



Universidade Federal do Rio Grande

Instituto de Oceanografia

Pós-Graduação em Oceanografia Física Química e Geológica

Estudo Numérico de Conversão da Energia Cinética das Correntes Marinhas em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira

Eduardo de Paula Kirinus

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Rio Grande, Novembro de 2017

Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Oceanografia
Pós-Graduação em Oceanografia Física Química e Geológica

Estudo Numérico de Conversão da Energia
Cinética das Correntes Marinhas em Energia Elétrica na
Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira

Discente: Oc. Eduardo de Paula Kirinus

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Tese apresentada à banca examinadora
da Universidade Federal do Rio Grande,
como exigência parcial para obtenção
do título de Doutor em Oceanografia
Física Química e Geológica pelo programa
Pós-Graduação em Oceanografia Física
Química e Geológica

Novembro de 2017

**Estudo da Viabilidade de Conversão da Energia das Correntes em Energia Elétrica na
Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira**

Discente: Eduardo de Paula Kirinus

Banca Examinadora

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques
Instituto de Matemática, Estatística e Física - IMEF-FURG

Profa. Dr. Paula Dentzien Dias Francischini
Instituto de Oceanografia - FURG

Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo
Instituto de Oceanografia - FURG

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Escola de Engenharia - FURG

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Escola de Engenharia - UNISINOS

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais, pois sem o seu apoio jamais teria conseguido chegar onde estou. A Lucia e ao Sérgio por todo o suporte.

Ao meu orientador de longa data, o Prof. Dr. Wiliam Correa Marques, que me aceitou como primeiro aluno de doutorado de sua carreira. Não é com qualquer aluno que tu ganha o tetra!! Pós-doc vem ai! A todos os colegas do LANSO por propiciarem um ambiente favorável a pesquisa, além de proporcionar amizades fora da linha de tendência. Ao Phelype um agradecimento especial por toda a ajuda em momentos desesperadores.

Aos membros da banca por aceitarem participar do processo de defesa, muito obrigado Profa. Dr. Paula Camboim Dentzien Dias, Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo e especialmente ao membro externo Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.

Aos professores Dr. Mauricio Almeida Noernberg (UFPR), Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein (UFSC) e Dr. Elirio Ernestino Toldo Jr. (UFRGS) por permitirem a abertura de dialogo e por ceder dados oceanográficos. Apesar de os dados ainda não terem sido utilizados devido a limitações, em breve, certamente haverá novas oportunidades de cooperação.

A toda equipe técnica do CESUP-UFRGS, por aguentar várias dúvidas e e-mails incensantes a cada pequeno probleminha, principalmente ao Lindolfo Meira e ao Luís Fernando Fernandez. Ao Prof. Jeferson Avila Souza, que em 2013 era Coordenador do PPGMC, permitindo acesso a um dos Workstation do programa.

Agradeço ao Jajá por manter essa amizade viva, mesmo através de visitas esporádicas!!! E a casa das 6 que manteve o grupo do Zap pra gente se falar!!

Agradeço a Marinha do Brasil por disponibilizar as cartas náuticas utilizadas para compor o banco de dados batimétrico deste trabalho. A NOAA, HYCOM, ECMWF por fornecerem dados globais de extrema qualidade livremente. Agradeço ao Centro de Hidrografia da Marinha por coordenar o Programa Nacional de Boias (PNBOIA) e ao GOOS-Brasil for divulgar e promover o uso dos dados.

Agradeço enormemente ao consórcio open-TELEMAC-MASCARET por disponibilizarem o modelo TELEMAC gratuito em sua plenitude, além de estabelecerem um marco de desenvolvimento e crescimento de seus usuários através das imensas inovações promovidas pelo consórcio.

Imensurável gratidão à Maria Isabel Machado, coordenadora do Programa de Recursos Humanos (Prh-27-ANP), por garantir provimento de bolsas durante o doutorado. Além de incentivar minha atuação em eventos internacionais como na participação no *XX TELEMAC-MASCARET User Conference* realizado em Karlshure na Alemanha, e no *Offshore renewable energy summer school* oferecido pela HR-Wallingford na Inglaterra. Também agradeço a FINEP, ANP e Petrobras.

Vanice, me faltam palavras para expressar a gratidão que tenho pelo teu apoio e companheirismo durante todo o processo deste doutorado e do nosso tempo como casal. Sem você, nunca teria conseguido finalizar este trabalho pois em todos os maus momentos desta empreitada tu me mostrou a saída, enquanto que nos momentos bons tu me manteve com os pés no chão para que juntos conseguíssemos dar o passo seguinte, independente das dificuldades. Superamos mais este desafio, mas tenho certeza que outros virão, e que juntos dividiremos novos momentos (bons e maus) e certamente teremos experiências únicas nas nossas jornadas futuras. Te amo.

"The bald and not excessively bald
and not excessively smart hamster
obeyed a terrified and not excessively
terrified hamster."
Why, Matlab 2017

Resumo

Estudo Numérico de Conversão da Energia Cinética das Correntes Marinhas em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira.

Energias renováveis de fontes marinhas já apresentam potencial possível de exploração, tornando determinante o início de estudos e investigações sobre taxas de conversão de energia, bem como dos impactos hidrodinâmicos e morfodinâmicos em longo prazo. Ondas e correntes oceânicas estão sendo pesquisadas ao redor do mundo como possíveis fontes de energia. Descobertas recentes relatam que em lugares energeticamente viáveis, os estudos estão focados em impactos locais, desconsiderando as variações de longo prazo. Este estudo demonstra a importância de se avaliar recursos energéticos através de simulações de longo período, para aumentar o conhecimento sobre os processos de variabilidade espacial e temporal que controlam o padrão dinâmico de locais viáveis para a implantação de energias renováveis oceânicas. O principal objetivo deste trabalho é encontrar locais próximos a região costeira da Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira, que sejam viáveis para a exploração da energia das correntes e ondas, além de avaliar os impactos hidrodinâmicos e morfodinâmicos de longo período. Os modelos hidrodinâmico TELEMAC-3D e espectral de ondas TOMAWAC foram utilizados para o período de 10 anos, entre os anos de 2003 e 2012, para acessar a viabilidade de ondas e correntes. O modelo morfodinâmico SISYPHE acoplado ao modelo TELEMAC-3D também foi utilizado para o mesmo período em abordagem de cenários, com e sem a presença dos sítios de turbinas para realizar as comparações dos impactos ambientais. Fontes de alta intensidade das correntes e altura de ondas foram encontradas em cinco localidades na costa da Plataforma Continental Sul do Brasil e Plataforma Continental Sudeste do Brasil, onde foram subsequentemente analisados para a frequência de ocorrência, análise de variabilidade em relação a meses e estações do ano, assim como, variabilidade espacial e temporal. Os resultados apontaram que a energia renovável provinda das correntes oceânicas possui maior estabilidade para a conversão na Plataforma Continental Sul do Brasil, enquanto que para as ondas, as melhores condições encontradas foram na Plataforma Continental Sudeste do Brasil. As estações mais fracas para a conversão energética foram o outono e o verão, para correntes e ondas respectivamente, com variação entre as estações dominantes. A variabilidade das ondas demonstrou grande correlação com a dinâmica atmosférica em relação a passagem de sistemas frontais, em oposição às correntes que foram principalmente forçadas pelo fluxo local dirigido por vento. Através destes resultados, regiões viáveis para as correntes na região costeira da Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira foram reduzidas e limitadas através da definição de cinco critérios como batimetria, proximidade com a costa, frequência de altas intensidades de velocidade, variabilidade sazonal e mensal. Sítios de turbinas foram adicionados ao módulo de conversão de energias acoplado ao modelo hidrodinâmico para que as mudanças impactantes do fluxo, devido a conversão, fossem desenvolvidas corretamente. Os resultados demonstraram que nos três locais selecionados, as turbinas não apresentam taxas de conversão semelhantes, ao contrário, àquelas localizadas nas bordas dos sítios apresentaram melhores taxas de conversão. Em relação aos impactos, a corrente superficial decresceu dentro dos sítios provocando ajustes na coluna de água, quebrando o padrão vertical natural da corrente, e desenvolvendo fluxos laterais que, com o tempo, afetam a dinâmica de fundo, causando mudanças nos depósitos sedimentares, além de impactar as taxas de transporte de sedimentos pelo fundo. As turbinas propostas neste trabalho converteram um total de 1840 GWh ao longo dos 10 anos de estudo, considerando neste valor, as perdas mecânicas e o cabeamento, além de outras fontes de perda. Este valor é equivalente a energia consumida por 56.166 residências durante 10 anos.

