
Figura 17 Espectro de energia em Piçarras - ST003 .....	44
Figura 18 Espectro de energia em Penha.....	45
Figura 19 Detalhe do espectro de energia em Penha onde pode-se observar os picos referentes às constantes harmônicas semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (K1 e O1), respectivamente.	45
Figura 20 Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha azul apresenta as variações no ponto ST001 (equipamento mais abrigado) enquanto a linha verde indica as variações no ponto ST003 (equipamento mais externo). Verifica-se que as variações de temperatura diminuem conforme a medição ocorre em águas mais profundas.....	47
Figura 21 .....	48
Figura 22 Dados de temperatura na Enseada de Piçarras onde os dados do ponto ST002 e ST003 apresentam dados horários apenas.....	49
Figura 23 O primeiro gráfico (superior) apresenta os dados de temperatura do ponto ST001 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho). O segundo gráfico (meio) apresenta o valor de temperatura uma vez retirada a tendência linear apresentada	

na figura superior. O terceiro gráfico (inferior) apresenta o espectro de energia no domínio da frequência.....	50
Figura 24 O primeiro gráfico (superior) apresenta os dados de temperatura do ponto ST002 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho). O segundo gráfico (meio) apresenta o valor de temperatura uma vez retirada a tendência linear apresentada na figura superior. O terceiro gráfico (inferior) apresenta o espectro de energia no domínio da frequência.....	51
Figura 25 O primeiro gráfico (superior) apresenta os dados de temperatura do ponto ST003 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho). O segundo gráfico (meio) apresenta o valor de temperatura uma vez retirada a tendência linear apresentada na figura superior. O terceiro gráfico (inferior) apresenta o espectro de energia no domínio da frequência.....	52
Figura 26 Comparação entre a elevação meteorológica de nível (figura superior), a variação de temperatura (figura central) e a intensidade e direção do vento (figura inferior) no ponto ST001.....	54
Figura 27 Comparação entre a elevação meteorológica de nível (figura superior), a variação de temperatura (figura central) e a intensidade e direção do vento (figura inferior) no ponto ST002.....	55
Figura 28 Comparação entre a elevação meteorológica de nível (figura superior), a variação de temperatura (figura central) e a intensidade e direção do vento (figura inferior) no ponto ST003.....	56
Figura 29 Rosa de correntes no ponto ST001 integrada na vertical (em cm).....	58
Figura 30 Rosa de correntes no ponto ST002 integrada na vertical (em cm).....	58
Figura 31 Rosa de correntes no ponto ST003 integrada na vertical (em cm).....	59
Figura 32 Histograma da velocidade de corrente no ponto ST001 integrada na vertical....	59
Figura 33 Histograma da velocidade de corrente no ponto ST002 integrada na vertical....	59
Figura 34 Histograma da velocidade de corrente no ponto ST003 integrada na vertical....	60
Figura 35 Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST001. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.....	60
Figura 36 Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST002. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.....	61
Figura 37 Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST003. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.....	61
Figura 38 Grade numérica .....	63
Figura 39 Batimetria interpolada na grade numérica. ....	64
Figura 40 RMSE para a componente U da velocidade em ST001.....	67
Figura 41 RMSE para a componente U da velocidade em ST002.....	68
Figura 42 RMSE para a componente U da velocidade em ST003.....	69
Figura 43 RMSE para a componente V da velocidade em ST001.....	70
Figura 44 RMSE para a componente V da velocidade em ST002.....	71
Figura 45 RMSE para a componente V da velocidade em ST003.....	72
Figura 46 Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 01.....	74
Figura 47 Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 01.....	75
Figura 48 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 02.....	76
Figura 49 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 03.....	77

Figura 50 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 04.....	78
Figura 51 Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 05.....	79
Figura 52 Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 05.....	80
Figura 53 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 06.....	81
Figura 54 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 07.....	82
Figura 55 Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 07.....	83
Figura 56 Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de sizigia no Cenário 07 .....	84
Figura 57 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 08.....	85
Figura 58 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 09.....	86
Figura 59 Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 10.....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Movimento estimado de turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012) .....	17
Tabela 2 Receita estimada em reais para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012) .....	17
Tabela 3 Principais atrativos turísticos considerados pelos turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012) .....	17
Tabela 4 Localização dos equipamentos .....	23
Tabela 5 Cartas Náuticas utilizadas .....	30
Tabela 5 Cartas Náuticas utilizadas .....	31
Tabela 6 Características das Variações de Nível Medidas (em metros) .....	33
Tabela 7 Estatística dos valores de nível das marés meteorológicas medidas (em metros) .....	34
Tabela 8 Número de Forma para cada um dos dados analisados. ....	40
Tabela 9 Porcentagem de energia em períodos acima de 50h .....	41
Tabela 10 Características dos dados de temperatura.....	46
Tabela 11 Propriedades da grade numérica.....	62
Tabela 12 Configurações utilizadas na calibração.....	65
Tabela 13 Amplitude máxima do valor medido e percentual de erro do modelo para cada equipamento e parâmetro medido .....	66
Tabela 14 Configuração dos cenários de análise.....	73

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1	PERGUNTAS DE PESQUISA . . . . .	11
1.2	HIPÓTESE . . . . .	12
1.3	OBJETIVOS . . . . .	12
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	12
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1	MARÉ E CIRCULAÇÃO RESIDUAL . . . . .	13
2.2	ÁREA DE ESTUDO . . . . .	16
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>22</b>
3.1	DADOS MEDIDOS . . . . .	23
3.2	MODELO NUMÉRICO . . . . .	27
3.2.1	DELFT3D-FLOW . . . . .	27
3.3	FORÇANTES DOS MODELOS . . . . .	28
3.3.1	Maré . . . . .	28
3.3.2	Vento . . . . .	29
3.4	DADOS DIVERSOS . . . . .	29
3.4.1	Vento . . . . .	29
3.4.2	Linha de Costa . . . . .	30
3.4.3	Batimetria . . . . .	30
3.5	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO . . . . .	31
3.6	ANÁLISES UTILIZADAS . . . . .	32
3.6.1	TTide . . . . .	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>33</b>
4.1	DESCRIÇÃO DOS DADOS MEDIDOS . . . . .	33
4.1.1	Nível . . . . .	33
4.1.2	Temperatura . . . . .	46
4.1.3	Nível, Temperatura e Vento . . . . .	53
4.1.4	Corrente . . . . .	57
4.2	MODELO NUMÉRICO . . . . .	62
4.2.1	Grade Numérica e Batimetria . . . . .	62
4.2.2	Calibração . . . . .	65
4.2.3	Cenários de análise . . . . .	73
4.2.4	Mapas de Residuais . . . . .	74
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>92</b>
	REFERÊNCIAS . . . . .	93
	APÊNDICE A - Modelagem Numérica de Zonas Costeiras: uma revisão	99
	APÊNDICE B - Análises de Constantes Harmônicas . . . . .	104
	APÊNDICE C - Análise dos Dados de Vento . . . . .	114
	APÊNDICE D - Figuras Extras . . . . .	122

## 1 INTRODUÇÃO

Sentado numa cadeira na praia, um turista pode perceber facilmente que existe uma dinâmica na praia que o cerca. As ondas quebram incessantemente, às vezes maiores, às vezes menores, o vento varia de intensidade e direção e a faixa de areia pode se apresentar maior ou menor conforme o horário em que ela é observada. Apesar de facilmente observados, os processos costeiros que regem as dinâmicas de zonas costeiras são bastante complexos e interligados.

A zona costeira é uma região de alto dinamismo, e está sujeita a oscilações periódicas de altas e baixas frequências como ondas e marés, respectivamente. Dado que a água pode ser considerada incompressível, o volume remanescente após uma oscilação deve ser conservado e é de se esperar que as componentes geradas pela oscilação tenham uma resultante nula (LEBLOND, 1991). Entretanto, o que se observa na realidade é que a resultante das oscilações durante longos períodos (por exemplo, após um ou vários ciclos de maré) é não nula. Essa resultante pode ser causada ou amplificada por diversos parâmetros ambientais tais como: não linearidade da corrente de maré, padrão de onda predominante, direção do vento predominante, eventos de tempestade, entre outros (BROWN et al., 2010, e.g.).

As magnitudes dessas correntes residuais e de longo período normalmente são ordens de magnitude menores que as correntes de maré. No entanto, mesmo sendo muito menos intensas, a magnitude e a variação espacial e temporal dessa circulação exerce uma grande influência na interação de processos físicos, bioquímicos e sedimentares. Os processos de transporte através da circulação residual e de longo período têm controle sobre fluxo de água doce, descarga de contaminantes, dispersão e transporte de sedimentos e nutrientes além de poderem auxiliar na manutenção ou declínio de recursos vivos (CHENG, 1990). Além disso, dependendo da variação dessa circulação, seja por sazonalidade ou pela frequência dos eventos de tempestade, a mesma também pode ter papel fundamental na morfodinâmica regional (BROWN et al., 2010).

A Enseada do Itapocorói se destaca no cenário catarinense pela grande importância turística. No entanto, a região sofre com sucessivos problemas erosivos desde a década de 70, quando a barra do rio Piçarras foi fixada (HEUVEL et al., 2008). Considerando então a importância econômica e social da Enseada do Itapocorói tanto em termos econômicos como sociais, o seu estudo é de vital importância. Visto que a circulação residual pode ter um papel importante para o entendimento do transporte de partículas, um estudo da mesma pode vir a contribuir para o entendimento da morfodinâmica de longo prazo, bem como avaliar a taxa de recirculação local, podendo colaborar para a melhora da qualidade da água. Além disso, o estudo da morfodinâmica de enseadas necessita que os processos hidrodinâmicos da região sejam bem conhecidos (SILVA et al., 2010). Dessa forma, o presente estudo visa avaliar o comportamento hidrodinâmico da região focando na circulação residual bem como o papel dos parâmetros ambientais da região em sua formação, de forma a avaliar qual parâmetro é mais relevante na modificação dessa circulação.

As correntes residuais dificilmente conseguem ser medidas em campo (CHENG, 1990) por isso, para alcançar o objetivo proposto, será feito uso da modelagem numérica e avaliação de dados de ADCP (temperatura, corrente, ondas e nível) coletados ao longo de um mês em três pontos na enseada.

### 1.1 PERGUNTAS DE PESQUISA

- Qual é o padrão espacial típico da circulação submareal da Enseada? E temporal?
- Quais os parâmetros ambientais têm maior influência na circulação residual?

## 1.2 HIPÓTESE

Existe uma circulação residual típica na Enseada do Itapocorói que é gerada principalmente por um algum fator ambiental (maré ou vento), mas cujas características principais podem ser eventualmente alteradas no caso de eventos de tempestade.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do estudo é compreender o padrão de circulação local e a circulação residual na Enseada do Itapocorói (Balneário Piçarras), bem como as variáveis ambientais que os influenciam, através do uso de modelagem numérica de forma a compreender os padrões de longo prazo e as possíveis influências destes na área de estudo.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Caracterizar a circulação local através da análise das séries de fundo;
- Descrever características meteo-oceanográficas da região;
- Construção de um modelo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW) para a área de estudo;
- Calibração dos modelos hidrodinâmicos com dados provenientes de 3 equipamentos;
- Definir o padrão típico da circulação residual;
- Compreender o papel dos parâmetros ambientais na modificação da circulação e qual o parâmetro dominante;
- Definir a circulação residual na Enseada do Itapocorói para cada cenário analisado;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MARÉ E CIRCULAÇÃO RESIDUAL

As principais variações de nível ocorridas em zonas costeiras acontecem devido às oscilações causadas pelas marés, tornando-se de fundamental importância para estudos costeiros o seu conhecimento, bem como as correntes que são geradas (EBBERT; EROFEEVA, 2002). Apesar de bem compreendidas num âmbito global, a onda de maré em águas costeiras tem uma dinâmica muito diferente daquela encontrada em regiões oceânicas (LEBLOND, 1991).

As marés são consideradas ondas de água rasa e, portanto, estão sempre sujeitas à influência do fundo. Entretanto, ao adentrar águas ainda mais rasas, como as plataformas continentais interna, as suas escalas laterais passam a ser reduzidas (LEBLOND, 1991). Conforme a onda de maré passa a propagar para águas costeiras ela tende a interagir e sofrer diversos processos: reflexão total ou parcial (uma vez que a linha de costa passa a agir como uma barreira), efeitos iniciais, efeitos de continuidade, perda de energia por fricção, entre outros. Dessa forma, uma vez que se encontra em águas rasas, a onda de maré se torna progressivamente não linear e dissipativa. Além disso, esses processos não lineares podem transferir energia para constituintes harmônicas de águas rasas totalmente novas (SCHUREMAN, 1958; MASSEL, 1989; PARKER, 2007). Outra consequência da redução das escalas laterais é a criação de regiões de gradiente de velocidade. Os termos iniciais passam a ganhar importância no balanço de momento e contribuem para a geração de correntes residuais e vorticidade (LEBLOND, 1991). Portanto, em águas rasas, vários processos compõem um complexo cenário a ser estudado e, por mais que os fenômenos que gerem as marés sejam muito bem conhecidos e compreendidos, os movimentos resultantes requerem um estudo mais aprofundado.

Ao se considerar a água como incompressível, independente das oscilações ocorridas, seria natural se pensar, em um primeiro momento, que o residual da circulação deveria ser nulo (LEBLOND, 1991). O que se vê na realidade é bastante distinto e a observação de longo prazo nos dá a clara predominância de uma direção indicando a presença de resultantes não nulas. A fonte mais óvia de geração de velocidade residual é a descarga fluvial, uma vez que seu fluxo é unidirecional. Entretanto, o que se observa é que existem resultantes de velocidade mesmo em locais sem presença de rios. Diversos parâmetros ambientais podem gerar residuais de velocidade. Entre eles podemos citar não linearidade da corrente de maré, padrão de onda predominante, direção do vento predominante, eventos de tempestade, diferença de densidade, características batimétricas ou mesmo obras costeiras (TEE, 1976; TRUCCOLO, 2009; BROWN et al., 2010).

A circulação residual, especialmente a da maré, está normalmente relacionada a processos de longo período, com frequências baixas e velocidades uma ou duas ordens menores que as próprias correntes de maré e, assim, pode acabar sendo negligenciada por conta dessas características (CHENG, 1990). Apesar de serem consideradas irrelevantes quando comparadas com as correntes de maré, elas podem ser bastante relevantes em longo prazo dado que podem dominar o transporte e a distribuição geral de propriedades da água como temperatura e salinidade quando considerada a sua persistência. Dessa forma, sua determinação pode contribuir para o manejo costeiro (como o tempo de permanência de poluentes) ou mesmo para a proteção costeira, dado que ela também pode ter papel significante para o transporte de partículas sedimentares (TRUCCOLO, 2009).

Parker (1991) cita os trabalhos de Hunt e Johns (1963), Huthnance (1973) e Nihoul e Ronday (1975) como os primeiros trabalhos a proporem mecanismos de geração de correntes residuais geradas por maré. Hunt e Johns (1963) estudaram a geração de correntes de fundo induzidas por maré em águas rasas, já citando a importância de fluxos residuais tanto na circulação geral quanto em mudanças morfológicas significativas. Huthnance (1973) verificou

que as forças geradoras de correntes residuais em bancos de maré no Norfolk Sandbanks foram a força de Coriolis e fricção de fundo. Nihoul e Ronday (1975) mostraram que em regiões com marés expressivas os termos não lineares das equações passam a agir como uma “tensão de cisalhamento de maré” que, aliada ao vento, produz movimentos residuais.

De forma geral e simplificada, o termo circulação residual é utilizado para remeter às circulações de longo período, ou seja, o resultante da circulação uma vez que os processos atuantes são findados. No entanto é possível perceber na literatura uma certa variação em relação à sua definição.

Nihoul e Ronday (1975) discutem sobre as diferentes formas como o termo circulação residual é utilizado em diferentes campos. Os autores citam que, sob um olhar matemático, as correntes residuais podem ser consideradas como o fluxo estacionário descrito pelas equações fundamentais desconsiderando os termos transitentes das equações. Em se tratando do campo experimental, tende-se a definir as correntes residuais como o fluxo que sobra ao se subtrair uma maré modelada (ou prevista) de um fluxo medido. Segundo os autores, ainda existem os cientistas que consideram as correntes residuais aquelas encontradas após se realizar uma integração das correntes naturais ao longo de um período de tempo suficientemente longo, de forma a se cancelarem as contribuições da maré. Os autores afirmam que a última parece ser a mais realista.

Yanagi (1976) afirma que o fluxo estacionário (*steady-state*) é causado por diversos processos físicos como vento, gradiente de pressão atmosférica, descarga de rios, correntes de densidade, correntes de oceano aberto, força de Coriolis e marés. Especificamente, o autor considera fluxo residual de maré como aquele causado por não linearidades das correntes de maré relativas à topografia de fundo e geometria das bordas.

Tee (1976) considera corrente residual aquela corrente que permanece após retiradas as frequências diurnas, semidiurnas ou superiores.

No estudo de Brown et al. (2010) a circulação residual é tratada como a circulação instantânea que permanece após a remoção da maré astronômica da circulação total encontrada, tanto em dados medidos quanto nos modelados.

No presente estudo, será considerada como circulação residual aquela descrita como a média da circulação local em um longo período de tempo, conforme relatado por Nihoul e Ronday (1975). Este termo foi definido por Imasato (1983) como velocidade residual eulíriana gerada por maré e calculada conforme a equação 2.1 onde  $T$  é um período de tempo suficientemente grande para anular as componentes de maré.

$$U_{\text{residual}}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T U(x, y, t) dt \quad (2.1)$$

Onde,

$U$  é a componente da velocidade;

$T$  é o período de tempo analisado;

$x, y, t$  são as componentes espaciais e temporal.

Verifica-se na literatura que muitos estudos são focados em circulação residual em ambientes estuarinos com enfoque especial naquela gerada pela baroclinicidade do sistema (MACCREADY; BANAS, 2010; BURCHARD et al., 2011; BROWN et al., 2010). Poucos esforços foram feitos na tentativa de estudos de circulação residual em sistemas com predominância barotrópica. Poucos estavam relacionados à separação e avaliação da influência das componentes barotrópicas. O presente estudo propõe contribuir nessa área de pesquisa, guiando-se pelos trabalhos de Valle-Levinson et al. (2000) e Brown et al. (2010) e visando expandir os resultados encontrados por Leite et al. (2011).

Valle-Levinson et al. (2000) tinham como objetivo compreender a circulação residual em uma baía semi-árida bastante semelhante ao que se pode encontrar na Enseada do Itapocorói: orientação preferencial norte-sul, aberta para o oceano, encapsulada entre dois promontórios, com uma baixa descarga fluvial, regime de micro-maré semidiurna e importante centro urbano. Os autores verificaram que a circulação básica poderia ser dividida em duas: uma camada superior dominada por uma componente diurna (atmosférica e mareal) e uma camada inferior com influência diurna e semi-diurna gerada principalmente pela maré.

Já o trabalho de Brown et al. (2010) tinha como objetivo compreender a contribuição de parâmetros físicos na variação temporal das correntes residuais em um ambiente estuarino fortemente influenciado pela maré e comparar a contribuição desses parâmetros, em condições normais e de tempestade, quando comparados com a maré. Os processos físicos avaliados foram: forçantes meteorológicas, baroclinicidade, descarga de rios, residual externo, marés e ondas.

O trabalho de Truccolo et al. (2006) verificou que em São Francisco do Sul, na região exposta às ondulações, apenas 74% da variação de nível poderia ser explicada por marés astronômicas e que 24% da variação poderia ser explicada pelas oscilações em frequência submareal. Além disso, oscilações do nível do mar em frequência submareal não podem ser completamente desconsideradas em um regime de micromaré como o encontrado no sul do Brasil, uma vez que sobre-elevações de até 1m já foram registradas na região de Itajaí (TRUCCOLO, 2009).

Dessa forma, o presente trabalho levará em consideração as variações em frequência submareal, desconsiderando frequências supramareais (e.g. ondas de gravidade) e terá como foco principal o estudo de correntes residuais barotrópicas cujos principais parâmetros ambientais serão a maré e o vento.

## 2.2 ÁREA DE ESTUDO

No contexto das zonas costeiras as praias de enseadas (*headland-bay beaches*) representam quase 51% das linhas de costa do mundo. Estas são características em regiões rochosas associadas com topografias montanhosas e cujas dimensões podem variar dependendo da topografia pré-existente parcialmente afogada durante a transgressão holocênica. Tipicamente possuem um formato assimétrico caracterizado por uma área curva denominada zona de sombra, uma área parcialmente curva transicional e uma região reta alinhada ao clima de ondas predominante (SHORT; MASSELINK, 1999).

A Enseada do Itapocorói está localizada no litoral centro-norte de Santa Catarina e engloba os municípios de Piçarras, Penha e Barra Velha (Figura 1). A enseada se enquadra na característica típica de uma praia de enseada, com uma área sombreada, protegida por um costão rochoso (Ponta da Penha) no formato de uma espiral e uma área mais exposta na direção das ondulações predominantes.



Figura 1 – Localização da Enseada do Itapocorói.

O principal município que constitui a enseada é a Praia de Piçarras, que possui 8 km de extensão, sendo delimitada ao norte pelo promontório de Itajuba e ao sul pela foz do rio Piçarras. Do rio Piçarras até a Ponta da Penha, esta parte do município de Penha. A praia de Piçarras tem orientação de 157 a 337° com altura de quebra de onda (Hb) de 0,4 m e período de 7 segundos (KLEIN; MENEZES, 2001).

Grande parte da economia local advém do turismo. Na maior parte do mundo, praias são o principal atrativo turístico da costa sendo que boa parte da economia de países desenvolvidos ou em desenvolvimento dependem desse tipo de turismo (KLEIN et al., 2009). No Balneário Piçarras esta tendência é bastante significativa. Em 2010 cerca de 17 mil pessoas residiam permanentemente na cidade (IBGE, 2015), porém estima-se que apenas nos primeiros três meses de 2010, mais de 133 mil turistas estiveram no município de Piçarras (Tabela 1) com uma receita estimada de mais de 62,5 milhões de reais (Tabela 2). Também verifica-se que o turismo representa mais de 50% dos motivos de viagem (SANTUR, 2012) e os atrativos naturais aparecem como o grande motivador turístico da região (Tabela 3).

Tabela 1: Movimento estimado de turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)

<b>Origem</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>
Nacionais	60.123	54.682	16.774
Estrangeiros	323	1.066	60
Total	60.446	55.748	16.834

Tabela 2: Receita estimada em reais para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)

<b>Origem</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>
Nacionais	33.376.245,70	22.339.482,46	5.299.255,48
Estrangeiros	323.000,00	1.205.400,04	75.000,00
Total	33.699.245,70	23.544.882,50	5.374.255,48

Tabela 3: Principais atrativos turísticos considerados pelos turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)

<b>Origem</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>
Origem	Janeiro	Fevereiro	Março
Atrativos Naturais	53,27%	55,91%	39,08%
Manifestações Populares	27,54%	30,97%	52,11%
Tratamento de Saúde	16,03%	12,86%	6,51%
At. Históricas e Culturais	2,48%	-	1,53%
Entretenimento	0,23%	-	0,39%
Compras	0,23%	-	0,38%
Religião/Peregrinação	0,22%	-	-
Visita a Amigos e Parentes	-	0,26%	-
Total	100,0%	100,0%	100,0%

Principalmente por conta desse atrativo turístico, a Enseada sofreu o mesmo processo acelerado de urbanização que o litoral centro-norte catarinense passou, em especial nos últimos 30 anos. Nesse período, houve um incremento populacional considerável e com pouca atenção, por parte das autoridades locais, aos processos costeiros que fazem parte da dinâmica da região (KLEIN et al., 2006). A praia de Piçarras, região sul da Enseada e local das maiores taxas de desenvolvimento urbano, sofre com um grande problema erosivo (Figura 2) e vem sendo constantemente estudada em busca de formas de mitigá-lo, como a construção de espigões (1989, 1994) e o engordamento praial (1999 e 2008), porém sem êxito a longo prazo (HEUVEL et al., 2008; ARAUJO et al., 2010; FREITAS et al., 2010; ALMEIDA, 2013; RIBEIRO, 2014).



Figura 2 – Efeitos da erosão em Piçarras. Fonte: Maciel (2010).

A população local afirma que os problemas erosivos começaram a ocorrer na década de 70, quando a desembocadura do rio Piçarras foi fixada (KLEIN et al., 2009). Diversas intervenções tem sido feitas para solucionar o problema erosivo, como a construção de espigões (1989 e 1994) e o engordamento praial (1999 e 2008) mas ambos os métodos não se apresentaram efetivos para a solução do problema no longo prazo (ALMEIDA, 2013). Na figura 3 pode-se observar na parte inferior direita a fixação da barra do rio Piçarras por dois espigões e na parte superior esquerda a presença de um espigão para retenção de sedimentos. Nota-se claramente na figura que determinadas partes da praia se apresentam muito menos extensas que outras e que as ondas continuam a chegar em ângulo na praia.

Araujo et al. (2010) verificaram um perfil erosivo ao longo de toda a praia, mas foi observado que o sedimento removido da parte sul não estava sendo depositado na mesma proporção na direção da deriva litorânea. A principal zona de erosão, identificada como uma zona de erosão acentuada (ZEA), se situa cerca de 500 m na parte ao norte da desembocadura do Rio Piçarras. Os valores de taxa de erosão chegaram a  $-14 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$  na região mais crítica da praia entre os anos de 1998 e 2008.

(ALMEIDA, 2013) verificou que, independente do estado de mar, as ondas que chegam à praia são pouco energéticas e as correntes de baixa intensidade, gerando uma dinâmica constante com um transporte litorâneo contínuo de norte para sul.

Masselink e Short (1993) propuseram uma relação entre a altura de onda e a variação de maré para avaliar a predominância de um ou outro em praias denominada *Relative Tidal Range* (RTR). Klein e Menezes (2001) verificaram que, em Piçarras, o RTR é de 2,02, o que indica que a praia é tipicamente dominada por ondas. Isso se deve ao fato de que toda a região sul do Brasil apresenta regimes de micromarés, principalmente pela influência de um ponto anfídromo localizado aproximadamente em  $33^\circ\text{S}$  e  $46^\circ\text{W}$ . Na Enseada, a altura média

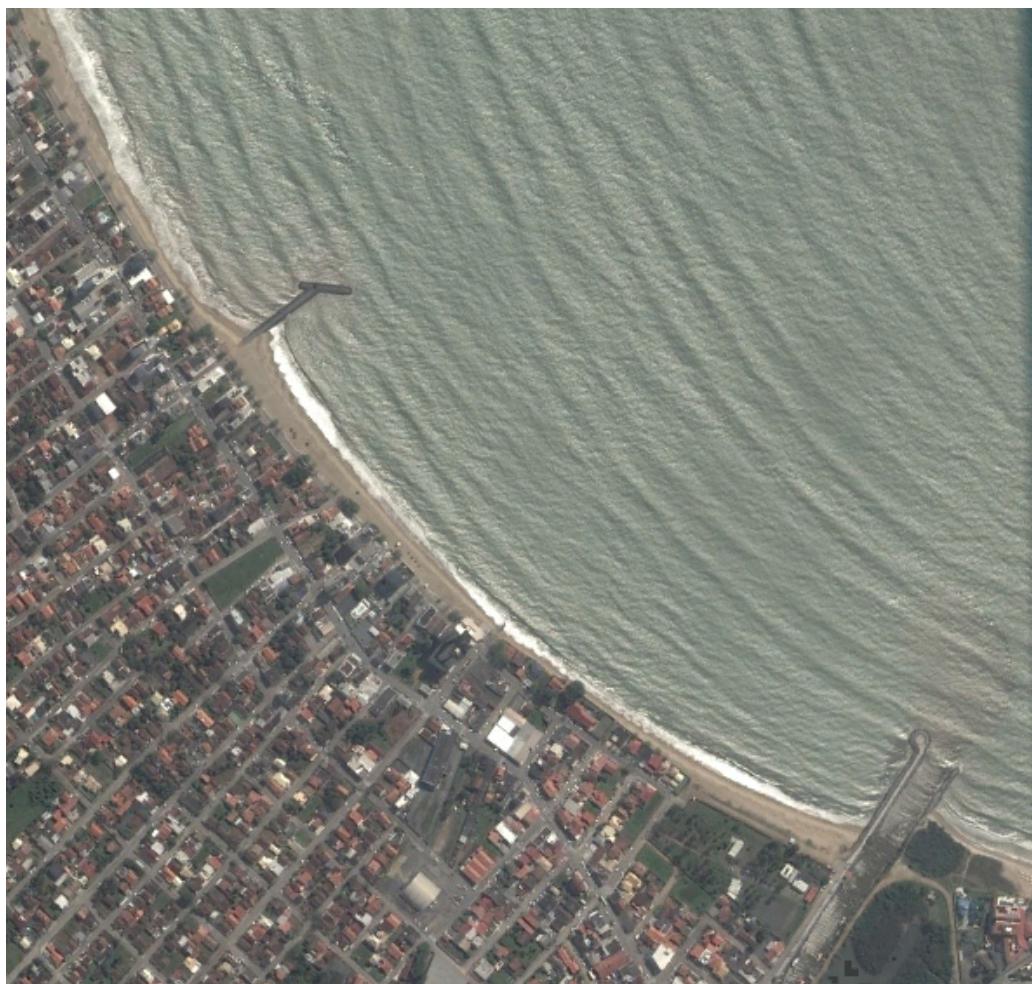


Figura 3 – Imagem do Google Earth da Praia de Piçarras de 18 de Setembro de 2015. Fonte: Google Earth.

da maré é de cerca de 0,8 m, com máximas de 1,2 m na sizígia e 0,3 m na quadratura, sendo classificada como regime de micro-maré semi-diurno (SCHETTINI et al., 1999). No entanto, análises feitas pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria indicaram que a maré pode alcançar 1,83 m (ALMEIDA, 2013). Dados da estação maregráfica da UNIVALI indicam que também existe a presença de seiches em frequências sub-horárias (SCHETTINI et al., 1999).

Devido ao regime de micromarés do sul do país, as marés meteorológicas passam a ter uma grande importância na dinâmica local. Parise et al. (2009) verificaram que entre Junho de 2006 e Julho de 2007, 23 eventos de marés meteorológicas foram registrados na praia do Cassino, extremo sul do Brasil. As marés meteorológicas alcançaram, em média 1 m de elevação acima da maré astronômica com uma medição máxima de 1,9 m. Os autores também verificaram que ventos de sudoeste estiveram presente em 70% dos casos de sobre-elevação, uma vez que a orientação nordeste-sudoeste da costa do Rio Grande do Sul e o efeito de Coriolis favorece efeitos de elevação. É importante citar que os autores também verificaram que as maiores erosões costeiras eram provenientes de marés meteorológicas com maior duração e não com maior elevação. Esse resultado reforça a importância de estudos de longo prazo para avaliação do efeito cumulativo na dinâmica praial.

As principais forçantes do regime de corrente na Enseada são a maré e o vento, porém ficando em velocidades baixas, usualmente inferiores a  $0,1m.s^{-1}$  (SCHETTINI et al., 1999). Estudos anteriores verificaram que a circulação local é, no entanto, muito mais influenciada pelos regimes de vento do que pela maré e esta só passa a ser dominante no caso de ventos fracos ou ausentes (SCHETTINI et al., 1999; LEITE et al., 2011). Leite et al. (2011) encontraram a presença de dois vórtices gerados dentro da Enseada com direções variando conforme o sentido do vento

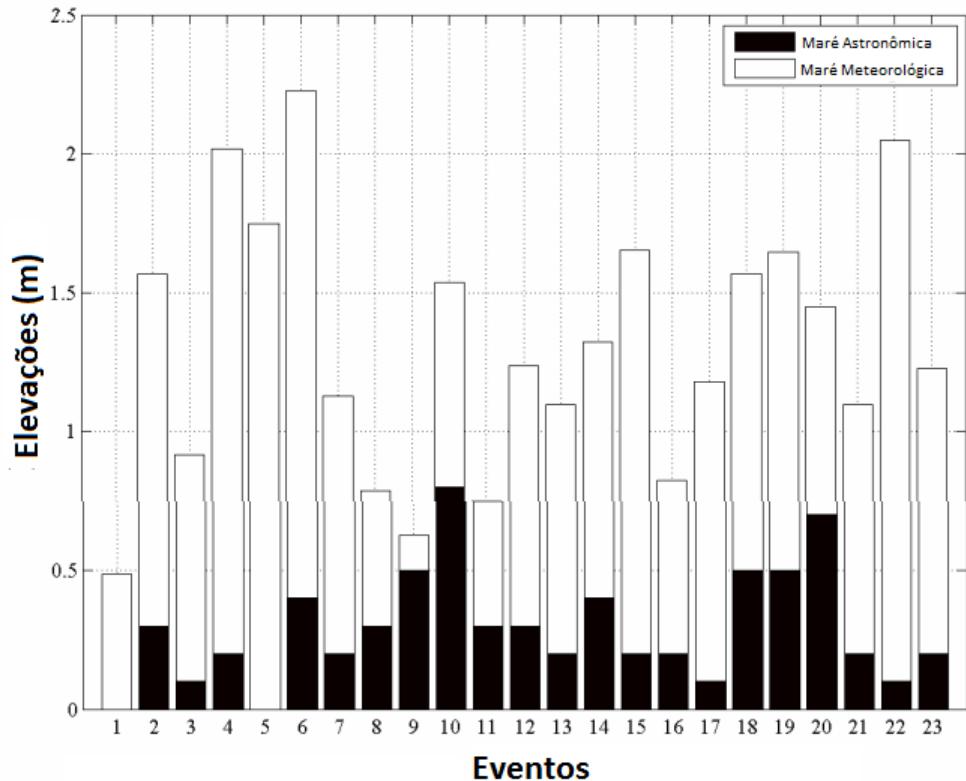


Figura 4 – Máxima elevação do nível do mar causada por marés meteorológicas e astronômicas.  
Fonte: Parise et al. (2009).

(sentido horário em ventos de NE e anti-horário em ventos de S e SO) e com pouca influência da maré.

O litoral de Santa Catarina é submetido regularmente à passagem de frentes frias, normalmente com trajetória sudoeste para nordeste que afetam todo o litoral da América do Sul. O ar frio é trazido pela aproximação de anticiclones que se deslocam sobre a Argentina e avançam sobre o Brasil (MONTEIRO, 2001). Rodrigues et al. (2004) verificaram que em 10 anos, 429 frentes frias puderam ser identificadas em Santa Catarina com uma média de 3 a 4 frentes ocorrendo em todos os meses do ano. Entretanto, os autores também verificaram que existe uma leve tendência de aumento das frentes frias na primavera (cerca de 30% das ocorrências, com uma média de 12,6 frentes frias). O intervalo médio entre duas passagens consecutivas de frentes é de 8 dias, porém mais de 50% das frentes frias atingem o litoral catarinense entre 3 a 8 dias.

As ondulações também são bastante importantes na região, especialmente no setor norte. Devido ao posicionamento abrigado, a parte sul da Enseada é protegida das ondulações mais energéticas provenientes do quadrante S, permanecendo na maior parte do tempo sujeita à ondulações de NE com alturas modestas e períodos inferiores a 8 s (SCHETTINI et al., 1999).

Ribeiro (2014) avaliou dados de ADCP coletados entre agosto e setembro de 2011 e notou uma ausência de ondulações provenientes de NE durante este período. O autor encontrou períodos de pico oscilando entre 12 s, referentes a ondas mais longas de sudeste, e 8 s, referentes a ondas geradas mais próximo da costa, associadas à direção E.

Ramirez (2010) encontrou que as correntes exibem o mesmo comportamento tanto em ondas de altura média como extrema e variam apenas em intensidade. A autora descobriu também que correntes são quase nulas quando as ondulações são oriundas de S e que ondas incidentes de ESE e ENE têm as menores intensidades daquelas vindas do quadrante E, principalmente devido à orientação da praia.

Muitos estudos realizados na Enseada do Itapocorói focaram no estudo da morfodinâmica local (KLEIN; MENEZES, 2001; ARAUJO et al., 2010; RAMIREZ, 2010; OLIVEIRA, 2013), no padrão de ondas (RIBEIRO, 2014) e nos perigos costeiros e evolução da linha de costa (FREITAS et al., 2010; SILVA, 2012). Estes estudos foram estimulados pelo grande problema erosivo que a enseada apresenta bem como pela característica de predominância dos efeitos de onda na região. Entretanto, em praias de enseada a dinâmica é dominada por ondas em períodos curtos, como alguns estados de mar ou tempestades (SILVA et al., 2010) porém a circulação residual gerada pela maré e/ou vento pode ter um efeito cumulativo no longo prazo (BROWN et al., 2010). Dessa forma, visando complementar os estudos anteriores, a presente pesquisa pretende atuar no estudo de padrões residuais na enseada, tomando o trabalho de Leite (2009) e Leite et al. (2011) como referência principal da dinâmica da região. Almeja-se que esta análise contribua para a compreensão do tempo de recirculação, que pode contribuir para a compreensão dos processos dinâmicos e, possivelmente contribuir com os estudos morfodinâmicos que buscam entender o processo erosivo da região.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Dado os objetivos propostos pelo presente estudo, a figura 5 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada para alcançar os objetivos.

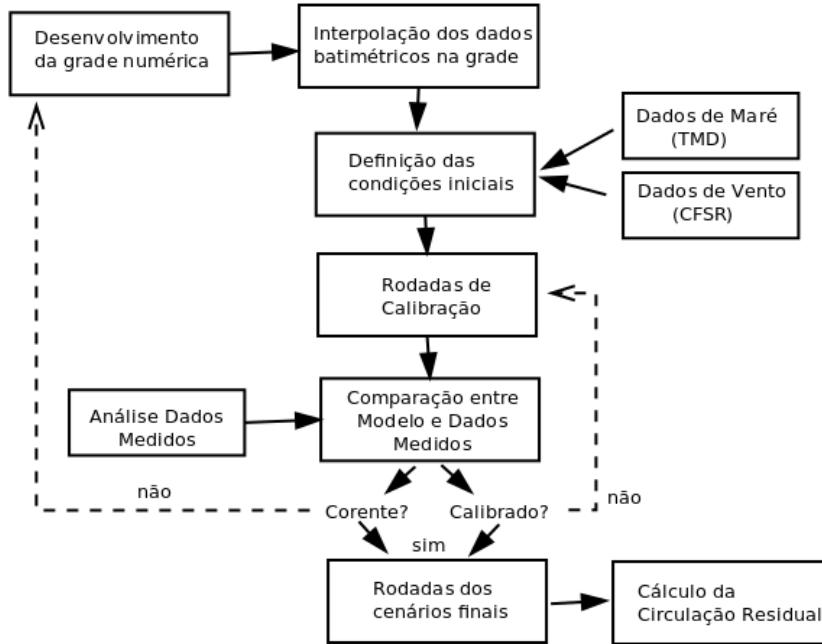


Figura 5 – Fluxograma da metodologia aplicada.

A primeira etapa foi desenvolver uma grade numérica e interpolar a batimetria nesta grade. Concomitantemente, foram avaliados os dados de três perfiladores acústicos que serão usados para a calibração do modelo. O objetivo dessas análises foi avaliar a consistências dos dados, compreender melhor o comportamento encontrado e desenvolver análises estatísticas para melhor compreender a hidrodinâmica da região de estudo em termos pontuais.

Os dados de entrada foram utilizados como forçantes do modelo foram dados de maré do TPXO e dados de vento do CFSR/NCEP. Detalhes sobre cada um dos dados utilizados como forçante serão descritos nas seções que seguem. O resultado desse modelo será comparado com os dados medidos pelos perfiladores acústicos, para avaliar a acurácia do modelo. Esse processo é denominado calibração e assume-se que, quanto menor a diferença entre o dado modelado e medido, melhor é o modelo (WAVEREN et al., 2010). Dessa forma, ao se atestar a confiabilidade dos dados em um ou mais pontos, assume-se que os processos reproduzidos em todo o domínio foram corretamente reproduzidos de forma a gerar resultados coerentes naquele(s) ponto(s) e, portanto, que o modelo está adequado, dentro de suas limitações, a reproduzir a dinâmica da área de interesse.

Os erros entre os dados simulados e os dados medidos podem existir por diversos problemas: erros conceituais nas simplificações assumidas pelos modelos, parâmetros inadequados, erros de forçantes ou problemas de aquisição dos dados medidos. Dessa forma, a ideia geral da calibração é modificar parâmetros do modelo de modo a otimizar os resultados do modelo. Esse é um processo iterativo e deve ser realizado até que o valor de erro esteja dentro de um limite aceitável (WAVEREN et al., 2010).

Após a obtenção de um modelo calibrado, serão realizadas rodadas com as configurações finais. Serão feitos esquemas conforme descrito em Brown et al. (2010), onde o modelo será rodado em uma condição "simples" (apenas com maré) e outros serão rodados com diferentes forçantes associadas, de forma a avaliar a contribuição de cada uma. O resultado encontrado

será comparado àqueles obtidos através das análises dos dados dos perfiladores acústicos.

### 3.1 DADOS MEDIDOS

Os dados utilizados na calibração do modelo foram coletados pelas equipes da Coastal Planning & Engineering do Brasil (CPE) e o Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC) da Universidade Federal de Santa Catarina no período de 19/08/2011 a 22/09/2011, com financiamento pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ\_CTTanArea 22/2008, Proc. No. 575008/2008-3).

Foram coletados dados de temperatura, pressão, corrente e ondas com perfiladores acústicos do tipo *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) da marca Nortek, sendo dois deles do modelo AWAC 1MHz (ST001 e ST002) e um do tipo AWAC 600kHz utilizado no ponto ST003.

Os perfiladores acústicos utilizam-se do efeito Doppler para avaliar a direção e a velocidade das correntes com base na modificação de um sinal sonoro de alta frequência ao ser refletido em partículas suspensas do fluido em movimento. O ADCP consegue avaliar essa diferença de velocidade entre o pulso emitido e o refletido em diferentes intervalos de profundidade, denominado células. A suposição básica desse método é que as partículas em suspensão deslocam-se com a mesma velocidade do fluxo de água (MÖLLER; ABE, 2011). De forma simples, a velocidade é dada por:

$$F_D = -2F_s \frac{V}{c}$$

onde,

$F_d$  é a mudança na frequência de transmissão;

$V$  é a velocidade relativa entre a fonte e o alvo;

$c$  é a velocidade de propagação do som;

$F_s$  é a frequência de transmissão do som.

Os perfiladores acústicos podem ser usados basicamente de duas formas: da forma estática, onde são feitas medições eulerianas de dados e o equipamento é instalado em um ponto fixo (pilares, pontes ou fundeados) ou de forma dinâmica quando o mesmo é instalado no casco de uma embarcação. Quando instalados da forma dinâmica se faz necessário um sistema rastreador do fundo (*bottom tracking*) para descontar a velocidade da embarcação.