Palavras-Chave: Energia Renovável Marinha; Hidrodinâmica; Morfodinâmica; Ondas; Correntes; Sedimentos; Variabilidade; Impactos; Telemac-3D, Sisyphé, TOMAWAC.

Abstract

Numerical study for current kinetic energy conversion into electricity in the South-Southeastern Brazilian Shelf.

As marine renewable resources starts to represent a feasible exploration potential, thus the investigation of long-term impacts regarding hydrodynamic and morphodynamic processes becomes crucial. Waves and ocean currents have been widely researched worldwide as possible renewable sources. Recent findings relate viable energy spots with high power output focusing in local dynamic impacts disregarding long-term viability. This study underlines the importance of resource assessment performed throughout long-term simulations, attempting to improve the understanding of spatial-temporal variability controlling the dynamic patterns of feasible spots for oceanic renewable energy. The main objective of this work is to find viable near shore energetic spots for currents and waves, and also evaluate the long-term hydrodynamic and morphodynamic impacts. The hydrodynamic and the spectral wave models TELEMAC-3D and TOMAWAC were used over 10 years period, from 2003 to 2012, for the hydrodynamic and waves assessment. The morphodynamic model SISYPHE coupled with TELEMAC-3D were also used along the same period in scenario approach, with and without the turbines sites, for impact comparisons. Sources of high current intensity and wave height were found in five spots around the Southern Brazilian Shelf and Southeast Brazil Bight, where they were further analysed for frequency of high occurrence, variability analysis during months and seasons, as well as, spatial and temporal variability. The results points out that renewable energy from ocean currents have more stability for conversion in the Southern Brazilian Shelf, while waves present better conditions in the Southeast Brazil Bight. The weaker seasons for energy conversion were Autumn and Summer, for currents and waves respectively, with the stronger seasons varying. Waves variability demonstrate highly correlation with atmospheric dynamics regarding the passage of frontal systems, in opposition of currents that are mainly forced by local wind-driven setup. Following these results, the viable spots in the South-Southeastern Brazilian Inner Shelf were narrow down through the definition of five criteria such as bathymetry, coastal proximity, frequency of high intensity velocity, seasonal and monthly variability. Turbines sites were added to a conversion energy module coupled into the hydrodynamic model in order to develop properly the flow changes towards the energy conversion process. Results revealed that in the three chosen spots, turbines were not equally converting the currents energy, in fact, the ones located on the outer side of the farm developed greater conversion rates. Regarding impacts, decrease of the surface current occurs generating strong adjustments in the water column, breaking the natural pattern of vertical circulation and developing lateral flows, that in time affect the bottom dynamics leading to changes in sediment deposition, besides bedload transport rates swift as well. Concerning energy output, the idealized turbines sites produced 1840 GWh over 10 years providing electricity to 56,166 residences, accounting for mechanical, cabling and other sources of losses.

Keywords: Marine Renewable Energy; Hydrodynamic; Morphodynamic; Waves; Currents; Sediments; Variability; Impacts; Telemac-3D, Sisyphe, TOMAWAC.

Introdução	1
1 Introdução	p. 2
1.1 Energia das Correntes, Marés e Ondas Geradas pelo Vento	p. 3
1.1.1 Equipamentos de Conversão de Energia de Correntes	p. 10
1.2 Região de Estudo	p. 17
1.2.1 A Plataforma Continental Sul do Brasil	p. 17
1.2.2 Plataforma Continental Sudeste do Brasil	p. 23
1.3 Objetivo Geral	p. 25
1.3.1 Objetivos Específicos	p. 25
1.4 Hipótese	p. 25
1.5 Estrutura da Tese	p. 26
Metodologia	27
2 Metodologia	p. 28
2.1 Módulo Hidrodinâmico - TELEMAC-3D	p. 29
2.1.1 Equacionamento do modelo TELEMAC-3D	p. 30
2.2 Módulo Morfodinâmico - SISYPHE	p. 38
2.2.1 SISYPHE e a camada de fundo	p. 39
2.2.2 Interações fluido-sedimento	p. 40
2.2.3 Transporte de sedimentos	p. 41

2.2.4	Carga de material transportada junto ao fundo (<i>bedload</i>)	p. 44
2.3	Módulo Ondulatório - TOMAWAC	p. 47
2.3.1	Discretização Espectro-Angular	p. 51
2.4	Módulo de Conversão de Energia	p. 52
2.5	Acoplamento	p. 57
2.6	Geração da Malha de Elementos Finitos	p. 60
2.6.1	Estruturação da Malha Batimétrica	p. 60
2.6.2	Malha Computacional	p. 65
2.7	Fontes de Dados Utilizadas como Condições Iniciais e de Contorno	p. 70
2.7.1	HYCOM	p. 70
2.7.2	<i>Reanalysis</i> - NOAA	p. 71
2.7.3	WW3	p. 71
2.7.4	Maré astronômica	p. 71
2.8	Condições Iniciais	p. 72
2.9	Condições de Contorno	p. 73
2.10	Métodos para Análise dos Resultados	p. 77

Parametrizações, verificação e validação do modelo TELEMAC-3D 79

3	Parametrizações, verificação e validação do modelo TELEMAC-3D	p. 80
3.1	Performance e Parametrização	p. 80
3.1.1	Sensibilidade da Malha Computacional	p. 84
3.1.2	Verificação do modelo com parâmetros físicos	p. 90
3.1.3	Verificação do modelo com a melhor parametrização	p. 93
3.1.4	Validação do modelo TELEMAC-3D	p. 95
3.2	Estudo de Caso	p. 105

Parametrizações, verificação e validação do modelo TOMAWAC 107

4	Parametrizações, verificação e validação do modelo TOMAWAC	p. 108
4.1	Parametrização e Validação	p. 108
4.2	Estudo de Caso	p. 115

Artigo I:

Into the long-term simulation for marine energy exploitation

Autores: Kirinus, E. P.; Oleinik, P. H.; Marques, W. C.

116

5	Into the long-term simulation for coastal ocean energy exploitation	p. 117
5.1	Introduction	p. 117
5.2	Methodology	p. 121
5.2.1	TELEMAC System	p. 121
5.2.2	Initial and Boundary Conditions	p. 124
5.3	Model Performance and Validation	p. 126
5.3.1	Grid sensibility	p. 126
5.3.2	Validation and Calibration	p. 126
5.4	Results and Discussions	p. 130
5.5	Conclusions	p. 148
5.6	Acknowledgements	p. 151
5.7	References	p. 152

Artigo II:

First insight into hydrodynamic and morphodynamic of ocean current energy conversion sites in South-Southeastern Brazilian Inner Shelf

Autores: Kirinus, E. P.; Marques, W. C.