Foram instalados três perfiladores acústicos do tipo ADCP na região da Enseada do Itapocorói em ponto fixos (fundeados), de forma a se obter uma medição euleriana de dados (Figura 6). Os equipamentos foram dispostos em diferentes níveis de exposição às ondulações mais intensas: abrigado (ST001), semi-exposto (ST002) e exposto (ST003) de acordo com as coordenadas dispostas na tabela 4 e no mapa da figura 6.

Tabela 4: Localização dos equipamentos

Equipamento	Latitude	Longitude
ST001	26° 46' 5.79"S	48° 39' 15,58"W
ST002	26° 45' 51,74"S	48° 39' 42,37"W
ST003	26° 42' 18,36"S	48° 36' 56,70"W

Os equipamentos foram fundeados voltados para cima (*upward-looking*) e configurados para adquirirem informações com intervalos de 30 minutos. As medições de pressão (nível) e temperatura foram coletadas de forma instantânea (medidas pontuais) enquanto que as medições de corrente são resultados de uma média de 5 minutos de aquisição. Para a medição de ondas os dados foram coletados a cada 1 hora durante 20 minutos, numa taxa de aquisição de 4 Hz (0,25 s) no ST001 e ST002 e 2 Hz (0,5 s) no ST003.

Os dados passaram por diversos processos de análise de consistência descritos em Ribeiro (2011) e obtiveram uma taxa de recuperação dos dados acima de 96% para todos os parâmetros coletados (corrente, onda, temperatura e pressão) nos 3 ADCPs. Os dados já foram usados nos trabalhos de Ribeiro (2014) e Oliveira (2013) e podem ser considerados de ótima qualidade para utilização no presente trabalho.

Entretanto, durante as medições alguns dados não puderam ser coletados e, portanto, as séries temporais continham interrupções (dados em branco). Interrupções em séries temporais as tornam muito complexas para análises sem um tratamento prévio. Dado que a quantidade de dados faltantes era esparsa, representando menos de 5% da série temporal, e não havia sucessão de dados ausentes, escolheu-se utilizar uma interpolação linear simples para suprir os dados que não foram medidos. A figura 7 apresenta um exemplo dos dados medidos e da quantidade de dados faltantes no ponto de coleta ST001.

Além dos dados desses 3 ADCPs, também foram utilizados dados de maregrafia coletados em Penha durante mais de 1 ano, entre Outubro de 1995 e Dezembro de 1996. Estes dados não serão usados para a calibração do modelo, mas serão analisados e comparados com os dados do ADCP para melhor compreensão da hidrodinâmica local.

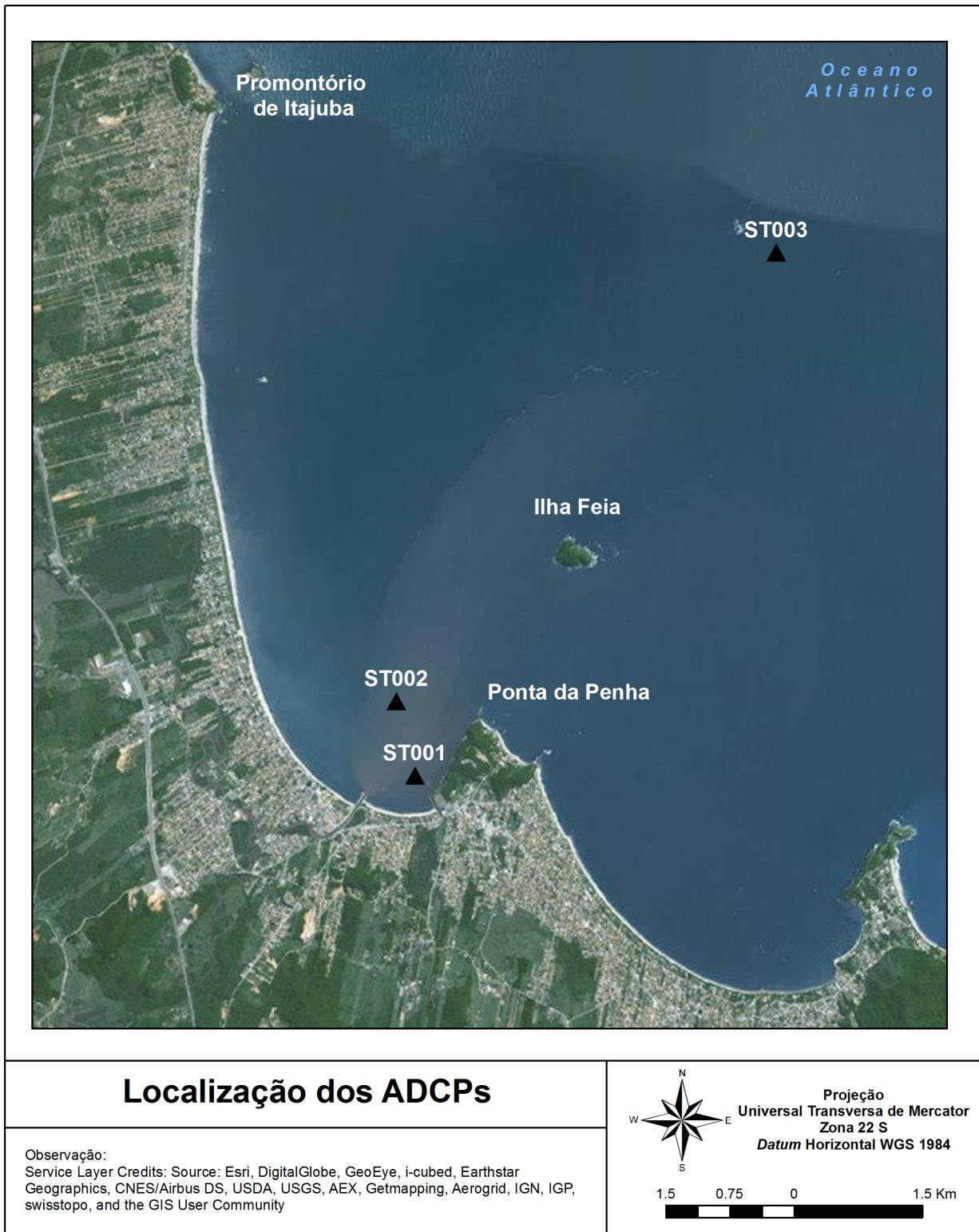


Figura 6 – Localização das coletas de dados através de ADCPs.

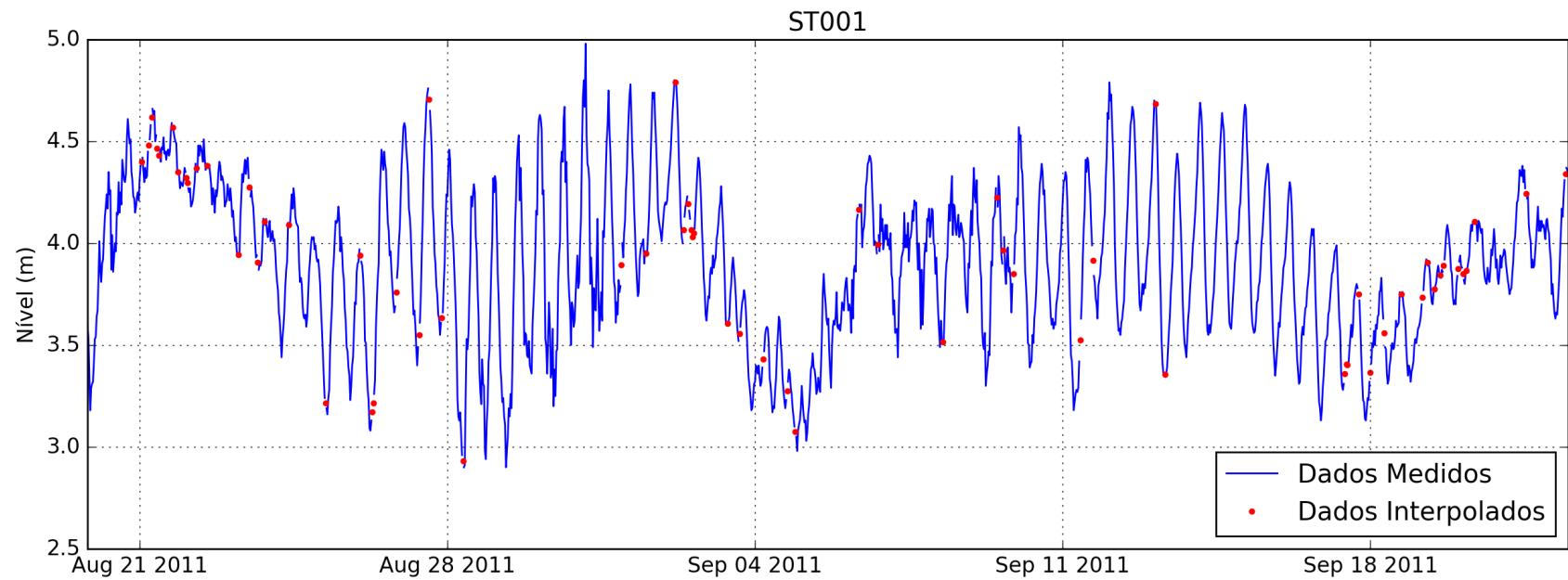


Figura 7 – Dados medidos no ADCP ST001. Pontos em vermelho indicam que os dados foram obtidos através de interpolação linear e os dados em azul são dados medidas pelo ADCP.

## 3.2 MODELO NUMÉRICO

### 3.2.1 DELFT3D-FLOW

O Delft 3D é um modelo numérico desenvolvido pela WL Delft Hydraulics em cooperação com a Universidade de Delft de Tecnologia e constitui um avançado sistema integrado de modelos numéricos adequados para estudos multidisciplinares de sistemas complexos como áreas costeiras, rios e áreas estuarinas. O modelo possui diversos módulos que podem ser acoplados para gerar simulações de fluxo, transporte de sedimento, geração e propagação de ondas curtas, qualidade de água, evolução morfológica e ecologia (DELTARES, 2014). No cerne do Delft3D está o módulo FLOW, que faz as computações hidrodinâmicas.

O módulo Delft3D-FLOW é um módulo para simulações hidrodinâmicas e de transporte. Este calcula fluxos não estacionários e fenômenos de transporte que são resultados de forçantes mareais e meteorológicas em grades complexas, retilíneas e curvilíneas. Este módulo inclui diversos processos como cisalhamento de vento (*wind shear*), forçantes de onda, forçantes de maré, fluxos gerados por densidade, estratificação por gradientes de salinidade e/ou temperatura, modificações de pressão atmosférica, entre outros. Isso faz com que o modelo seja capaz de ser aplicado em uma grande gama de situações costeiras (LESSER et al., 2004), e já foi utilizado em diversos estudos (HU et al., 2009; HU; DING, 2009; LEONARDI et al., 2013; HORSTMAN et al., 2013).

O modelo utiliza-se de equações de águas rasas não-estáveis (*unsteady*) em duas (integrais na vertical) ou três dimensões. O sistema de equações consiste nas equações horizontais de momentum, a equação da continuidade, a equação de transporte e o modelo de fechamento turbulento. A equação de momentum vertical é reduzida à pressão hidrostática, uma vez que se assume que as acelerações verticais são pequenas quando comparadas às acelerações gravitacionais e, portanto, não são levadas em consideração. Ele se torna, então, adequado para prever fenômenos de transporte onde as escalas horizontal e temporal são significativamente maiores que as escalas verticais (LESSER et al., 2004).

Na horizontal é utilizado um modelo tradicional e centralizado de aproximações de diferenças finitas de segunda ordem, num esquema do tipo Arakawa C (ARAKAWA; LAMB, 1977). Neste esquema, as velocidades são calculadas nas bordas da célula enquanto variáveis escalares são calculadas no centro da célula de cálculo. Dessa forma, cada uma das variáveis ( $u$ ,  $v$  e zeta) tem uma matriz de coordenadas independente. A figura 8 apresenta o padrão típico de uma grade no Delft.

Cada representação inserida na figura pode ser identificada abaixo:

linhas cheias representam a grade numérica

área cinza representa os itens com os mesmos índices de grade ( $m, n$ )

$+$  representa a localização dos parâmetros de nível, concentração de constituintes, salinidade e temperatura

$-$  representa a localização da componente horizontal da velocidade na direção x

$|$  representa a localização da componente horizontal da velocidade na direção y

$\bullet$  representam os valores de profundidade

Dado que a área de estudo apresenta-se em uma região com pouca influência estuarina e constitui-se de uma área aberta, onde a coluna de água tende a ser homogênea, optou-se por utilizar a versão bidimensional (2D) do modelo.

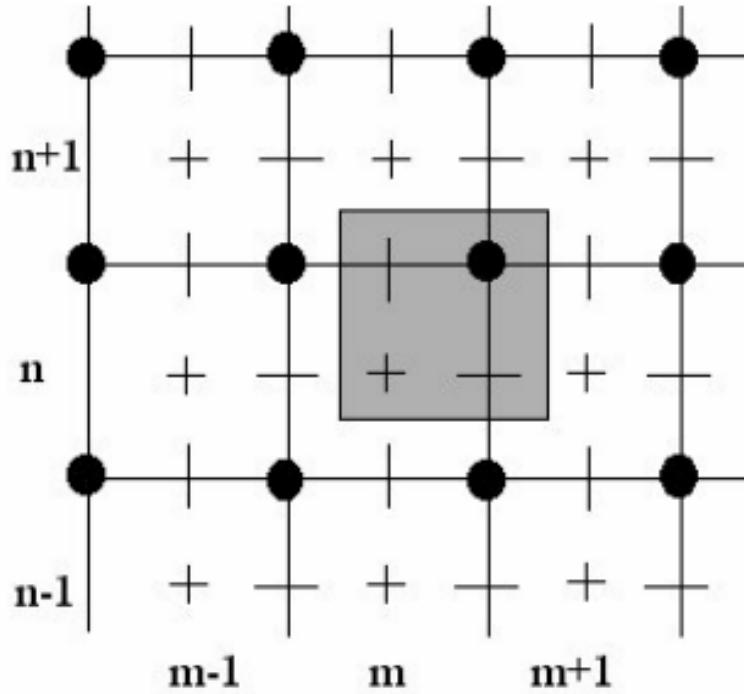


Figura 8 – Localização das variáveis calculadas em uma malha do tipo Arakawa C.

### 3.3 FORÇANTES DOS MODELOS

#### 3.3.1 Maré

Os dados de maré que foram utilizados para forçar o modelo hidrodinâmico foram obtidos do projeto *OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO* disponíveis em Egbert e Erofeeva (2015). O TPXO é um modelo global de marés com resolução de  $1/4^\circ$  de grau (aproximadamente 28 km) que permite obter as constantes harmônicas.

Ele foi inicialmente idealizado por Egbert et al. (1994) que desenvolveram um método inverso generalizado para combinar as equações hidrodinâmicas, as quais os campos de velocidade e elevações devem atender, e dados de marés medidos e obtidos através de imagens de altimetria. Dessa forma, os autores conseguiram inserir dados de altimetria em um modelo barotrópico através da diminuição dos erros, pelo método de mínimos quadrados, entre os dados reais e as equações de águas rasas linearizadas. No entanto, esse processo demandava muito tempo computacional, já que as equações deveriam ser calculadas duas vezes para cada observação (uma avançada e uma atrasada no tempo). Egbert e Erofeeva (2002) desenvolveram um método para implementar o modelo inverso generalizado de Egbert et al. (1994) de forma mais eficiente computacionalmente e este é o método usado hoje nas versões mais modernas do TPXO (7.2).

Através desse modelo é possível obter oito constituintes harmônicas principais: quatro semi-diurnas (M2, S2, N2, K2) e quatro diurnas (K1, O1, P1, Q1), duas constituintes de longo período (Mf e Mm) e três constituintes não lineares (M4, MS4, MN4). Os resultados do modelo são facilmente acessíveis através de uma interface gráfica desenvolvida em ambiente MATLAB e denominada *Tidal Model Driver* (TMD). A versão mais moderna do modelo (7.2) e o TMD estão disponibilizados gratuitamente no endereço: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>.

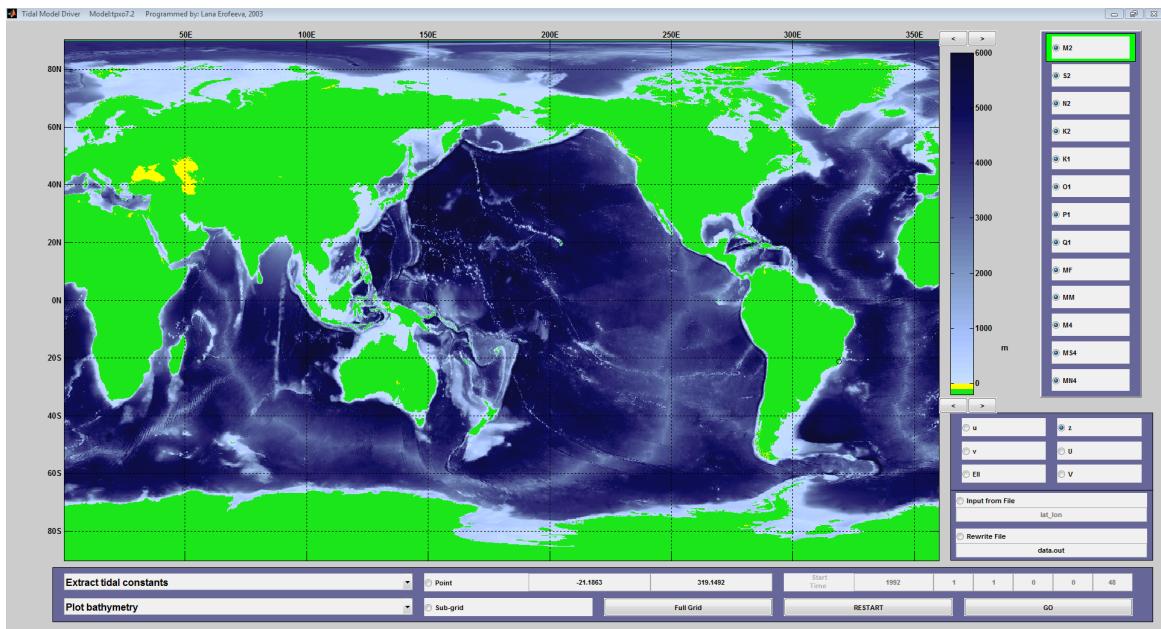


Figura 9 – Interface gráfica do TMD para obtenção das constituintes harmônicas calculadas pelo modelo TPXO.

### 3.3.2 Vento

Para a forçante do modelo numérico os dados de ventos utilizados foram obtidos do modelo de reanálise do *National Center for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR).

O propósito geral de modelos de reanálise é produzir representações globais plurianuais acuradas de condições atmosféricas, geradas por um modelo e uma aquisição constante de dados que passam a ser incorporados ao sistema. Pode-se dizer que em um dado momento  $t$  é o resultado de uma curta previsão iniciada por uma análise passada ( $t - \Delta t$ ), modificada por assimilação de dados em uma pequena janela centrada em  $t$ . Por convenção a janela  $\Delta t$  é de seis horas. Dessa forma, toda nova reanálise é beneficiada por todas as reanálises anteriores e os erros têm mais chances de serem descobertos e corrigidos nos resultados posteriores (SAHA et al., 2010).

O *Coupled Forecast System Reanalysis* (CFSR) é um modelo de reanálise mais recente, cuja primeira versão foi lançada em 2004, abrange o período de 1981 até 2011. Em Março de 2011, foi lançada a versão 2 do sistema, com maior resolução, apresentando uma série de dados disponíveis a partir de 01 de Janeiro de 2011. O modelo de reanálise tem módulos de interação entre a atmosfera, os oceanos, a terra e o gelo marinho. A nova série tem resoluções horizontais de  $0,2^\circ$ ,  $0,5^\circ$ ,  $1^\circ$  e  $2,5^\circ$  (SAHA et al., 2011). Para o presente trabalho serão utilizados apenas os dados referentes à segunda versão do modelo.

Os resultados estão disponíveis e podem ser gratuitamente adquiridos no seguinte endereço: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds094.1/>.

## 3.4 DADOS DIVERSOS

### 3.4.1 Vento

Além dos dados do CFSR, utilizados nas análises de regime de ventos da região e como forçante do modelo, dois outros dados foram analisados no presente trabalho.

O primeiro conjunto foi proveniente da Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica (REDEMET) registrados em diversos aeroportos pelo país, denominados METAR. Os dados estão disponíveis no endereço <http://www.redemet.aer.mil.br/>. Para o presente trabalho, foram coletados dados referentes ao ano de 2011 na estação presente no Aeroporto de Navegantes (SBNF).

O segundo conjunto foi os dados de vento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) obtidos para o ano de 2011 para a estação de Itajaí. Esses são dados muito bons quando comparados aos do CFSR, uma vez que estes são de modelos e não dados medidos, e melhores em relação aos dados do METAR uma vez que foram coletados em área mais ampla e a uma altura de 18m.

Os dados do METAR foram desconsiderados uma vez que mais de 16% dos dados eram inexistentes e, portanto, sua análise seria sujeita a uma grande quantidade de dados inexistentes. Os dados do INMET se mostraram muito coerentes para as análises entre nível meteorológico, temperatura e vento. Isso se deu porque o dado era medido e coletado de hora em hora com poucos dados ausentes. No entanto, o mesmo não se mostrou adequado como forçante do modelo.

### 3.4.2 Linha de Costa

A linha de costa utilizada no presente trabalho foi obtida no banco de dados GSHHG (Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database) da NOAA. Este tem como base dois bancos de dados de domínio público: o World Vector Shorelines (WVS) e a CIA World Data Bank II (WDBII) e podem ser gratuitamente obtidos em formato ESRI de Shapefile ou em formato binário. Os dados do GSHHG incluem 4 níveis hierárquicos fronteira entre o continente e o oceano (L1), fronteira entre lagos e terras (L2), fronteira entre ilhas lacustres e lagos (L3) e fronteiras entre lagos internos e ilhas (L4). Cada um desses níveis está disponível em cinco resoluções diferentes: grosseira (crude), baixa (low), intermediária (intermediate), alta (high) e máxima (full). Os dados foram adquiridos em dezembro de 2015 através do endereço <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>.

### 3.4.3 Batimetria

Foram utilizadas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) obtidas através do endereço <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster-disponiveis.html>. Foram utilizados dados pontuais de batimetria e isóbatas para refinar o detalhamento da batimetria do modelo das cartas náuticas listadas na tabela 5.

Tabela 5: Cartas Náuticas utilizadas

Número da Carta	Nome	Escala
30	Costa Sueste da América do Sul	1:3.500.000
90	Da Ilha de Santa Catarina a Maldonado	1:990.526
23300	De Paranaguá a Imbituba	1:300.000
21070	Do Cabo Frio ao Cabo de Santa Marta Grande	1:1.000.000
1910	Da Ilha da Coral ao Cabo de Santa Marta Grande	1:100.211
1902	Proximidades da Ilha de Santa Catarina	1:100.928
1801	Porto de Itajaí	1:15.000

Tabela 5: Cartas Náuticas utilizadas

Número da Carta	Nome	Escala

Na região próxima da costa na Enseada do Itapocorói foram utilizados dados de batimetria coletados pela Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade do Vale do Itajaí no período de 02/11/2011 a 06/11/2011, com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ-CTTranArea 44/2008, Proc. No. 575008/2008-3). Todos os procedimentos de coleta e tratamento dos dados estão descritos em Bitencourt e Silva (2011).

Todos esses dados foram interpolados do mais recente e detalhado (medida em 2011) até o mais esparsos (Carta No. 30), de forma que a batimetria interpolada fosse construída dando prioridade aos dados recentes. Os dados foram normalizados para o datum vertical do 0 DHN.

### 3.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

A performance do modelo será avaliada conforme os cálculos propostos por Fox (1981) e Wilmott (1982). Estima-se que variações na ordem de 10% da amplitude de variação do parâmetro modelado sejam aceitáveis.

Fox (1981) descreve os esforços da Sociedade Meteorológica Americana (AMS) para desenvolver técnicas de avaliação de performance de modelos atmosféricos. Dois tipos principais de mensuração de performance foram encontrados: medidas das diferenças (ou residuais) e medidas de correlação. O primeiro diz respeito a uma quantificação do tamanho da diferença entre valores medidos e modelados. Medidas de correlação avaliam a associação ou concordância entre os valores medidos e modelados. O autor afirma que o primeiro é mais coerente com a teoria estatística.

Wilmott (1982) avaliou as medidas propostas por Fox (1981) e verificou que a Raiz do Erro Médio Quadrático (em inglês, RMSE) é uma das medidas que melhor conseguem avaliar a performance de modelos. Seu cálculo é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (3.1)$$

Onde,

$O$  são os dados observados;

$M$  são os dados modelados;

$$M'_i = M_i - \bar{O};$$

$$O'_i = O_i - \bar{O}.$$

Buscou-se alcançar erros na casa de 10% da amplitude máxima dos valores modelados. Por exemplo, para uma maré com amplitude de 2m, o ideal é que os valores de erro estejam na casa de, no máximo, 20cm.

## 3.6 ANÁLISES UTILIZADAS

### 3.6.1 TTide

Existe uma série de problemas associados com utilizar análises harmônicas clássicas para análise de sinais de maré. Visando corrigir e melhorar as análises harmônicas em sinais de maré, Pawlowicz et al. (2002) fizeram o pacote T\_TIDE, que é uma série de rotinas para análise harmônica clássica porém com algumas correções e opções para os usuários. Essa série de rotinas foi utilizada no presente trabalho para analisar os sinais de nível e fazer uma análise do sinal de maré nos dados coletados.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS MEDIDOS

#### 4.1.1 Nível

Inicialmente foram estudados os dados de nível dos três ADCPs para melhor compreender o comportamento da maré ao longo da Enseada. Os dados analisados em cada um dos pontos dos ADCPs podem ser vistos nas figuras 10 a 12 na parte superior. Como a medição de nível depende do local onde o ADCP foi instalado, existe uma diferença entre as profundidades nos três pontos medidos. A média de nível de cada aparelho foi obtida e subtraída, de forma que as curvas estivessem em relação ao nível zero. Não obstante, os três aparelhos mediram um comportamento de nível muito semelhante, o que indica que, em termos de nível, a dinâmica local não aparenta variar dentro da enseada. Na parte inferior dos gráficos, se encontram os dados previstos, ou componente astronômica do sinal, sobrepostos pelo residual, ou componente meteorológica. O sinal meteorológico tem diversos picos e cavas, normalmente ficando entre 0,5m e -0,5m, mas chega a ultrapassar 0,5m no início de setembro. Logo no início das medições, uma elevação do nível de quase 0,5m é vista em todos os aparelhos. No total, três períodos de alta e três períodos de baixa.

A tabela 6 contém as principais características dos dados adquiridos. A variação entre o nível máximo e mínimo encontrado foi de aproximadamente 2m, com uma tendência leve de aumento dessa variação nos pontos mais internos (ST001 e ST002), o que indica que existe um leve empilhamento de água dentro da enseada.

Os dados maregráficos de Penha serviram como base de comparação das estatísticas gerais apenas, uma vez que suas medições aconteceram por um período maior e em momento diferente da coleta dos dados dos ADCPs. A figura 13 apresenta alguns picos e cavas, semelhante ao que foi visto nos dados dos ADCPs. Os dados meteorológicos alcançaram valores de até 1,3m, quase três vezes os valores meteorológicos encontrados nos dados de ADCP.

A variação máxima de nível encontrada é quase duas vezes superior à diferença máxima encontrada na tabela da FEMAR (Média das Preamares Superiores - Média das Baixamares inferiores), que seria de 1,11cm (Figura 64). Isso indica que a componente meteorológica pode ter uma presença e uma influência muito grande na região, o que é natural visto que região é de micromaré.

Tabela 6: Características das Variações de Nível Medidas  
(em metros)

Equipamento	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Variação Máxima
ST001	2,90	4,98	3,90	3,91	2,08
ST002	6,30	8,33	7,25	7,25	2,03
ST003	15,52	17,80	16,77	16,78	1,98
Penha	-1,13	1,18	-0,04	-0,04	2,32

Na tabela 7 estão apresentados os valores máximos e mínimos de nível de origem meteorológica. Nos dados colhidos pelos ADCPs, a maré meteorológica gerou um nível mínimo de -0,71m e máximo de 0,65m. Dessa forma, a maré meteorológica foi responsável por uma variação de nível de 1,3m no ponto ST003 e 1,2m nos outros dois locais de coleta. Já em Penha,

verificou-se que enquanto o nível máximo foi semelhante ao encontrado no dados dos ADCPs (0,70m), o nível mínimo foi quase o dobro, atingindo -1,37m.

Na figura 14 verifica-se que esse nível mínimo registrado na verdade fez parte de um evento de maré meteorológica negativa que persistiu entre 3 e 4 dias.

Dessa forma, é possível concluir que a maré meteorológica verificada pelos ADCPs no ano de 2011 não foi tão representativa quanto ela pode ser na região estudada e que marés meteorológicas na região podem ultrapassar 1,3m. De fato, esses dados concordam com o trabalho de Parise et al. (2009) que verificaram que as marés meteorológicas alcançam em média 1m, podendo alcançar 1,9m em casos mais extremos no extremo sul do país.

Tabela 7: Estatística dos valores de nível das marés meteorológicas medidas (em metros)

<b>Equipamento</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Variação Máxima</b>
ST001	-0,71	0,65	1,37
ST002	-0,68	0,53	1,21
ST003	-0,70	0,50	1,20
Penha	-1,37	0,70	2,08

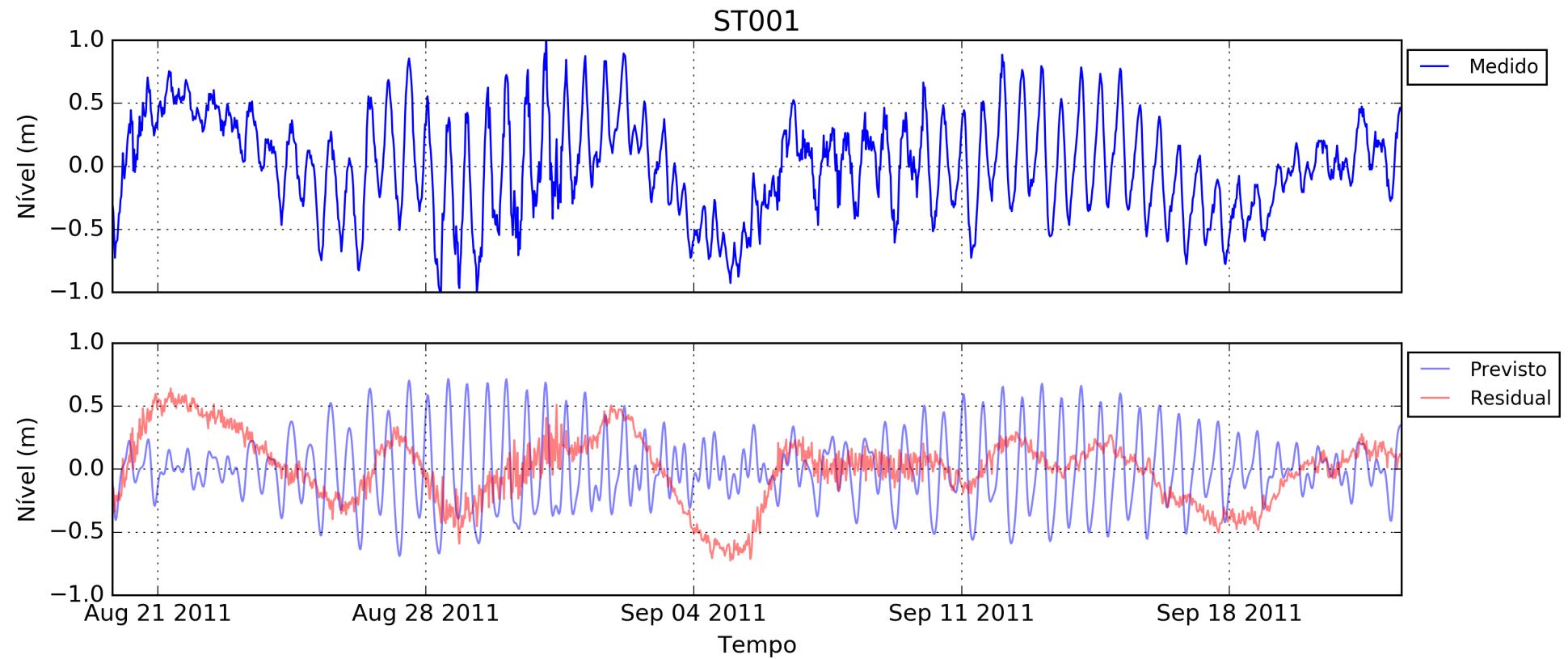


Figura 10 – Variação de Nível no ponto ST001 separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).

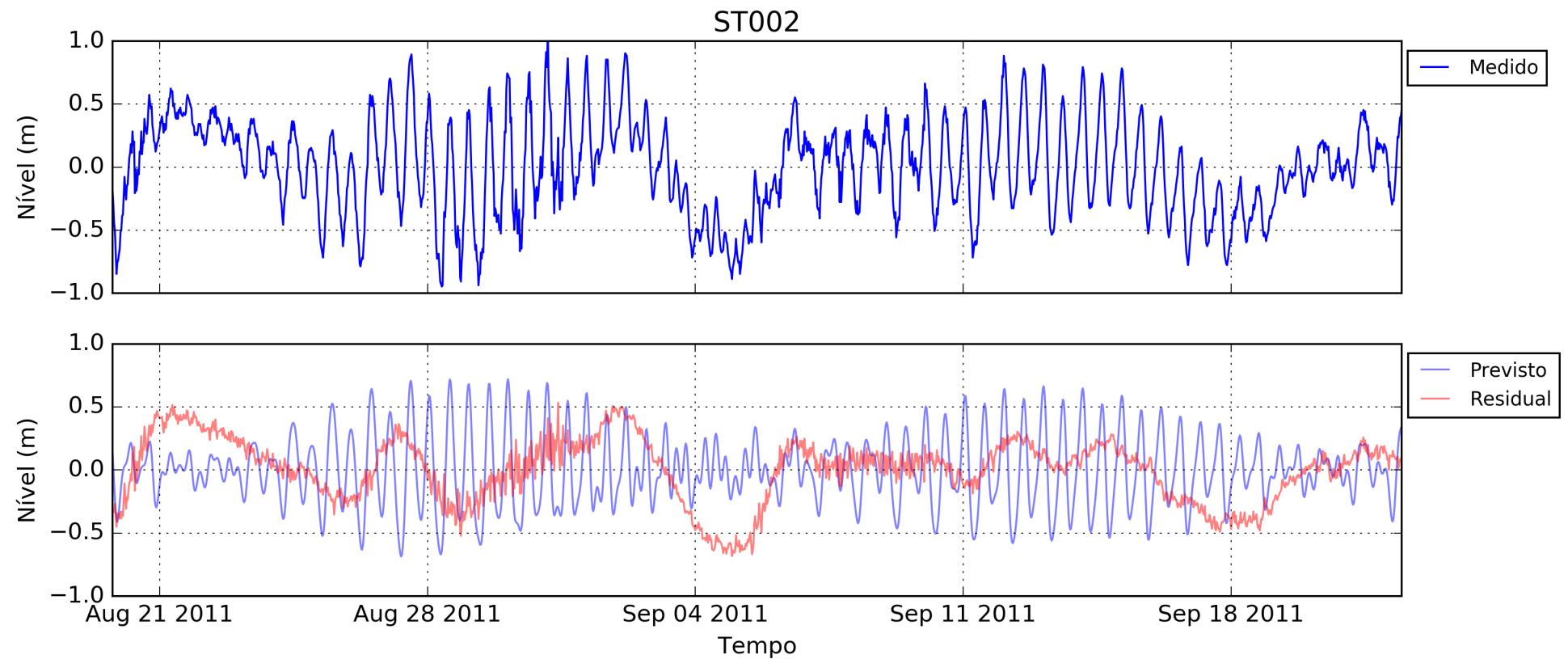


Figura 11 – Variação de Nível no ponto ST002 separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).

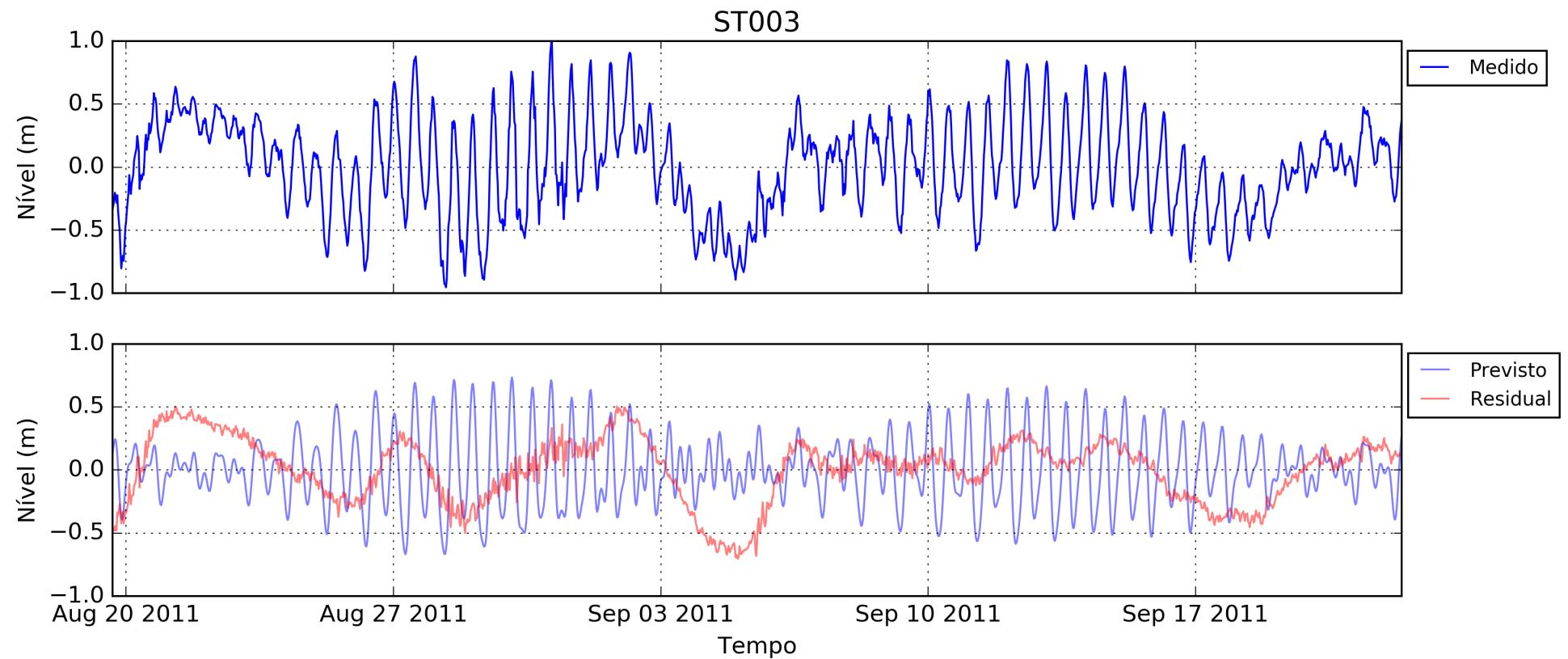


Figura 12 – Variação de Nível no ponto ST003 separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).

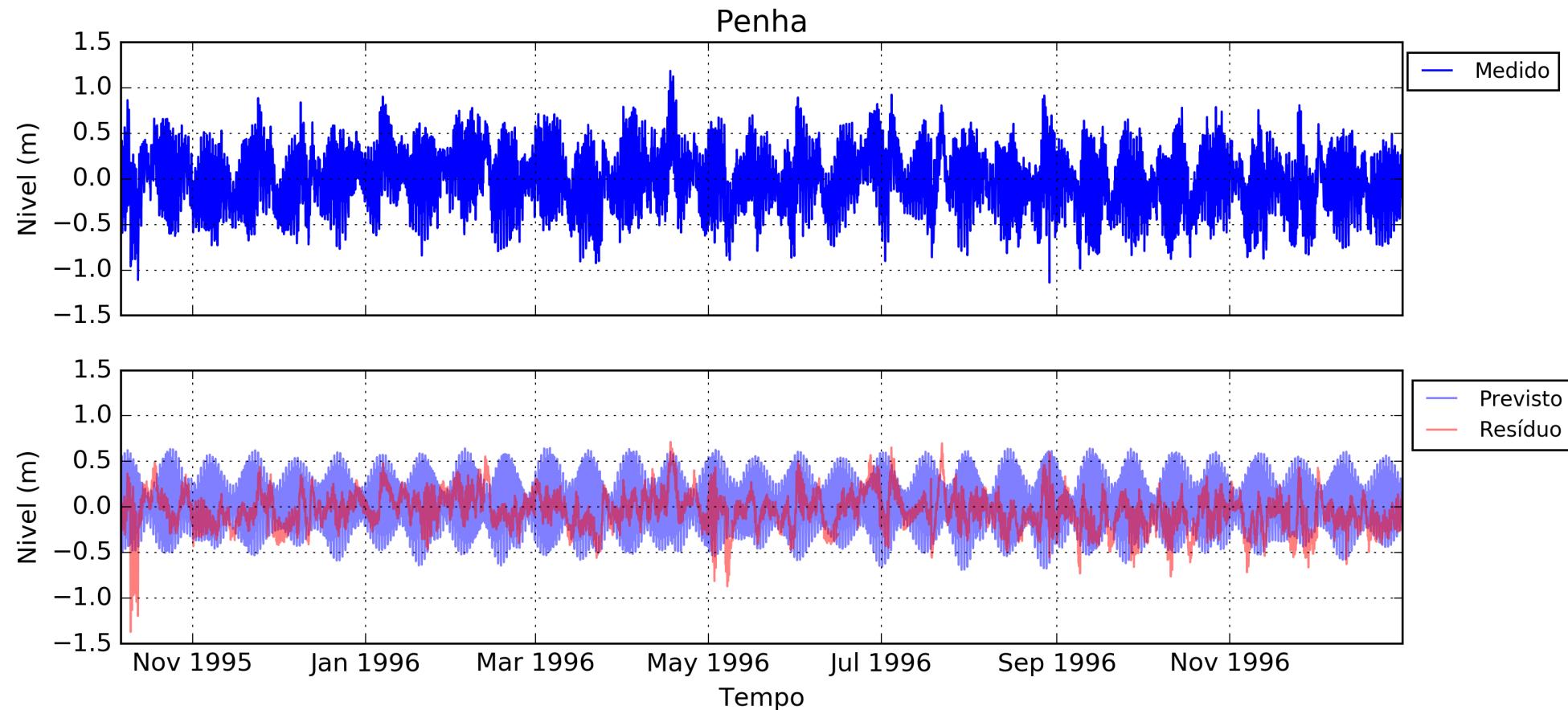


Figura 13 – Variação de nível medido em Penha separado entre: dado medido (em azul na parte superior) e dados de maré previsto (em azul na parte inferior) e o residual meteorológico (em vermelho na parte inferior).