153

6	First insight into hydrodynamic and morphodynamic of ocean current energy conversion sites in South-Southeastern Brazilian Inner Shelf	p. 154
6.1	Introduction	p. 155
6.2	Methodology	p. 157
6.2.1	TELEMAC System	p. 157
6.2.2	Initial and Boundary Conditions	p. 163
6.3	Defining the Energy Conversion Sites	p. 164
6.4	Results and Discussions	p. 165
6.4.1	Turbine farm performance	p. 165
6.4.2	Environmental Impacts	p. 170
6.5	Conclusions	p. 181
6.6	Acknowledgements	p. 183
6.7	References	p. 183

I	Conclusões	184
7	Conclusões	p. 185
II	Limitações do estudo e proposta para trabalhos futuros	193
8	Limitações do estudo e proposta para trabalhos futuros	p. 194
8.1	Limitações deste estudo	p. 194
8.2	Trabalhos Futuros	p. 195
9	Referências	p. 197

Lista de Figuras

- 1.1 *Alguns conversores de energia de ondas. Ver relação de princípios físicos e posicionamento na tabela 1.1.* p. 7
- 1.2 *Conversores descritos na tabela 1.2 (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)) (cont.).* p. 15
- 1.2 *Conversores descritos na tabela 1.2 (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)).* p. 16
- 1.2 *Conversores descritos na tabela 1.2 (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)).* p. 17
- 1.3 *Área de estudo. (a) Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira, com batimetria até 5.000 m, com destaque para os quadrados numéricos representando as isóbatas de 50, 500, 2.000 and 3.000 m. A linha tracejada preta divide a Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira.* p. 18
- 1.4 *Correntes marinhas superficiais e massas de água no inverno. BC: Corrente do Brasil; MC: Corrente das Malvinas; PC: Corrente da Patagônia; BCC/RGC: Corrente Costeira do Brasil ou Corrente do Rio Grande; TW: Água Tropical; SAW: Água Subantártica; SASW: Água Subantártica de Plataforma; PPW: Água da Pluma do Rio da Prata; STSW: Água Subtropical de Plataforma. Fonte: Möller et al. (2008).* p. 20
- 1.5 *Correntes marinhas superficiais e massas de água no verão. Fonte: Möller et al. (2008).* p. 21
- 2.1 *Camadas do modelo morfodinâmico. Em azul está representado o fluido hidrodinâmico presente na coluna de água, em marrom as camadas sedimentares e em cinza a camada profunda intransponível. Adaptado de Tassi e Villaret (2014)* p. 40
- 2.2 *Transporte de sedimentos junto ao fundo (bedload) no SISYPHE. A) Início da transferência de movimento; B) Rolamento; C) Saltação e D) Arrasto. Adaptado de Kopmann et al. (2013)* p. 42
- 2.3 *Parcelas do transporte pelo fundo e em suspensão. Adaptado de Kopmann et al. (2013)* p. 43

2.4	<i>Sistema de coordenadas polares utilizado pelo TOMAWAC , neste caso, são 25 frequências e 12 direções. Adaptado de TOMAWAC (2017)</i>	p. 53
2.5	<i>Regiões de perturbação do escoamento, segundo Zdravkovich (1997)</i>	p. 54
2.6	<i>Vista superior de um fluxo incidindo sobre uma turbina. U representa o fluxo não perturbado, enquanto que U_1, U_2, U_3 e U_4 representam mudanças no fluxo de acordo com a sua relação com a posição da turbina. Adaptado de Vennell (2011b)</i>	p. 55
2.7	<i>Esquema longitudinal (eixo x-z) das influências de uma turbina. A relação entre as velocidades é: $U_2 \geq U \geq U_1 \geq U_4 \geq U_3$. ZDI significa Zona de Divergência Inferior, enquanto que ZDS é a Zona de Divergência Superior. Adaptado de Kolekar e Banerjee (2015) e Vogel et al. (2016).</i>	p. 56
2.8	<i>Esquema do acoplamento entre o modelo hidrodinâmico e morfodinâmico. A) Modelo inicia os calculos considerando uma condição de fundo b^0; B) Ocorre a mudança do passo de tempo e a velocidade é alterada pelo modelo hidrodinâmico; C) A nova velocidade gera movimento de carga pelo fundo q_b; D) O modelo morfodinâmico calcula todo o processo de movimentação e devolve a nova batimetria resultante da influência da velocidade neste passo de tempo. O ciclo de interações retorna para B. Adaptado de Kopmann et al. (2013)</i>	p. 59
2.9	<i>Fluxograma apresentando a interação completa entre os diferentes módulos do sistema open TELEMAC-MASCARET.</i>	p. 60
2.10	<i>Cartas náuticas digitalizadas para a região (a) sul e (b) sudeste do Brasil. Pontos representam dados adquiridos de batimetria provenientes das cartas náuticas.</i>	p. 62
2.11	<i>Pontos contendo dados batimétricos provenientes dos projetos (a) LEPLAC e (b) ReviZZE. Dados batimétricos provenientes de vários projetos da (c) FURG e (d) UNIVALI.</i>	p. 63
2.12	<i>Dados batimétricos provenientes do banco de dados global GEBCO (a) com profundidades entre 0 e -400m foram removidos do banco de dados. Banco de dados batimétricos costeiros utilizado (b). A linha vermelha demonstra o limite oceânico da malha. Os dados do GEBCO foram excluídos desta figura para melhor visualização.</i>	p. 64
2.13	<i>Malha numérica em elementos finitos. Podendo ser notado a variação do refino da malha na medida em que a região costeira se aproxima.</i>	p. 65
2.14	<i>Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bidimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet e Van Haren (1996)).</i>	p. 66
2.15	<i>Representação tridimensional de 6 níveis sigma da malha numérica.</i>	p. 69
2.16	<i>Fluxograma da relação entre os bancos de dados e as condições iniciais de cada módulo.</i>	p. 73
2.17	<i>Condições iniciais hidrodinâmicas provenientes do HYCOM para a camada superficial do módulo TELEMAC-3D . (a) Salinidade, (b) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (c) Velocidade u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e (d) Velocidade v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).</i>	p. 74
2.18	<i>Condições iniciais ondulatórias provenientes do WW3 para a camada superficial do módulo TOMAWAC. (a) Altura significativa das ondas (m), (b) Período de pico (s), (c) Direção de pico ($^{\circ}$).</i>	p. 75

2.19	<i>Contornos líquidos (HYCOM e OTPS) e superficiais (Vento, Temperatura do ar e Pressão atmosférica) utilizados nas simulações. O contorno terrestre é considerado uma parede fechada. Adaptado de da Silva (2018) (em preparação).</i>	p. 77
3.1	<i>Fluxograma relacionando o desenvolvimento do estudo realizado.</i>	p. 81
3.2	<i>Malhas computacionais de elementos finitos desenvolvidas para a análise de sensibilidade. Malhas com (a) 102.585, (b) 205.617 e (c) 352.393 nós. (d) Malha com a localização dos pontos comparados.</i>	p. 86
3.3	<i>Intensidade da corrente ($m.s^{-1}$) nos 6 pontos escolhidos variando no tempo.</i>	p. 87
3.4	<i>Elevação do nível do mar (m) nos 6 pontos escolhidos variando no tempo.</i>	p. 88
3.5	<i>Mapas de salinidade. Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).</i>	p. 93
3.6	<i>Intensidade da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$). Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).</i>	p. 94
3.7	<i>Componente u da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$). Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).</i>	p. 95
3.8	<i>Componente v da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$). Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).</i>	p. 96
3.9	<i>Séries temporais da intensidade da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$) entre TELEMAC-3D (preto), HYCOM (verde) e PNBOIA (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b) e São Paulo (c).</i>	p. 99
3.10	<i>Séries temporais da componente U da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$) entre TELEMAC-3D (preto), HYCOM (verde) e PNBOIA (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b) e São Paulo (c).</i>	p. 100
3.11	<i>Séries temporais da componente V da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$) entre TELEMAC-3D (preto), HYCOM (verde) e PNBOIA (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b) e São Paulo (c).</i>	p. 101
4.1	<i>Séries temporais da altura de ondas significativa espectral (m), período de pico (s) e direção de pico ($^{\circ}$) entre TOMAWAC (azul), e dados observados (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b), São Paulo (c) e a boia da FUGRO no Rio de Janeiro (d).</i>	p. 111
5.1	<i>Study area located in the South-Southeastern Brazilian Shelf. In addition, the numerical grid used in this work with 205,617 nodes disposed in 20 vertical sigma levels. The yellow lines represent the oceanic liquid boundaries and the spiral represents the atmospheric surface conditions. The dots represent the in situ data from buoys: PNBOIA-RS (green), PNBOIA-SC (cyan), PNBOIA-SP (red) and FUGRO-RJ (magenta). Bathymetry is shown in the color bar and also using the isolines for 50, 500, 2,000 and 3,000 m.</i>	p. 119

5.2	<i>Maximum of current intensity for 2006, with zoom in 5 areas with the highest velocity. (b) Z1: Rio Grande do Sul littoral, (c) Z2: Santa Marta Cape, (d) Z3: Florianópolis Island, (e) Z4: São Sebastião Island, (f) Z5: Arraial do Cabo. The color bar for all areas is forced to a maximum scale of $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ despite image (b) surpassing this value.</i>	p. 131
5.3	<i>Mean current velocity (m.s^{-1}) for the austral seasons. Summer (DJF), Autumn (MAM), Winter (JJA) and Spring (SON).</i>	p. 134
5.4	<i>Mean wave height (m) for the austral seasons. Summer (DJF), Autumn (MAM), Winter (JJA) and Spring (SON).</i>	p. 135
5.5	<i>Frequency filter applied to current velocity (Left) and mean wave height (Right). Scale values are in percentage. Five zones of interest were selected.</i>	p. 136
5.6	<i>(Left Panel) SV and (Right Panel) MV applied for the values of current velocity above $0,30 \text{ m.s}^{-1}$.</i>	p. 138
5.7	<i>(Left Panel) SV and (Right Panel) applied for the values of wave height above 1,50 m</i>	p. 142
5.8	<i>(A) Details of the 50 m isobath in the entire domain. The origin of the selected line is right above Z1. The distance from the origin is counted in kilometers at each zone. (B) Z1, (C) Z2, (D) Z4, (E) Z5. Red-greenish diamonds are points of interest for the upcoming sections.</i>	p. 143
5.9	<i>Global wavelet power spectrum across the space using Morlet wavelet for the current velocity at the 50 m isobath. Solid contour lines enclose regions of greater than 95% confidence level for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.95. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 144
5.10	<i>Global wavelet power spectrum across the space using Morlet wavelet for the spectral significant wave height at the 50 m isobath. Solid contour lines enclose regions of greater than 95% confidence level for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.95. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 145
5.11	<i>(A) Two-dimensional local (2 - 30 days averaged) wavelet power spectrum for the current velocity at the 50 m isobath. (B) Mean variance of the studied period, where values beneath the red tendency dashed line represents 95% of confidence level. (C) Temporal series of the spacial mean variance of each location. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 146
5.12	<i>(A) Two-dimensional local (2 - 30 days averaged) wavelet power spectrum for the spectral significant wave height at the 50 m isobath. (B) Mean variance of the studied period, where values beneath the red tendency dashed line represents 95% of confidence level. (C) Temporal series of the spacial mean variance of each location. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section and dashed red lines. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 147

5.13	<i>Integrated current velocity ($m.s^{-1}$) and wind velocity ($m.s^{-1}$) at ZI over the point P1 (A), used for the cross-wavelet analysis, as well as, the local (B) wavelet power spectrum of the time series using Morlet wavelet. Thick contour lines enclose regions of greater than 95% confidence for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.90. Cross-hatched regions indicate the cone of influence where edge effects become important. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 148
6.1	<i>(a) Study area located in the South-Southeastern Brazilian Shelf. In addition, the numerical grid used in this work with 205,617 nodes disposed in 20 vertical sigma levels. The red lines represent the oceanic liquid boundaries and the spiral represents the atmospheric surface conditions. Bathymetry is shown in the colorbar and also using the isolines for 50, 500, 2,000 and 3,000 m. The turbines farm are set in three regions marked with green rectangles with 171 turbines, (b) where the southern farm (State of Rio Grande do Sul) have 87 turbines, (c) the center farm (State of São Paulo) have 61 turbines while (d) the northern (State of Rio de Janeiro) have 23. At each region vertical cross sections (cyan lines) were taken for further analysis. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 156
6.2	<i>Longitudinal representation (axis x-z) of the influence of a turbine. Relation among the velocities are: $U_2 \geq U \geq U_1 \geq U_4 \geq U_3$. ZDI means Inferior Diverging Zone, while, ZDS is the Superior Diverging Zone. Adapted from Kolekar e Banerjee (2015) e Vogel et al. (2016).</i>	p. 161
6.3	<i>Diagram with the interaction of the modules used in this work.</i>	p. 162
6.4	<i>Mean power ($kW.day^{-1}$) of turbines at each site, (A) RS, (B) SP and (C) RJ. Magenta lines represents the boundary contour of the turbines farm.</i>	p. 166
6.5	<i>Time series of integrated power ($kW.day^{-1}$) considering the entire sites. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 168
6.6	<i>(Left panel) Local wavelet power spectrum for the time series of power converted at SP site using Morlet wavelet. Thick contour lines enclose regions of greater than 95% confidence for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.90. Cross-hatched regions indicate the cone of influence where edge effects become important. (Right Panel) Global wavelet power spectrum where values above tendency dashed line represents 95% of confidence. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)</i>	p. 169
6.7	<i>Rio Grande do Sul turbines site. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel), as the sites are represented by the magenta boundary line. (A and D) Mean superficial velocity ($m.s^{-1}$) with mean direction in vectors; (B and E) Bed shear stress ($N.m^{-2}$) and integrated bedload transport ($cm^2.s^{-1}$) in black isolines; (C and F) Evolution of the bottom (m) with mean bottom current direction in vectors.</i>	p. 171

- 6.8 *São Paulo turbines site. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel), as the sites are represented by the magenta boundary line. (A and D) Mean superficial velocity ($m.s^{-1}$) with mean direction in vectors; (B and E) Bed shear stress ($N.m^{-2}$) and integrated bedload transport ($cm^2.s^{-1}$) in black isolines; (C and F) Evolution of the bottom (m) with mean bottom current direction in vectors. p. 172*
- 6.9 *Rio de Janeiro turbines site. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel), as the sites are represented by the magenta boundary line. (A and D) Mean superficial velocity ($m.s^{-1}$) with mean direction in vectors; (B and E) Bed shear stress ($N.m^{-2}$) and integrated bedload transport ($cm^2.s^{-1}$) in black isolines; (C and F) Evolution of the bottom (m) with mean bottom current direction in vectors. p. 174*
- 6.10 *Vertical cross sections for the Rio Grande do Sul turbines site; colored surface shows mean transversal velocity ($m.s^{-1}$) while vectors show direction of resultant between vertical and transversal velocities. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel). (A and C) Refers to RS1 transect; (B and D) Refers to RS2 transect. See figure 6.1 b. for better locating the transects p. 176*
- 6.11 *Vertical cross sections for the São Paulo turbines site; colored surface shows mean transversal velocity ($m.s^{-1}$) while vectors show direction of resultant between vertical and transversal velocities. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel). (A and D) Refers to SP1 transect; (B and E) Refers to SP2 transect; (C and F) Refers to SP3 transect. See figure 6.1 c. for better locating the transects p. 177*
- 6.12 *Vertical cross sections for the Rio de Janeiro turbines site; colored surface shows mean transversal velocity ($m.s^{-1}$) while vectors show direction of resultant between vertical and transversal velocities. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel). (A and C) Refers to RJ1 transect; (B and D) Refers to RJ2 transect. See figure 6.1 d. for better locating the transects p. 178*