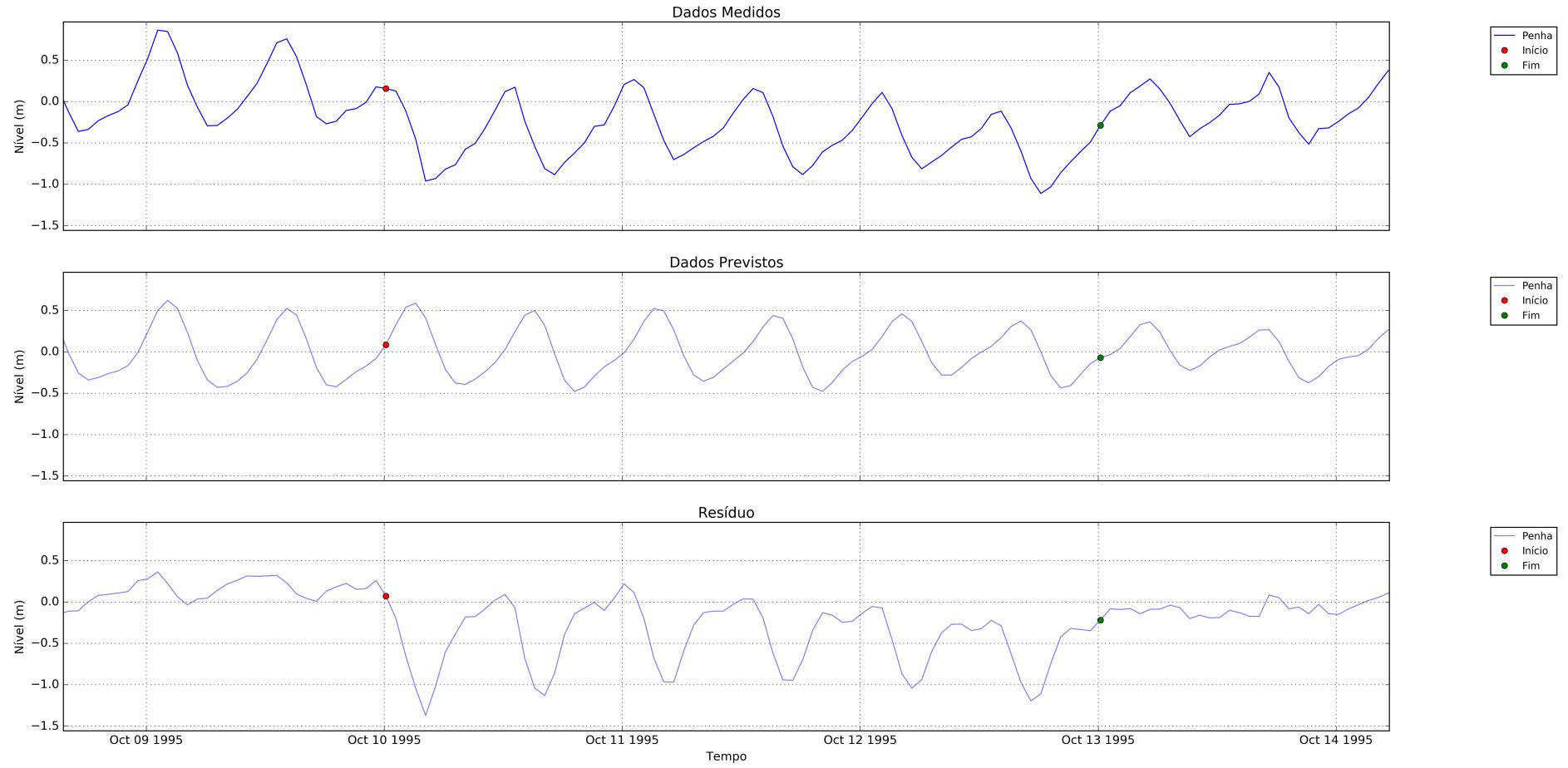


Figura 14 – Evento de maré meteorológica negativa registrado

A importância relativa das constituintes diurnas e semidiurnas pode ser expressa pelo número de Forma (*Form Factor*, F) de acordo com as constantes harmônicas, definido por (PUGH, 1987):

$$F = \frac{H_{K1} + H_{O1}}{H_{M2} + H_{S2}} \quad (4.1)$$

Onde:

$H_{K1}$ : é a amplitude da componente lunisolar diurna;

$H_{O1}$ : é a amplitude da componente principal lunar diurna;

$H_{M2}$ : é a amplitude da componente principal lunar;

$H_{S2}$ : é a amplitude da componente principal solar.

e:

Se F estiver entre 0 e 0,25 a maré tem forma semidiurna;

Se F estiver entre 0,25 e 1,5 a maré é considerada mista com predominância semidiurna;

Se F estiver entre 1,5 e 3 a maré é considerada mista com predominância diurna;

Se F for maior que 3 a maré é puramente diurna.

Os números de forma encontrados para os dados medidos podem ser observados na tabela 8 e, portanto, a maré na Enseada de Itapocorói e arredores pode ser considerada do tipo mista com uma predominância semidiurna. Vale ressaltar no entanto que, pelo baixo valor de número de forma encontrado, pode-se notar a alta influência das componentes semidiurnas sobre as componentes diurnas. Os dados de Penha apresentaram uma maior influência das componentes diurnas sobre as semidiurnas quando comparados com os dados de Piçarras.

Tabela 8: Número de Forma para cada um dos dados analisados.

Local	Número de Forma
ST001	0,2978
ST002	0,2962
ST003	0,2873
Penha	0,3131

Também é possível observar a grande influência das componentes semidiurnas nas figuras 15 a ?? onde estão apresentados os resultado de nível no domínio da frequência (terceira figura de cima para baixo). Primeiramente deve-se notar que apesar de os dados terem um tempo de medições diferentes (1 ano para Penha e 1 mês para Piçarras), os resultados de espectro se mostraram muito semelhantes. É possível perceber que existem quatro picos de energia distintos cujos períodos associados a esses picos são de 25,5, 12, 8 e 6 horas (respectivamente, 0,25, 0,34, 0,50 e 1,07 dias).

O maior pico de energia em ambos os dados analisados estava localizado no período aproximado de 12 horas indicando a predominância semidiurna, como já verificado anteriormente. As componentes terciadiurnas e quaterdiurnas se apresentaram com picos de energia semelhan-

tes entre si, sem predominância, mas com menos energia do que a componente diurna, que se apresenta ligeiramente mais energética.

Analizando detalhadamente o espectro do dado referente a penha é possível identificar dois picos de energia por volta de 12 horas e dois picos de energia por volta de 24 horas. Ao se identificar os períodos de cada pico verificou-se que os sinais correspondiam a 12, 12,4, 23,9 e 25,8 horas, o que corresponde aos períodos das principais componentes semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (K1 e O1), respectivamente. Dessa forma, seria interessante considerar que apenas períodos de medição de apenas um mês não sejam usados para estudos focados na maré, uma vez que não houve sinal suficiente para separar os picos de energia em cada frequência.

Outro resultante interessante é que, em todos os gráficos, existe uma energia considerável em períodos maiores que 25h, mas que não pode ser bem identificada no espectro. Verificou-se que energias com períodos maiores que 50h representaram mais de 30% nos dados de Piçarras e 27,5% dos dados analisados.

Tabela 9: Porcentagem de energia em períodos acima de 50h

Local	Porcentagem
ST001	30,55%
ST002	30,86%
ST003	31,09%
Penha	27,54%

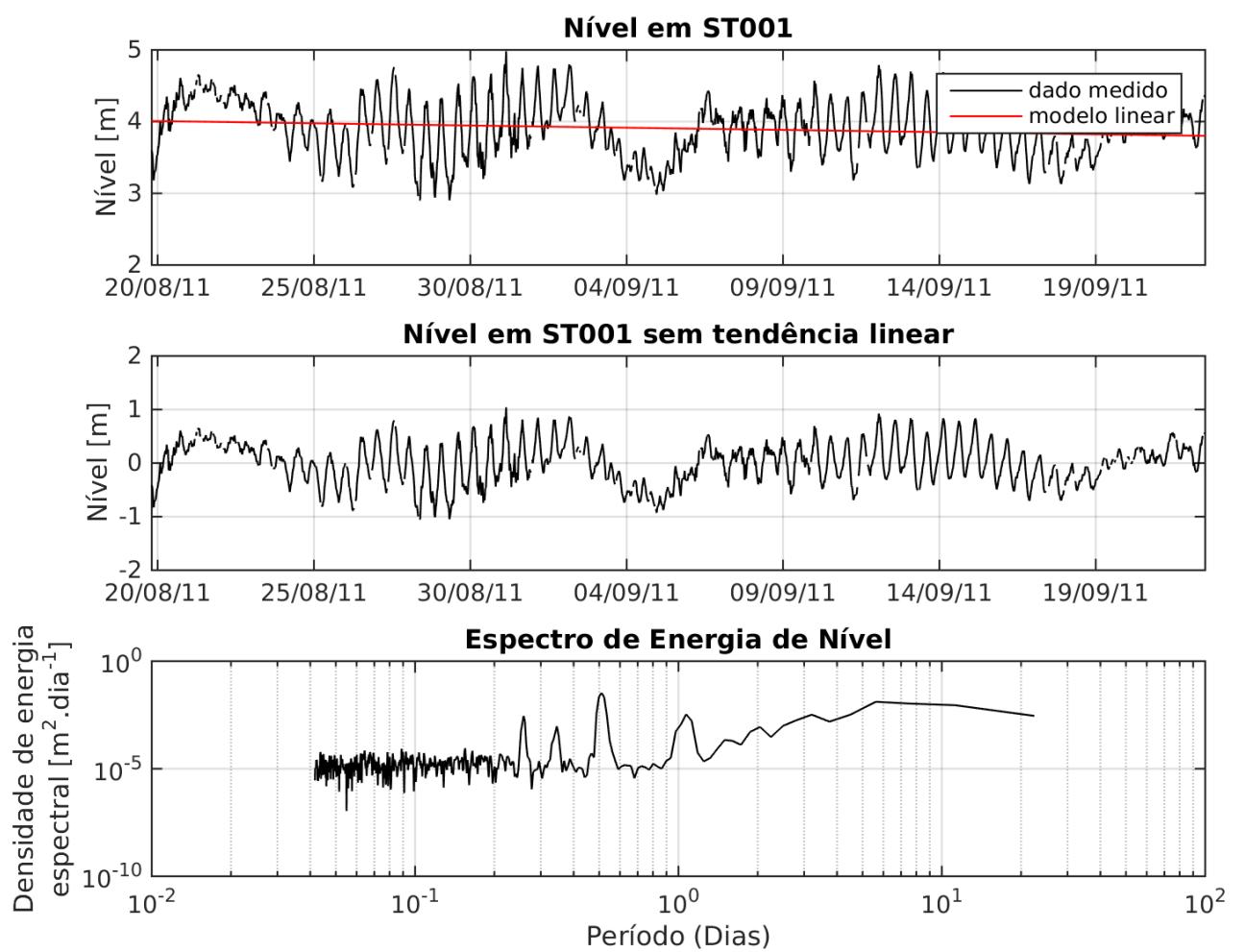


Figura 15 – Espectro de energia em Piçarras - ST001

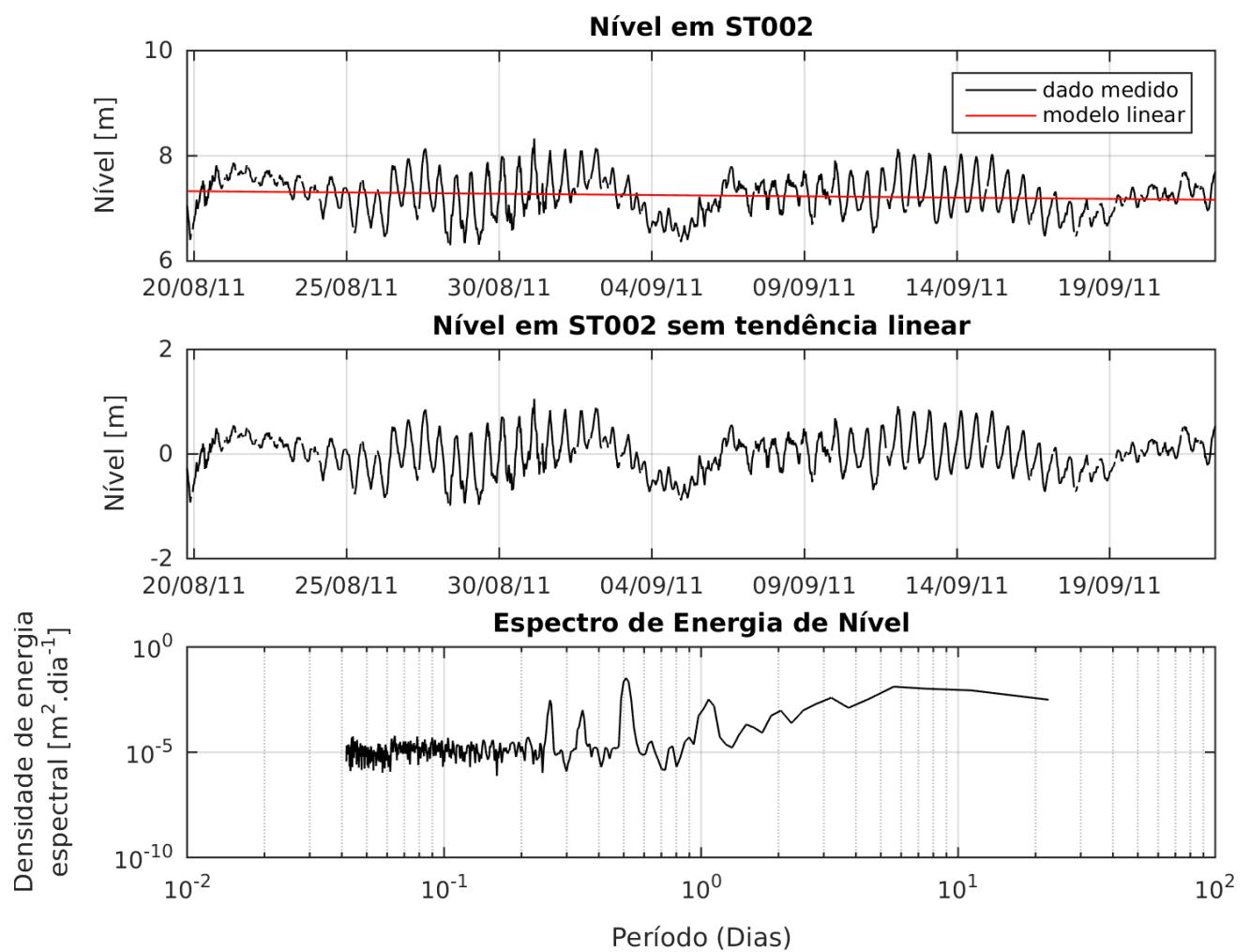


Figura 16 – Espectro de energia em Piçarras - ST002

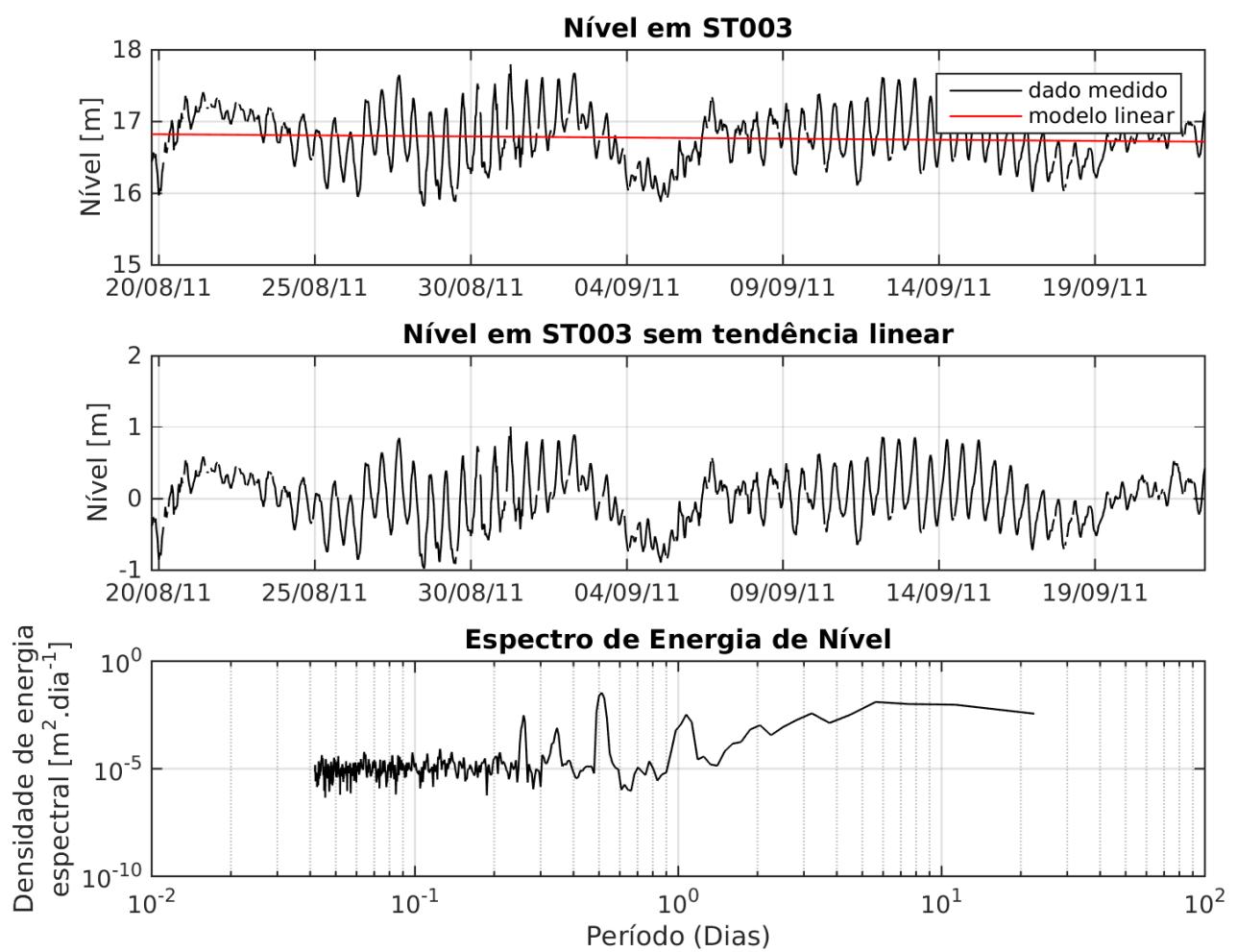


Figura 17 – Espectro de energia em Piçarras - ST003

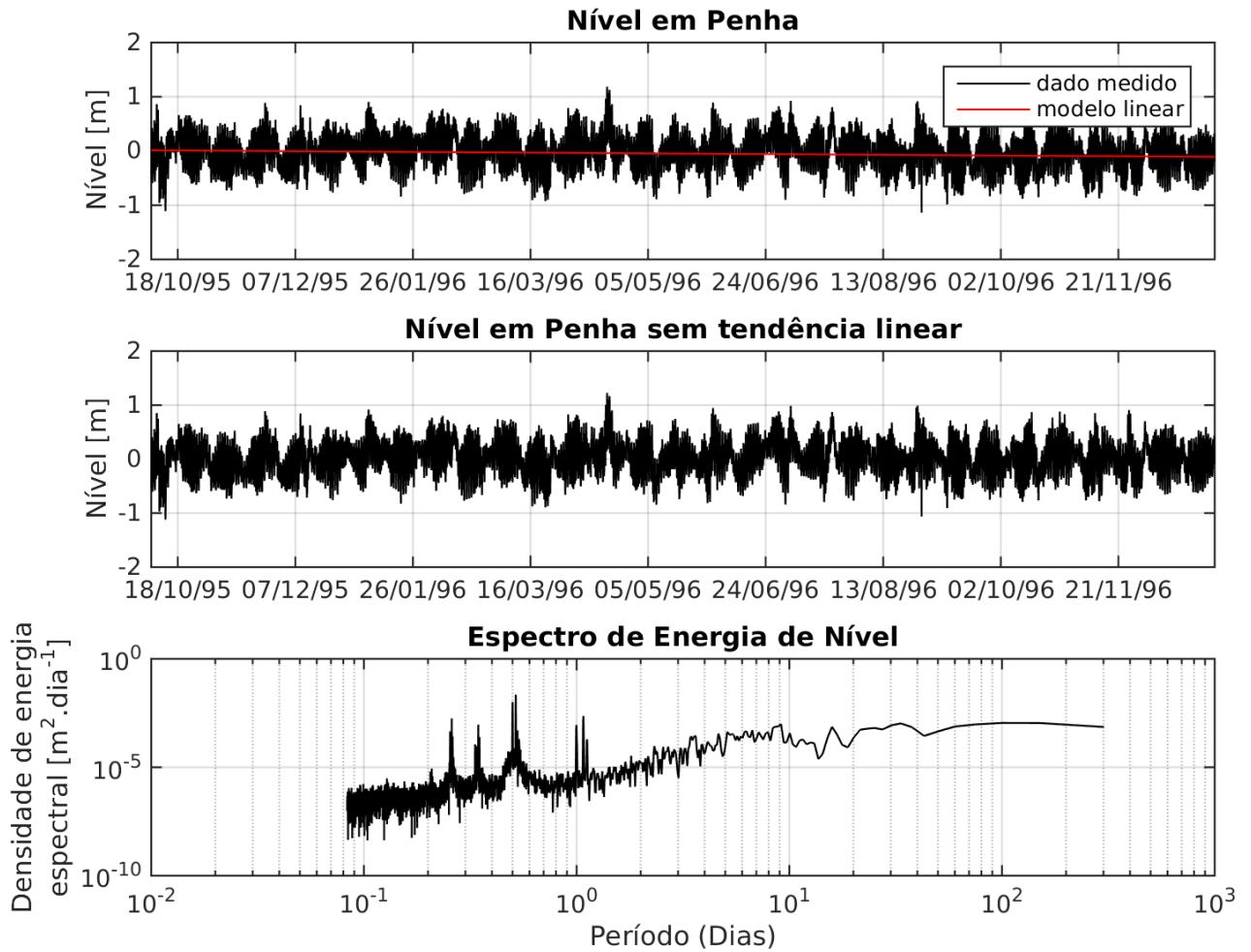


Figura 18 – Espectro de energia em Penha

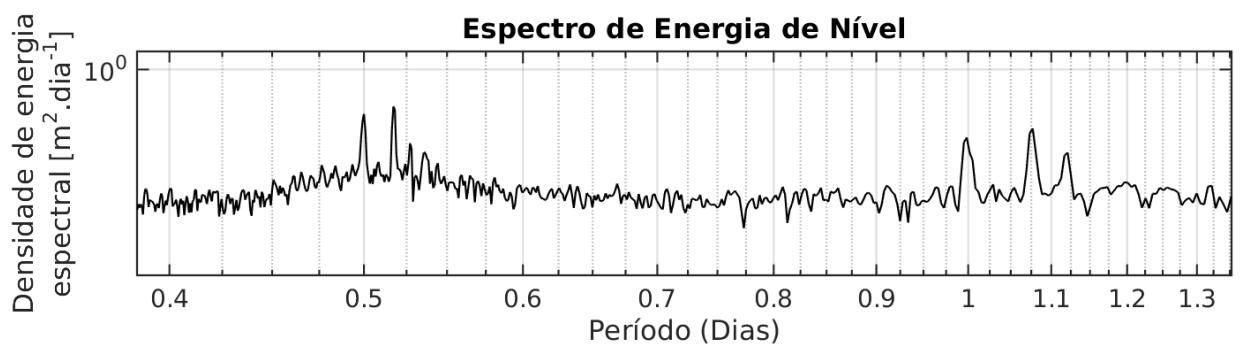


Figura 19 – Detalhe do espectro de energia em Penha onde pode-se observar os picos referentes às constantes harmônicas semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (K1 e O1), respectivamente.

#### 4.1.2 Temperatura

Os dados de temperatura obtidos pelos ADCPs podem ser observados na figura ???. É notável que, nos dados do ponto ST002 e ST003 existe uma frequência muito alta que prejudica sua visualização mais detalhada. Esta variação de alta frequência poderia estar relacionada a variações diárias, mas, ao se observar os dados de forma mais atenta na figura 21 verifica-se que os dados apresentam um padrão em formato serrilhado, não condizente com esse tipo de dado. Dessa forma, assumiu-se que os dados de temperatura nos pontos ST002 e ST003 apresentam erros de medição e buscou-se aplicar uma média móvel para que os mesmos apresentassem um padrão mais natural. O resultado detalhado do filtro aplicado pode ser observado na figura 71 e 72. Na figura 22 estão dispostas as séries filtradas em conjunto com o dado medido em ST001.

É possível perceber uma mudança brusca no comportamento da variável ao longo dos três pontos. O ponto ST001, mais próximo da praia e na menor profundidade, possui uma grande variação de temperatura ao longo do mês. A temperatura chegou próximo a 17°C no dia 24 de Agosto (18h) e ultrapassou os 20°C em 19 de Setembro (23h). Essa variação de mais de 3,5°C contrasta bastante com o ponto ST003 cuja variação foi de apenas 0,98°C em todo o período analisado. Já o ponto ST002 apresentou características intermediárias em relação aos pontos ST001 e ST003 (Tabela 10).

Deve-se notar que as temperaturas mínimas foram bastante semelhantes (menos de 0,5°C de diferença) enquanto a temperatura máxima se apresentou com os dados mais contrastantes. Dado que a variação de temperatura do ponto ST003 foi mais de três vezes a variação encontrada no ponto ST001, assume-se que o segundo tem uma grande influência do aquecimento local, e possivelmente do vento, dada a sua pequena profundidade 4m. Já o ponto ST003, localizado na profundidade de 17m, tem um padrão homogêneo possivelmente só sendo afetado por massas de água externas.

Tabela 10: Características dos dados de temperatura.

Equipamento	Mínimo	Máximo	Média	Variação Máxima
ST001	17,02°C	20,61°C	18,02°C	3,59°C
ST002	17,52°C	19,13°C	18,18°C	1,61°C
ST003	17,16°C	18,14°C	17,88°C	0,98°C

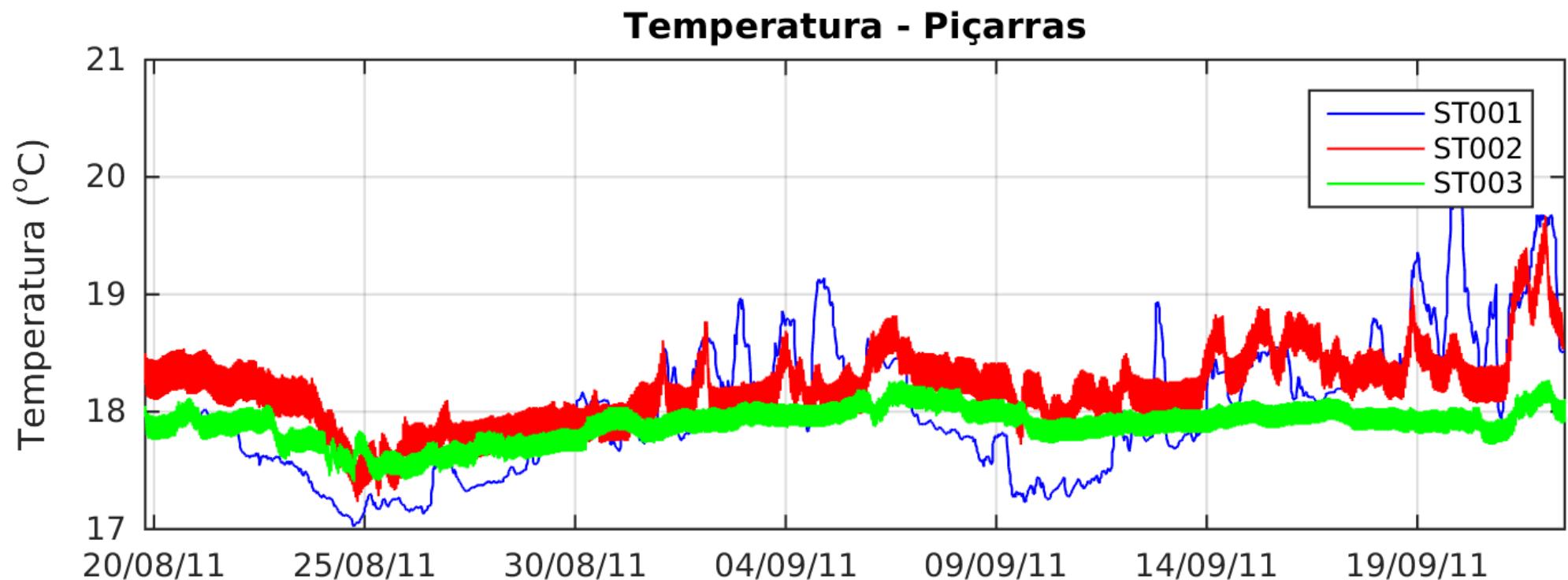
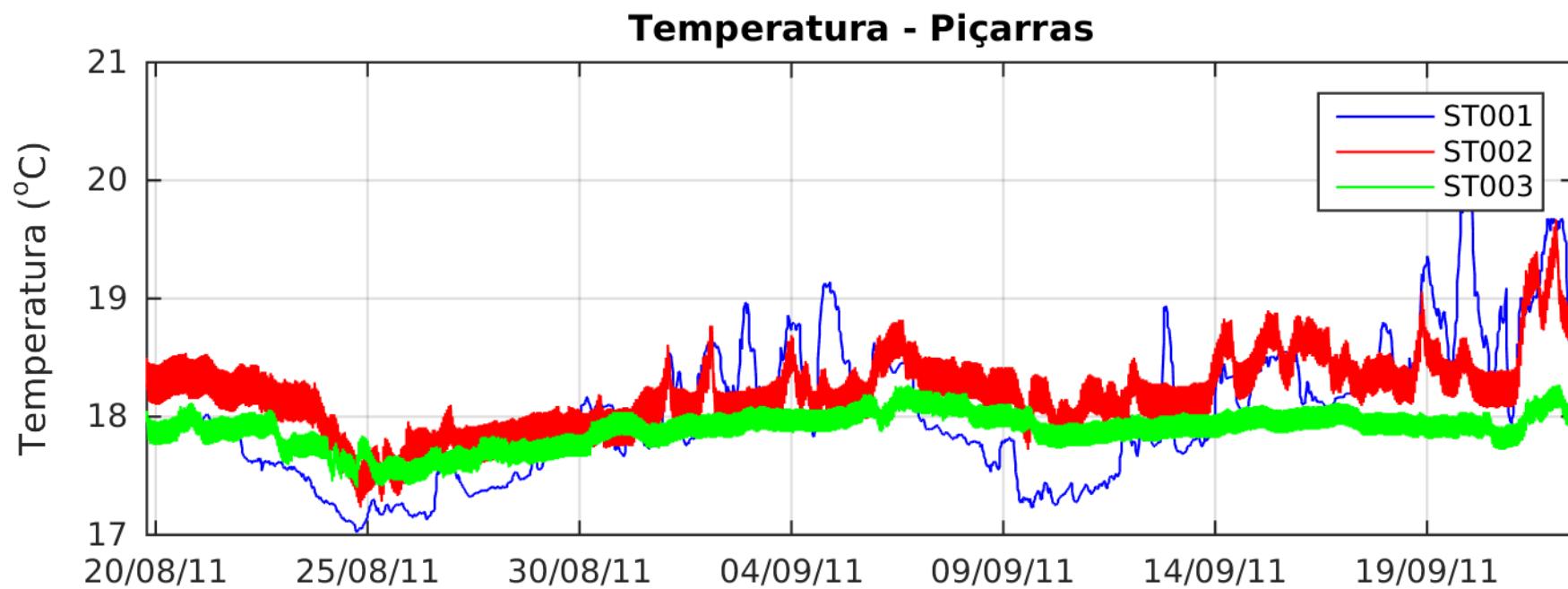
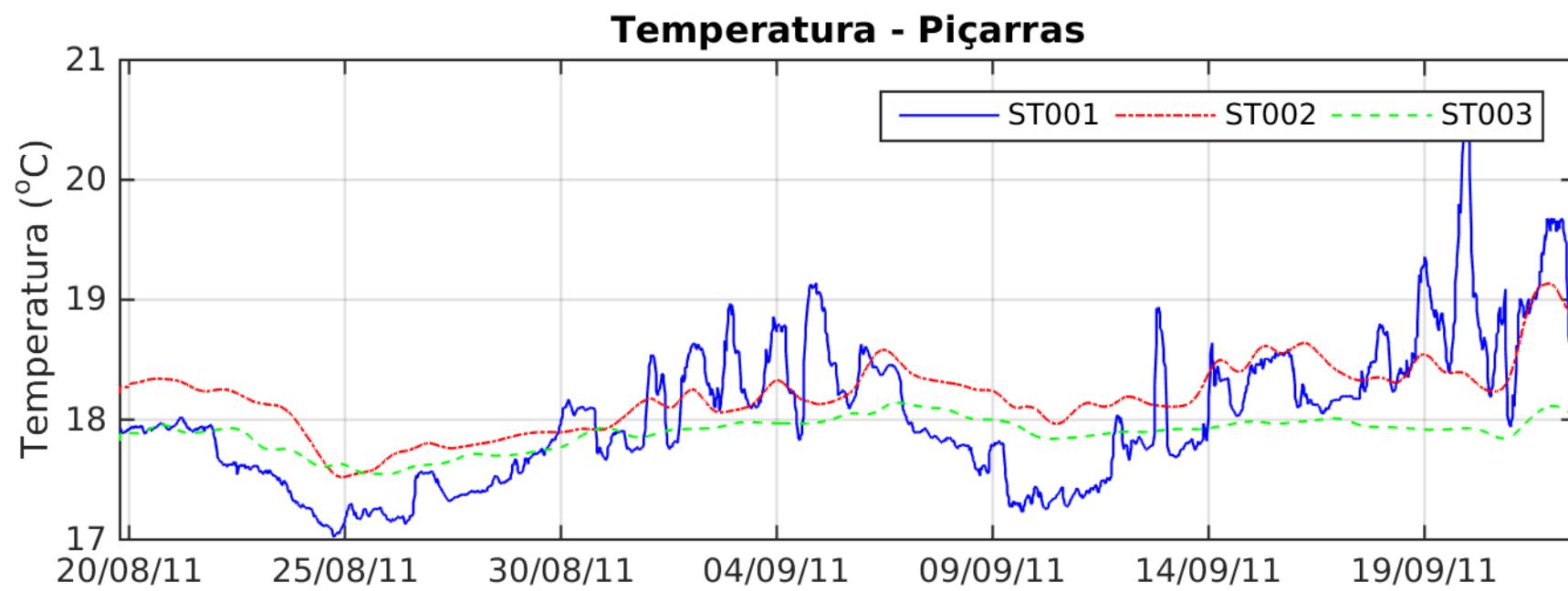


Figura 20 – Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha azul apresenta as variações no ponto ST001 (equipamento mais abrigado) enquanto a linha verde indica as variações no ponto ST003 (equipamento mais externo). Verifica-se que as variações de temperatura diminuem conforme a medição ocorre em águas mais profundas.





Nas figuras 23 a 25 estão apresentados os resultados da análise de no domínio da frequência da temperatura em todos os pontos medidos. É possível observar que existe uma tendência de aumento de energia conforme o período aumenta. Nos ponto ST001 e ST002 verifica-se que esse pico aumenta até o período de 1 dia. Períodos maiores que 1 dia tem uma energia maior associada, mas, devido ao curto período de aquisição, os picos tornam-se mais indistintos. No ponto ST003 o pico no período de 1 dia fica pouco evidente e com menos energia que os picos próximos a ele. Isso pode ser causado pelo distanciamento do ponto ST003 da costa e sua maior profundidade, mostrando que o mesmo está menos sujeito a variações diurnas de temperatura, como verificado nos pontos mais internos.

É interessante notar que a alta frequência vista nos dados medidos se reflete em um pico de energia no menor período apresentado no espectro. A quantidade de energia é muito maior do que nos demais períodos, o que corrobora a teoria de que esta frequência foi introduzida devido a um erro de medição.

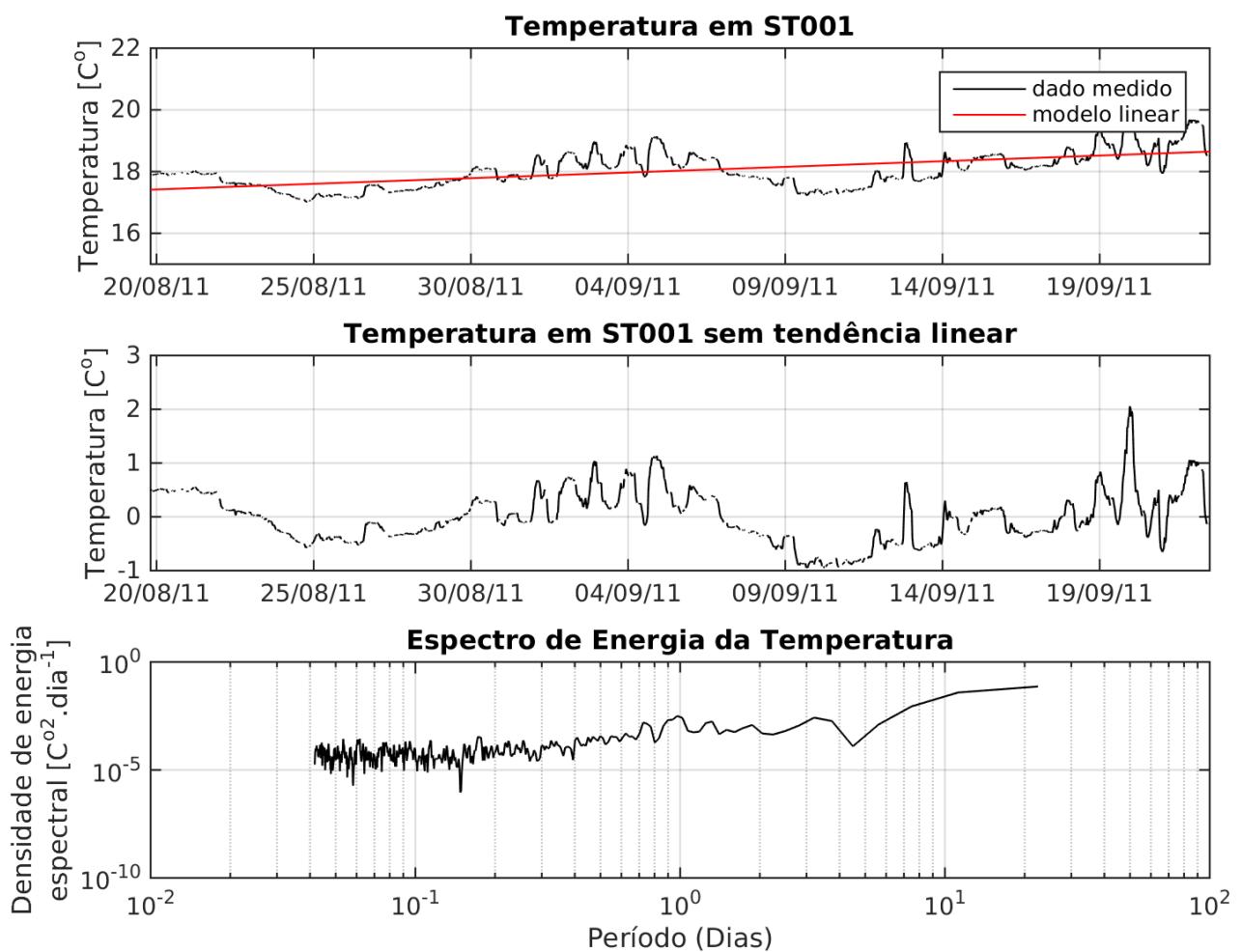


Figura 23 – O primeiro gráfico (superior) apresenta os dados de temperatura do ponto ST001 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho). O segundo gráfico (meio) apresenta o valor de temperatura uma vez retirada a tendência linear apresentada na figura superior. O terceiro gráfico (inferior) apresenta o espectro de energia no domínio da frequência.

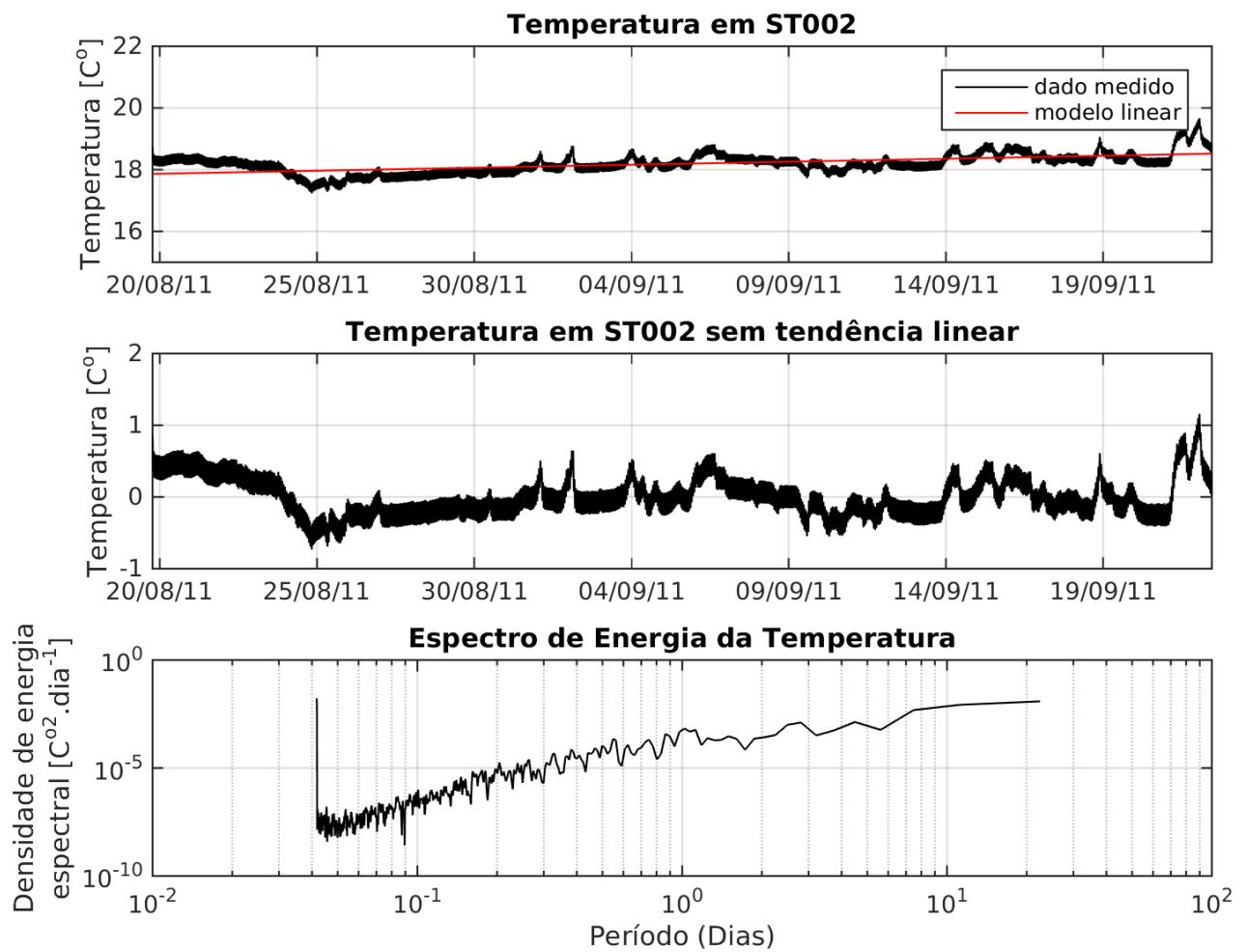


Figura 24 – O primeiro gráfico (superior) apresenta os dados de temperatura do ponto ST002 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho). O segundo gráfico (meio) apresenta o valor de temperatura uma vez retirada a tendência linear apresentada na figura superior. O terceiro gráfico (inferior) apresenta o espectro de energia no domínio da frequência.