Lista de Tabelas

1.1	Definição de conversores de energia de acordo com seu princípio de funcionamento. (ver figura 1.1)	p. 6
1.2	Status das tecnologias para a geração de energia através das correntes marinhas em geral (incluindo maré) (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)). A potência indicada é fornecida pelo desenvolvedor. NF = Não Fornecido.	p. 12
2.1	Parâmetros utilizados no módulo de conversão de energia.	p. 57
2.2	Utilização de níveis sigma de acordo com diferentes autores, modelos utilizados e ambientes de estudo. σ : Níveis sigma; PCA: Plataforma Continental Adjacente; NI: Não Informado; DF: Diferenças Finitas	p. 68
3.1	Configuração dos computadores utilizados em todas as etapas do desenvolvimento da tese.	p. 83
3.2	Estimativa de tempo para o modelo hidrodinâmico acoplado ao morfodinâmico. A malha desta simulação contém 205.617 nós, e 20 níveis verticais totalizando 4.112.340 de nós.	p. 83
3.3	Configuração das simulações de sensibilidade de malha.	p. 85
3.4	Posição dos pontos comparados e a cidade mais próxima como ponto de referência.	p. 89
3.5	Diferença entre as malhas em alta e baixa frequência.	p. 90
3.6	Simulações para a verificação de parâmetros. Coeficiente de Influência do Vento (CIV); Variável (Var); Variação Temporal dos dados de vento em horas (Vt). . . .	p. 91
3.7	Configuração definitiva das simulações.	p. 92
3.8	Configuração das simulações para verificação da parametrização escolhida.	p. 96
3.9	Informações dos equipamentos (PNBOIA) nos quais os dados foram utilizados nas comparações. T_i e T_f se referem, respectivamente, ao tempo inicial e final das series temporais utilizadas nas comparações. As séries podem se estender além deste período.	p. 97

3.10	Indicadores de performance utilizados e o resultado desejado para encontrar a melhor concordância entre modelo e observação. <i>n</i> : Quantidade de dados observados <i>obs</i> : Dado observado; <i>mod</i> : Dado modelado; <i>obs_{mean}</i> : Média dos dados observados; <i>mod_{mean}</i> : Média dos dados modelados; <i>obs_{var}</i> : Variância dos dados observados; <i>mod_{var}</i> : Variância dos dados modelados;	p. 102
3.11	Comparação dos indicadores de performance entre intensidade da corrente e suas componentes dos modelos contra as três localidades das PNBOIAS. T-3D : TELEMAC-3D; HYC : HYCOM; TxH : TELEMAC-3D como dado modelado e HYCOM como dado observado. RMSE, MAE estão em $m.s^{-1}$	p. 104
3.12	Configuração definitiva das simulações.	p. 106
4.1	Configuração dos testes de validação das simulações das ondas. O cabeçalho da tabela representa os parâmetros testados sendo: (A) Número de frequências, (B) Frequência mínimas, (C) Variação da frequência, (D) Número de direções, (E) Coeficiente de geração do vento, (F) Curva de crescimento devido ao vento, (G) Coeficiente de arrasto do vento, (H) Coeficiente de arrasto com o fundo, (I) Coeficiente de dissipação por <i>whitecapping</i>	p. 109
4.2	Indicadores de performance e parâmetros estatísticos utilizados e o resultado desejado para encontrar a melhor concordância entre modelo e observação. <i>n</i> : Quantidade de dados observados <i>obs</i> : Dado observado; <i>mod</i> : Dado modelado; <i>obs_{mean}</i> : Média dos dados observados; <i>mod_{mean}</i> : Média dos dados modelados; <i>d_i</i> : Diferença entre grupos da boia e modelo.	p. 113
4.3	Comparação dos indicadores de performance entre Altura Significativa das ondas (<i>H_{mo}</i>) e Período de Pico (<i>T_p</i>) em relação as três localidades das PNBOIAS, além da boia pertencente a FUGRO. RMSE, MAE, BIAS, <i>mod_{mean}</i> , <i>obs_{mean}</i> , <i>mod_{std}</i> , <i>obs_{std}</i> estão nas unidades dos parâmetros analisados, e SI está em porcentagem.	p. 114
4.4	Configuração definitiva da simulação das ondas.	p. 115
5.1	Measurements used to assess the performance of the model against buoy. <i>n</i> : Number of observations or samples <i>obs</i> : Observed values; <i>mod</i> : Modeled data; <i>obs_{mean}</i> : Mean of observed values; <i>mod_{mean}</i> : Mean of modeled values; <i>obs_{var}</i> : Variance of observed values; <i>mod_{var}</i> : Variance of modeled values; <i>d_i</i> : Difference between ranks of buoy and model.	p. 128
5.2	Comparison between statistical metrics for wave and current data. Spectral significant wave height (<i>H_{mo}</i>), peak period (<i>T_p</i>) and current intensity (Int) analyzed among the three PNBOIA buoy and also a FUGRO buoy. RMSE, MAE, BIAS, <i>mod_{mean}</i> , <i>obs_{mean}</i> , <i>mod_{std}</i> , <i>obs_{std}</i> are in the same units of the parameters, SI is in percentage. NA = Not Applied.	p. 129
5.3	Variability analysis between wave and current data. DS and DM stands for Dominant Season and Month, respectively in opposition for WS and WM meaning Weaker Season and Month. SV and MV are dimensionless. Months and seasons are abbreviate until their third letter. Zones ranging from 1 to 5 according to figure 5.2.	p. 139
6.1	Parametrization of the models setup.	p. 164
6.2	Sites power analysis. Mean, standard deviation (<i>Std</i>), maximum (<i>Max</i>) and integrated (<i>Int</i>) power were compared against each site.	p. 167

Lista de Símbolos

α	Coeficiente de troca de calor ($Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)
$\Delta\rho$	Varição da massa específica (kg/m^3)
ν	Coeficiente de viscosidade cinemática (m^2/s)
ω	Velocidade angular de rotação da Terra ($7.292 \times 10^5 \text{ rad/s}$)
Ω	Efeito Doppler
ρ_0	Massa específica de referência (kg/m^3)
f_u e f_v	Força de coriolis
g	Aceleração gravitacional (m/s^2)
p	Pressão (Pa)
p_{ar}	Pressão do ar (Pa)
p_{atm}	Pressão atmosférica (Pa)
p_d	Termo da pressão dinâmica (kg/m^3)
t	Tempo (s)
U	Primeira componente da velocidade (m/s)
V	Segunda componente da velocidade (m/s)
W	Terceira componente da velocidade (m/s)
z	Profundidade de uma camada qualquer (m)
Z_{ref}	Camada muito fina concentrada próxima ao fundo
Z_s	Elevação da superfície (m)
α_{mpm}	Coeficiente para o transporte de sedimentos pelo fundo
β	Fator empírico
$\nabla^2(U)$ e $\nabla^2(V)$	São os operadores laplacianos no plano das coordenadas cartesianas
\mathbf{k}	Número de onda, onde $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$
\dot{g}	Variável hipotética
\dot{x}	Derivada total de uma variável
ε	Dissipação da energia cinética turbulenta
η	Elevação do nível do mar
η_w	Elevação do nível do mar causada pelas ondas
∞	Infinito
κ	Constante de von Kármán
μ	Fator de correção para a tensão de fricção superficial
ν_C	Coeficiente de difusão turbulenta associada ao traçador
ν_T	Coeficiente de difusão de calor na água
ω	Frequência angular absoluta
$\vec{\chi}$	Intensidade do vento (m/s)
\vec{u}_H	Velocidade horizontal na superfície livre do fluido
∂	Derivada Parcial
ϕ	Fluxo de calor
Φ_b	Transporte de sedimentos pelo fundo