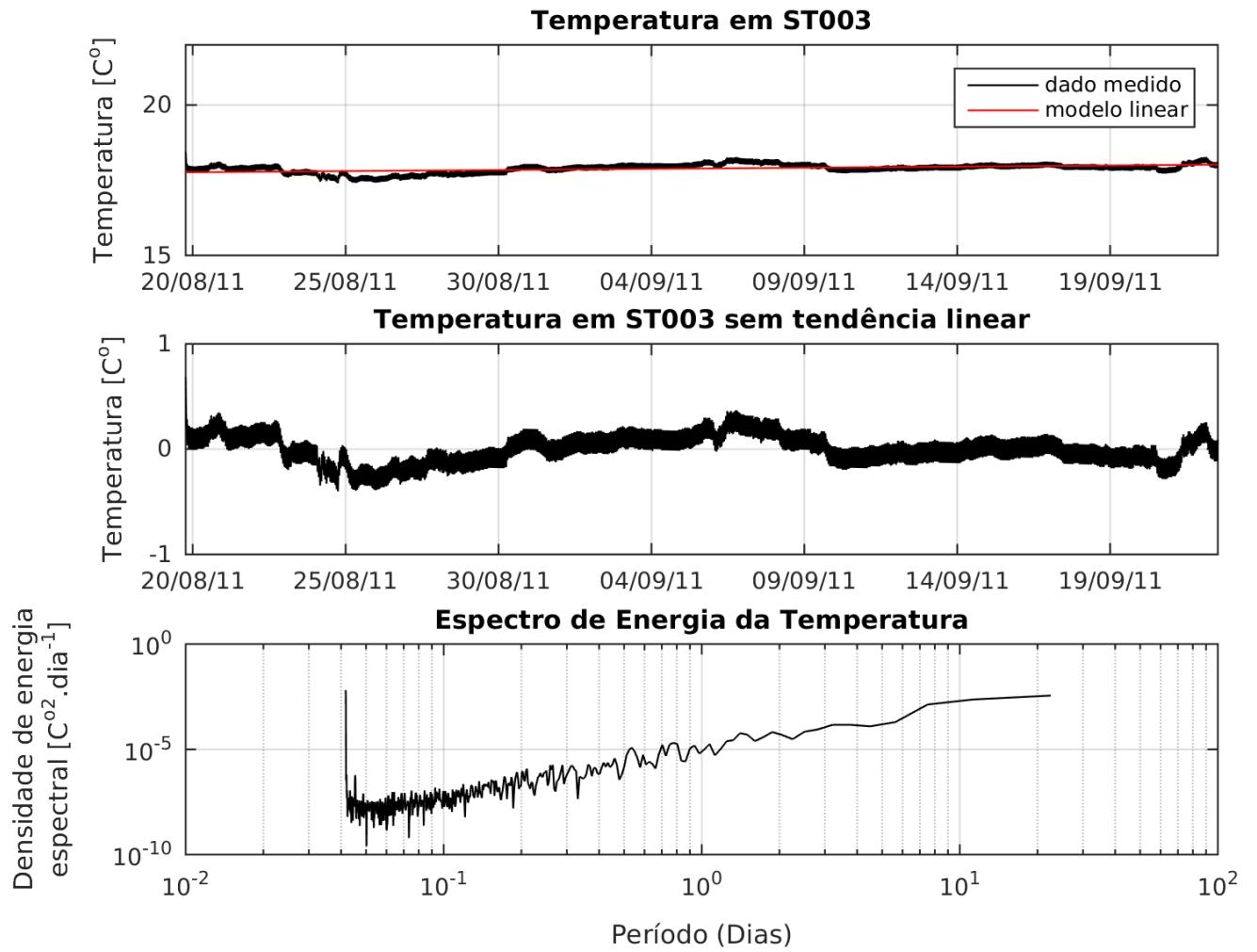


Figura 25 – O primeiro gráfico (superior) apresenta os dados de temperatura do ponto ST003 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho). O segundo gráfico (meio) apresenta o valor de temperatura uma vez retirada a tendência linear apresentada na figura superior. O terceiro gráfico (inferior) apresenta o espectro de energia no domínio da frequência.

#### 4.1.3 Nível, Temperatura e Vento

Nas figuras 26 a 28 estão apresentadas análises comparativas entre a maré meteorológica, a temperatura e o vento nos pontos ST001, ST002 e ST003.

É possível verificar em ST001 que o pico de elevação de nível no começo da série (dia 22) sucedeu um episódio esporádico porém intenso de vento SE. Entretanto, não houve nada na temperatura que demonstrasse qualquer influência desse vento e esse episódio de vento Sul parece ser pouco para a grande elevação verificada nesse primeiro período. Esse pico, portanto, pode estar associado a tempestades geradas longe da costa e não a ventos locais.

Toda a elevação de temperatura que ocorre após o dia 15 de Setembro bem como o episódio de pico de temperatura no dia 20 de Setembro se dá depois de uma sucessão de ventos S-SE intensos (mais de  $5m.s^{-1}$ ), eventualmente sobrepostos por ventos do quadrante N com menor intensidade. Por outro lado, se vê uma diminuição do nível, o que não é comum com ventos desse quadrante.

As baixas temperaturas entre 22 e 30 de Agosto aparecem associadas por um período de vento constante do quadrante NE, além de ser um período onde verifica-se uma abaixamento constante do nível. Esse pode ser o efeito do Efeito de Coriolis sobre a costa, uma vez que ventos de NE tendem a abaixar o nível e diminuir a temperatura. O efeito contrário pode ser visto no dia 3 de Setembro, onde intensos ventos de Sul mudam a tendência de queda do nível e causam um aumento da temperatura, que vinha oscilando em um período onde o vento não mantinha direção constante.

Os pontos ST002 e ST003 apresentam os mesmos resultados entre vento e nível, mas com efeitos muito sutis na temperatura, praticamente imperceptíveis no ponto S003. Verifica-se, portanto, que as correlações entre vento, nível e temperatura se apresentam mais intensas em pontos rasos, como o ST001, e mais sutis em regiões profundas como ST002 e ST003.

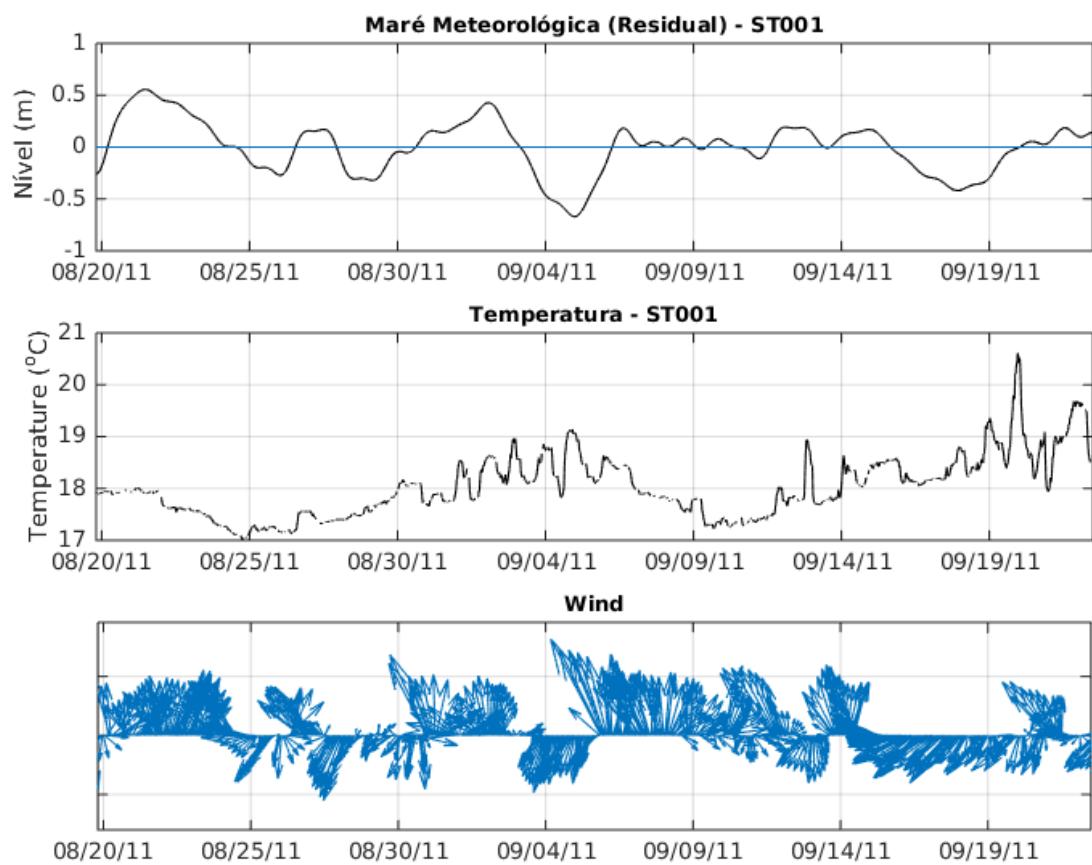


Figura 26 – Comparação entre a elevação meteorológica de nível (figura superior), a variação de temperatura (figura central) e a intensidade e direção do vento (figura inferior) no ponto ST001.

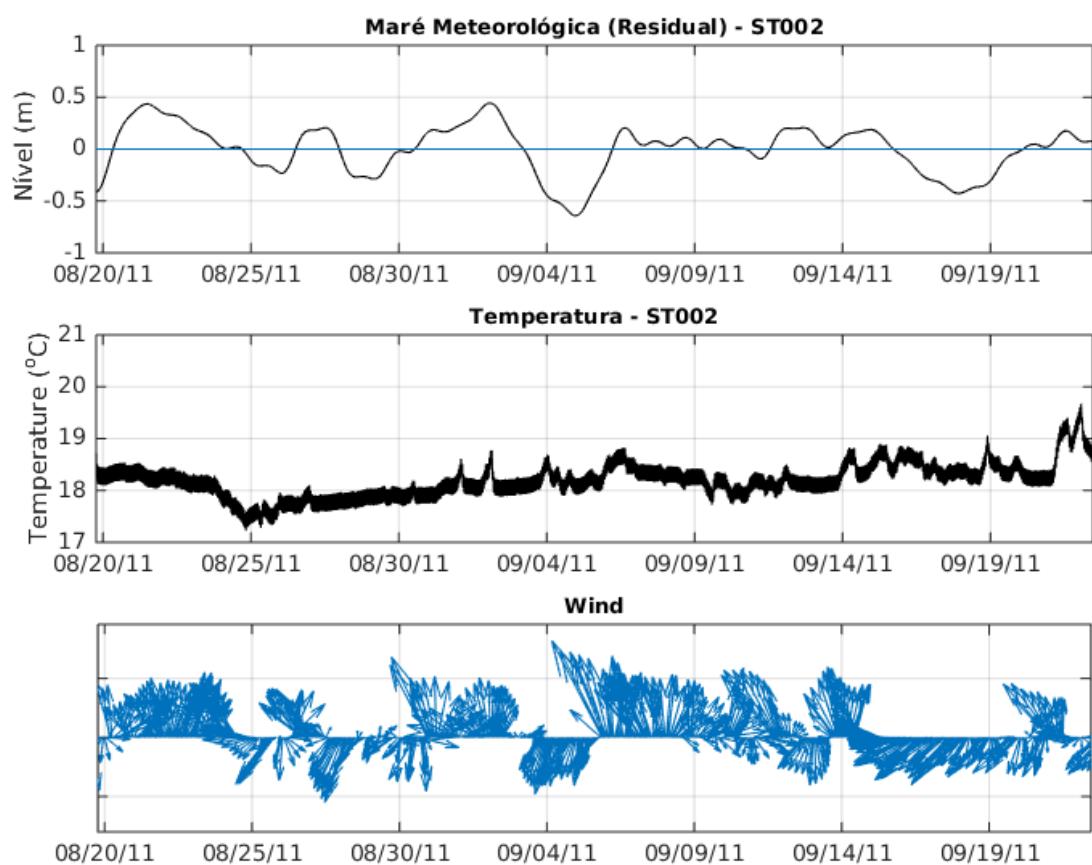


Figura 27 – Comparação entre a elevação meteorológica de nível (figura superior), a variação de temperatura (figura central) e a intensidade e direção do vento (figura inferior) no ponto ST002.

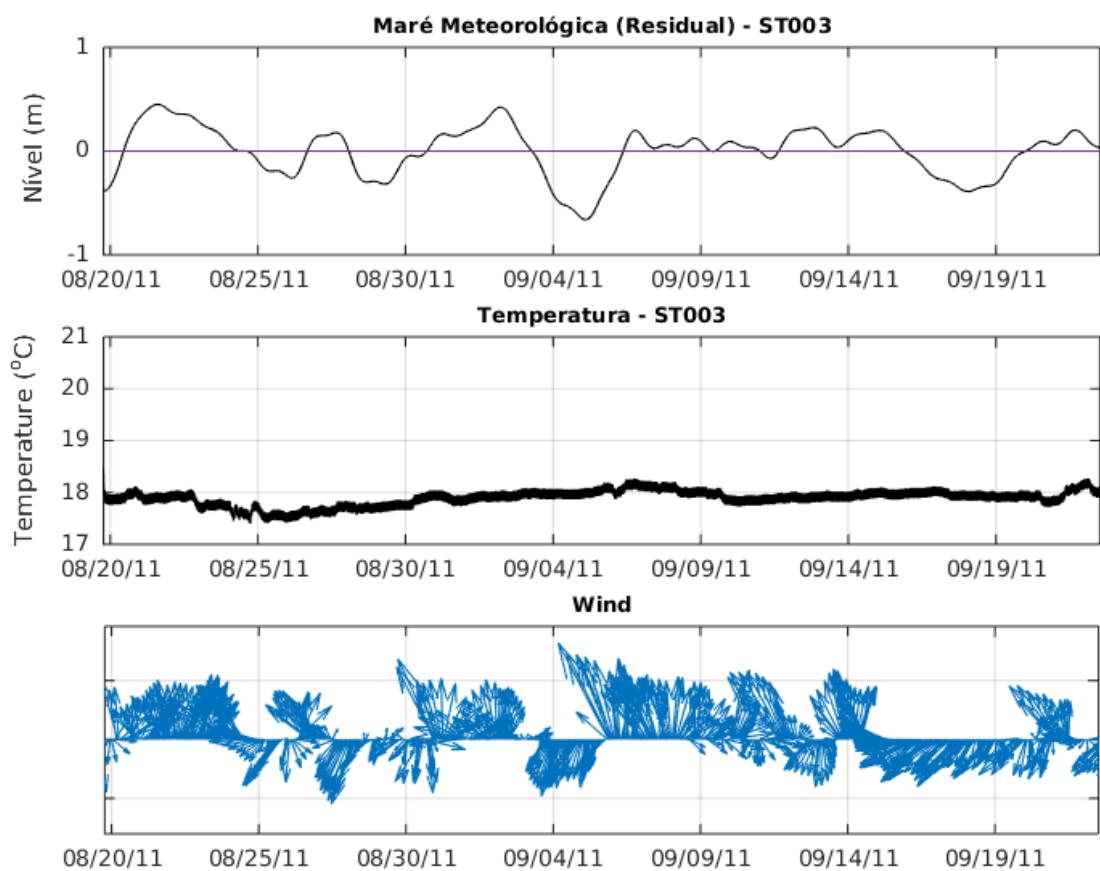


Figura 28 – Comparação entre a elevação meteorológica de nível (figura superior), a variação de temperatura (figura central) e a intensidade e direção do vento (figura inferior) no ponto ST003.

#### 4.1.4 Corrente

Nas figuras 29, 30 e 31 podem ser observadas as rosas de corrente integradas na vertical para os pontos ST001, ST002 e ST003, respectivamente. Demais análises por camadas podem ser encontradas nos Apêndices.

Em termos de velocidades integradas na coluna, as correntes apresentam velocidades muito baixas, abaixo de  $20\text{cm}.\text{s}^{-1}$  na maior parte do tempo. Entretanto, nota-se que a maior parte das correntes fica abaixo de  $10\text{cm}.\text{s}^{-1}$  (Figuras 32 a 34). É possível notar nas figuras 35 a 37 que em 90% do tempo, as velocidades ficam abaixo de  $8\text{cm}.\text{s}^{-1}$  nos pontos ST001 e ST002 e abaixo de  $21\text{cm}.\text{s}^{-1}$  em ST003.

As figuras ?? a ?? apresentam na parte superior os vetores indicando a direção e magnitude das correntes e na parte inferior a velocidade. Enquanto nos pontos ST001 e ST002 não foi possível associar os episódios de grande velocidade com direções predominantes, no ponto ST003 percebe-se que as correntes que atingiram velocidades acima de  $15\text{cm}.\text{s}^{-1}$  estão associadas a correntes de sudeste.

Também foram feitos gráficos para todas as camadas de cada ADCP. Para evitar sobre-carregar o trabalho de imagens, os gráficos por camada estão disponíveis no apêndice A.

No ponto ST001 as correntes se apresentaram mais fortes na superfície (Figura ??), com direção predominante para NE, enquanto perto do fundo (Figura ??) as velocidades ficaram abaixo de  $10\text{cm}.\text{s}^{-1}$ . Correntes para O são praticamente ausentes em todas as camadas.

Em ST002 a velocidade é mais bem distribuída ao longo da coluna de água, embora as direções variem de um eixo ENE-WSW perto do fundo para uma distribuição mais homogênea de direções próximo da superfície.

ST003 apresenta predominância de correntes de S-SSE em praticamente todas as camadas mais intensas na superfície, acima de  $35\text{cm}.\text{s}^{-1}$  e menos intensas perto do fundo, normalmente abaixo de  $30\text{cm}.\text{s}^{-1}$ .

Vale ressaltar que os episódios de velocidade acima de  $25\text{cm}.\text{s}^{-1}$  nas camadas de ST001 e ST002 não aconteceram no mesmo período de tempo. Essa diferença indica que processos regem as correntes em cada uma das regiões analisadas.

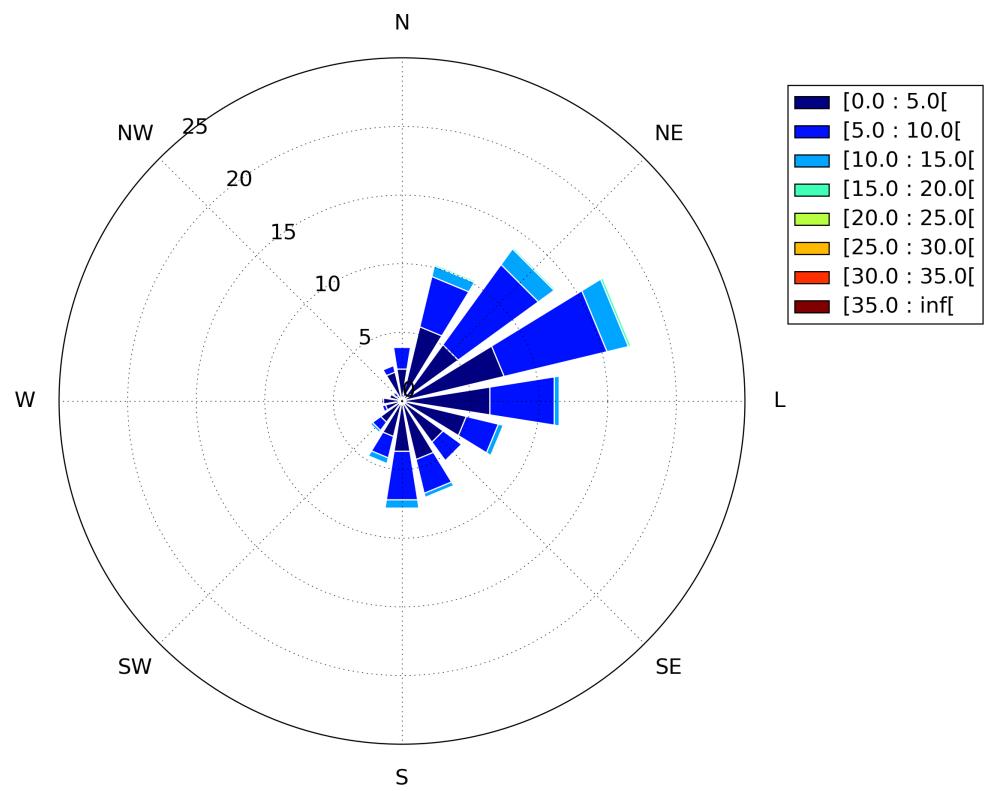


Figura 29 – Rosa de correntes no ponto ST001 integrada na vertical (em cm).

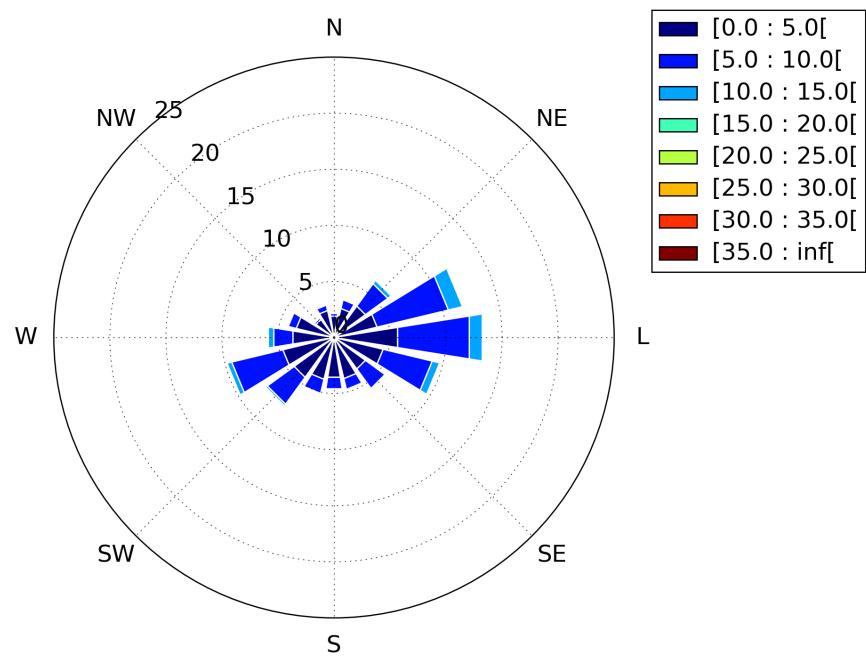


Figura 30 – Rosa de correntes no ponto ST002 integrada na vertical (em cm).

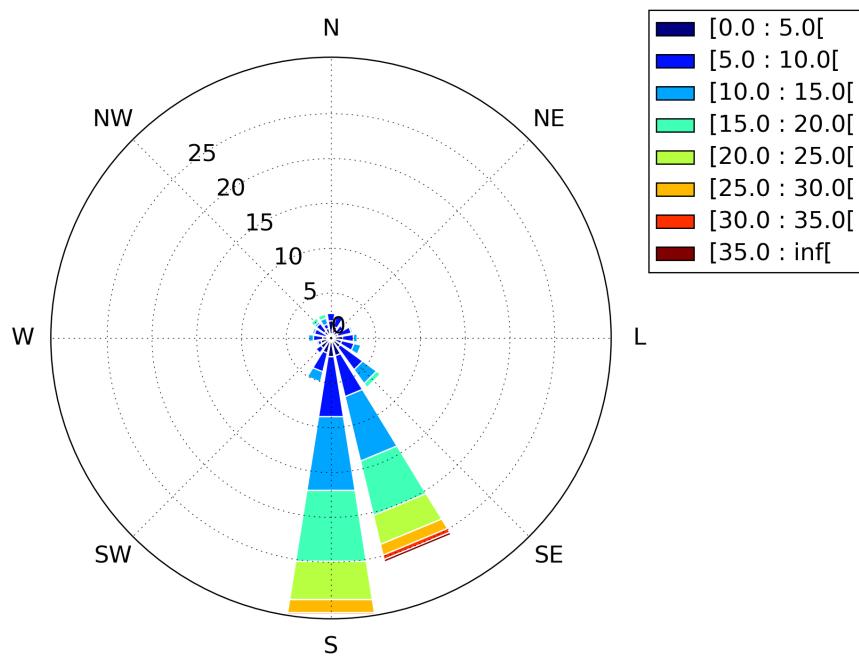


Figura 31 – Rosa de correntes no ponto ST003 integrada na vertical (em cm).

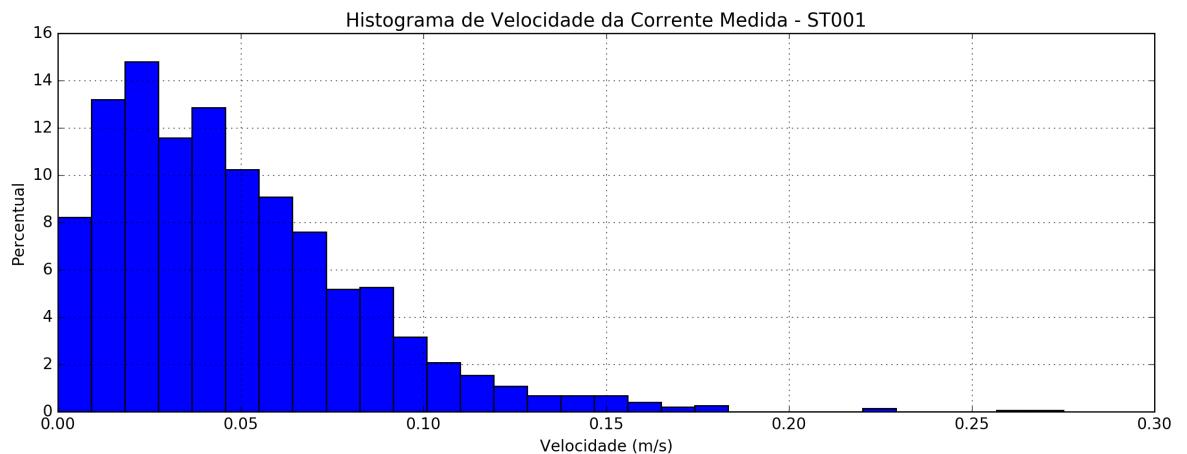


Figura 32 – Histograma da velocidade de corrente no ponto ST001 integrada na vertical.

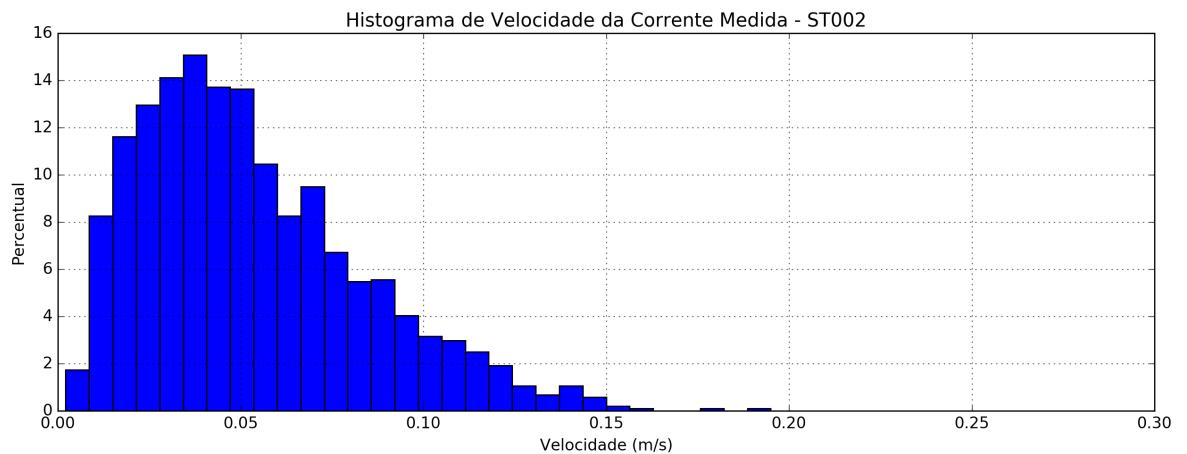


Figura 33 – Histograma da velocidade de corrente no ponto ST002 integrada na vertical.

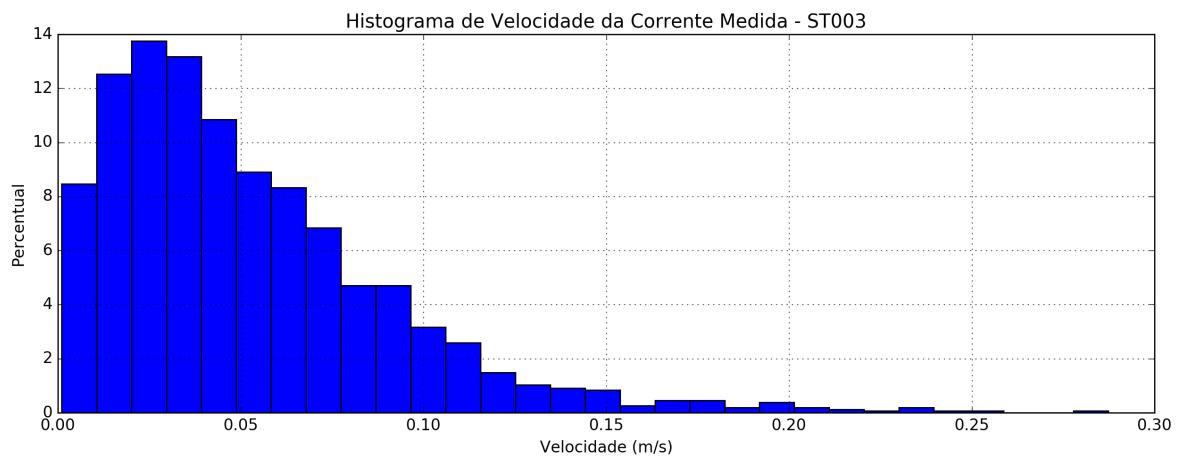


Figura 34 – Histograma da velocidade de corrente no ponto ST003 integrada na vertical.

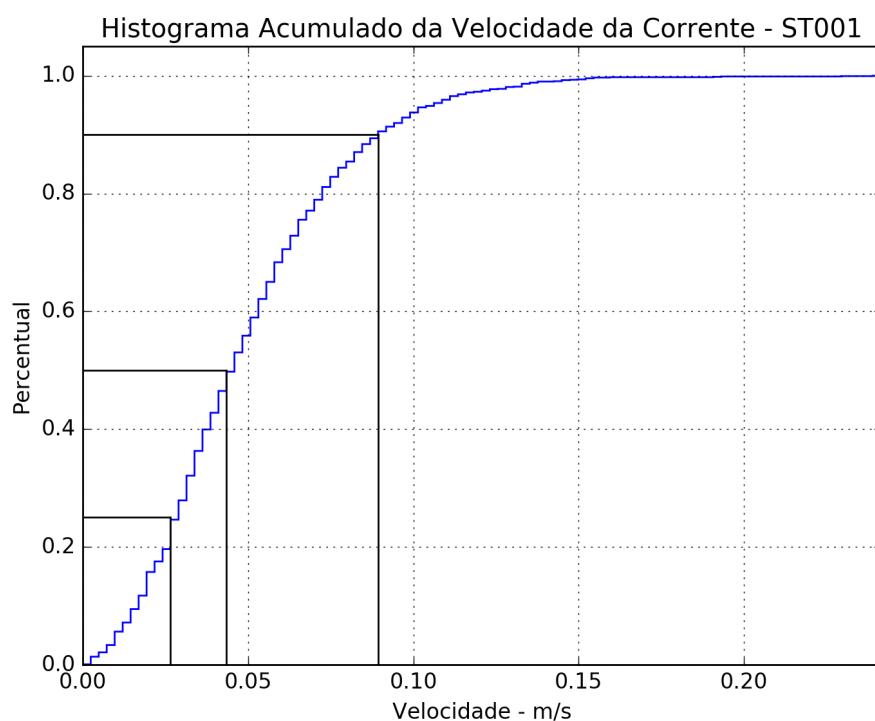


Figura 35 – Histograma cumulativo da velocidade da corrente em  $m.s^{-1}$  no ST001. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.

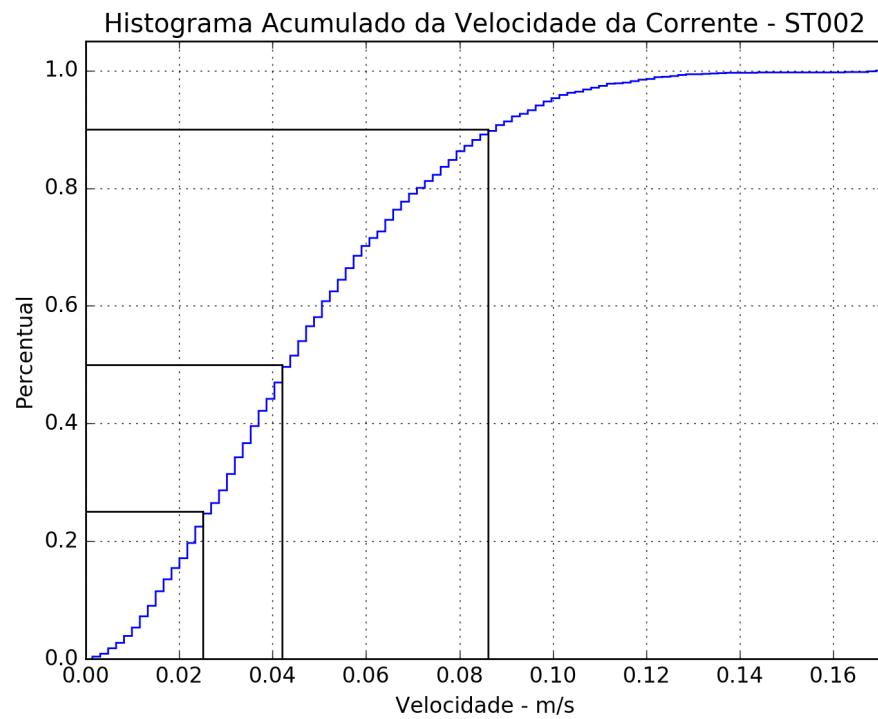


Figura 36 – Histograma cumulativo da velocidade da corrente em  $m.s^{-1}$  no ST002. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.

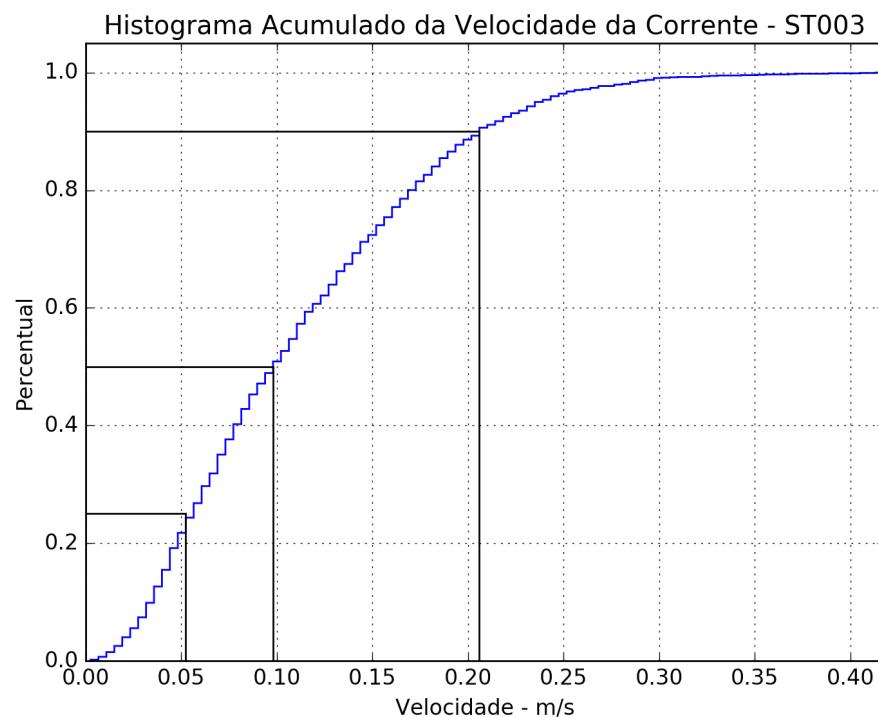


Figura 37 – Histograma cumulativo da velocidade da corrente em  $m.s^{-1}$  no ST003. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.

## 4.2 MODELO NUMÉRICO

### 4.2.1 Grade Numérica e Batimetria

A grade numérica foi desenvolvida através da ferramenta Delft3D-RGFGRID disponível no pacote de módulos do Delft3D. O objetivo do RGFGRID é criar, modificar e visualizar grades curvilineares de forma fácil. Para isso, o software conta com diversas ferramentas para a geração de grades tais como aumentar ou diminuir a resolução da grade globalmente ou localmente, apagar ou adicionar células individuais e ortogonalização (DELTARES, 2011b). A qualidade de uma grade pode ser determinada pela ortogonalidade e pela taxa com que algumas certas propriedades (*smoothness*) mudam ao longo da área a ser modelada (DELTARES, 2014). A medida de ortogonalidade é o ângulo (ou o cosseno do ângulo) entre as linhas de grade em ambas as direções x e y. A medida de *smoothness* é a relação entre os tamanhos das células de grade em ambas as direções.

O manual do RGFGRID recomenda alguns valores de propriedades da grade para que a mesma possa ser considerada de qualidade e para que se evite a introdução de erros numéricos devido ao aumento de resolução na área de estudo e curvatura da grade. Buscou-se manter o máximo possível dentro dos parâmetros recomendados conforme pode ser observado na tabela 11.

Tabela 11: Propriedades da grade numérica.

Parâmetro	Valor Padrão/Recomendado	Valor Máx.
Ortogonalidade	<0,02	0,01
M Smoothness	<1,2	1,050
N Smoothness	<1,2	1,136
<i>Aspect Ratio</i>	1-2	<1,7 na área de estudo
Resolução Mínima	-	200 m
Resolução Máxima	-	23,7 m

Uma vez a grade definida, os pontos batimétricos descritos anteriormente foram interpolados na mesma. Para isso, utilizou-se o programa Delft3D-QUICKIN (DELTARES, 2011a). O valor máximo de profundidade dentro do domínio numérico é de 39.2 m e o resultado pode ser verificado na figura A.5.

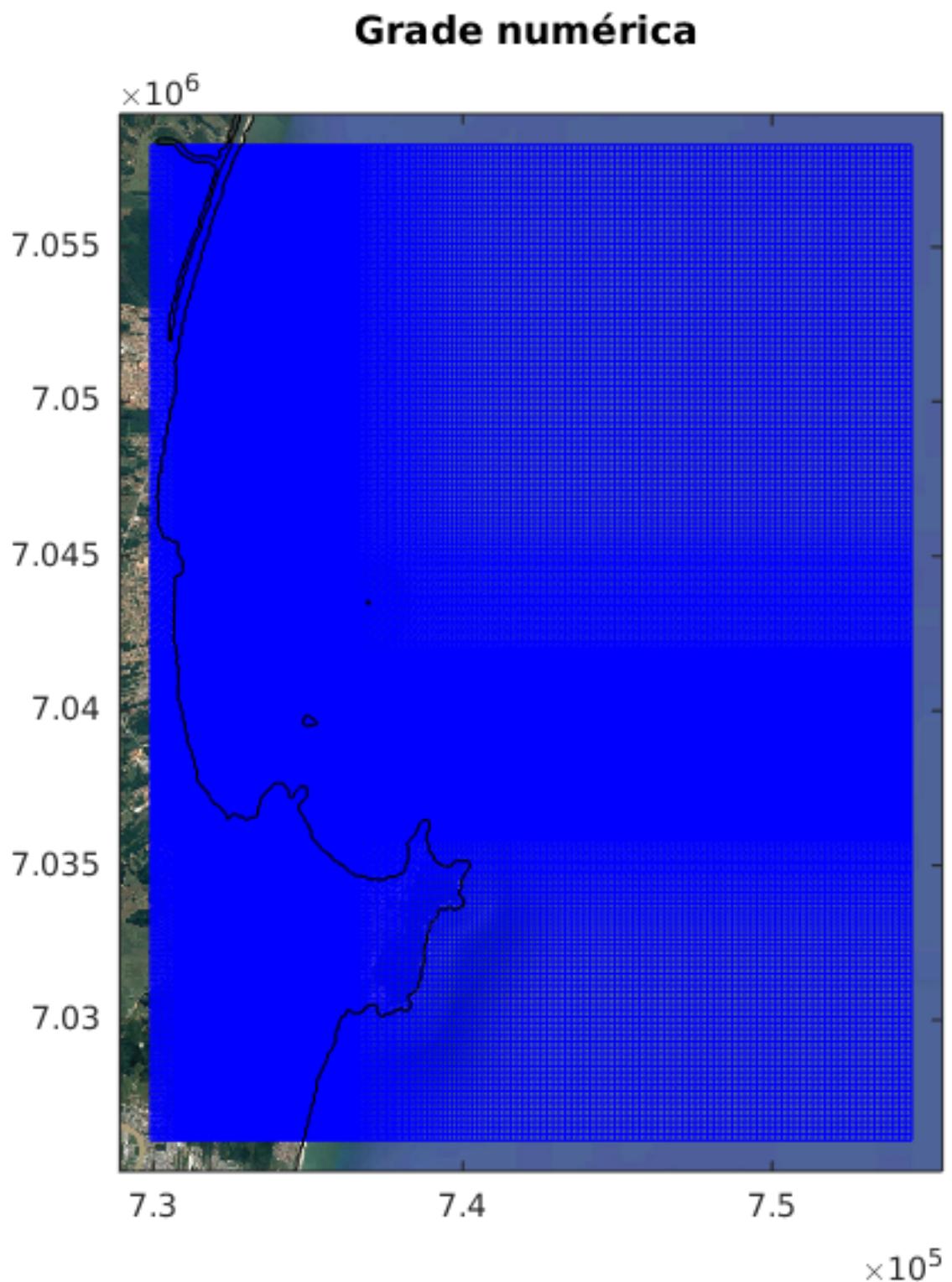


Figura 38 – Grade numérica

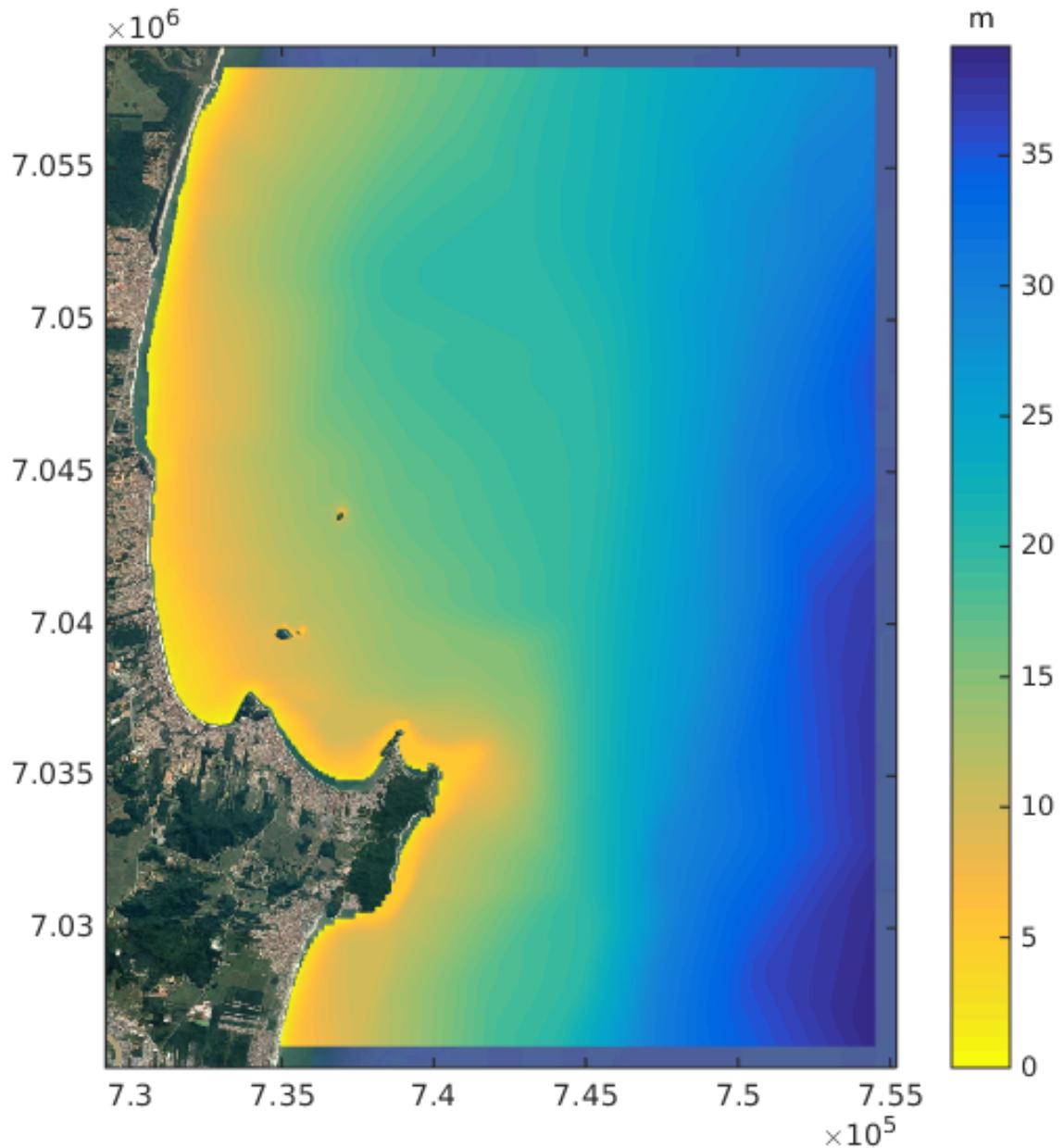
**Batimetria interpolada na grade numérica**

Figura 39 – Batimetria interpolada na grade numérica.

#### 4.2.2 Calibração

Diversos parâmetros foram testados de modo que se conseguisse chegar a um modelo que representasse aproximadamente a realidade. No total, foram construídas três grades numéricas e geradas 10 batimetrias. Por fim, chegou-se na grade numérica e batimetria apresentadas acima. Alguns parâmetros de configuração do modelo foram testados e aqueles definidos na calibração e seus valores padrão estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Configurações utilizadas na calibração.

Parâmetro	Valor padrão	Valor utilizado
Densidade da água	$1000 \text{ kg.m}^{-3}$	$1025 \text{ kg.m}^{-3}$
Formulação de Rugosidade	Chezy	Manning
Rugosidade do fundo (U)	65	0,025
Rugosidade do fundo (V)	65	0,025
Viscosidade	$1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	$0,1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
Coef. de Arrasto de Vento	$100 \text{ m.s}^{-1}$	$50 \text{ m.s}^{-1}$

Nas figuras 40 a 45 podem ser observados os resultados da calibração do modelo em comparação com os dados medidos nos três ADCPs posicionados em diferentes profundidades na Enseada do Itapocorói. Para avaliar a performance do modelo, foi calculada a amplitude máxima de variação dos dados medidos e, assumiu-se como ideal valores de erros que correspondessem a aproximadamente 10% ou menos que o valor máximo de variação do dado medido. A tabela 13 apresenta os valores de amplitude e o valor de erro do modelo para cada parâmetro avaliado em cada um dos equipamentos.

Primeiramente, é notável que os valores de erro de nível sejam consideravelmente mais baixos que aqueles encontrados nas componentes de velocidade, ficando sempre abaixo de 6% do valor da amplitude da maré na região, que se encontra em aproximadamente 1,4m. Essa diferença de erros entre a calibração das componentes da velocidade e os valores nível indica que os processos que regem a hidrodinâmica local não estão associados às variações de nível, mas a outros processos costeiros como sugerido por Schettini et al. (1999).

É possível verificar que, em relação à corrente, os valores de erro são menores no ponto ST002. O ponto ST001 apresenta-se muito próximo da costa, o que o faz sujeito a influências da batimetria e da linha de costa. A resolução da grade pode ter sido um limitante de calibração do modelo neste ponto costeiro, justificando os maiores valores de erro encontrados em ST001 do que ST002. Já o ponto ST003 apresenta-se em uma área muito externa. A inserção de vento no modelo teve menor influência neste ponto do que nos demais pontos costeiros, indicando que o mesmo está muito menos sujeito a variações locais do que os demais pontos analisados. O fato de não se ter conseguido uma calibração em ST003 em diversas tentativas com diferentes forçantes de maré e vento local, indica que o ponto está muito externo para serem desconsideradas forçantes de larga escala, ondas de plataforma e/ou a baroclinicidade do sistema. Isso também pode ser verificado no domínio da frequência, onde o ponto ST003 apresentou a maior porcentagem de energia em frequência submareais (31%).

De forma geral, os erros ficaram próximos a 10% da amplitude do dado avaliado. O ponto ST002 foi o que apresentou os menores valores de erro (<10,5%), mesmo apresentando amplitudes de variação menores que os outros dois locais avaliados. O ponto ST003 teve o maior erro associado na calibração em relação à componente V ( $\sim 14\%$ ). Apesar de os valores

não estarem necessariamente abaixo de 10%, considerou-se que eles estão próximos o suficiente para representarem os processos da região e, portanto, deu-se prosseguimento aos cenários de análise.

Tabela 13: Amplitude máxima do valor medido e percentual de erro do modelo para cada equipamento e parâmetro medido

Equip.	Componente U		Componente V		Nível	
	Ampl. Máx	Erro	Ampl. Máx	Erro	Ampl. Máx	Erro
ST001	$0,323 \text{ } m.s^{-1}$	10,98%	$0,303 \text{ } m.s^{-1}$	11,21%	1,411 m	5,60%
ST002	$0,286 \text{ } m.s^{-1}$	9,37%	$0,192 \text{ } m.s^{-1}$	10,43%	1,405 m	5,69%
ST003	$0,346 \text{ } m.s^{-1}$	10,76%	$0,678 \text{ } m.s^{-1}$	14,05%	1,401 m	5,78%

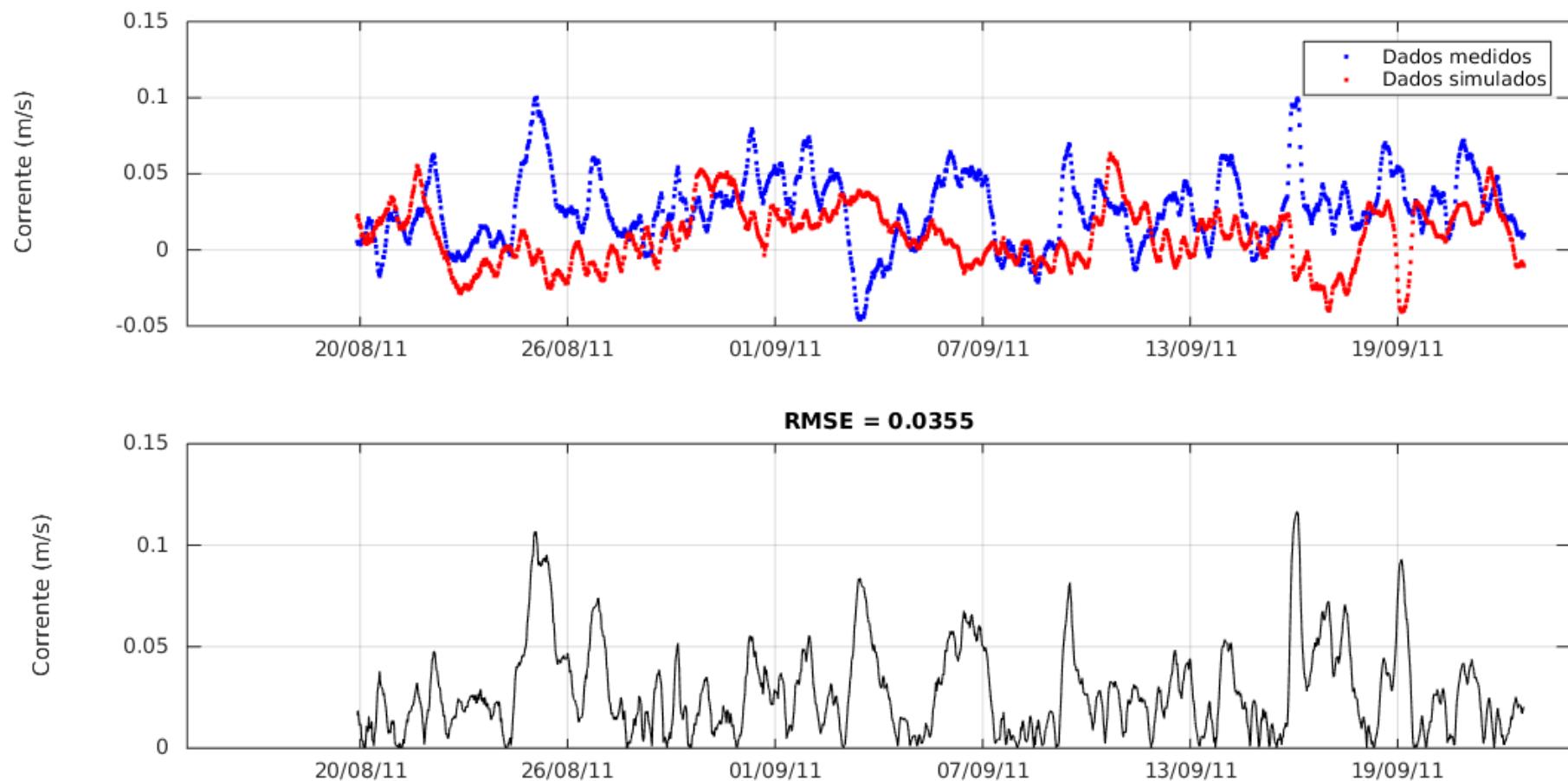


Figura 40 – RMSE para a componente U da velocidade em ST001.

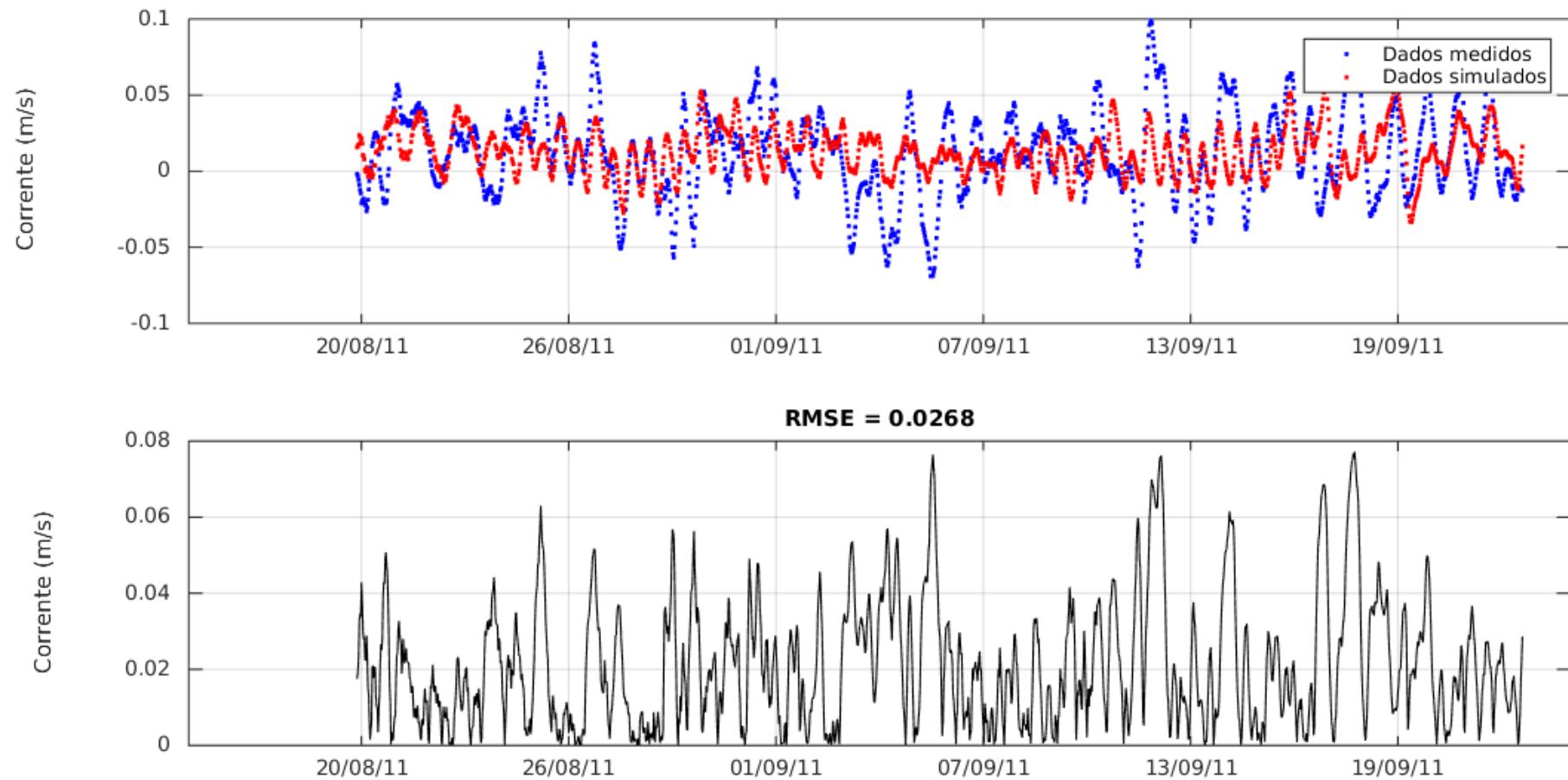


Figura 41 – RMSE para a componente U da velocidade em ST002.

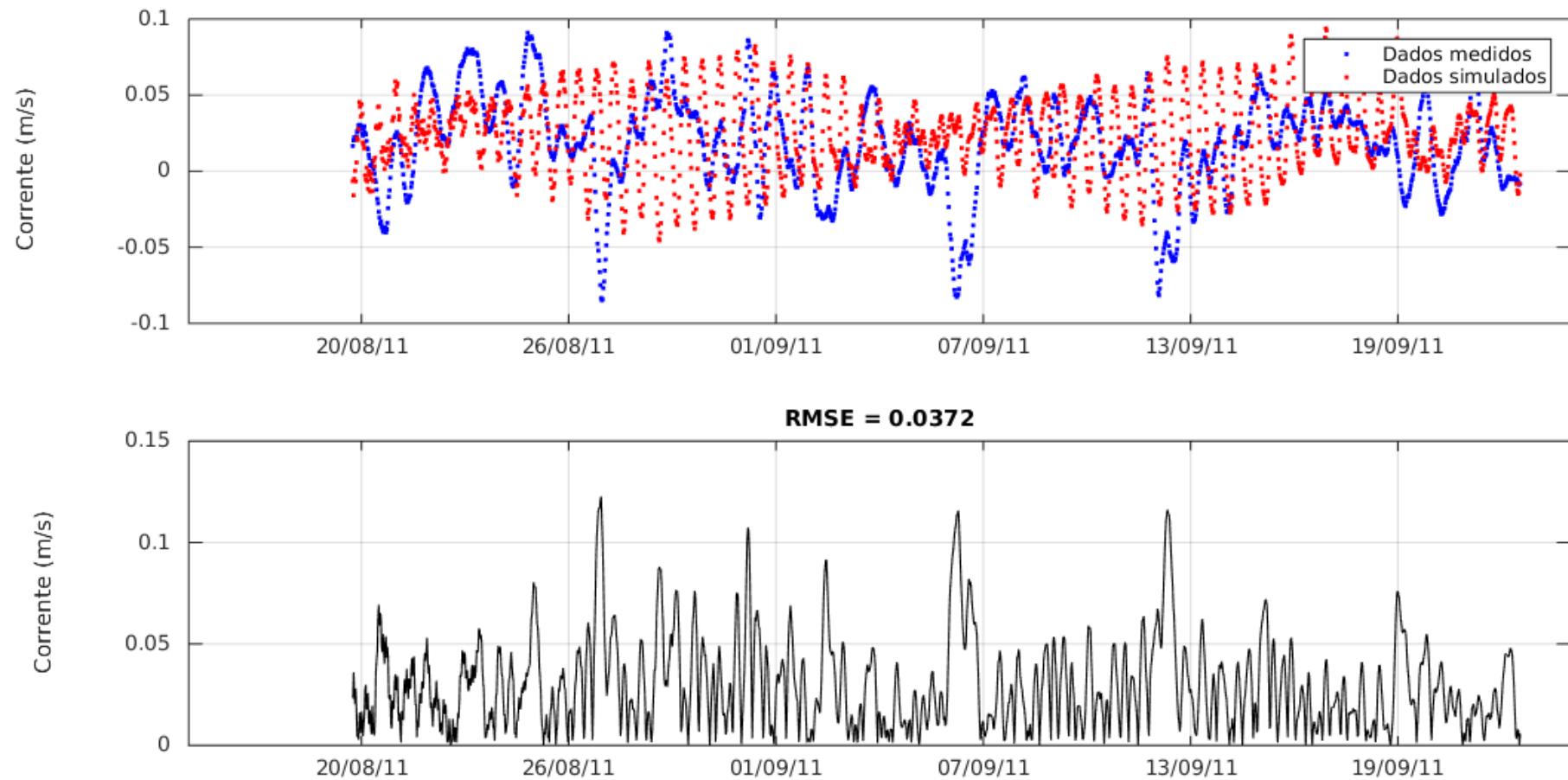


Figura 42 – RMSE para a componente U da velocidade em ST003.

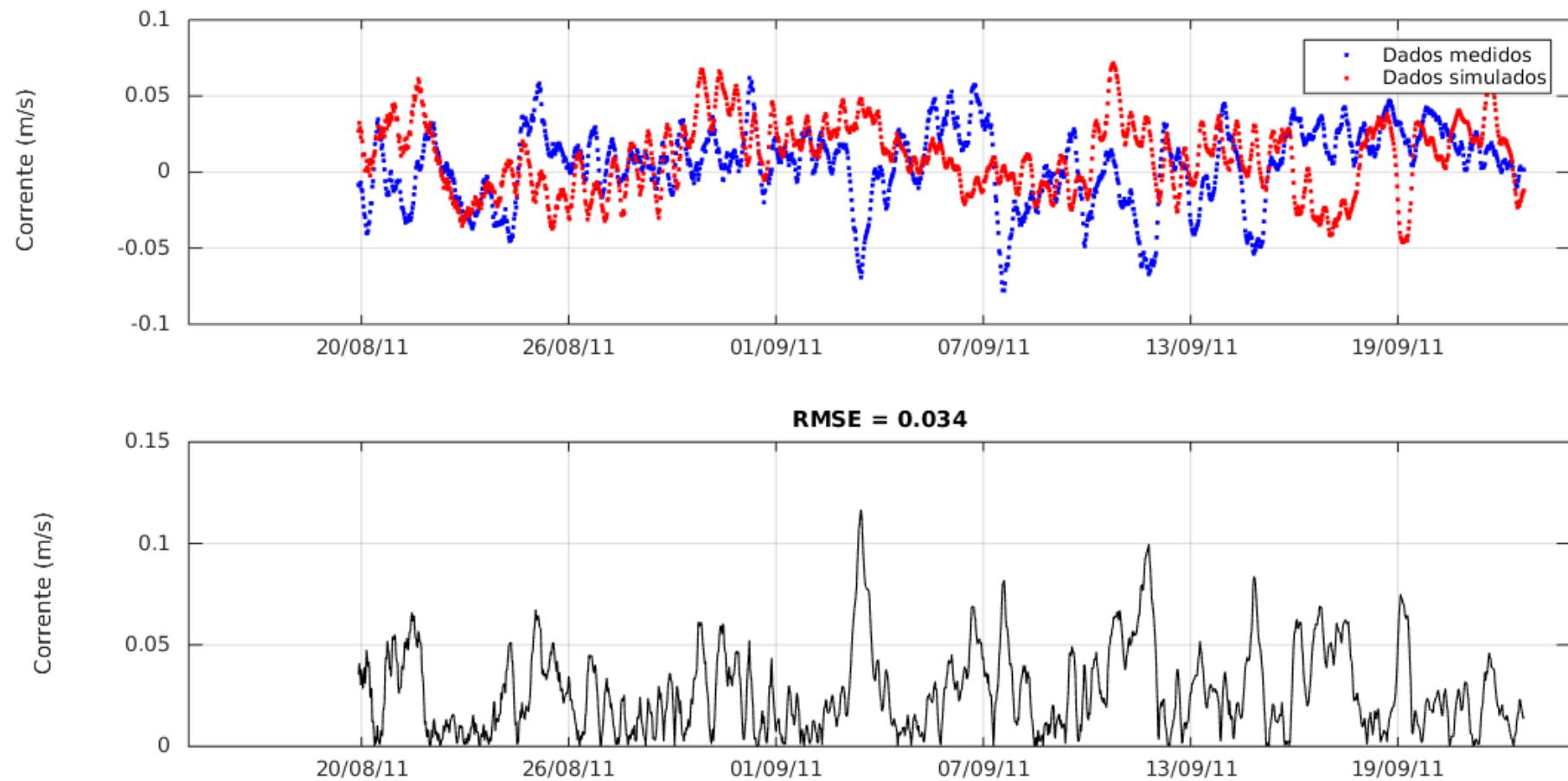


Figura 43 – RMSE para a componente V da velocidade em ST001.

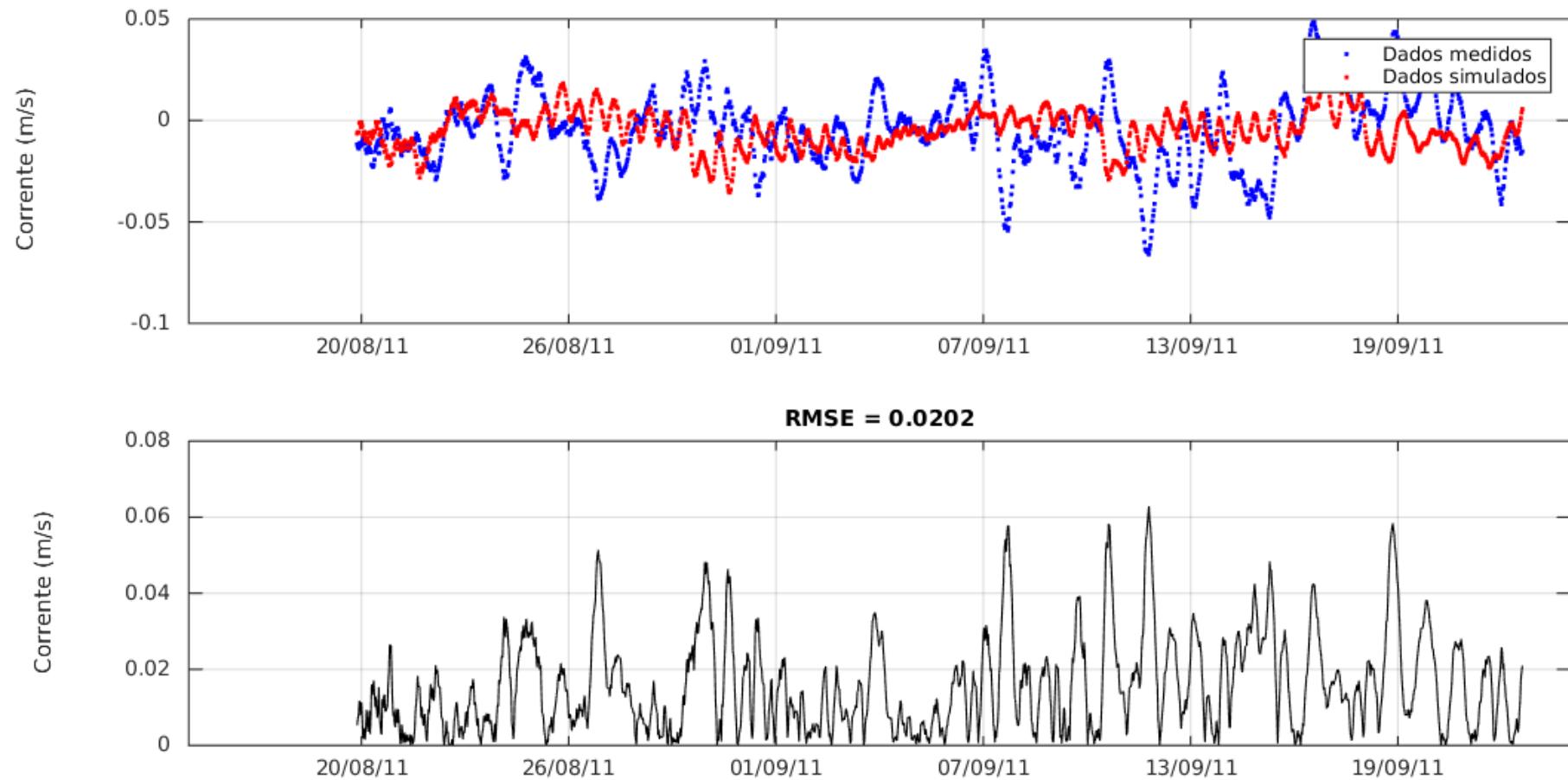


Figura 44 – RMSE para a componente V da velocidade em ST002.

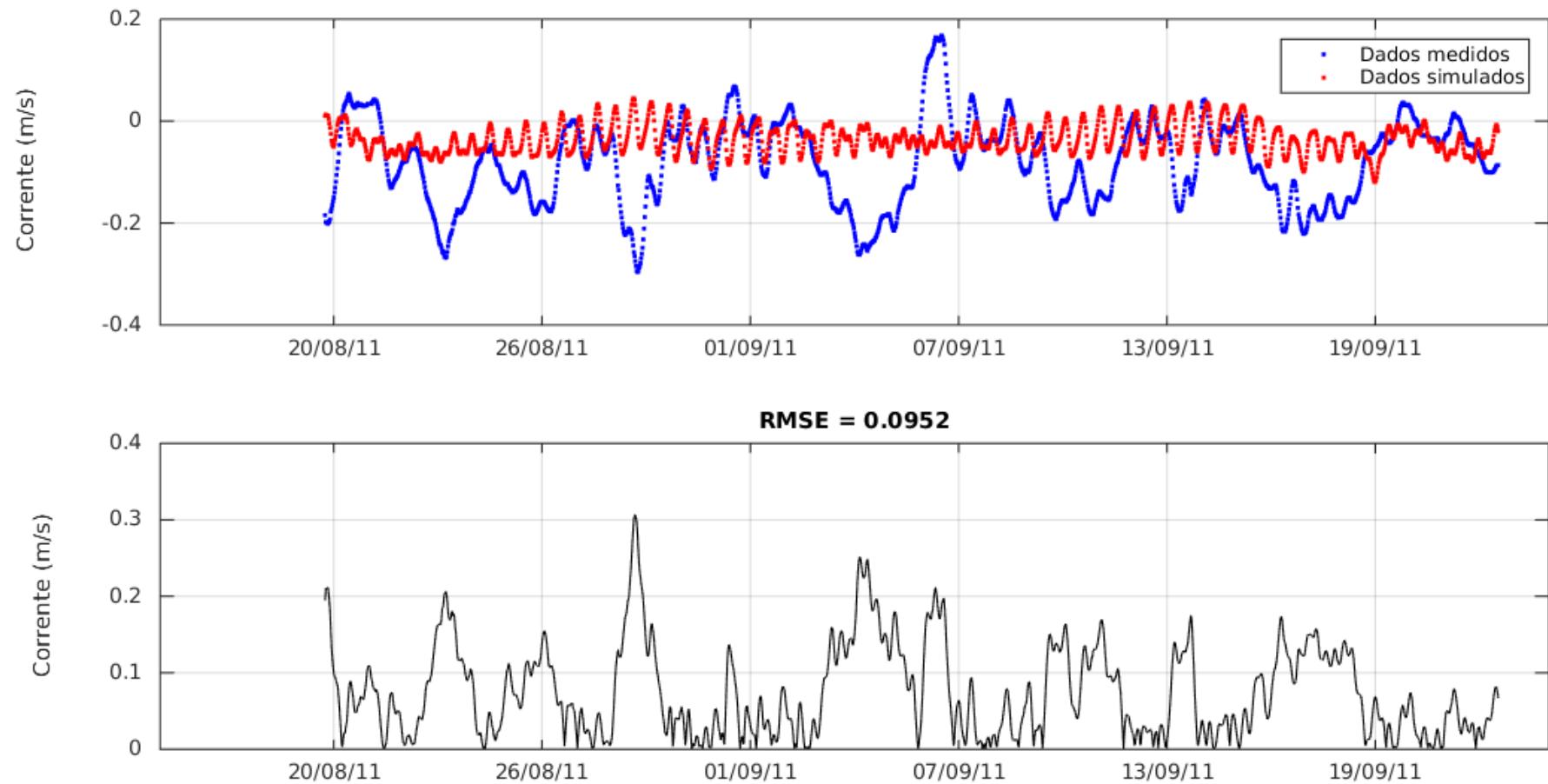


Figura 45 – RMSE para a componente V da velocidade em ST003.

### 4.2.3 Cenários de análise

Para análise das correntes residuais foram selecionados 10 casos de estudo descritos na tabela 14.

Os cenários selecionados tiveram como base o padrão de vento típico da região. Foram escolhidos quatro direções de vento, NE, S, E e SE e duas intensidades de vento ( $4$  e  $10 m.s^{-1}$ ), representando os valores médios e máximos de vento encontrados na região, conforme descrito na tabela 20. Além desses cenários hipotéticos de vento constante, um cenário apenas com maré e um cenário com vento real (variando no tempo), foram selecionados. O primeiro visa entender qual o papel da maré na região, sem a influência do vento enquanto o segundo visa entender o comportamento da enseada em uma situação mais realista.

Uma vez que os resultados foram obtidos, foram desenvolvidos mapas de circulação residual para diferentes períodos de tempo. Buscou-se entender como a circulação de longo prazo se comporta na região da enseada e se diferentes períodos de tempo considerados para comprehendê-la poderia influenciar nos resultados finais. Foram feitos mapas de residual a cada 50, 100 e 200 horas além de um mapa com o residual considerando 2 meses de simulação.

Tabela 14: Configuração dos cenários de análise.

Rodada	Padrão de análise
1	Apenas maré (sem vento)
2	Maré e vento real (rodada de calibração)
3	Maré e vento NE de $4 m.s^{-1}$
4	Maré e vento NE de $10 m.s^{-1}$
5	Maré e vento S de $4 m.s^{-1}$
6	Maré e vento S de $10 m.s^{-1}$
7	Maré e vento E de $4 m.s^{-1}$
8	Maré e vento E de $10 m.s^{-1}$
9	Maré e vento SE de $4 m.s^{-1}$
10	Maré e vento SE de $10 m.s^{-1}$

#### 4.2.4 Mapas de Residuais

A figura 46 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 01, simulado apenas com maré. As correntes apresentam-se bem amenas, não alcançando  $0,4\text{cm}.\text{s}^{-1}$ . As maiores velocidades estão associadas ao costão rochoso da Ponta da Penha e à ilha Feia. Em geral, as velocidades ficam abaixo de  $0,1\text{cm}.\text{s}^{-1}$  na maior parte do domínio, com uma tendência de correntes de norte para sul. Um vórtice no sentido horário pode ser observado na parte sul da ilha Feia, mas velocidades elevadas podem ser observadas ao redor de toda a ilha.

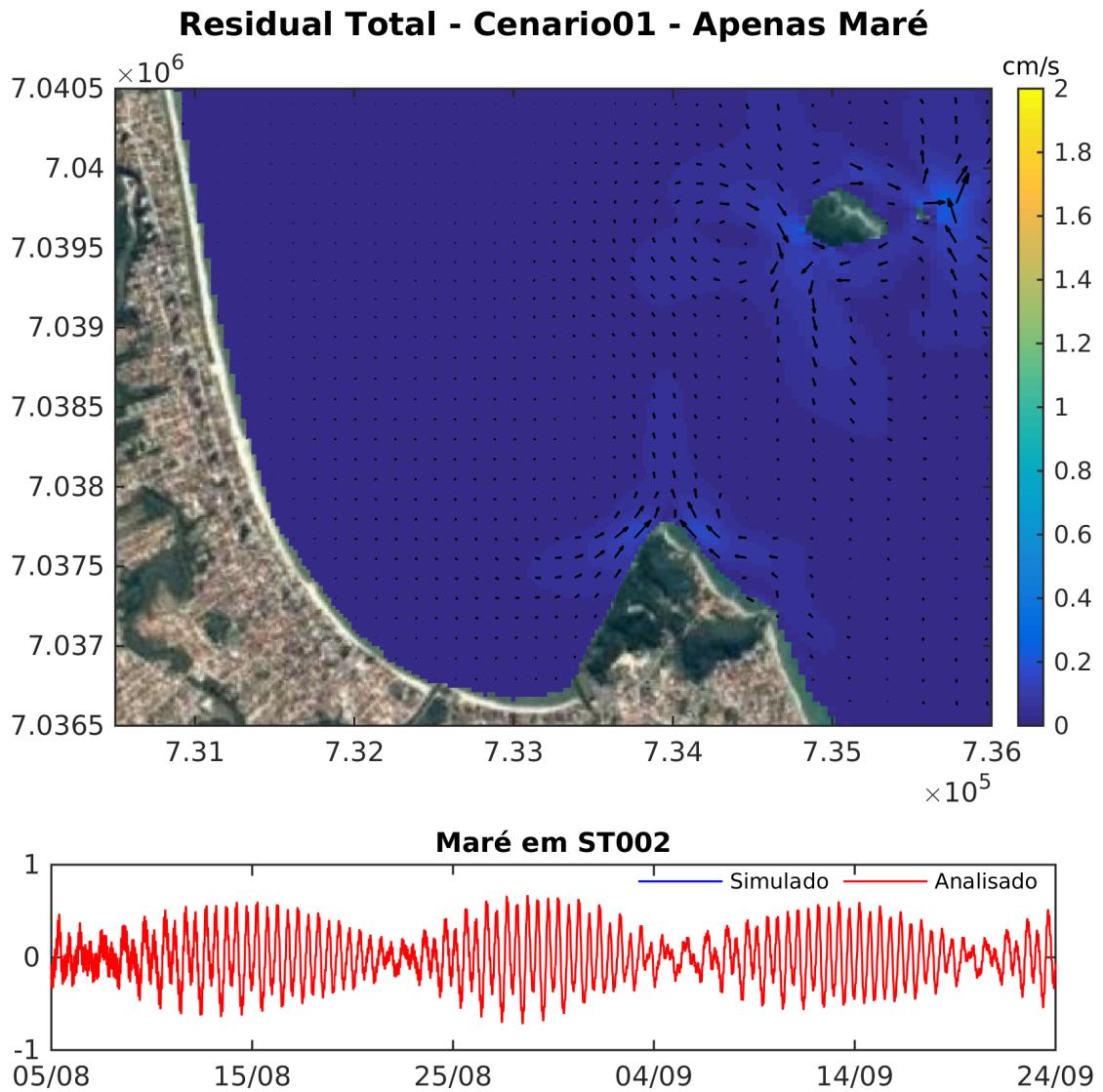


Figura 46 – Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 01.

A tendência verificada no mapa foi vista em todos os mapas de análise de resíduos a cada 50, 100 e 200 horas. O que pode ser observado é que, em momentos de maré de quadratura, as correntes se passam a ser ainda menos intensas, muitas vezes não alcançando  $0,2\text{cm}.\text{s}^{-1}$  em todo o domínio avaliado (Figura 47). Ainda na quadratura é possível verificar um vórtice sendo formado exatamente na frente da Ponta da Penha e o vórtice sul da ilha Feia se estende até quase a Ponta da Penha. Em momentos de sizígia, o padrão de distribuição das correntes é semelhante ao padrão residual total, porém, com correntes mais intensas, que chegam a  $0,6\text{cm}.\text{s}^{-1}$ .

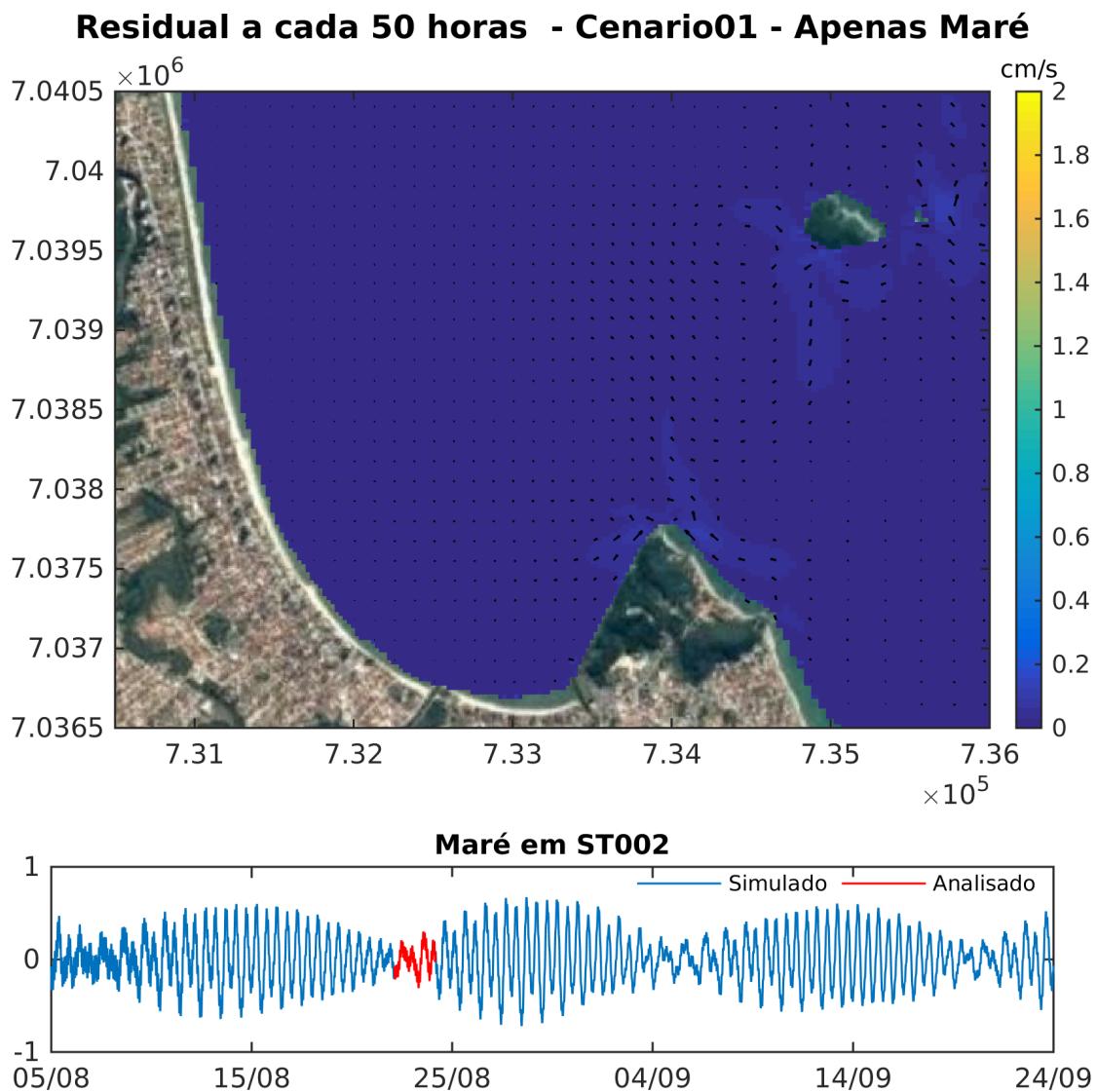


Figura 47 – Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 01

A figura 48 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 02, simulado com maré e vento variando no tempo. Buscou-se entender como é o residual na região considerando um vento real, ou seja, esse é o cenário que mais se aproxima da realidade na Enseada.

Pode-se verificar que o padrão é tipicamente de norte para sul em todos os momentos, sem formação de vórtice. As correntes são intensificadas no estreitamento da plataforma entre a Ilha Feia e a Ponta da Penha, onde chega a valores próximos de  $0,6\text{cm}.\text{s}^{-1}$ . As correntes mais intensas, no entanto, ficam logo ao sul da Ilha Feia. Ao longo da praia, os valores são homogêneos e em torno de  $0,3\text{cm}.\text{s}^{-1}$ .