Φ_s	Taxa adimensional do transporte de areia induzido por correntes
Ψ	Vetor derivada total dos termos fonte das ondas
ρ	Massa específica da água (kg/m^3)
ρ_r	Massa específica relativa ($kg.m^{-3}$)
ρ_{ref}	Massa específica de referência ($\rho_{ref} = 999.972 kg.m^{-3}$)
ρ_s	Massa específica do sedimento ($kg.m^{-3}$)
σ	Coordenada sigma
σ	Frequência angular intrínseca ou relativa
σ^2	Relação de dispersão
τ_0	Tensão de fricção superficial ($N.m^2$)
τ_c	Atrito cisalhante crítico adimensional para os sedimentos em movimento inci- piente ($N.m^{-2}$)
$\langle \eta_w^2 \rangle$	Variância da elevação do nível do mar
θ'	Parâmetro de Shields
θ	Direção da onda
θ_m	Discretização da direção
Θ_c	Número crítico de Shields ou atrito cisalhante crítico adimensional
θ_c	Parâmetro crítico de Shields
θ_i	Número finito de direções relativas de onda
Δt	Tempo total da simulação
φ	Coordenada da direção da corrente
ϖ	Fase da onda (radianos)
ζ	Coefficiente de eficiência da turbina
ϑ	Viscosidade dinâmica absoluta do fluido ($N.s.m^{-2}$)
a	Amplitude das ondas
a_{vento}	Coefficiente da influência do vento (adimensional)
a_m	Amplitude da onda para cada componente do elemento
b^0	Batimetria inicial
b^n	Batimetria no passo de tempo n
b^{n+1}	Batimetria no passo de tempo $n + 1$
C	Concentração de um traçador arbitrário
$C_\eta, P_{rt}, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constantes do modelo k- ε
C_g	Velocidade relativa de grupo das ondas
C_p	Calor específico da água ($J/kg^{-1} . ^\circ C^{-1}$)
C_f	Coefficiente de fricção adimensional
d	Altura da água
D_*	Função não dimensional do diâmetro do grão
d_{50}	Tamanho do grão com 50% de material fino por peso
E	Energia de ondas progressivas
f	Frequência da onda
f_1	frequência mínima
f_a	Frequência angular absoluta
F_{fonte}	Taxa de criação do traçador

f_n	Discretização da frequência
f_{r_i}	Número finito de frequências relativas de onda
f_r	Frequência relativa
F_x	Termo fonte da quantidade de movimento da equação u
F_y	Termo fonte da quantidade de movimento da equação v
G	Fonte devido a forças gravitacionais
h	Profundidade da água (m)
H_{mo}	Altura de onda significativa espectral (m)
k	Energia cinética turbulenta do fluido
k_s	Altura da rugosidade do grão ($k_s \approx 3d_{50}$)
k_x	Componente x do vetor número de onda
k_y	Componente y do vetor número de onda
m	Coefficiente de Manning
m_0	Varição do estado do mar no momento de ordem 0 de espectro de onda (m^2)
mn	Momento na ordem n
mod	Dado modelado
mod_{mean}	Média dos dados modelados
mod_{var}	Variância dos dados modelados
N	Espectro direcional de ação das ondas
n	Porosidade do fundo não coesivo
n	Quantidade de dados observados
o_x e o_x	Origem em x e y
obs	Dado observado
obs_{mean}	Média dos dados observados
obs_{var}	Variância dos dados observados
P	Produção da energia turbulenta
P_{rt}	Número de Prandtl
P_t	Potência Térmica
q	Fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta
q	Razão entre as frequências
Q	Termos fonte da ação das ondas
q_b	Carga de transporte pelo fundo
Q_{b0}	Intensidade das taxas de transporte junto ao fundo
q_s	Carga de transporte em suspensão
Q_b	Carga de sedimentos transportados pelo fundo
Q_b	Transporte de volume sólido por unidade de comprimento ($m^2.s^{-1}$)
Q_s	Sedimento transportado em suspensão
Q_t	Carga total de sedimentos
S	Salinidade ($kg.m^3$)
s	Frequência angular intrínseca ou relativa
T	Temperatura da água na superfície do mar ($^{\circ}C$)
T_{ar}	Temperatura do ar ($^{\circ}C$)
t_f	Tempo final
t_i	Tempo inicial
T_{ref}	Temperatura de referência de $4^{\circ}C$
ts_n	Passo de tempo inicial

$u(z_1)$	Velocidade próxima ao fundo
u^n	Velocidade de corrente incidente
u_*	Velocidade de fricção
z^*	Sistema de coordenadas sigma
z_f	Profundidade local medida na malha
z_0	Distância vertical de uma borda limite ($z_0 = \frac{k_s}{30}$)
z_1	Distância mais próxima do fundo medida em coordenadas verticais z
Z_f	Elevação do fundo do mar (m)
$(\vec{\tau})$	Tensão de cisalhamento ($kg.m^{-1}.s^{-2}$)
(\vec{n})	Vetor normal
(\vec{u})	Velocidade de corrente qualquer (m/s)
(θ)	Latitude em graus
(u)	Componente zonal da velocidade de corrente (m/s)
(v)	Componente meridional da velocidade de corrente (m/s)
A	Área da Turbina (m^2)
E	Espectro direcional de energia
F	Variância da densidade direcional do espectro
H	Altura do conversor (m)
ND	Números de direções
NF	Números de frequência
P	Potência (W)
R	Raio da turbina (m)
v	Velocidade da corrente incidente (m/s)

Lista de Abreviaturas

ACAS	Água Central do Atlântico Sul
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AREPE	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
ARGO	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BC	Brazil Current
BCC	Corrente Costeira do Brasil
BCC	Brazil Coastal Current
CESUP	Centro Nacional de Supercomputação na Região Sul
CHC	<i>Canadian Hydraulic Centre</i>
CIV	Coefficiente de Influência do Vento
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONVERSUT	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
CTD	<i>conductivity temperature depth</i>
D_p	Direção das ondas
DELFT3D-	Modelo morfodinâmico da DELFT
FLOW	
DF	Diferenças Finitas
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DM	Dominant Month
DS	Dominant Season
DSR	Divisão de Sensoriamento Remoto
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ECOPEL	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
ECOS	<i>Easy Coupling Oil System</i>
ECOSAR	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
EMC	<i>Environmental Modeling Centre</i>
ENSO	El Niño Southern Oscillation
EPA	Environmental Protection Agency
EPRI	Electric Power Research Institute's
ER	Erro Relativo
ERA	European Reanalysis
EUA	Estados Unidos da América
FES	Finite Element Solution
FUGRO	FUnderingstechniek en GRONDmechanica, empresa holandes
GEBCO	<i>General Bathymetric Chart of the Oceans</i>
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
GOOS	Global Ocean Observation System
GOW	Global Ocean Wave