É interessante notar que existe uma diminuição na intensidade da corrente conforme esta se aproxima da zona de sombra da enseada, e as correntes exatamente próximas do costa ficam mais amenas, em torno de  $0,1\text{cm}.\text{s}^{-1}$ .

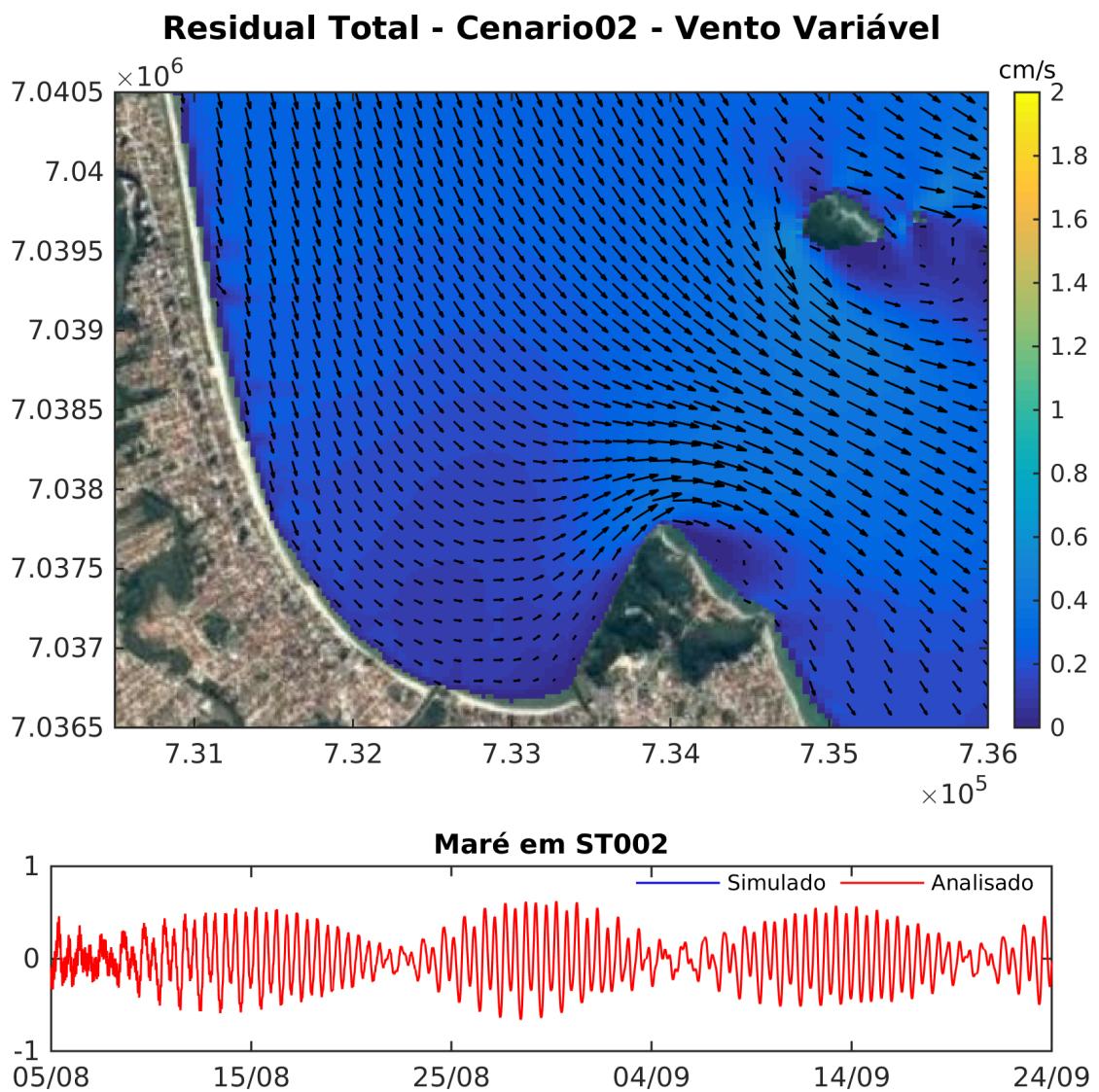


Figura 48 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 02.

As figuras geradas a cada 50h, 100h e 200h mostraram cenários muito distintos ao longo do tempo. Formação de vórtices na região da enseada, intensificação da corrente ao longo do costão, uma região de zona de sombra na parte leste da Ponta da Penha, etc. O que verificou-se é que o vento é um fator atuante e representativo para as correntes na região.

A figura 49 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 03, simulado com maré e vento constante de NE com  $4m.s^{-1}$ . É possível perceber que um grande vórtice de sentido horário passa a aparecer na zona de sombra da praia. As correntes ao longo do costão invertem a direção e passam a ser de Norte para Sul. Correntes nas proximidades da praia são mais intensas e chegam a  $0,4cm.s^{-1}$ . Próximo à região onde se encontra a Zona de Erosão Acentuada existe uma diminuição na intensidade da corrente, quando as correntes de norte, vindas da parte mais exposta da praia se encontram com as correntes associadas ao vórtice.

Correntes intensas de até  $0,7cm.s^{-1}$  são observadas no setor sul da Ilha Feia. Um vórtice no sentido anti-horário pode ser observado na parte sudeste da ilha, com velocidades na ordem de  $0,1cm.s^{-1}$ .

É interessante notar que, neste cenário, a parte leste da Ponta da Penha, normalmente associada com altas velocidades nos cenários anteriores, se apresenta numa zona de sombra, com velocidade também na ordem de  $0,1cm.s^{-1}$ .

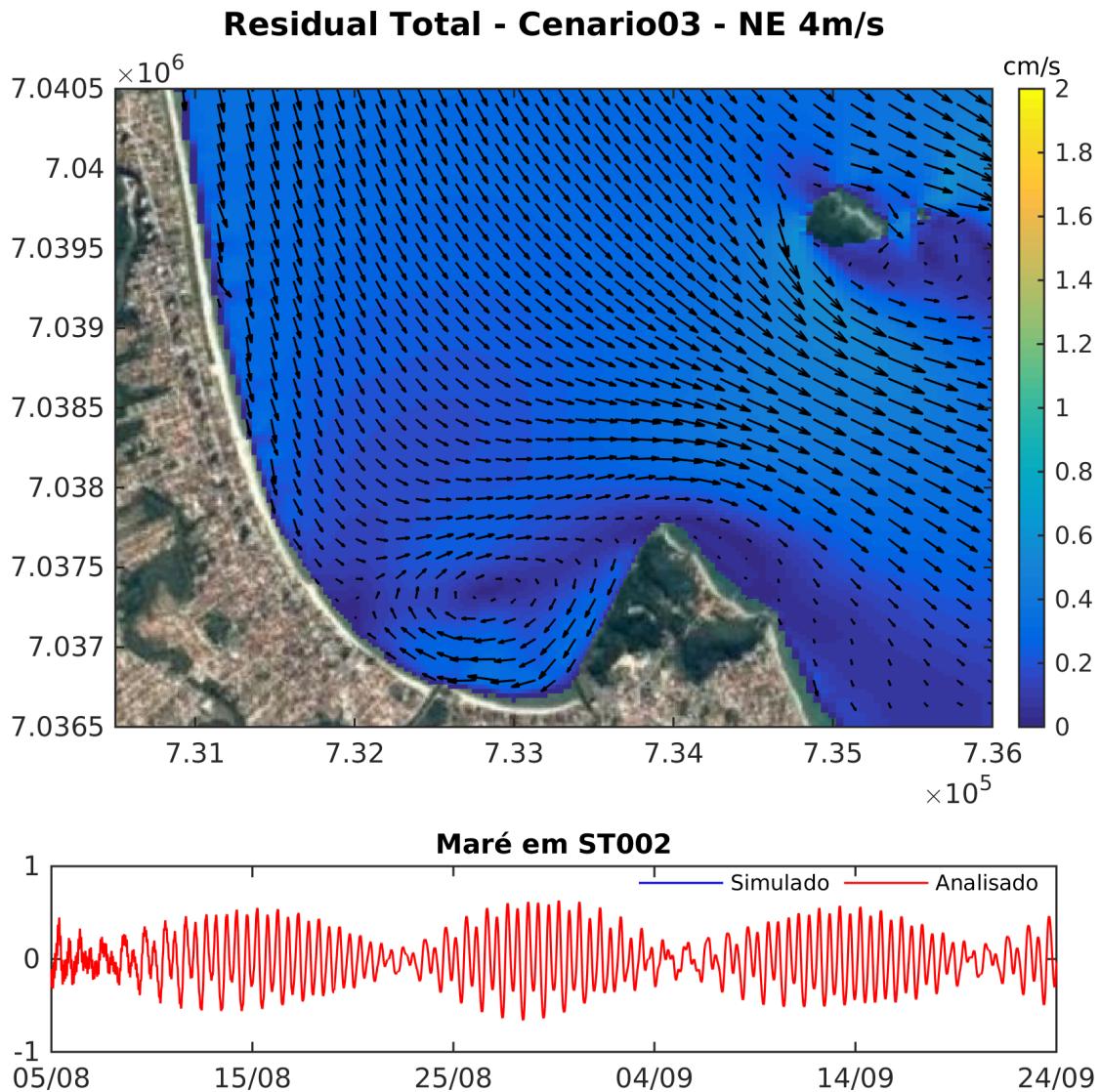


Figura 49 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 03.

A figura 50 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 04, com maré e vento constante de NE com  $10m.s^{-1}$ . O padrão de correntes é muito semelhante àquele encontrado no cenário anterior, porém, com velocidades consideravelmente superiores, chegando a  $2cm.s^{-1}$  na área NE da Ilha Feia. O vórtice da área de sombra da praia chega a alcançar  $1,6cm.s^{-1}$ . Esses valores representam mais de 10% da velocidade encontrada na região. Ou seja, o residual de corrente para ventos intensos pode ser bastante decisivo para variações na hidrodinâmica e, por consequência, na morfodinâmica da região.

A zona de sombra a SE da Ilha Feia e na Ponta da Penha passam a ser ainda mais contrastantes com as intensas correntes presentes no estreitamento da plataforma.

O padrão apresentado na figura 50 se apresentou praticamente constante nas demais análises feitas, o que mais uma vez corrobora a teoria de que o vento é muito mais relevante para a geração de correntes na região de estudo do que a maré.

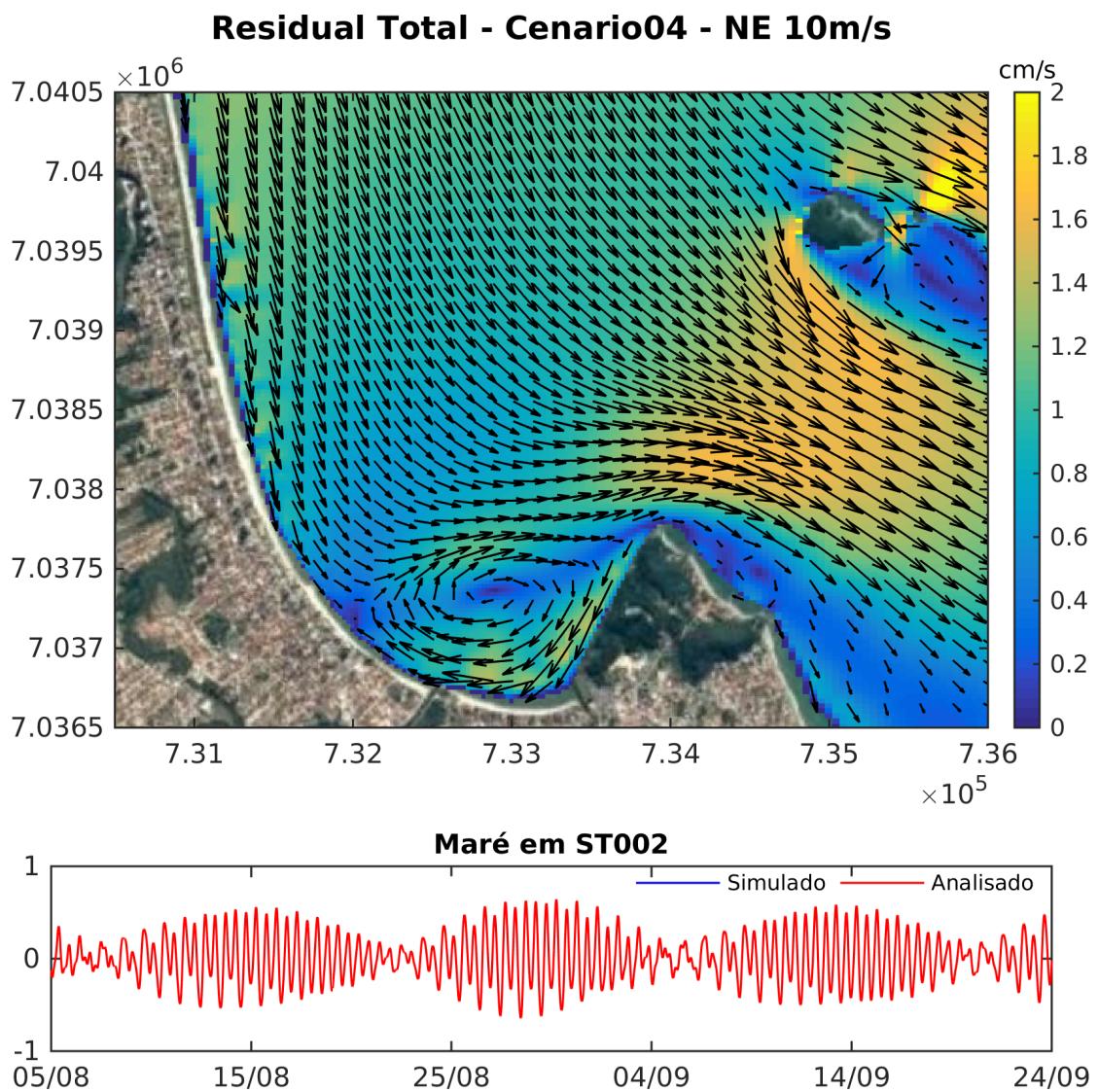


Figura 50 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 04.

A figura 51 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 05, com maré e vento constante de S com  $4m.s^{-1}$ . Neste cenário, correntes de sul com velocidades de até  $0,8cm.s^{-1}$  aparecem na parte leste da Ponta da Penha. Esse fluxo segue em direção ao norte, mas parte dele entra na zona de sombra gerada pelo costão e dá origem a um vórtice de sentido anti-horário, com velocidades abaixo de  $0,2cm.s^{-1}$ . O vórtice tem início, na praia, na altura da desembocadura do rio Piçarras, seguindo em correntes amenas para sul. A corrente na parte exposta da enseada onde, nos cenários anteriores, sempre esteve de norte para sul, passa a ser de sul para norte a parte da desembocadura do rio, com velocidades de até  $0,8cm.s^{-1}$ .

A ilha Feia continua causando uma zona de sombra, desta vez localizada a NO desta. O fluxo que passa pela ilha apresenta-se uniforme e sem geração de vórtices naquela área.

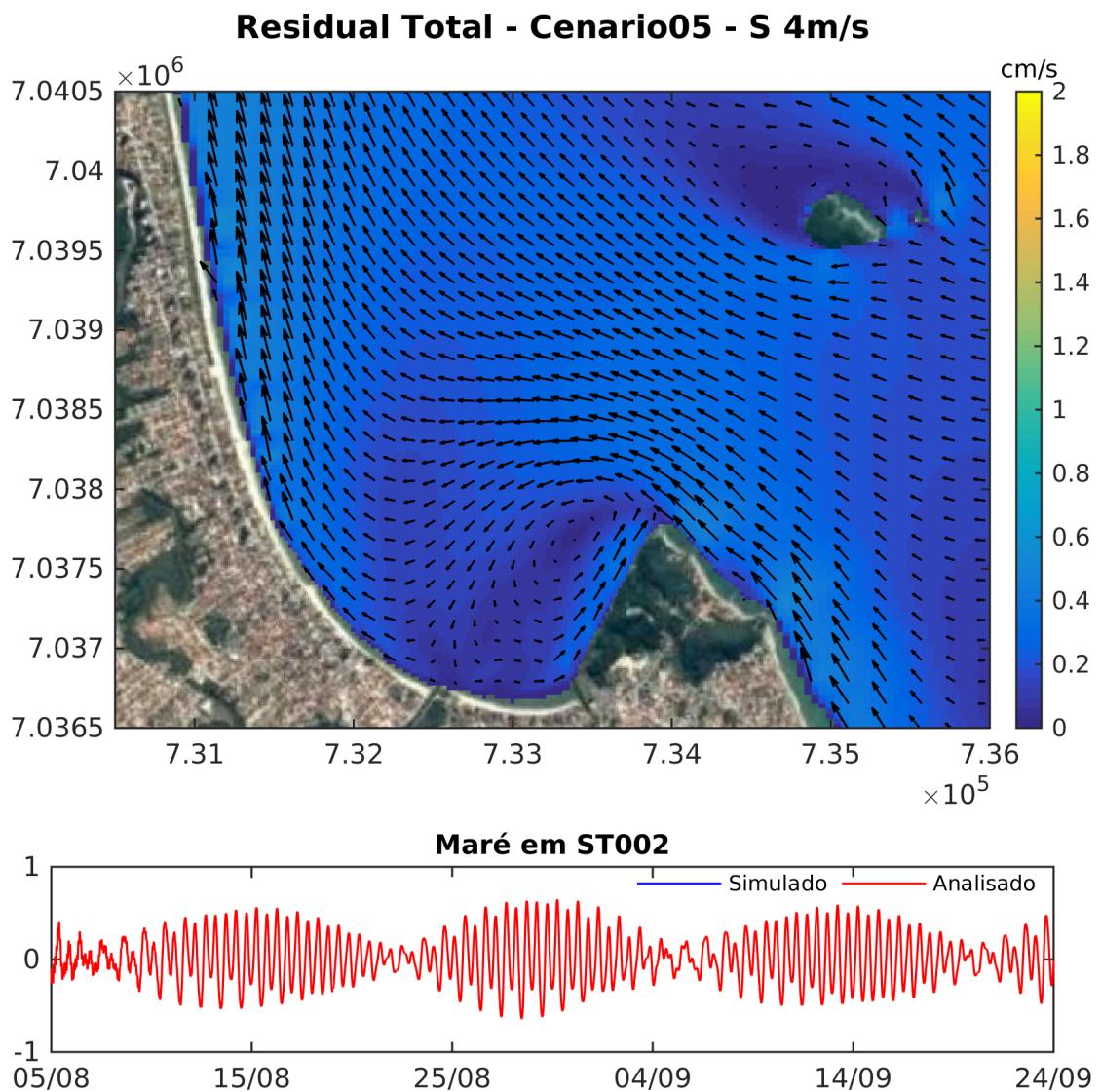


Figura 51 – Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 05.

Este padrão de velocidade e direção de correntes se manteve muito semelhante em todas as análises de residual por horas, com pequenas alterações causadas pelo momento do ciclo de maré que se está sendo analisado. Marés de quadratura acabam permitindo a intensificação da corrente mais do que os momentos de maré de sizígia mas, em geral o padrão é o mesmo (Figura 52).

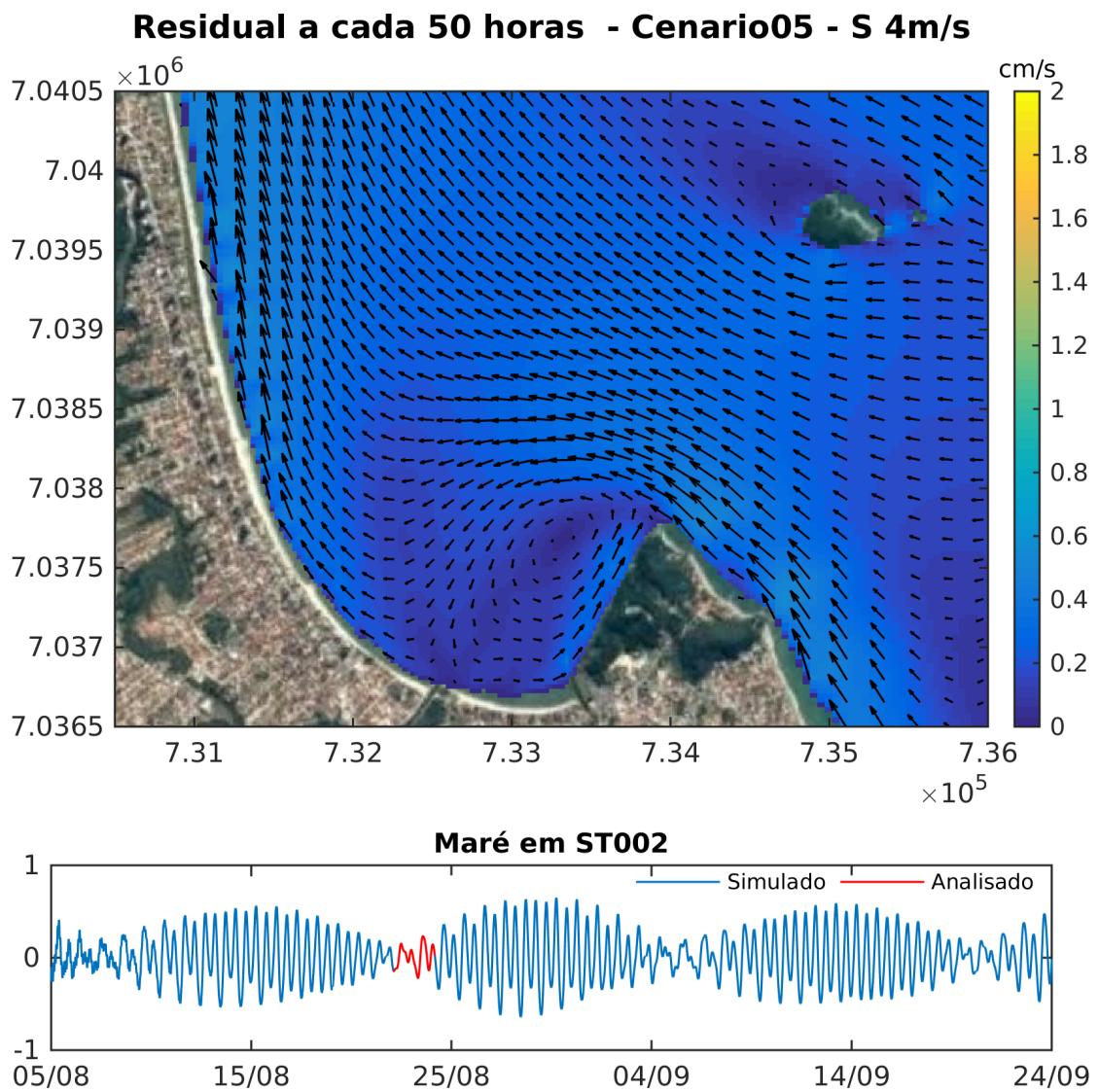


Figura 52 – Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 05

A figura 53 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 06, com maré e vento constante de S com  $10m.s^{-1}$ . Verifica-se um padrão semelhante em termos de direção, com o vórtice sendo gerado na região de sombra da enseada. Entretanto, os valores de velocidade de corrente podem alcançar  $2cm.s^{-1}$  na região leste da Ponta da Penha e na parte exposta da enseada, com intensificação gradual da corrente a partir da desembocadura do rio Piçarras.

O próprio vórtice gerado neste cenário teve correntes mais intensas, com correntes que chegam a  $2cm.s^{-1}$  na parte superior da Ponta da Penha. Nas proximidades da Ilha Feia houve um aumento de velocidade, porém não tão nítido quanto aquele sentido nas áreas mais próximas da costa.

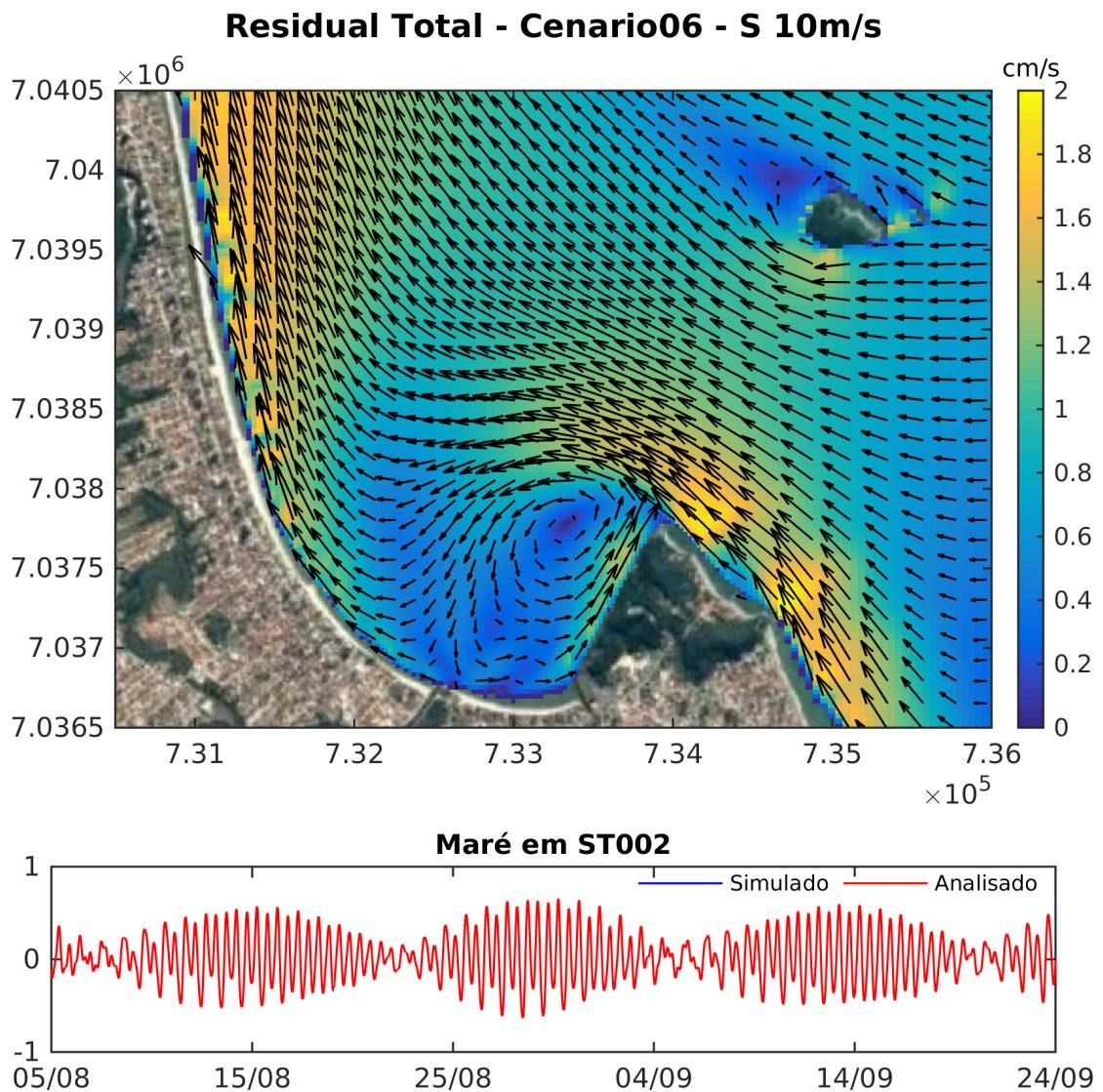


Figura 53 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 06.

A figura 54 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 07, com maré e vento constante de E com  $4m.s^{-1}$ . O mesmo padrão de um “corredor de correntes” na parte leste da Ponta da Penha, visto no cenário anterior, é visto no presente cenário. Entretanto, não há a geração de um vórtice e as correntes passam pela Ponta da Penha, seguem sul pelo costão, e então continuam pela praia seguindo para norte. As velocidades em geral não ultrapassam  $0,7cm.s^{-1}$  com uma zona de baixas velocidades localizadas no centro da Enseada, com velocidades na ordem de  $0,1cm.s^{-1}$ .

Neste cenário, ficou mais nítido que apesar de ter pouca influência na geração de correntes, a maré consegue ter uma influência modesta na velocidade da corrente residual, como pode ser visto na figura 55 e 56.

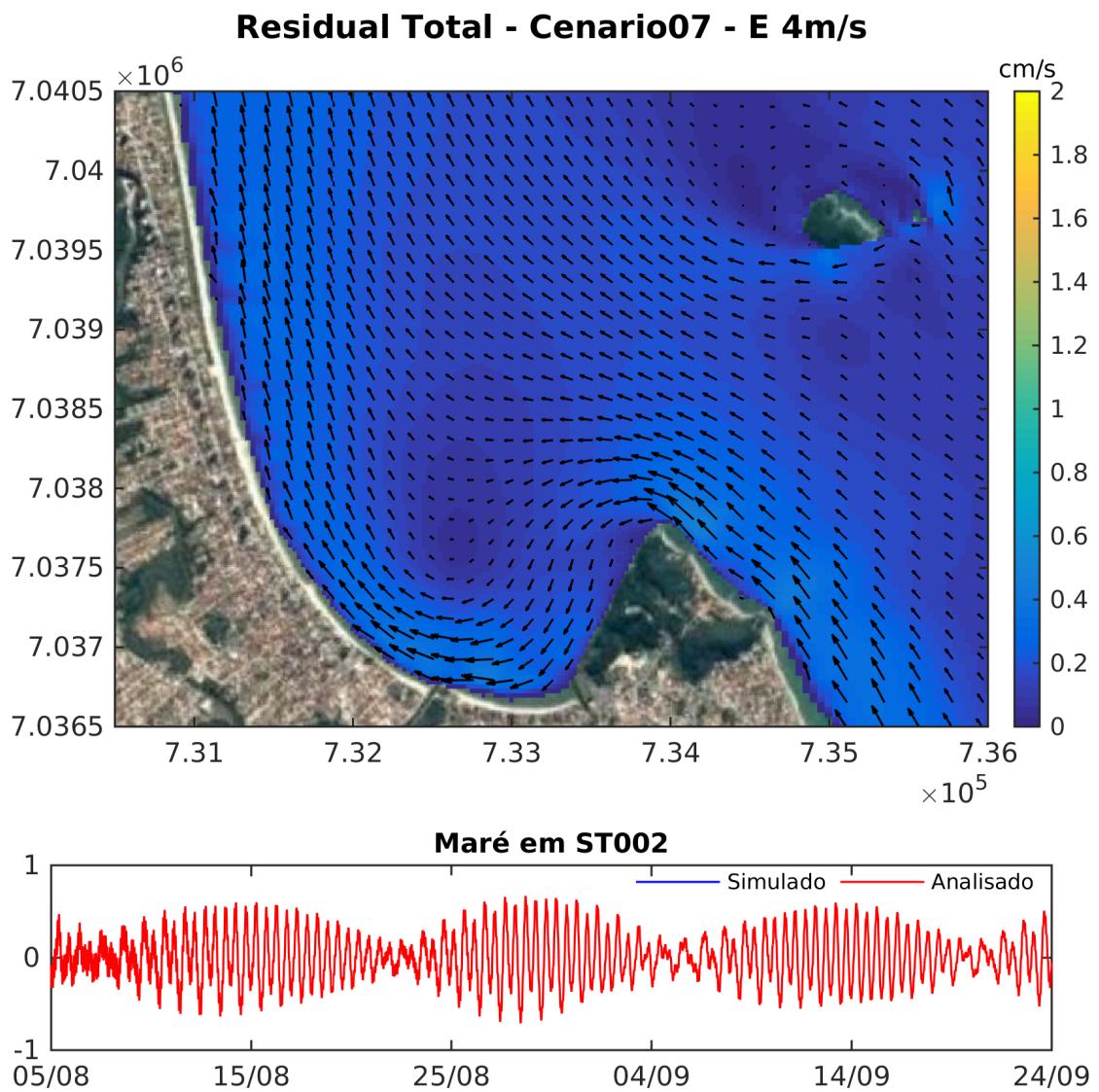


Figura 54 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 07.

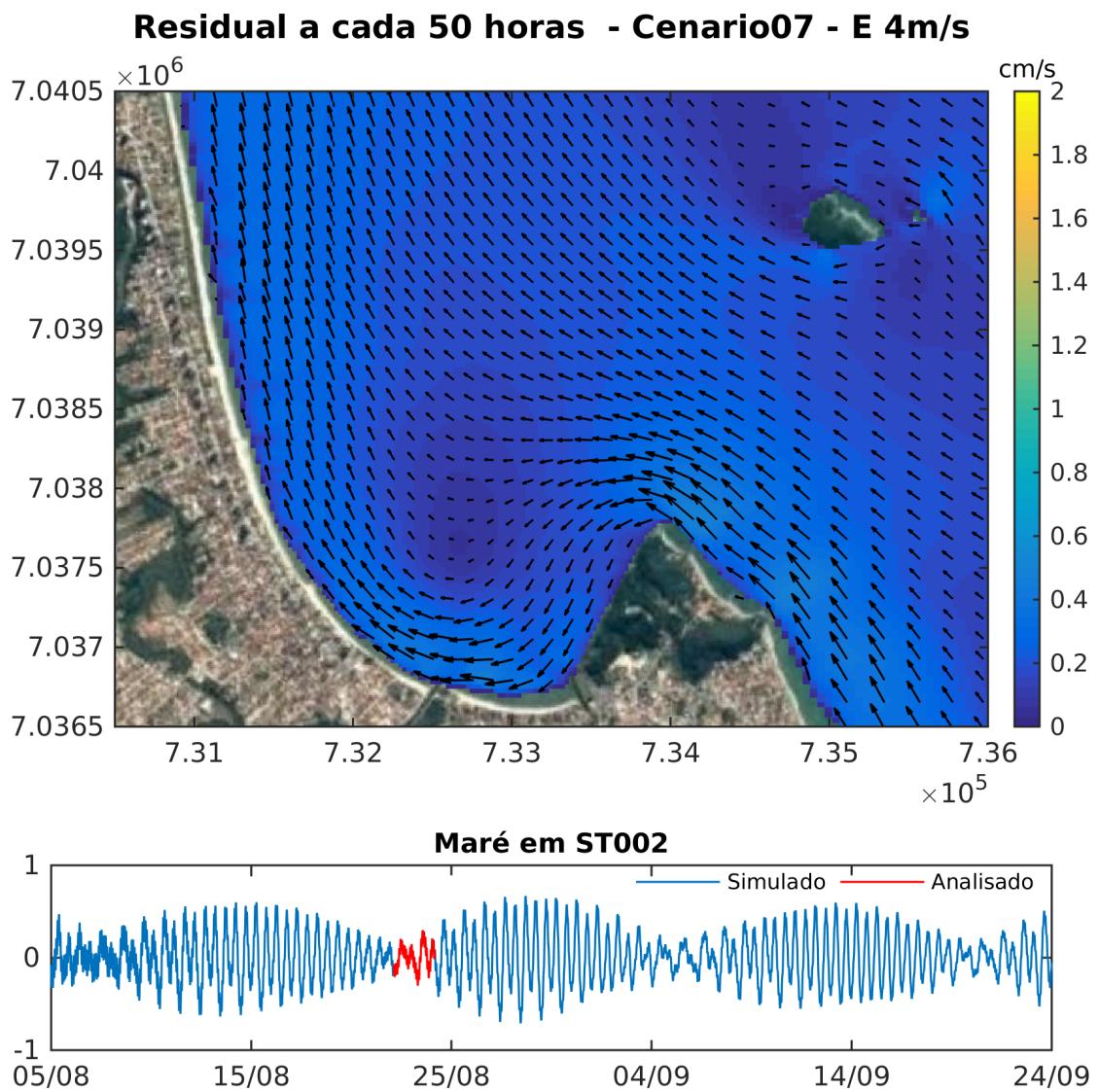


Figura 55 – Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 07

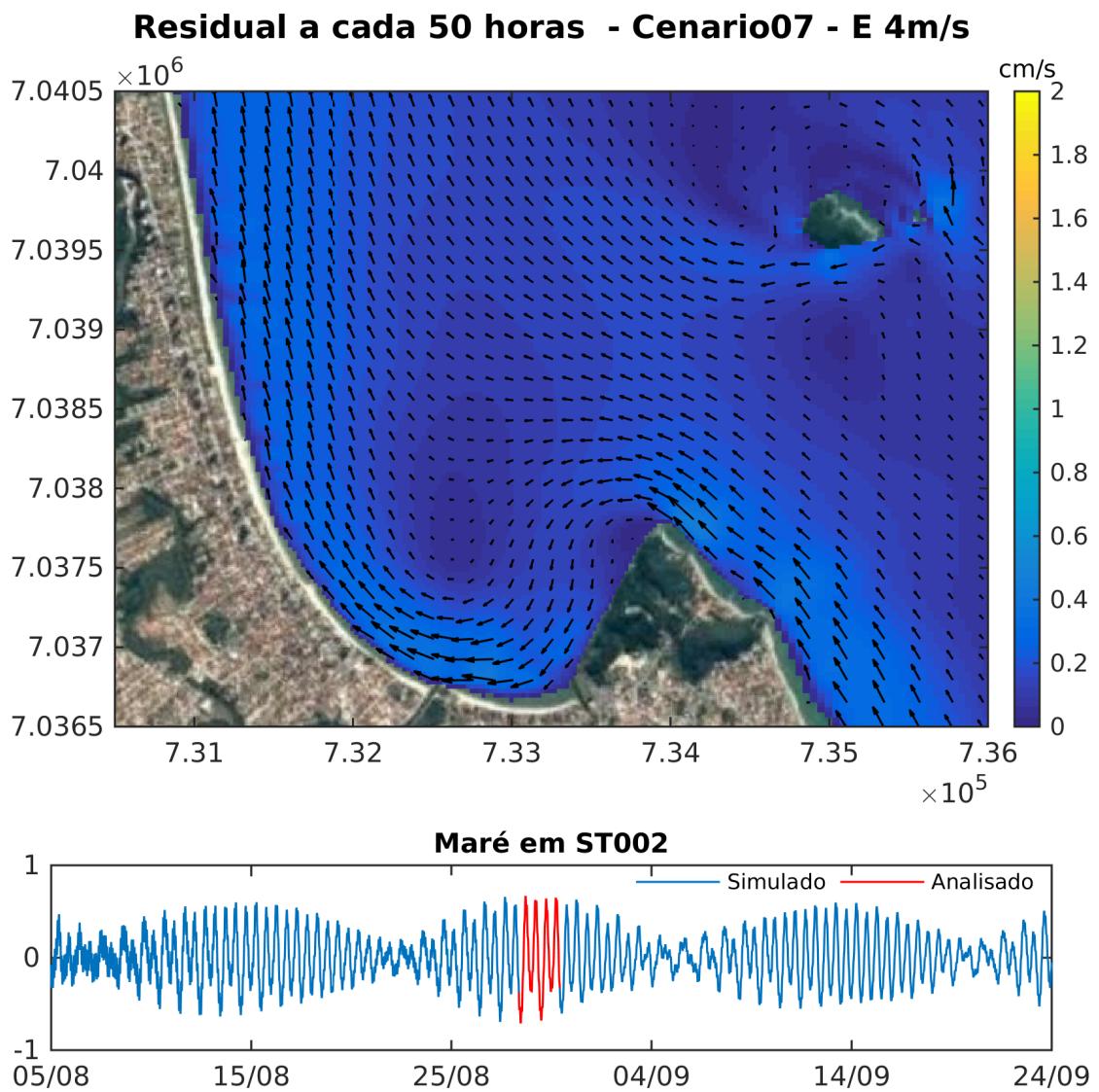


Figura 56 – Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de sizígia no Cenário 07

A figura 57 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 08, com maré e vento constante de E com  $10m.s^{-1}$ . Apesar do mesmo padrão sem vórtice e com direção preferencial de sul para norte aparece neste cenário, as correntes são consideravelmente mais intensas, alcançando velocidades acima de  $1,2cm.s^{-1}$  em praticamente toda a praia. Velocidades próximas a  $2cm.s^{-1}$  aparecem logo ao norte da Ponta da Penha, diminuindo de intensidade conforme seguem para norte.

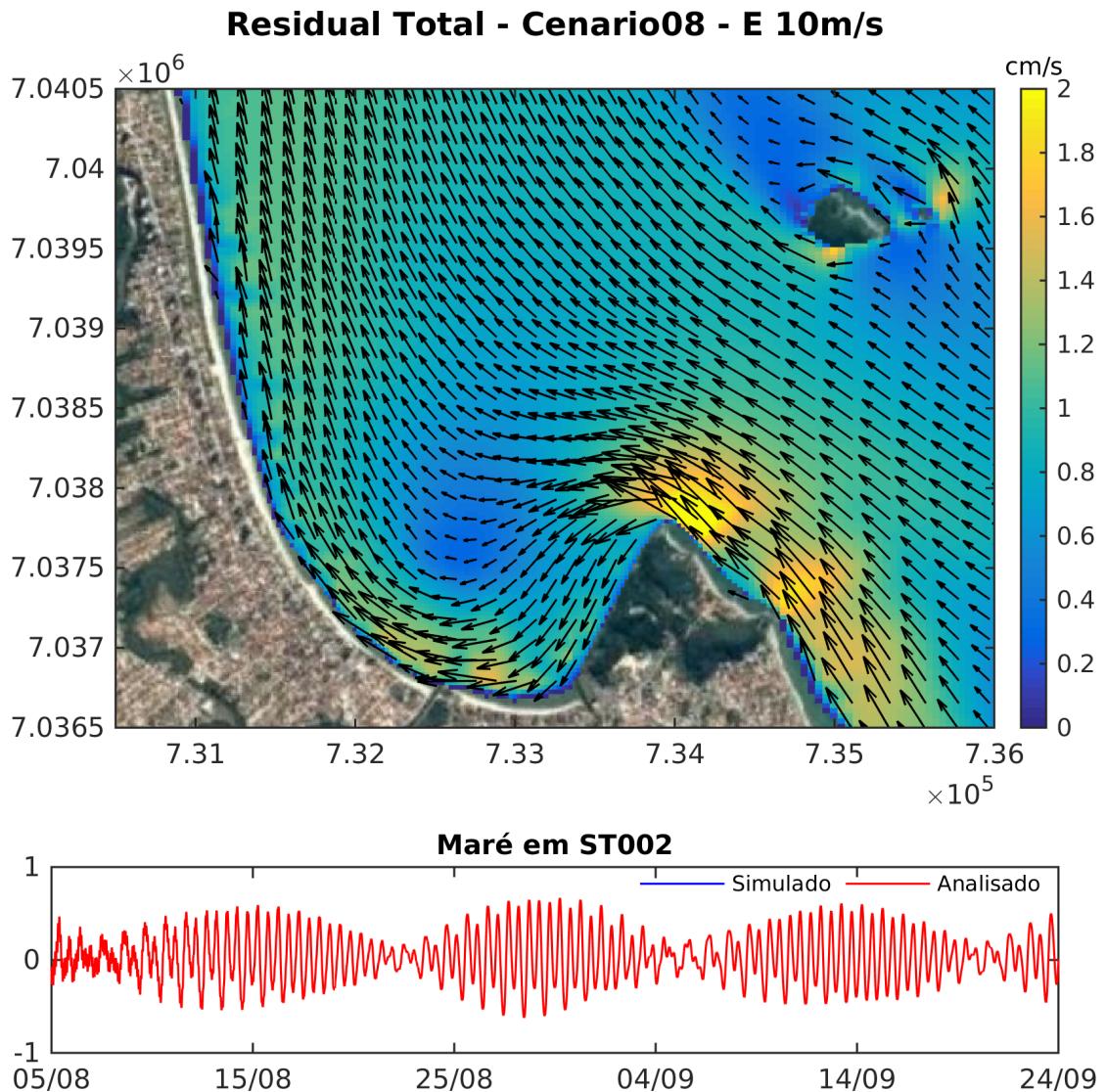


Figura 57 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 08.

A figura 58 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 09, com maré e vento constante de SE com  $4m.s^{-1}$ . O perfil de correntes deste cenário é semelhante àquele encontrado no Cenário 05 de vento S (Figura 51). Entretanto, o atual cenário apresenta, no geral, velocidades superiores em todo o domínio quando comparado com o cenário de vento S, com velocidades perto de  $0,8cm.s^{-1}$  ocorrendo ao longo de toda praia.

O vórtice de sentido anti-horário também pode ser visto, também com velocidades mais intensas que aquele encontrado no Cenário 05.

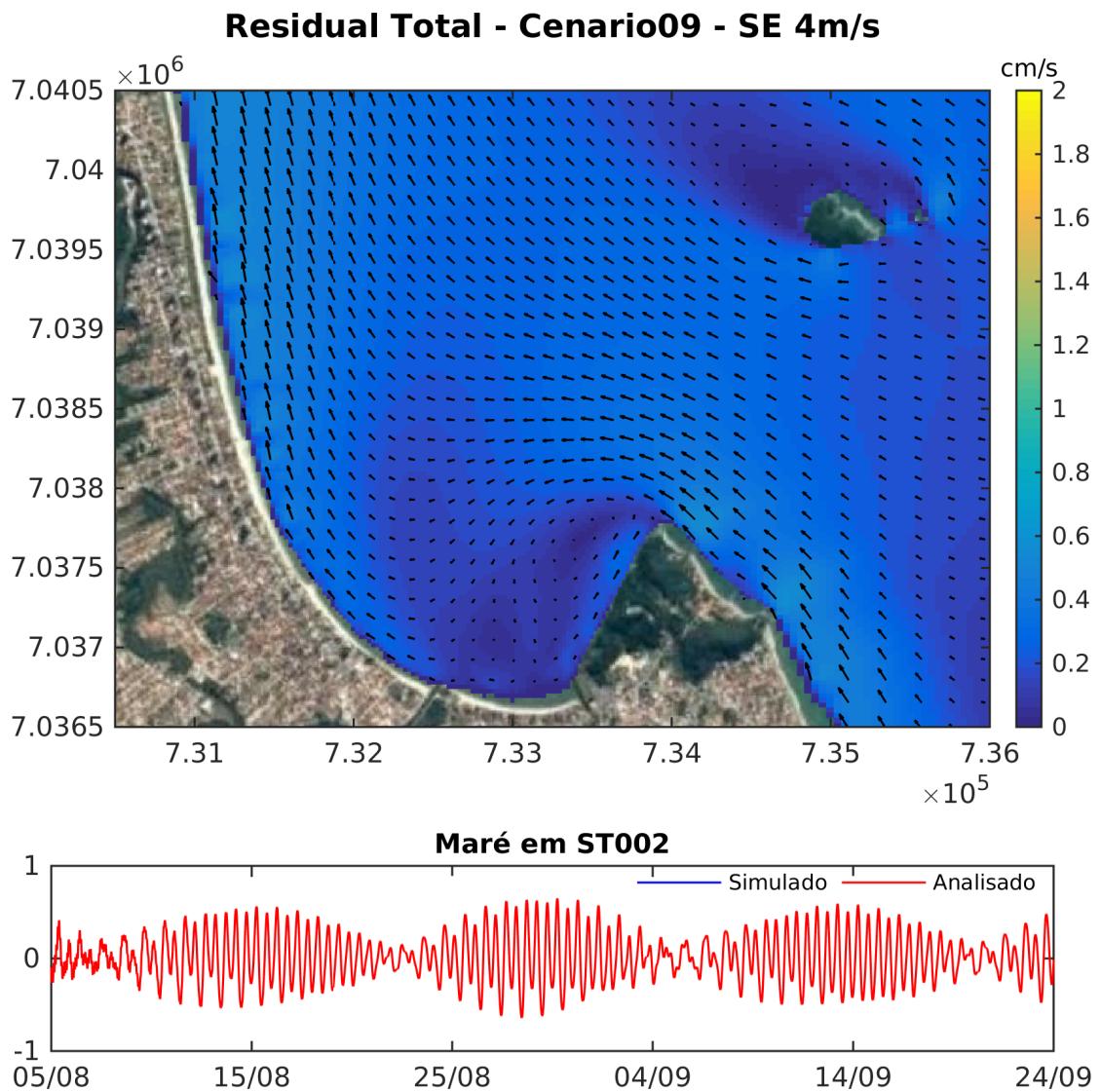


Figura 58 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 09.

A figura 59 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 10, com maré e vento constante de SE com  $10m.s^{-1}$ . Além da intensificação das correntes por conta do aumento da velocidade do vento, este cenário apresenta a formação de dois vórtices de sentido contrário dentro da Enseada. Mais ao norte, próximo do final da Ponta da Penha, está o vórtice de sentido anti-horário também presente nos cenários 05, 06 e 09. Entretanto, vê-se a formação de um segundo vórtice, mais ao sul e de sentido horário.

Semelhante ao cenário 06, as correntes próximas a costa, na parte exposta da praia, podem ultrapassar  $1,2cm.s^{-1}$  e têm direção de sul para norte.

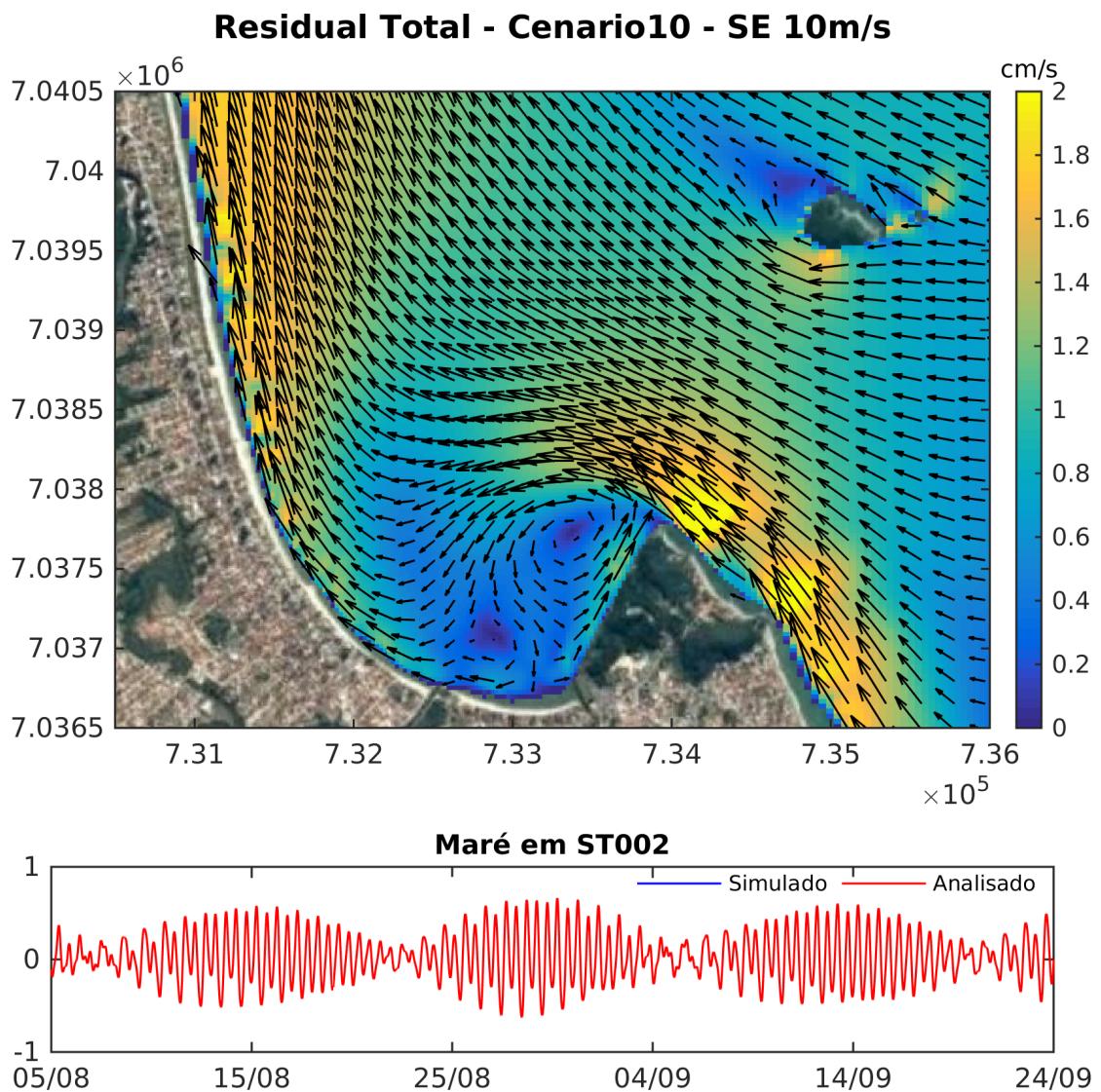


Figura 59 – Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 10.

## 5 DISCUSSÃO

O vento na região apresenta um comportamento homogêneo em termos de velocidade em todas as estações, com velocidades máximas de aproximadamente de  $10m.s^{-1}$  e uma média de velocidade de  $4m.s^{-1}$ . Esses resultados concordam com os resultados encontrados por Gomes (2010), que também obteve um padrão muito semelhante de velocidades do vento ao longo das estações do ano.

A predominância de ventos de N mais intensos no verão é causada pela posição mais ao sul do Anticiclone do Atlântico Sul (AAS) (CARVALHO et al., 1998). Nos resultados apresentados, verificou-se, de fato, essa presença dos ventos do quadrante N no período de verão. Este resultado não concorda com aqueles encontrados por Gomes (2010), que verificou uma maior predominância de ventos de L tanto no verão quanto na primavera.

A predominância de ventos S no inverno foi encontrada em ambos os trabalhos. Essa modificação na direção preferencial acontece quando o Anticiclone Móvel Polar desloca o AAS para norte, e os ventos de norte se tornam menos intensos, aumentando a relevância dos ventos de sul (CARVALHO et al., 1998).

Verificou-se que, considerando todos os dados analisados, 58,3% dos casos de vento eram provenientes do quadrante N. Esse resultado ressalta a relevância de ventos da direção N-NE, associados à atuação do AAS, conforme descrito por Truccolo (1998) e Carvalho et al. (1998). As velocidades amenas características do AAS, entre 2 e  $4m.s^{-1}$  se apresentam em 26,8% dos dados.

Apesar dos dados de vento descritos em Leite (2009) terem sido coletados no Inverno (11 de Julho a 23 de Agosto), a rosa dos ventos encontrada pelo autor se assemelha muito mais à rosa dos ventos deste trabalho para a estação do Outono, com ventos predominantemente de O-NO. Todos esses resultados indicam que existe uma forte sazonalidade de direção de ventos na região, com alta variabilidade entre estações e entre anos.

Verificou-se que a maré meteorológica analisada nos ADCPs não foi tão representativa quanto descrito por Parise et al. (2009). Os autores verificaram que as marés meteorológicas alcançam em média 1m, podendo chegar a 1,9m em casos na Praia do Cassino, extremo sul do Brasil. Os dados de nível de Penha indicaram que marés meteorológicas de pelo menos 1,3m podem ocorrer na região. Em média a maré meteorológica medida ficou em 83cm.

Os resultados de frequência de nível mostraram uma forte influência da componente semi-diurna da maré, com presença de componentes diurnas, terci-diurnas e quadri-diurnas em níveis semelhantes de energia. Esse resultado concorda com o número de forma encontrado para cada ponto medido, que ficou abaixo de 0,30 em toda Enseada e 0,31 em Penha, indicando uma maré mista com predominância semidiurna. Esses valores foram menores que o número de forma encontrado por Leite (2009), de 0,38, ou seja, houve uma menor influência das constantes diurnas dentro do período analisado no presente trabalho. É importante ressaltar que no espectro de energia por períodos de Penha, os picos de frequência das constantes harmônicas M2, S2, K1 e O1 apareciam de forma muito nítida, ao contrário dos dados de Piçarras, onde picos indistintos eram visto nos períodos de 12 e 25h. Esse resultado mostra que dados mensais podem ser insuficientes para uma análise detalhada do espectro de maré da região e, portanto, é imprescindível medições de longo período para uma melhor descrição da região.

Também verificou-se que 27,5% da energia do sinal se encontrava em frequências superiores a 50h na Penha e mais de 30% nos dados de Piçarras. Esse resultado vai ao encontro dos dados de Truccolo et al. (2006), que verificaram que cerca de 24% da variação de nível em São Francisco do Sul poderia ser explicada por frequências submareais. Ou seja, circulações residuais e correntes de plataforma têm um papel fundamental na dinâmica de região e, portanto, seu papel não pode ser subestimado ao se analisar a dinâmica local.

Todos os valores de temperatura foram bem menores que aqueles descritos em Schettini et

al. (1999), onde os valores permaneceram entre 25 e 27°C. Essa diferença entre os dados descritos pelos autores e os encontrados nos dados deste trabalho se dá pelo período em que tais dados foram medidos. Enquanto os dados de Schettini et al. (1999) foram medidos em março (fim do verão), os dados aqui apresentados foram coletados entre agosto e setembro (fim do inverno) e, portanto, essa diferença é natural para a região, que se encontra em uma região temperada e está sujeita a massas de água com valores menores de temperatura. A homogeneidade de temperaturas ao longo da coluna de água no inverno e temperaturas mais baixas (abaixo de 20°C) já foi descrita por Carvalho et al. (1998) para a plataforma catarinense. Resultados no domínio da frequência indicam que áreas internas estão sujeitas a variações diárias de temperatura, enquanto áreas externas apresentam pouca energia neste período.

Os resultados de corrente indicaram correntes amenas, abaixo de  $20\text{cm}.\text{s}^{-1}$  dentro da enseada e abaixo de  $40\text{cm}.\text{s}^{-1}$  em regiões abertas e expostas à ondulação direta. Esses resultados corroboram as observações descritas em Schettini et al. (1999) e Almeida (2013). Entretanto, os primeiros autores afirmaram que as correntes obedecem mais diretamente ao regime dos ventos do que às oscilações da maré enquanto o segundo autor verificou que as condições amenas de corrente acontecem em todos os estados de mar. Da mesma forma como foi feito com a temperatura, foram desenvolvidos alguns gráficos tentando correlacionar a velocidade da corrente com a direção ou o vento. Novamente nenhum padrão emergiu nas análises realizadas e não foi possível relacionar a velocidade da corrente com o vento.

Através das análises de correntes residuais, verificou-se que o vento tem uma maior influência na dinâmica local do que a maré. Os residuais gerados apenas pela maré não alcançam  $0,2\text{cm}.\text{s}^{-1}$ , enquanto residuais de vento chegaram a alcançar  $2\text{cm}.\text{s}^{-1}$  em alguns cenários. Esse resultado corrobora o que foi encontrado por Schettini et al. (1999) e Leite et al. (2011).

As correntes residuais são normalmente muito menores que as correntes típicas da região, usualmente inferiores a  $1\text{cm}.\text{s}^{-1}$ . Ventos de intensidade de  $10\text{m}.\text{s}^{-1}$ , independente da direção, podem gerar correntes residuais da ordem de  $2\text{cm}.\text{s}^{-1}$ , o que representa cerca de 20% da velocidade de corrente da região. Dessa forma, ventos intensos e de direção constante podem ter uma influência significativa na hidro e morfodinâmica da região e não devem ser ignorados seus efeitos de longo prazo.

Ventos de S e SE geraram um vórtice de sentido anti-horário na zona de sombra da Enseada, enquanto ventos de NE geraram um vórtice em sentido horário, semelhante ao que foi descrito por Leite et al. (2011). Ventos de E não geraram nenhum vórtice em ambas as velocidades de vento enquanto o cenário com vento SE de  $10\text{m}.\text{s}^{-1}$  foi o único que gerou a presença de dois vórtices em sentidos contrários, ambos dentro da zona de sombra da enseada.

É interessante notar que, apesar de a corrente ser descrita normalmente com sentido norte-sul na praia, ventos de E, S e SE geraram residuais de corrente para sul na maior parte da região costeira da Enseada. Apenas ventos de NE geraram correntes de norte pra sul. No residual total encontrado no cenário com vento variável (Cenário 02), verificou-se um leve residual para sul, o que indica a predominância, na época de ventos do quadrante E e S. Esse resultado é coerente uma vez que se modelou o mesmo período dos dados medidos, coletados no período de inverno, onde ventos de S são mais recorrentes.

O estreitamento da plataforma entre a Ponta da Penha e a Ilha Feia está associado a aumento de velocidades de corrente, especialmente correntes de norte. Quando o residual tem correntes de Sul, as maiores velocidades ficam associadas à parte leste da Ponta da Penha, mais próximo da costa e não tanto no encurtamento da plataforma.

Apesar de todos os resultados de correntes residuais integradas em dois meses, 50, 100 ou 200 horas terem apresentado resultados semelhantes na grande maioria dos cenários, verificou-se que os mapas a cada 50 horas são mais adequados para avaliar o comportamento dos residuais em momentos específicos de maré.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivo caracterizar a circulação local e residual da Enseada do Itapocorói. Considera-se que o trabalho alcançou os objetivos propostos e encontrou os seguintes resultados:

- Ventos na região da Enseada são do quadrante N em 58,3% do tempo. Ventos do quadrante sul estão presentes em 14,8% do tempo.
- O padrão de direção de vento muda ao longo das estações, sendo mais O-N no verão e S no inverno. Essa forte sazonalidade na direção de ventos na região está associada às mudanças de posição do Anticiclone do Atlântico Sul e do Anticiclone Móvel Polar.
- A velocidade do vento nas diferentes estações é semelhantes, com média aproximada de  $4m.s^{-1}$  e valores máximos de  $10m.s^{-1}$ . Velocidades abaixo de  $6m.s^{-1}$  estão presentes em 70% do tempo.
- Verificou-se que as marés meteorológicas na região podem chegar a 1,3m, mas que um mês de coletas de dados pode não ser suficientes para medir elevações dessa magnitude.
- Devido ao regime de micro-marés da região, a componente meteorológica teve uma influência muito grande no perfil de nível dos dados medidos. Os eventos típicos de maré meteorológica medidos na região alcançam, em média, 73cm.
- O número de forma para os dados medidos indicou que a região está submetida a um regime de marés misto com predominância semidiurna.
- Verificou-se uma discrepância entre as constantes harmônicas apresentadas na FEMAR de Penha e as constantes harmônicas de dados medidos, com diversas constantes apresentando um SNR muito pequeno e, portanto ficando fora das análises
- A comparação entre as constantes harmônicas M2 e S2 entre os dados da FEMAR e os deste presente trabalho tiveram 2 e 4cm de diferenças na amplitude, respectivamente, indicando que os dados da FEMAR talvez não representem de forma adequada a dinâmica mareal da região.
- Da energia de nível medida ao menos 27,5% esteve associada com frequências submareais (acima de 50h), podendo chegar a 31%.
- A energia da maré semidiurna é a mais relevante dentre aquelas identificadas pela FFT, porém componentes diurnas, terciadiurnas e quadriadiurnas têm relevância menor e com igual equivalência.
- Em um gráfico de energia por período, verificou-se que no dado de um ano de medições em Penha foi possível distinguir com clareza os picos das constantes harmônicas M2, S2, K1 e O1. Nos dados de um mês de coleta, apenas picos de energia nos períodos de 12 e 25h eram distinguíveis.
- As temperaturas medidas ficaram todas abaixo de 20°C, condizentes com o período de inverno, quando as medições foram feitas.
- Existe uma maior variação de temperatura no ponto mais raso de medição, que chegou a 3,59°C. Não foi encontrada nenhuma relação da variação de temperatura com a direção e velocidade do vento, nem nenhuma frequência de oscilação distingível.

- A temperatura do ponto mais profundo medido (17m), apresentou variação de temperatura de 1°C em todo o período medido, indicando uma homogeneidade da região onde se encontrava o equipamento.
- Ainda no sinal de temperatura, áreas internas apresentavam um pico de energia no período de 1 dia, enquanto a área externa não apresentou o mesmo pico de energia. Isso indica que diferentes processos ocorrem em cada uma das áreas e que as áreas internas estão sujeitas à variações diárias de temperatura causadas por aquecimento solar ou dinâmica do rio Piçarras.
- Dentro da Enseada, as velocidades ficam 90% abaixo de  $8\text{cm}.\text{s}^{-1}$ , mas podem chegar a valores na ordem de  $20\text{cm}.\text{s}^{-1}$ .
- Os pontos internos de medição da Enseada revelaram que a direção preferencial é distinta nos pontos analisados. O ponto mais interno tem direção preferencial NE e o ponto mais exposto tem direção preferencial E.
- No ponto mais externo avaliado, as velocidades ficam 90% do tempo abaixo de  $21\text{cm}.\text{s}^{-1}$ , podendo alcançar  $30\text{cm}.\text{s}^{-1}$ . Os correntes neste ponto são prioritariamente de sul.
- Consegiu-se gerar uma grade numérica e uma batimetria interpolada que pudesse representar de forma adequada a hidrodinâmica da região.
- A parte interna da Enseada foi devidamente representada apenas com os parâmetros vento e maré, mas a parte externa, não. Isso mostra que parâmetros baroclínicos e outros parâmetros de larga escala não podem ser descartados do processo de análise da hidrodinâmica da área externa da Enseada.
- Os cenários de análise da corrente residual foram suficientes para encontrar diversos padrões de corrente residual na área de estudo.
- O vento é o parâmetro mais relevante na geração de correntes residuais.
- Ventos de velocidades altas ( $10\text{m}.\text{s}^{-1}$ ) geram correntes residuais muito intensas, que podem chegar a  $2\text{cm}.\text{s}^{-1}$ . Essas correntes representam um percentual muito grande da velocidade típica na região, o que pode ter sérias consequências na morfologia local. Sugere-se não se desconsiderar correntes residuais no padrão de hidrodinâmica e morfodinâmica de longo prazo da enseada.
- O padrão de corrente residual da Enseada é modificado com o tempo, de acordo com o vento predominante no momento da análise.
- Ventos de S e SE geram vórtices de sentido antihorário na zona de sombra da enseada, enquanto ventos de NE geram vórtices no sentido horário. Ventos de E não geram vórtices.
- Ventos constantes geram residuais semelhantes em qualquer tipo de análise feita, enquanto o cenário com vento variável apresentou diferentes residuais dependendo do momento em que foi utilizado para a análise.
- Ventos NE geram correntes residuais de sentido norte-sul ao longo da praia, enquanto ventos de E, S e SE geram correntes residuais de sentido sul-norte.
- Vento de SE de  $10\text{m}.\text{s}^{-1}$  foi o único cenário que gerou dois vórtices de sentidos contrários na zona de sombra da Enseada.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou descrever a hidrodinâmica da Enseada do Itapocorói tanto em termos de descrição de dados medidos, quanto a avaliação de resultados de modelos numéricos.

Este trabalho deu continuidade ao estudo feito por Leite (2009), e buscou expandir as análises em termos de quantidade de dados e melhoria da calibração do modelo. Entretanto, verificou-se que apenas as componentes barotrópicas básicas não são suficientes pra representar e modelar com suficiente qualidade todos os pontos analisados neste trabalho.

Sugere-se, para trabalhos futuros, que componentes meteorológicas sejam incluídas, bem como a inserção de temperatura e salinidade, para avaliar a influência das componentes baroclínicas da região.

Verificou-se que correntes residuais podem ser muito intensas na área de estudo e, portanto, sugere-se, também, avaliar o tempo de resposta da morfodinâmica local às intensidades de corrente residual aqui apresentadas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. R. de. **Estudio de dinámica litoral y evolución de la zona sur de la Playa de Piçarras (Santa Catarina/ Brasil)**. Dissertaçāo (Mestrado) — Universidad de Cantabria, Santander, 2013. 263 p.
- ARAKAWA, A. & LAMB, V. Methods of computational physics. **Academic Press**, v. 17, p. 174–265, 1977.
- ARAUJO, R. S. et al. Variação da morfologia praial e identificação de zonas de erosão acentuada (zea) na enseada do itapocorói-sc. **Braz. J. Aqua. Sci. Technol.**, v. 14, n. 1, p. 29–38, 2010.
- BITENCOURT, D. & SILVA, G. V. **Levantamento Batimétrico na Enseada do Itapocorói utilizando Motoaquática**. [S.l.], 2011.
- BROWN, J. M. & BOLAÑOS, R. & SOUZA, A. J. a. Process contribution to the time-varying residual circulation in tidally dominated estuarine environments. **Braz. J. Aqua. Sci. Technol.**, v. 14, n. 1, p. 29–38, 2010.
- BURCHARD, H. et al. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries: Straight and irrotational channels with parabolic cross section. **Journal of Physical Oceanography**, v. 41, p. 548–570, 2011.
- CARVALHO, J. L. B. & SCHETTINI, C. A. F. & RIBAS, T. M. Estrutura termohalina do litoral centro-norte catarinense. **Notas Técnicas Facimar**, v. 2, p. 181–197, 1998.
- CHENG, R. T. Residual currents and long-term transport. In: \_\_\_\_\_. New York, U.S.A.: Springer-Verlag, 1990. cap. Introduction.
- COCHRAN, W. T. et al. What is the fast fourier transform. **Proceeding of the IEEE**, v. 55, p. 1664–1674, 1967.
- DELTARES. **Delft3D-QUICKIN User Manual**. [S.l.], 2011.
- DELTARES. **Delft3D-RGFGRID User Manual**. [S.l.], 2011.
- DELTARES. **Delft3D-FLOW User Manual**. [S.l.], 2014.
- EGBERT, G. D. & BENNET, A. F. & FOREMAN, M. G. G. Topex/poseidon tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 821–852, 1994.
- EGBERT, G. D. & EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **American Meteorologica Society**, v. 19, p. 183–204, 2002.
- EGBERT, G. D. & EROFEEVA, S. Y. **TPXO/Poseidon**. 2015. Acessado em 09 ago 2015. Disponível em: <<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>>.
- FEMAR. 2016. Acessado em mar. 2016. Disponível em: <<http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/263.html>>.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos básicos e aplicações**. [S.l.]: Edusp, 2000.
- FOX, D. G. Judging air quality model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, p. 599– 609, 1981.

FREITAS, D. et al. Quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras para a enseada do itapocorói - sc. **Braz. J. Aqua. Sci. Technol.**, v. 14, n. 1, p. 39–49, 2010.

GILAT, A. & SUBRAMANIAM, V. **Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas**: Uma introdução com aplicações usando o matlab. [S.l.]: Bookman, 2008.

GOMES, G. H. **Caracterização do regime de vento costeiro do Estado de Santa Catarina por meio de dados do satélite Quikscat seawinds**. 2010. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade do Vale do Itajaí.

HEUVEL, S. van den et al. **Case Study Piçarras Beach**: Erosion and nourishment of a headland bay beach. [S.l.], 2008.

HORSTMAN, E. & DOHMHEN-JANSSEN, M. & HULSCHER, S. Modeling tidal dynamics in a mangrove creek catchment in delft3d. **Coastal Dynamics**, p. 833–844, 2013.

HU, K. & DING, P. The effect od deep waterway constructions on hydrodynamics and salinities in yangtze estuary, china. **Journal of Coastal Research**, v. 56, p. 961–965, 2009.

HU, K. et al. A 2d/3d hydrodynamic and sediment transport model for the yangtze estuary, china. **Journal of Marine Systems**, v. 77, p. 114–136, 2009.

HUNT, J. N. & JOHNS, B. Currents induced by tides and gravity waves. **Tellus**, v. 15, n. 4, p. 343–351, 1963.

HUTHNANCE, J. M. Tidal current asymmetries over the norfolk sandbanks. **Estuarine and Coastal Marine Science**, I, p. 89–99, 1973.

IBGE. 2015. Acessado em fev. 2015. Disponível em:  
<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=421280&search=santa-catarina—balneario-picarras>.

IMASATO, N. What is tide-induced residual current. **American Meteorological Society**, p. 1307–1317, 1983.

KLEIN, A. H. F. et al. Beach management: Principles and practice. In: \_\_\_\_\_. 100 Cambridge Grove: Earthscan, 2009. cap. Ameliorative Strategies at Balneário Piçarras Beach.

KLEIN, A. H. F. & MENEZES, J. T. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. **Journal of Coastal Research**, v. 17, n. 4, p. 812–835, 2001.

KLEIN, A. H. F. et al. Erosão e progradação do litoral brasileiro. In: \_\_\_\_\_. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006. cap. Santa Catarina.

KUNDU, P. K. & COHEN, I. M. & DOWNLIND, D. R. **Fluid Mechanics**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

LEBLOND, P. H. **Tydal Hydrodynamics**. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc, 1991.

LEITE, L. **Hidrodinâmica das praias de enseada**: Estudo da enseada do itapocorói. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009. 61 p.

LEITE, L. M. et al. Hydrodynamic study of bay beaches - a case study os itapocoroi bay, brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 64, p. 1086–1090, 2011.

LEONARDI, N. et al. Efect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, p. 4169–4183, 2013.

- LESSER, G. R. et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model. **Coastal Engineering**, v. 51, p. 883–915, 2004.
- MACCREADY, P. & BANAS, N. S. **Estuary Treatise**: Residual circulation, mixing and dispersion. [S.l.: s.n.], 2010.
- MACIEL, R. **Prefeitura de Piçarras decreta novo estado de calamidade pública devido ao avanço das ondas**. 2010. Acessado em 10 ago. 2015. Disponível em: <<http://diariocatarinense.clicrbs.com.br/sc/noticia/2011/11/prefeitura-de-picarras-decreta-novo-estado-de-calamidade-publica-devido-ao-avanco-das-ondas-3548659.html>>.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos S. A., 1995.
- MASSEL, S. R. **Hydrodynamics of Coastal Zones**. [S.l.]: Elsevier Science Publisher, 1989.
- MASSELINK, G. & SHORT, A. D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. **Journal of Coastal Research**, v. 9, n. 3, p. 785–800, 1993.
- MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do estado de santa catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. **Geosul**, v. 21, n. 16, p. 69–78, 2001. Florianópolis.
- MÖLLER, O. & ABE, M. P. Estudos oceanográficos: do instrumental ao prático. In: \_\_\_\_\_. Pelotas, RS: Editora Textos, 2011. cap. Oceanografia Física.
- NIHOUL, J. C. J. & RONDAY, F. C. The influence of the "tidal stress" on the residual circulation. **Tellus XXVII**, v. 5, 1975.
- OLIVEIRA, J. G. de. **Modelagem numérica das respostas do perfil praial a eventos extremos em praias de enseada**: Estudo de caso da enseada do itapocorói, santa catarina, brasil. 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- PARISE, C. K. & CALLIARI, L. J. & KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of brazil: Atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, n. 3, p. 175–188, 2009.
- PARKER, B. B. **Tidal Hydrodynamics**. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc, 1991.
- PARKER, B. B. **Tidal Analysis and Prediction**. [S.l.], 2007.
- PAWLOWICZ, R. & BEARDSLEY, B. & LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using ttide. **Computers & Geosciences**, v. 28, p. 929–937, 2002.
- PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987.
- RAMIREZ, M. R. **Estudio de la estabilidad de las playas en la enseada de Itapocorói (SC, Brasil)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade da Cantábria, Santander, 2010. 184 p.
- RIBEIRO, P. J. da C. **Medição de correntes e ondas na ensada do Itapocorói**: Processamento dos dados e resultados. [S.l.], 2011.

- RIBEIRO, P. J. da C. **Transformação de ondas em praias de enseada: Estudo de Caso na Enseada de Itapocorói**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Florianópolis, Florianópolis, 2014. 140 p.
- RODRIGUES, M. L. G. & FRANCO, D. & SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de santa catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 135–151, 2004.
- ROELVINK, D. **A guide to modeling coastal morphology**. [S.l.]: World Scientific, 2012. 274 p.
- SAHA, S. et al. The ncep climate forecast system reanalysis. **American Meteorological Society**, p. 1015–1057, 2010.
- SAHA, S. et al. **NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products**. [S.l.]: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2011. Acessado em 16 ago 2015.
- SANTUR. **Pesquisa Mercadológica e Estudo da Demanda Turística**. [S.l.], 2012.
- SCHETTINI, C. A. F. et al. Aspectos hidrodinâmicos da enseada da armação de itapocorói. **NOTAS TÉC. FACIMAR.**, v. 3, p. 99–109, 1999.
- SCHUREMAN, P. **Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides**. [S.l.], 1958.
- SHORT, A. D. & MASSELINK, G. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. In: \_\_\_\_\_. West Sussex, England: John Wiley & Sons, LTD, 1999. cap. Santa Catarina.
- SILVA, G. V. **Cota de Inundação e Recorrência para a Enseada do Itapocorói e Praia do Morro dos Conventos, Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 98 p.
- SILVA, R. et al. Hydrodynamics of a headland-bay beach: Nearshore current circulation. **Coastal Engineering**, v. 57, p. 160–175, 2010.
- TEE, K. T. Tide-induced residual current - verification of a numerical model. **Journal of Physical Oceanography**, v. 7, p. 396–402, 1976.
- TRUCCOLO, E. C. **Maré Meteorológica e Forçantes Atmosféricas Locais em São Francisco do Sul - SC**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. 116 p.
- TRUCCOLO, E. C. **Hidrodinâmica em frequência mareal e submareal do estuário do Rio Itajaí-Açu, SC**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 204 p.
- TRUCCOLO, E. C. & FRANCO, D. & SCHETTINI, C. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of santa catarina, brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 547–552, 2006.
- VALLE-LEVINSON, A. et al. Tidal and residual circulation in a semi-arid bay: Coquimbo bay, chile. **Continental Shelf Research**, v. 20, p. 2009–2028, 2000.
- WAVEREN, R. H. van et al. **Good Modelling Practice Handbook**. [S.l.], 2010.
- WILMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, p. 1309 – 1313, 1982.

YANAGI, T. Fundamental study on the tidal residual circulation i. **Journal of the Oceanographical Society of Japan**, v. 32, p. 199–208, 1976.

## **APÊNDICE A – Modelagem Numérica de Zonas Costeiras: uma revisão**

O conhecimento da hidrodinâmica de uma região costeira pode ter diversos benefícios tanto em termos ambientais (variações sazonais, previsão das condições oceanográficas, padrões de transporte de sedimentos, etc.) quanto em ganhos sociais (prevenção de desastres naturais, proteção costeira, etc.). No entanto, para um entendimento amplo das características oceanográficas de determinada região é necessário um conhecimento extenso da mesma tanto em termos espaciais quanto temporais. Isso se torna extremamente difícil principalmente devido à complexidade dos processos envolvidos e à dificuldade de obtenção de dados medidos, que são muito custosos e esparsos.

As leis de conservação que governam os fluidos são modelos matemáticos validados há bastante tempo e que podem ser amplamente utilizados para compreendê-las (MALISKA, 1995). Quando se faz necessário resolver determinado problema nesta área pode-se optar por três métodos: os analíticos, os numéricos (experimentação teórica) e a experimentação em laboratório (Figura 60 baseada em Maliska (1995)).

Os métodos analíticos e numéricos são métodos teóricos, pois ambos têm como objetivo resolver equações diferenciais que explicam os fenômenos estudados. A diferença está apenas na complexidade da equação que cada método consegue resolver. O método de experimentação em laboratório é o mais próximo da realidade, pois de fato se trata da configuração real, porém está associado a grandes custos e uma super estrutura que, nem sempre, consegue atacar todos os problemas (e.g. escalas oceânicas).

No caso de métodos numéricos existem dois tipos de erros que podem estar presentes: aqueles referentes à má solução das equações diferenciais e aqueles referentes a não adequação das equações diferenciais para resolver o problema proposto. Ou seja, esses métodos só serão adequados e confiáveis quando se está em posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais e de um modelo matemático que, sabidamente, represente com fidelidade o fenômeno físico. Independente dos possíveis erros associados, os ganhos advindos das técnicas de soluções numéricas e analíticas são muito altos quando comparados aos custos de técnicas experimentais. Além disso é ampla a aceitação destes métodos para a solução desses tipos de equações devido à grande versatilidade e relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas (MALISKA, 1995).

No caso da mecânica dos fluidos, já existe um consenso a respeito da validade das leis que a descreve e, portanto, assume-se que os modelos matemáticos estão livres de erros ou que estes podem ser menosprezados na solução geral. Entretanto, estes modelos matemáticos validados são compostos de equações diferenciais parciais não lineares que, em geral, não possuem soluções analíticas ou fechadas, a não ser em casos extremamente simplificados. Portanto, para o caso da mecânica de fluidos complexos, as solução numéricas são as mais adequadas. Quando os modelos matemáticos passam a ser discretizados e resolvidos através de métodos numéricos eles recebem a denominação específica de dinâmica de fluidos computacionais (KUNDU et al., 2012).

Apesar de serem consideravelmente precisas é necessário ter consciência que as soluções numéricas são, inexoravelmente, inexatas. Existem ainda dois erros introduzidos ao se utilizar os métodos numéricos na solução de um problema. Um deles ocorre devido à limitação de armazenamento de informação que os computadores digitais possuem, denominados erros de arredondamento. O segundo tipo de erro é introduzido pelo próprio método numérico que, ao se utilizar aproximações para encontrar a solução numérica, acaba gerando os erros de truncamento. Juntos, os dois erros constituem o erro total da solução numérica, que é, basicamente, a diferença entre a solução verdadeira (exata, e que é desconhecida) e a solução numérica aproximada (GILAT; SUBRAMANIAM, 2008).

Inicialmente, soluções numéricas eram muito custosas computacionalmente e modelos analíticos (bastante simplificados) e experimentais eram as únicas ferramentas que os cientistas podiam contar para o entendimento dos fenômenos físicos. Com o avanço computacional ocorrido nas últimas décadas, as barreiras computacionais que tornavam custosas as soluções para a resolução dos métodos numéricos se tornaram muito pequenas quando comparadas aos

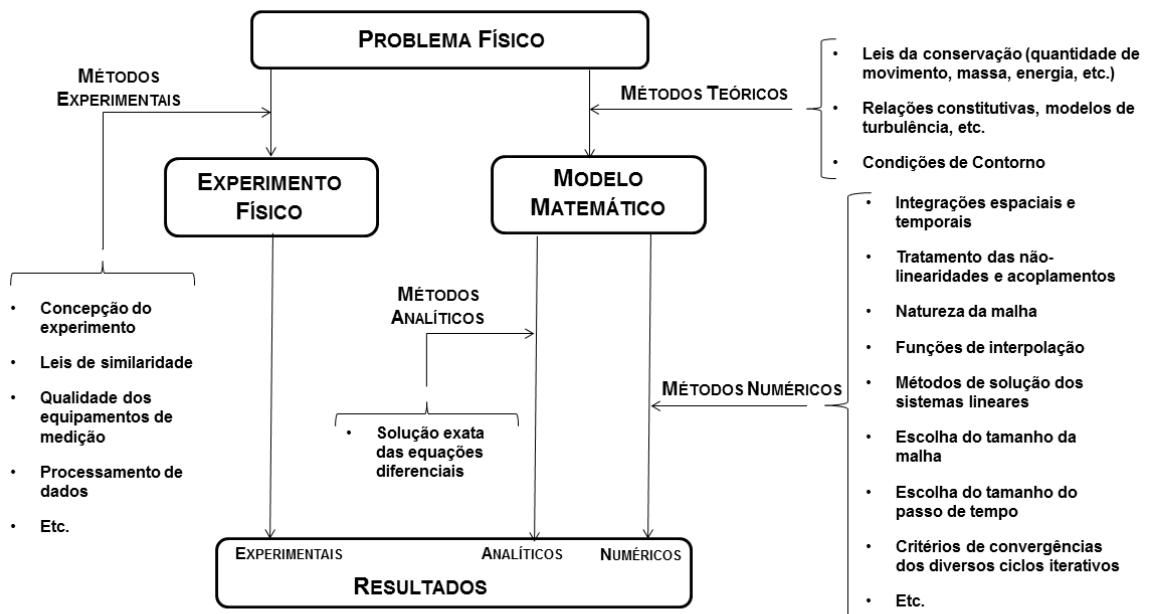


Figura 60 – Métodos de solução para um problema físico. Fonte: Maliska (1995).

ganhos potenciais. A solução de escoamento turbulento supersônico em um aerofólio com os computadores da década de 60 consumiria um tempo de computação de aproximadamente 30 anos com um custo de 10 milhões de dólares. O mesmo problema com os computadores atuais requer minutos e custo na ordem de centenas de dólares (MALISKA, 1995). Dessa forma, a modelagem numérica permite não apenas resolver as equações que descrevem os fenômenos físicos mas também constitui uma ferramenta para experimentos relativos aos processos que interagem e compõem as características observadas nos oceanos.

Modelos numéricos de áreas costeiras foram desenvolvidos desde o começo da década de 80, mas apenas na década de 90 que grandes institutos europeus conseguiram aprimorar os primeiros modelos e desenvolveram os modelos robustos e de código flexível que ainda são utilizados hoje em dia como o Delft3D (Deltares), Mike21 (*Danish Hydraulic Institute*) e Telemac (*Laboratoire Nationale d'Hydraulique*). Atualmente, diversos modelos estão disponíveis para utilização e muitos são gratuitos e de código aberto, o que facilita seu uso e dispersão. Inúmeros são os trabalhos na área da oceanografia que fazem uso dessa ferramenta que se tornou fundamental para os estudos específicos (ROELVINK, 2012).

A tarefa do método numérico, portanto, é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a(s) função(ões) incógnita(s). Quando escolhe-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceitamos ter a solução para um número discreto de pontos de forma que, quanto maior for este número de pontos, mais próxima da solução exata será a solução aproximada (MALISKA, 1995). O conjunto de pontos onde a solução será calculada é denominado grade numérica ou malha numérica.