HYC	HYCOM
HYCOM	<i>HYbrid Coordinate Ocean Model</i>
H_s	Altura significativa das ondas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de concordância de Willmott
IEA	International Energy Agency
IEAPM	Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INt	Integrated
ITCZ	Intertropical Convergence Zone
LANSD	Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos
LA-Plata	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
LEPLAC	Levantamento da Plataforma Continental Brasileira
Lidar	Light Detection And Ranging
MAE	Erro Médio Absoluto
Max	Maximum
MC	Corrente das Malvinas
MCT	Marine Current Turbines
MCT-II	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
MSE	Erro Quadrático Médio
MURD	Multidimensional Upwind Residual Distribution
MV	Monthly Variability Index
<i>mod</i>	Dado modelado
<i>mod_{mean}</i>	Média dos dados modelados
<i>mod_{var}</i>	Variância dos dados modelados
<i>n</i>	Quantidade de dados observados
NAO	North America Oscillation
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCODA	<i>Navy Coupled Ocean Data Assimilation</i>
ND	Números de Direções
NE	Northeast
NF	Números de Frequência
NI	Não Informado
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OES	Ocean Energy Systems Initiative
open	Consórcio de modelos de acesso livre
TELEMAC-	
MASCARET	
OSU	<i>Oregon State University</i>
OTPS	<i>OSU Tidal Prediction Software</i>
<i>obs</i>	Dado observado
<i>obs_{mean}</i>	Média dos dados observados
<i>obs_{var}</i>	Variância dos dados observados
PC	Corrente da Patagônia

PCA	Plataforma Continental Adjacente
PCSSB	Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira
PNBOIAS	Programa Nacional de Boias
POM	<i>Princeton Ocean Model</i>
PPGMC	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
PPW	Água da Pluma do Rio da Prata
PRH - 27	Programa de Recursos Humanos
PRONEX	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
R	Coefficiente de Correlação de Pierson
R&D-EDF	Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia Elétrica Fran- cesa
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
ReviZZE	Programa de Revisão da Zona Econômica Exclusiva
RGC	Corrente do Rio Grande
RJ1 e RJ3	Transectos na região dos sítios do Rio de Janeiro
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
ROC	Renewable Obligation Certificate
RS1 e RS2	Transectos na região dos sítios do Rio Grande do Sul
RVAR	Relação de Variância
rViés	Viés Relativo
r_s	Coefficiente de Correlação de Spearman
SACW	South Atlantic Central Water
SASA	South Atlantic Subtropical Anticyclone
SASW	Água Subantártica de Plataforma
SAW	Água Subantártica
SBB	Southeast Brazil Bight
SBS	Southern Brazilian Shelf
SCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
SI	Índice de Espalhamento
SISYPHE	Módulo morfodinâmico
SINAPAD	Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho
SIODOC	Sistema Integrado de Obtenção de Dados Oceanográficos
SO	Sudoeste
SOI	South Oscillation Index
SP1, SP2 e SP3	Transectos na região dos sítios de São Paulo
SS	Inclinação Média Quadrática
Std	Standard deviation
STSW	Água Subtropical de Plataforma
SUESTE	Projeto de Pesquisa realizados pela FURG
SV	Seasonal Variability Index
SW	Southwest
T-3d	TELEMAC-3D
T_p	Período das ondas
TELEMAC	Sistema TELEMAC, composto por diversos módulos
TELEMAC-3D	Módulo hidrodinâmico tridimensional

TOMAWAC	Módulo ondulatório - <i>TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation</i>
TW	Tropical Water
TxH	TELEMAC-3D como dado modelado e HYCOM como dado observado
UNIVALI	Universidade do Vale do Itajaí
Var	Variável
Vt	Variação Temporal dos dados de vento em horas
WAM	Wave Model
WEC	World Energy Council
WERATLAS	Atlas de recursos energéticos europeu
WN	Weaker Month
WS	Weaker Season
WW3	<i>WAVEWATCH III</i>
XBT	<i>Expendable bathythermographs</i>
Z1, Z2, Z3 e Z4	Referentes a posições de zonas na figura 2.7
ZDI	Zona de Divergência Inferior
ZDS	Zona de Divergência Superior

Introdução

CAPÍTULO 1

Introdução

A demanda por eletricidade ao redor do mundo deve dobrar nos próximos 20 anos (EPE, 2017). Esta expectativa combinada com o comprometimento de redução significativa das emissões de CO₂ (Protocolo de Kyoto) aumentaram a busca por energias limpas e métodos de conversão energética socialmente aceitáveis.

Devido ao crescente impacto ambiental negativo advindo do uso tradicional de fontes energéticas associadas a combustíveis fósseis, aliada a possibilidade futura de redução e término destas reservas, muitos países vêm investindo e iniciando processos de ampliação de sua matriz energética, buscando contornar os limites e restrições impostos por regulações ambientais (Turkenburg et al., 2012).

A maioria dos governos europeus introduziram formas de encorajar o desenvolvimento e a aceitação de energias renováveis, seja através de incentivos diretos ou favorecendo tributações e tarifas (créditos de carbono, (Parkinson e Djilali, 2015) e *Renewable Obligation Certificate* (ROC) Newbery (2016)) para o uso de energia elétrica advinda de fontes renováveis. Ainda assim, a maioria dos projetos de implantação de fontes renováveis consiste em energia solar e eólica, enquanto que energias de origem marinha ainda encontram barreiras práticas para sua implementação.

As fontes alternativas de energia possuem custos mais altos de utilização quando comparadas às

fontes convencionais e, neste sentido têm sido historicamente pouco atraentes para os investidores. Entretanto, esta tendência vem se alterando ao longo dos últimos anos, pois no ano de 2004, por exemplo, o custo da conversão de energia eólica caiu em 80% após um período de 30 anos, e neste sentido a capacidade eólica instalada tem sido aumentada significativamente (Policy, 2004). Embora pudessem ter sido tão exploradas quanto a energia eólica, a energia das ondas e das correntes continuam ainda pouco exploradas devido ao seu alto custo de implantação (Brown et al., 2006).

As regiões costeiras estão entre as regiões de crescimento mais rápido do mundo, gerando fortes pressões populacionais como para o abastecimento de água e energia. Em escala global, o panorama não é muito diferente, pois mais da metade da população dos Estados Unidos, por exemplo, vive a 80 *km* do litoral, próxima aos recursos energéticos marinhos (EPA, 2005). O crescimento da população nos estados ao longo da costa sudeste (Carolina do Norte, Carolina do Sul, Geórgia e Flórida) exige um maior fornecimento anual de energia enquanto a crescente pressão sobre o ambiente se acentua.

As fontes de energia dos oceanos podem ser categorizadas em: marés, ondas, correntes, gradientes térmicos e gradientes de salinidade (Bedard et al., 2010). Desenvolvimentos recentes demonstraram uma redução dos impactos ambientais quando o dispositivo de conversão é completamente submerso. Através de diversos estudos independentes, foi demonstrado que o impacto sobre os peixes e mamíferos marinhos é baixo devido ao lento movimento de tais dispositivos (EPRI, 2006). Existem muitas tecnologias emergindo para converter a energia destes recursos em energia elétrica. Entretanto, o primeiro passo para a conversão destes recursos consta no mapeamento abrangente dos mesmos, onde é esperado determinar a viabilidade e a acessibilidade das fontes, assim como o nível de conversão que pode ser atingido e seus impactos ao meio ambiente.

1.1 Energia das Correntes, Marés e Ondas Geradas pelo Vento

Avanços significativos nos conversores de ondas foram alcançados recentemente, além da crescente percepção, em vários países, das vantagens e possibilidades da aplicação de energias renováveis advindas das ondas. Em relação as tecnologias desenvolvidas, projetos de larga escala estarão prontos para aplicação nos próximos dez anos (Cornett, 2008) na Europa, entretanto em várias partes do mundo, o desenvolvimento e pesquisa dos recursos associados às ondas ainda permanecem pouco explorados.