As grades numéricas podem ser construídas de maneiras estruturadas ou desestruturadas. As grades estruturadas são geralmente aquelas cujo formato é retilíneo ou curvilíneo, mas cuja forma principal é o retângulo como apresentado na figura 61. Grades não estruturadas ou desestruturadas são aquelas tipicamente construídas através de triângulos (Figura 62), mas também podem se basear em composição de quadriláteros. Em grades estruturadas normalmente são utilizados métodos de diferenças finitas, enquanto em grades não estruturadas são utilizados métodos de elementos finitos ou volumes finitos (ROELVINK, 2012).

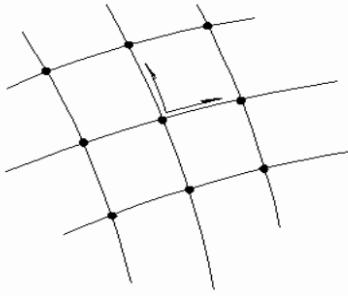


Figura 61 – Exemplo de grade numérica estruturada.

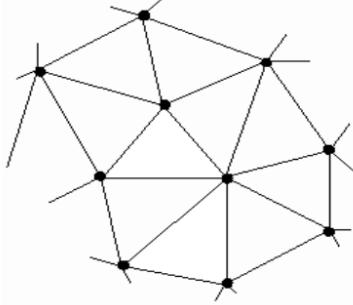


Figura 62 – Exemplo de grade numérica desestruturada.

Tradicionalmente, o método de diferenças finitas é mais popular nos modelos costeiros, principalmente pela facilidade dos seus conceitos e sua eficiência no cálculo célula-a-célula. Já os métodos de elementos finitos são bem mais complicados matematicamente e costumam ser mais lentos nos cálculos célula-a-célula mas conseguem facilmente cobrir áreas com grandes diferenças em escala de tamanhos (ROELVINK, 2012). O Delft3D utiliza o esquema de diferenças finitas baseados na expansão em séries de Taylor onde tem-se que:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \Delta\mathbf{x}\mathbf{F}'(\mathbf{x}) + \frac{\Delta\mathbf{x}^2}{2!}\mathbf{F}''(\mathbf{x}) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Delta\mathbf{x}^n}{n!} \mathbf{F}^n(\mathbf{x}) \quad (\text{A.1})$$

Então o cálculo da primeira derivada através do método das diferenças finitas é dado por:

$$\mathbf{F}'(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{F}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) - \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\Delta\mathbf{x}} + \mathcal{O}(\Delta\mathbf{x}) \quad (\text{A.2})$$

Onde  $\mathcal{O}(\Delta\mathbf{x})$  é o erro de truncamento introduzido pelo método cuja ordem de magnitude é de  $\Delta\mathbf{x}$ . Se aplicarmos esse método na equação da onda 1D dada por:

$$\frac{\delta\mathbf{u}}{\delta t} + c \frac{\delta\mathbf{u}}{\delta x} = \mathbf{0} \quad (\text{A.3})$$

Podemos obter a equação discretizada da equação da onda 1D:

$$\frac{\mathbf{u}_i^{n+1} - \mathbf{u}_i^n}{\Delta t} + c \frac{\mathbf{u}_i^n - \mathbf{u}_{i-1}^n}{\Delta x} = \mathbf{0} \quad (\text{A.4})$$

Com erros de truncamento na ordem de  $\Delta\mathbf{x}$  e  $\Delta t$ .

Os sistemas de equações formados por todas as sete equações básicas discretizadas pode ser resolvido de dois modos, basicamente: de forma implícita ou de forma explícita. Em métodos implícitos, todo o sistema de equações é calculado simultaneamente já que todos os valores do passo de tempo atual são desconhecidos com exceção das fronteiras. Esse cálculo pode ser feito

através de inversão de matriz (totalmente implícito) ou de métodos iterativos (parcialmente implícito). No caso dos métodos explícitos, as variáveis no tempo atual são baseadas em valores conhecidos do passo de tempo passado, o que é consideravelmente mais simples. Em geral métodos implícitos demoram mais por passo de tempo, mas conseguem trabalhar com passos de tempo maiores porque não há um limite fixo de estabilidade. Já no caso de métodos explícitos existe pouco esforço computacional por passo de tempo, mas o critério CFL deve ser seguido para garantir estabilidade (MALISKA, 1995; ROELVINK, 2012). É importante ressaltar que processos que demandam iteração podem acumular erros de arredondamento que também podem desestabilizar a solução.

No caso de modelos costeiros, os modelos Delft3D e Mike21 utilizam-se de esquemas implícitos enquanto modelos como ROMS e o XBeach usam esquemas explícito de soluções.

Os modelos, em geral, podem apresentar problemas de convergência, onde a solução numérica não é estável. A condição descrita pelos autores Richard Courant, Kurt Friedrichs e Hans Lewy deu origem a todos os fundamentos necessários para as condições de convergência de qualquer esquema numérico e passou a ser conhecida como condição CFL (FORTUNA, 2000).

A ideia básica da condição de Courant-Friedrichs-Lowy (CFL) é que a solução das equações de diferenças finitas não pode ser independente dos dados que determinam a solução das equações diferenciais parciais associadas, ou seja, as partículas de fluido calculadas não podem se mover mais do que um espaçamento de grade em um passo de tempo. A condição CFL é uma condição necessária para a estabilidade do modelo, porém não suficiente.

Os métodos numéricos, por suas características intrínsecas, geram um efeito semelhante ao de difusão com suavização de gradientes, mesmo quando o cálculo inclui unicamente componentes advectivas. Esse é um efeito puramente numérico, denominado difusão artificial, difusão falsa ou difusão numérica. Conforme o CFL é reduzido, o efeito de difusão numérica também é (FORTUNA, 2000). A figura 63 apresenta o resultado final da equação da onda 1D para duas diferentes condições CFL. A fronteira foi imposta como 1 invariavelmente, mas nota-se o efeito de difusão numérica ocorrendo em maior ou menos escala, dependendo da condição imposta.

$$CFL = \frac{C\Delta t}{\Delta x}, C \approx \sqrt{gh} + u \quad (\text{A.5})$$

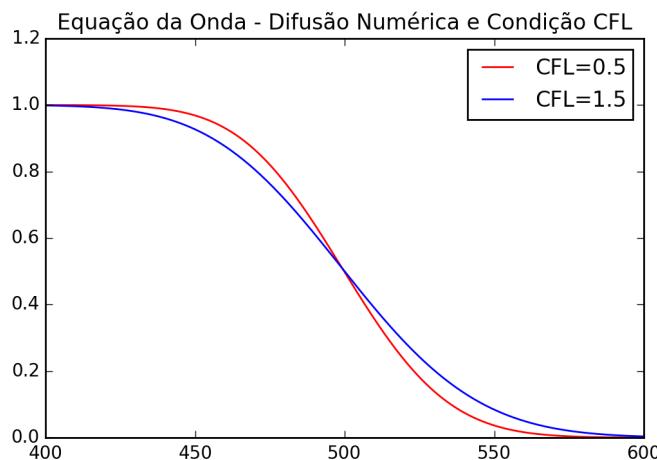


Figura 63 – Difusão numérica em diferentes condições de CFL em um problema da equação da onda 1D com condição de fronteira invariavelmente igual a 1 metro.

## **APÊNDICE B – Análises de Constantes Harmônicas**

As análises harmônicas foram aplicadas em todos os dados medidos para avaliar as componentes astronômicas dentro dos sinais analisados. O resultado final das análises incluiu as principais constantes harmônicas em cada um dos dados analisados.

Abaixo pode-se observar as tabelas 16 a 19 onde estão apresentadas as constantes harmônicas indicadas pelo pacote *ttide* para os sinais analisados. É possível verificar a frequência, amplitude (em centímetros), o erro de amplitude, a fase, o erro de fase e a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ration*) conhecida como SNR.

Simulações considerando um sinal fixo com diferentes níveis de ruído conseguiram indicar que para sinais de maré é ideal que o SNR seja maior que 10, mas que valores entre 2 e 3 são aceitáveis (PAWLOWICZ et al., 2002). Portanto, foram excluídas da tabela as constantes harmônicas que apresentaram uma relação de sinal-ruído (SNR) menor que 2.

Quando comparamos as constantes harmônicas dos ADCPs de Piçarras (30 dias de medição) com aquelas encontradas pelo marégrafo localizado na Penha (1 ano de dados), é possível perceber que a segunda apresenta um maior número de constantes harmônicas cujo SNR foi maior que 2. Pode-se concluir, portanto, que a quantidade limitada de dados no primeiro período pode, potencialmente, prejudicar análises harmônicas mais complexas.

Também é possível observar que as constantes harmônicas encontradas não foram as mesmas em todos os locais analisados. Buscou-se compreender estas diferenças e, para isso também foram utilizadas para comparação as constantes harmônicas estabelecidas como referência pela FEMAR em Penha (FEMAR, 2016). A tabela 15 apresenta, baseada na tabela da FEMAR, quais as constantes harmônicas foram encontradas nos dados e os valores de amplitude encontrados. É nítido que várias constantes apresentadas na tabela da FEMAR não foram encontradas em nenhum dos dados analisados. Entre elas estão as MM, Msf, M1, J1, OO1, 2N2, NU2, T2, SN4. Vale ressaltar que essas constantes até podem ter sido encontradas pelo pacote *ttide* mas foram desconsideradas devido à baixa relação de sinal-ruído.

Dentre as constantes apresentadas pela FEMAR que foram verificadas nos dados medidos, pode-se perceber uma variação na amplitude das ondas. As diferenças chegam alcançar 1,7cm na componente quaterdiurna MS4, 2cm na componente principal lunar (M2) e mais de 4cm na principal solar (S2). Além disso, três constantes foram encontradas exclusivamente nos dados de ADCP (ALP1, 2Q1 e NO1) e duas foram encontradas em todos os dados medidos mas não constavam na FEMAR (SK3 e 2MS6).

Tabela 15: Comparações entre as constantes harmônicas encontradas nos pontos ST001, ST002, ST003 e Penha com as constantes definidas pela FEMAR (FEMAR, 2016).

Constantes	FEMAR	ST001	ST002	ST003	Penha
Constante	FEMAR	ST001	ST002	ST003	Penha
MM	21,2	-	-	-	-
Msf	6,9	-	-	-	-
Q1	3,8	2,7	2,8	2,6	2,4
O1	11,7	10,77	10,65	10,68	8,9
M1	0,5	-	-	-	-
P1	2,6	-	-	-	2,0
K1	7,9	4,8	4,7	4,4	5,4
J1	1,5	-	-	-	-
001	0,7	-	-	-	-
2N2	0,7	-	-	-	-
MU2	3,1	2,8	3,0	3,2	2,1
N2	5,5	5,2	5,2	4,7	4,6
NU2	1,1	-	-	-	-
M2	26,3	28,3	28,1	28,3	28,1
L2	0,8	-	1,2	1,0	-
T2	1,1	-	-	-	-
S2	19,4	23,9	23,9	24,4	17,5

Tabela 15: Comparações entre as constantes harmônicas encontradas nos pontos ST001, ST002, ST003 e Penha com as constantes definidas pela FEMAR (FEMAR, 2016).

Constantes	FEMAR	ST001	ST002	ST003	Penha
K2	5,3	-	-	-	5,5
MO3	1,7	2,4	2,4	2,6	2,6
M3	5,5	4,8	4,8	4,6	5,3
MK3	0,6	-	-	-	1,7
MN4	3,8	3,9	3,9	3,9	2,8
M4	8,1	8,9	8,8	8,8	7,7
SN4	0,9	-	-	-	-
MS4	3,3	5,0	5,0	4,9	3,7

Tabela 16: Frequências encontradas nos dados de nível  
do ST001.

Constante Harmônica	Freq.	Amplitude (cm)	Erro de Ampl.	Fase	Erro de Fase	SNR
ALP1	0,0343966	1,5419	0,452	299,51	16,54	12
2Q1	0,0357064	1,6449	0,400	94,02	14,52	17
Q1	0,0372185	2,7398	0,429	325,62	9,94	41
O1	0,0387307	10,7731	0,428	293,18	2,08	630
NO1	0,0402686	1,5740	0,392	80,78	15,24	16
K1	0,0417807	4,7897	0,394	17,28	5,59	150
UPS1	0,0463430	0,9009	0,390	337,22	26,55	5.3
MU2	0,0776895	2,8297	0,747	339,19	15,01	14
N2	0,0789992	5,1950	0,728	287,81	7,60	51
M2	0,0805114	28,3225	0,778	139,90	1,38	1300
S2	0,0833333	23,9287	0,756	316,36	1,70	1000
MO3	0,1192421	2,3921	0,792	300,25	19,55	9.1
M3	0,1207671	4,8001	0,727	294,10	9,16	44
SK3	0,1251141	1,9392	0,815	81,87	27,06	5.7
MN4	0,1595106	3,8750	1,030	285,08	13,99	14
M4	0,1610228	8,8702	0,810	266,71	6,14	120
MS4	0,1638447	5,0315	1,057	169,33	11,57	23
2MS6	0,2443561	0,7546	0,459	340,08	40,16	2.7

Tabela 17: Análise harmônica através do ttide nos dados de nível do ST002,

Constante Harmônica	Freq.	Amplitude (cm)	Erro de Ampl.	Fase	Erro de Fase	SNR
ALP1	0,0343966	1,6004	0,466	305,34	18,93	12
2Q1	0,0357064	1,7065	0,455	106,38	16,03	14
Q1	0,0372185	2,7464	0,475	338,41	9,04	33
O1	0,0387307	10,6537	0,484	308,31	2,50	480
NO1	0,0402686	1,6129	0,487	97,99	14,54	11
K1	0,0417807	4,7405	0,491	30,21	5,82	93
UPS1	0,0463430	0,9177	0,479	340,12	27,41	3,7
MU2	0,0776895	2,9617	0,756	8,09	12,26	15
N2	0,0789992	5,2263	0,647	315,58	7,34	65
M2	0,0805114	28,0921	0,828	168,82	1,38	1200
L2	0,0820236	1,1613	0,689	147,04	35,45	2,8
S2	0,0833333	23,8874	0,813	346,16	1,74	860
MO3	0,1192421	2,3641	0,837	344,45	19,41	8
M3	0,1207671	4,7645	0,837	338,04	9,39	32
SK3	0,1251141	1,9392	0,856	123,28	24,65	5,1
MN4	0,1595106	3,8767	0,843	344,14	14,66	21
M4	0,1610228	8,8543	0,995	324,72	5,24	79
MS4	0,1638447	4,9715	1,029	227,51	11,20	23
2MS6	0,2443561	0,7419	0,397	68,45	33,10	3,5

Tabela 18: Frequências encontradas nos dados de nível  
do ST003.

Constante Harmônica	Freq.	Amplitude (cm)	Erro de Ampl.	Fase	Erro de Fase	SNR
ALP1	0,0343966	1,5514	0,609	321,28	22,65	6,5
2Q1	0,0357064	1,9434	0,564	111,56	16,70	12
Q1	0,0372185	2,6224	0,581	13,64	12,90	20
O1	0,0387307	10,6821	0,570	335,28	2,74	350
NO1	0,0402686	1,8453	0,567	125,71	17,34	11
K1	0,0417807	4,4388	0,503	62,02	7,14	78
EPS2	0,0761773	0,8275	0,393	57,06	30,64	4,4
MU2	0,0776895	3,1584	0,410	60,54	7,12	59
N2	0,0789992	4,7225	0,451	6,84	5,75	100
M2	0,0805114	28,2740	0,392	227,28	0,90	5200
L2	0,0820236	1,0548	0,439	191,77	24,69	5,8
S2	0,0833333	24,3625	0,464	45,41	0,96	2800
ETA2	0,0850736	1,1363	0,493	60,91	22,28	5,3
MO3	0,1192421	2,5788	1,045	76,21	22,82	6,1
M3	0,1207671	4,6140	0,982	64,48	11,73	22
SK3	0,1251141	1,9197	1,033	218,20	27,98	3,5
MN4	0,1595106	3,9056	0,860	98,87	14,13	21
M4	0,1610228	8,7903	0,941	82,71	5,82	87
MS4	0,1638447	4,9328	0,893	348,19	10,47	30
2MS6	0,2443561	0,4758	0,328	230,46	40,95	2,1

Tabela 19: Frequências encontradas nos dados de nível de Penha.

Constante Harmônica	Freq.	Amplitude (cm)	Erro de Ampl.	Fase	Erro de Fase	SNR
Q1	0,0372185	2,4132	0,417	114,85	9,27	34
RHO1	0,0374209	0,5895	0,377	242,64	38,22	2,4
O1	0,0387307	8,8670	0,352	348,75	2,53	630
P1	0,0415526	2,0539	0,450	354,04	11,79	21
S1	0,0416667	1,1426	0,424	25,74	17,71	7,3
K1	0,0417807	5,4217	0,394	55,87	3,76	190
2N2	0,0774871	1,7591	1,085	260,35	34,36	2,6
MU2	0,0776895	2,1402	1,110	344,04	33,61	3,7
N2	0,0789992	4,5907	1,088	126,94	16,34	18
M2	0,0805114	28,1197	1,146	261,17	2,11	600
S2	0,0833333	17,5111	1,067	210,29	3,76	270
K2	0,0835615	5,5192	1,191	74,89	11,89	21
MO3	0,1192421	2,5799	0,577	83,65	11,79	20
M3	0,1207671	5,2993	0,545	284,82	6,15	95
SO3	0,1220640	1,5534	0,509	147,95	21,70	9,3
MK3	0,1222921	1,7008	0,530	195,19	17,68	10
SK3	0,1251141	1,2108	0,547	310,34	24,34	4,9
MN4	0,1595106	2,7916	0,505	244,34	11,17	31
M4	0,1610228	7,6645	0,484	144,14	3,95	250
MS4	0,1638447	3,6645	0,552	189,35	8,55	44

Tabela 19: Frequências encontradas nos dados de nível de Penha.

<b>Constante Harmônica</b>	<b>Freq.</b>	<b>Amplitude (cm)</b>	<b>Erro de Ampl.</b>	<b>Fase</b>	<b>Erro de Fase</b>	<b>SNR</b>
MK4	0,1640729	1,0341	0,651	42,41	31,48	2,5
2MK5	0,2028035	0,5157	0,240	281,05	28,78	4,6
2MS6	0,2443561	0,3173	0,145	89,39	32,33	4,8

<b>Nome da Estação :</b>	<b>PENHA – SC</b>						
<b>Localização :</b>	No trapiche da Cia. Pesca Krause						
<b>Organ. Responsável :</b>	DHN						
<b>Latitude :</b>	26° 46,2' S		<b>Longitude :</b>	48° 39,1' W			
<b>Período Analisado :</b>	20/08/74 a 20/09/74		<b>Nº de Componentes :</b>	36			
<b>Análise Harmônica :</b>	Método Tidal Liverpool Institute						
<b>Classificação :</b>	Maré de Desigualdades Diurnas						
<b>Estabelecimento do Porto: (HWF&amp;C)</b>	I H 57 min		<b>Nível Médio (Zo):</b>	68 cm acima do NR.			
<b>Média das Preamares Superiores (MHHW) :</b>	124 cm acima do NR.		<b>Média das Preamares Inferiores (MLHW) :</b>	103 cm acima do NR			
<b>Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :</b>	32 cm acima do NR.		<b>Média das Baixa-mares de Inferiores (MLLW) :</b>	13 cm acima do NR.			
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>							
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)		
<b>Sa</b>	-	-	<b>MU<sub>2</sub></b>	3,1	143		
<b>Ssa</b>	-	-	<b>N<sub>2</sub></b>	5,5	317		
<b>Mm</b>	21,2	110	<b>NU<sub>2</sub></b>	1,1	317		
<b>Mf</b>	-	-	<b>M<sub>2</sub></b>	26,3	067		
<b>MTM</b>	-	-	<b>L<sub>2</sub></b>	0,8	225		
<b>Msf</b>	6,9	004	<b>T<sub>2</sub></b>	1,1	064		
<b>Q<sub>1</sub></b>	3,8	218	<b>S<sub>2</sub></b>	19,4	064		
<b>O<sub>1</sub></b>	11,7	069	<b>K<sub>2</sub></b>	5,3	064		
<b>M<sub>1</sub></b>	0,5	254	<b>MO<sub>3</sub></b>	1,7	027		
<b>P<sub>1</sub></b>	2,6	144	<b>M<sub>3</sub></b>	5,5	188		
<b>K<sub>1</sub></b>	7,9	144	<b>MK<sub>3</sub></b>	0,6	080		
<b>J<sub>1</sub></b>	1,5	068	<b>MN<sub>4</sub></b>	3,8	234		
<b>OO<sub>1</sub></b>	0,7	142	<b>M<sub>4</sub></b>	8,1	121		
<b>MNS<sub>2</sub></b>	-	-	<b>SN<sub>4</sub></b>	0,9	356		
<b>2N<sub>2</sub></b>	0,7	207	<b>MS<sub>4</sub></b>	3,3	213		
<b>Referências de Nível:</b> RN-1: situada no inicio do trapiche onde está montada a casa da bomba. RN-2: na escada de acesso à fábrica de gelo							
<b>Obs:</b> Não há referências a outros períodos							

Código BNDO: 60224

- 263 -

Figura 64 – Constantes harmônicas definidas na estação maregráfica brasileira da FEMAR (FEMAR, 2016).

## **APÊNDICE C – Análise dos Dados de Vento**

### C.1 CFSR - 2011 A 2015

A seguir pode-se observar a rosa dos ventos (figura 65) e a distribuição conjunta (figura 66) dos dados de vento para todo o período de 2011 a 2015. Vale ressaltar primeiramente que as discrepâncias entre os valores de percentuais se deve ao número de divisões de direção entre a rosa dos ventos (16 classes) e a distribuição conjunta (8 classes).

Pode-se verificar que em 58,3% dos dados encontram-se no quadrante N (NW-N-NE) e que 70% do tempo, as velocidades do vento ficam abaixo de  $6\text{m.s}^{-1}$  para todas as direções. Considerando o quadrante S, ventos de SW são os mais recorrentes, acontecendo em 9,8% dos casos. Casos de vento acima de  $8\text{m.s}^{-1}$  são recorrentes em menos de 10% dos casos, mas estão presentes na maior parte das direções. As direções de O e ENE são as que apresentaram as maiores velocidades de vento ( $>10\text{m.s}^{-1}$ )

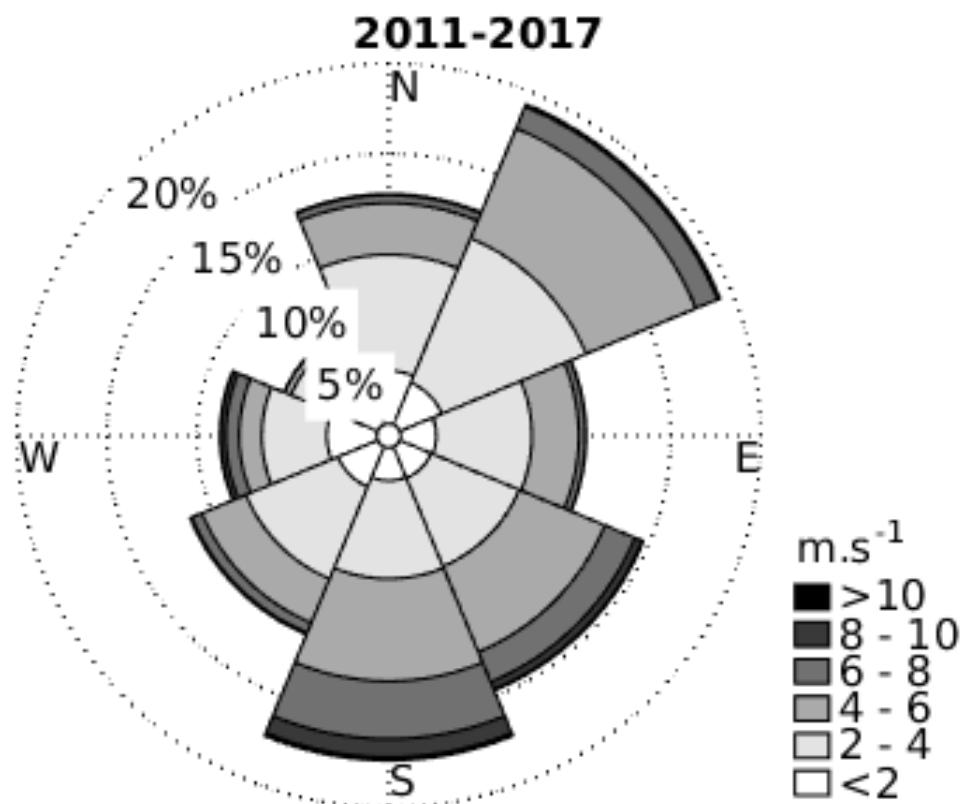


Figura 65 – Rosa dos ventos para os dados do CFSR de 2011 a 2015. Os círculos indicam percentuais de ocorrência por quadrante analisado.

	<b>N</b>	<b>NE</b>	<b>E</b>	<b>SE</b>	<b>S</b>	<b>SW</b>	<b>W</b>	<b>NW</b>	<b>Num Casos</b>	<b>Freq</b>	<b>Vel Min</b>	<b>Vel Media</b>	<b>Vel Max</b>
<b>0-2</b>	1691	1453	1136	1085	1055	1380	1604	1537	10941	18.96	0.02	1.31	2.00
<b>2-4</b>	3725	5014	3067	3060	3145	3195	2082	1478	24766	42.92	2.00	2.93	4.00
<b>4-6</b>	1653	3811	1503	2975	3282	1528	725	213	15690	27.19	4.00	4.74	6.00
<b>6-8</b>	254	756	212	1038	1851	348	429	22	4910	8.51	6.00	6.66	8.00
<b>8-10</b>	37	72	21	251	588	55	161	5	1190	2.06	8.00	8.61	10.00
<b>10-12</b>	2	5	5	40	87	5	32	0	176	0.31	10.00	10.52	11.99
<b>12-14</b>	1	1	0	4	12	1	0	0	19	0.03	12.02	12.54	13.94
<b>14-16</b>	0	1	0	1	2	0	0	0	4	0.01	14.10	14.40	14.59
<b>Num Casos</b>	7363	11113	5944	8454	10022	6512	5033	3255					
<b>Frequencia</b>	12.76	19.26	10.30	14.65	17.37	11.29	8.72	5.64					
<b>Vel Min</b>	0.03	0.04	0.02	0.10	0.07	0.04	0.05	0.04					
<b>Vel Média</b>	2.90	3.66	3.21	4.08	4.52	3.23	3.16	2.18					
<b>Vel Max</b>	12.06	14.59	10.37	14.10	14.46	13.20	11.88	8.24					

Figura 66 – Distribuição conjunta dos dados de ventos do CFSR de 2011 a 2015. Os tons de verde na figura indicam resultados mais relevantes dentre as ocorrências.

## C.2 ANÁLISE POR ESTAÇÃO

Foram feitas análises sazonais do comportamento do vento na região de estudo utilizando todo o conjunto de dados do CFSR (2011-2015). Verificou-se que, independente da estação, as velocidades mínimas ficaram abaixo de  $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e as máximas abaixo de  $11\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  com a média em torno de  $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ou seja, não pode ser verificada uma variação expressiva de velocidade do vento ao longo das estações do ano.

Tabela 20: Características das velocidade de vento por estação do ano.

Estação	Mínimo	Máximo	Média
Verão	0,60	10,03	3,82
Outono	0,17	10,16	4,23
Inverno	0,41	10,93	3,84
Primavera	0,40	9,83	4,00

Entretanto, nas figuras 67 a 70 pode-se perceber que a direção dos ventos muda bastante conforme a estação.

No Verão, os ventos mais expressivos são de ONO, com as maiores velocidades (8 a  $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) registradas na estação. As demais direções permaneceram com velocidades menores que  $6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , mas o percentual de ventos do quadrante N é maior que nas demais direções.

No Outono, os ventos ficam quase totalmente concentrados entre O e NO com menor presença de ventos N. As demais direções apresentam recorrência muito baixa, abaixo de 5% cada. As maiores velocidades são associadas aos ventos de O que representaram cerca de 13% dos dados. No entanto, a presença de ventos de NO abaixo de  $8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  aparece em quase 20% dos dados.

No Inverno, existe uma inversão das direções e os ventos de S passam a ser predominantes tanto em intensidade ( $>10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) quanto em percentual ( $>10\%$ ). Ventos do quadrante L e O aparecem em percentuais menores e velocidades abaixo de  $6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  na maior parte do tempo. Ventos do quadrante N se tornam quase ausentes neste período.

A Primavera se mostra com predominância do quadrante N e com os ventos mais intensos oriundos de ONO. Ventos de NE e L aparecem com um percentual próximo de 15% mas velocidades normalmente abaixo de  $6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ventos do quadrante sul são praticamente ausentes e com velocidades abaixo de  $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . As maiores velocidades voltam a ser associadas aos ventos de ONO, ultrapassando  $8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

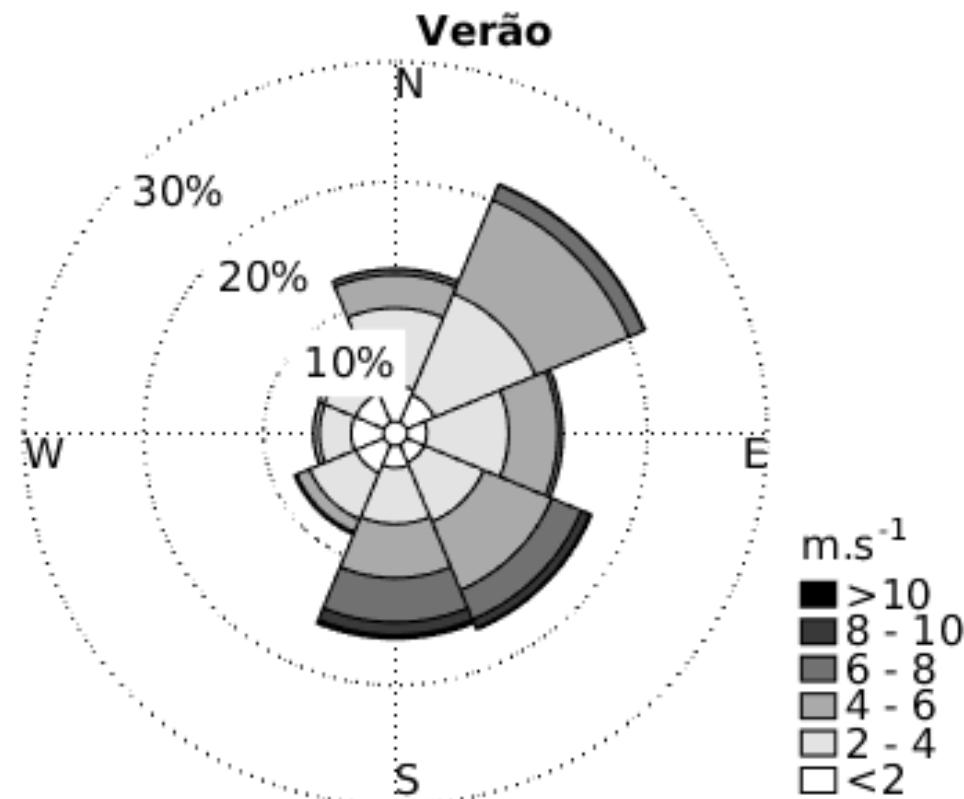


Figura 67 – Rosa dos ventos referente aos dados do CFSR para a estação Verão (Dezembro a Fevereiro) nos anos 2011 a 2015. Os círculos indicam percentuais de ocorrência por quadrante analisado. Ventos de ONO a NE são presentes em quantidades semelhantes, mas ventos de oeste são nitidamente mais fortes, podendo alcançar  $12 m.s^{-1}$

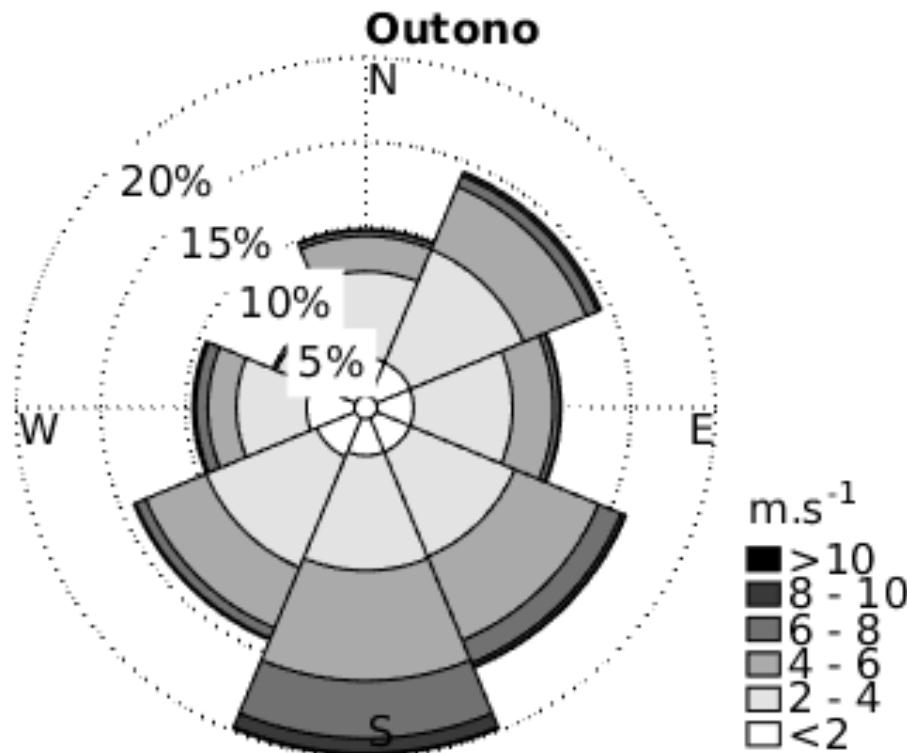


Figura 68 – Rosa dos ventos referente aos dados do CFSR para a estação Outono (Março a Maio) nos anos 2011 a 2015. Os círculos indicam percentuais de ocorrência por quadrante analisado. Ventos de O são mais intensos porém com menor ocorrência do que os ventos de NO, sendo estes os mais presentes durante o outono.

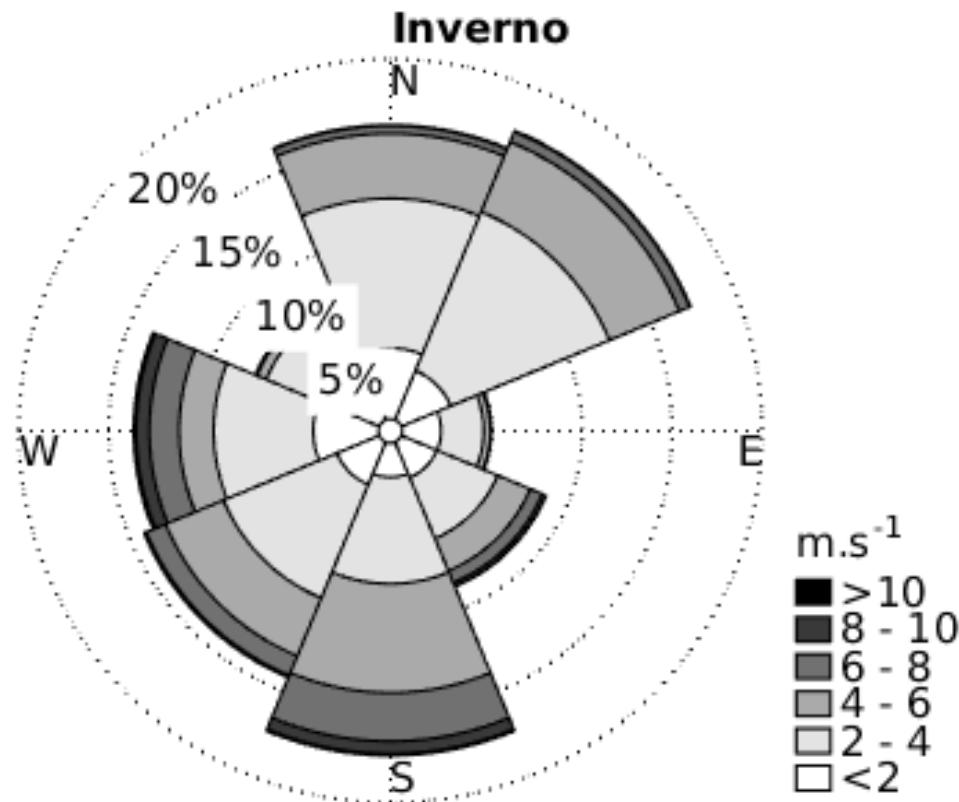


Figura 69 – Rosa dos ventos referente aos dados do CFSR para a estação Inverno (Junho a Agosto) nos anos 2011 a 2015. Os círculos indicam percentuais de ocorrência por quadrante analisado. Ventos de S se apresentam os mais frequentes e os mais intensos.

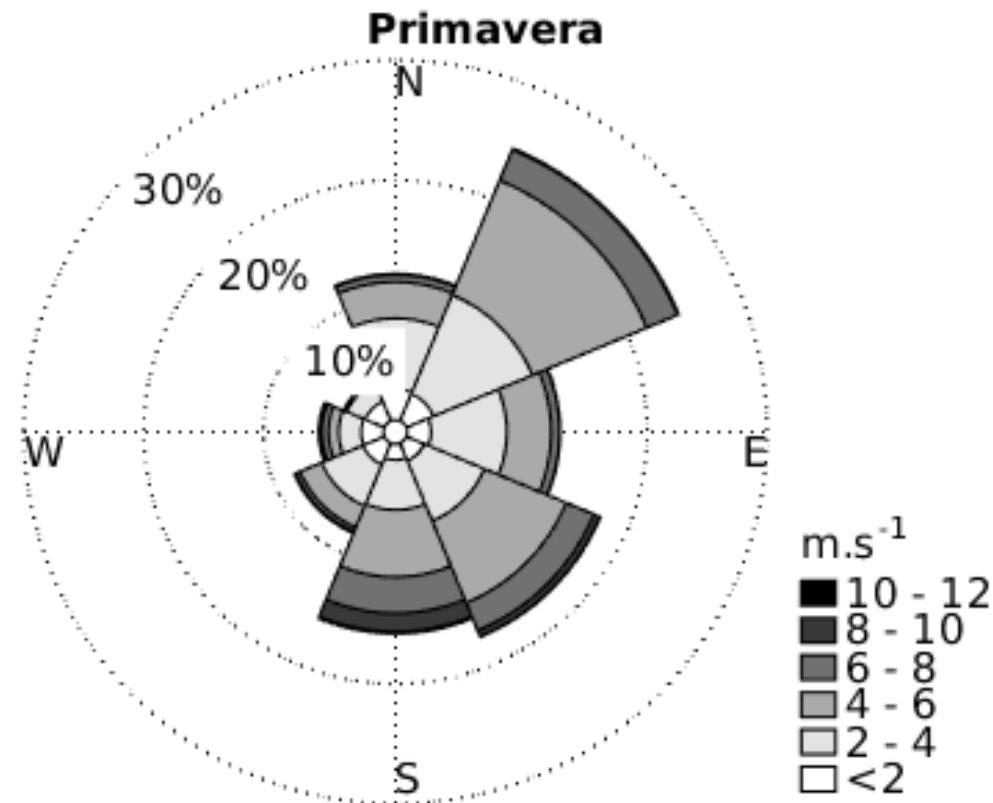


Figura 70 – Rosa dos ventos referente aos dados do CFSR para a estação Primavera (Setembro a Novembro) nos anos 2011 a 2015. Os círculos indicam percentuais de ocorrência por quadrante analisado. Ventos de NE e L são mais intensos, porém ventos de O-ONO são mais intensos.

## **APÊNDICE D – Figuras Extras**

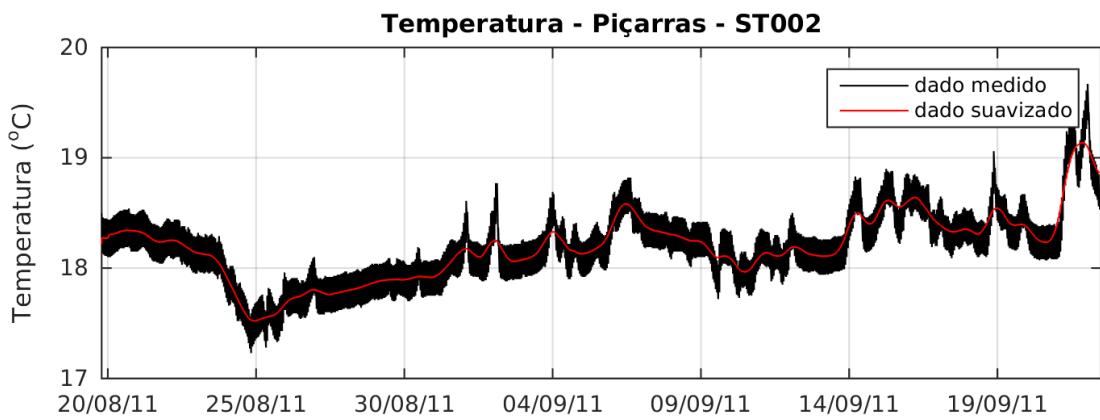


Figura 71 – Resultado da média móvel aplicada nos dados brutos de temperatura em ST002

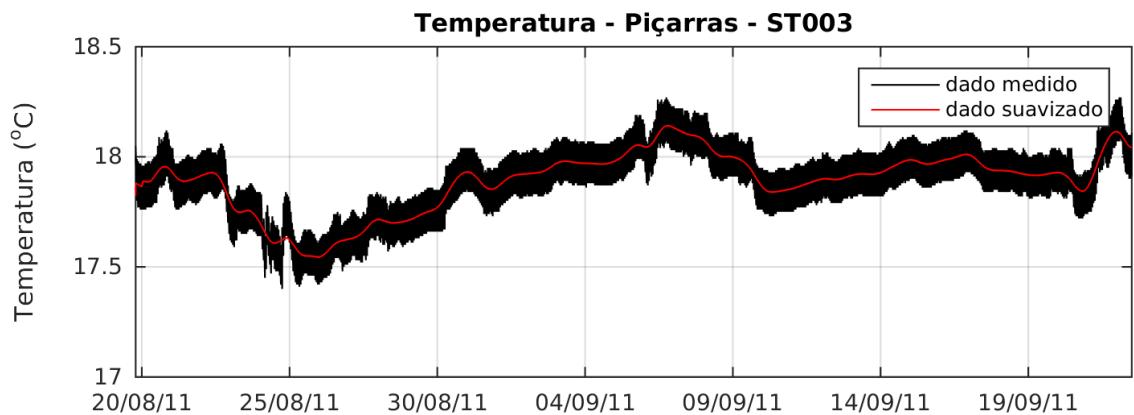


Figura 72 – Resultado da média móvel aplicada nos dados brutos de temperatura em ST003