Pontes et al. (1997) observaram que desde meados da década de 80, modelos numéricos de ondas geradas pelo vento estavam gerando resultados de boa qualidade e associaram estas estimativas de alta qualidade com a disponibilidade de recursos de energia das ondas em mar aberto. Como resultado desta iniciativa, os autores desenvolveram um atlas de recursos energéticos Europeu (WERATLAS) (Pontes, 1998).

Outro trabalho pioneiro na identificação de fontes energéticas de ondas foi o de Barstow et al. (1998). Estes autores obtiveram a densidade de potência das ondas em diversos pontos contornando à costa de todos os continentes utilizando 2 anos de altimetria de satélite da missão Topex/Poseidon. Este trabalho resultou em estimativas energéticas globais.

Recentemente, vários autores relataram avanços no detalhamento de fontes e recursos associados a conversores de ondas como: Reino Unido (ABP, 2004), Irlanda (Edwards et al., 2014a), Portugal (Pontes, 1998), Canadá (Cornett, 2006), Califórnia (Wilson e Beyene, 2007). Estes estudos abordaram dados provindos de boias, satélites, modelos de previsão de ondas ou uma combinação destes.

Cornett (2006) apresentou um inventário amplo de recursos energéticos ao longo da costa do Canadá nos Oceanos Pacífico e Atlântico, baseado em medidas de boias para 68 localidades, além de previsão numérica de ondas. Enquanto que em 2008, Cornett (2008) realizou um levantamento global sobre variabilidade dos recursos energéticos ondulatórios, através de 10 anos de dados do modelo WAVEWATCH III, e ainda gerou metodologias e resultados avançados aplicados e reanalisados até a atualidade.

No Brasil estudos de longo período sobre ondas e seu potencial energético ainda são recentes e inovadores (Contestabile et al., 2015; Reguero et al., 2015; Espindola e Araújo, 2017). Espindola e Araújo (2017) avaliaram 35 anos de resultados do modelo global ECMWF ERA-Interim em 49 pontos situados em toda a costa brasileira, avaliando variabilidade, o clima de ondas além de comparações com equipamentos de conversão existentes. Os autores concluíram que o Brasil possui de 8 a 21 KW.m^{-1} de potencial médio de ondas.

Contestabile et al. (2015) avaliaram os recursos energéticos das ondas na costa do estado de Santa Catarina, também através do uso de dados do modelo global ECMWF ERA-Interim, além de modelagem numérica com o modelo MIKE-21. A densidade média de potência encontrada foi de 8 a 14,5 KW.m^{-1} além de relacionar direções e frequências mais relevantes para a conversão

de alta energia. Reguero et al. (2015) utilizaram 61 anos de dados do modelo Global Ocean Wave (GOW - (Reguero et al., 2012a)) para estimar sazonalidade, interanualidade e variações de longo prazo, conseguindo relacionar potencial das ondas com índices climáticos globais como SOI (*South Oscillation Index*), NAO (*North America Oscillation*), entre outros.

Além disso, Reguero et al. (2015), afirmam a importância de melhor compreender a dinâmica atmosférica e sua variabilidade em relação aos processos geradores de ondas e como eles afetam cada estação do ano. Espindola e Araújo (2017) ressaltam que a direção dominante das ondas apresenta clara distinção de baixas para altas latitudes, e em adição, apresentam alta sazonalidade ao norte de 28°S (Contestabile et al., 2015).

Em relação aos dispositivos de conversão, eles podem ser divididos em três grandes categorias: (1) dispositivos costeiros; (2) próximos à costa e (3) em alto mar.

1. Dispositivos costeiros - *Shoreline* ou *onshore*: também são chamados de primeira geração. Estes dispositivos permitem acesso fácil para construção, instalação e manutenção, além de poderem estar próximos aos centros consumidores, permitindo fácil distribuição da energia gerada. Entretanto possuem menor potencial energético, pois as ondas que chegam à costa interagem com o leito oceânico e, conseqüentemente, têm sua energia reduzida.
2. Dispositivos próximos da costa - *Nearshore*: são chamados de segunda geração, e se utilizam da proximidade com à costa para o transporte e a distribuição da energia gerada, além disso ainda apresentam potencial energético superior.
3. Dispositivos em alto mar - *Offshore*: também chamados de terceira geração. Aproveitam os altos potenciais de energia presentes nas ondas em mar aberto, contudo, apresentam dificuldades de acesso para instalação e manutenção além da grande distância para transportar a energia gerada, causando maiores perdas pelo cabeamento de transmissão de energia.

Outra forma de classificar os dispositivos de energia das ondas do mar é através do seu princípio de funcionamento, de acordo com a definição de Falcão (2008) (tabela 1.1, em associação com a figura 1.1).

Por outro lado, a energia das correntes pode ser captada de duas formas: através da energia potencial ou da energia cinética, a qual consiste em aproveitar essencialmente a velocidade das correntes e

Table 1.1: Definição de conversores de energia de acordo com seu princípio de funcionamento. (ver figura 1.1)

Princípio Físico	Posição	Característica/Exemplo
Corpos Oscilantes	Submersos	Essencialmente translação vertical. Ex: AWS
		Rotação através de placas articuladas ao fundo. Ex: WaveRoller, Oyester
	Flutuantes	Essencialmente translação vertical. Ex: AquaBuoy e WabeBob
		Rotação. Ex: Pelamis
Corpos de Água Oscilante	Estrutura Fixa	Isolada. Ex: Limpet
	Estrutura Flutuante	Ex: Mighty Whale
Galgamento	Estrutura Fixa	Na costa. Ex: TAPCHAN
		Em quebra-mar. Ex: SSG
	Estrutura Flutuante	Ex: Wave Dragon

de massas de água associadas. A técnica utilizada, de uma forma geral, pode ser definida como eólica submarina, tendo aproximadamente os mesmos princípios de funcionamento e só diferindo o fluido com a qual interagem.

Atualmente, os países que comandam os avanços das pesquisas na conversão de energias oceânicas são: Reino Unido, França, Suécia, Noruega, Países Baixos, Dinamarca, Irlanda, Portugal, Espanha, Canadá, Federação Russa, China, Índia, Coreia, Austrália e Japão (Roberts, 1982; Reeve et al., 1991; Price e Probert, 1995; Sathiamoorthy e Probert, 1994; WEC, 2004, 2007; Xia et al., 2010; Lee et al., 2012; Obara et al., 2013). Entretanto estes avanços estão sendo realizados focando em energia das marés, cuja fonte pode ser facilmente controlada e sua direção (enchente e vazante) é facilmente prevista.

Outros países também estão iniciando seus avanços nas áreas de desenvolvimento e pesquisa, como Austrália, Bahrain, Bangladesh, Camarões, Coreia do Sul, Fiji, Turquia, França, Indonésia, Líbia, Nova Zelândia, Itália e Brasil (Probert, 1975; Hobday e Probert, 1990; Williams, 1994; Alnaser, 1995; Allen et al., 2008; Nagy e Körmendi, 2012; Amelio et al., 2012; Marques et al., 2012; Xing-gang et al., 2013; Kirinus et al., 2013; Molyneaux et al., 2013; Benli, 2013; Mohamed et al., 2013; Plew e Stevens, 2013; Singh e Choi, 2014; Goundar e Ahmed, 2014a; Ahmed et al., 2014; Fernandes e Rostami, 2015; Purwanto et al., 2015; Wirba et al., 2015; Kirinus et al., 2015; Kirinus e Marques, 2015b; Zhao et al., 2016; González-Gorbeña et al., 2016). As principais temáticas destes trabalhos consistem em acessar locais com possibilidade de conversão de energia renováveis, como solar, eólica, das

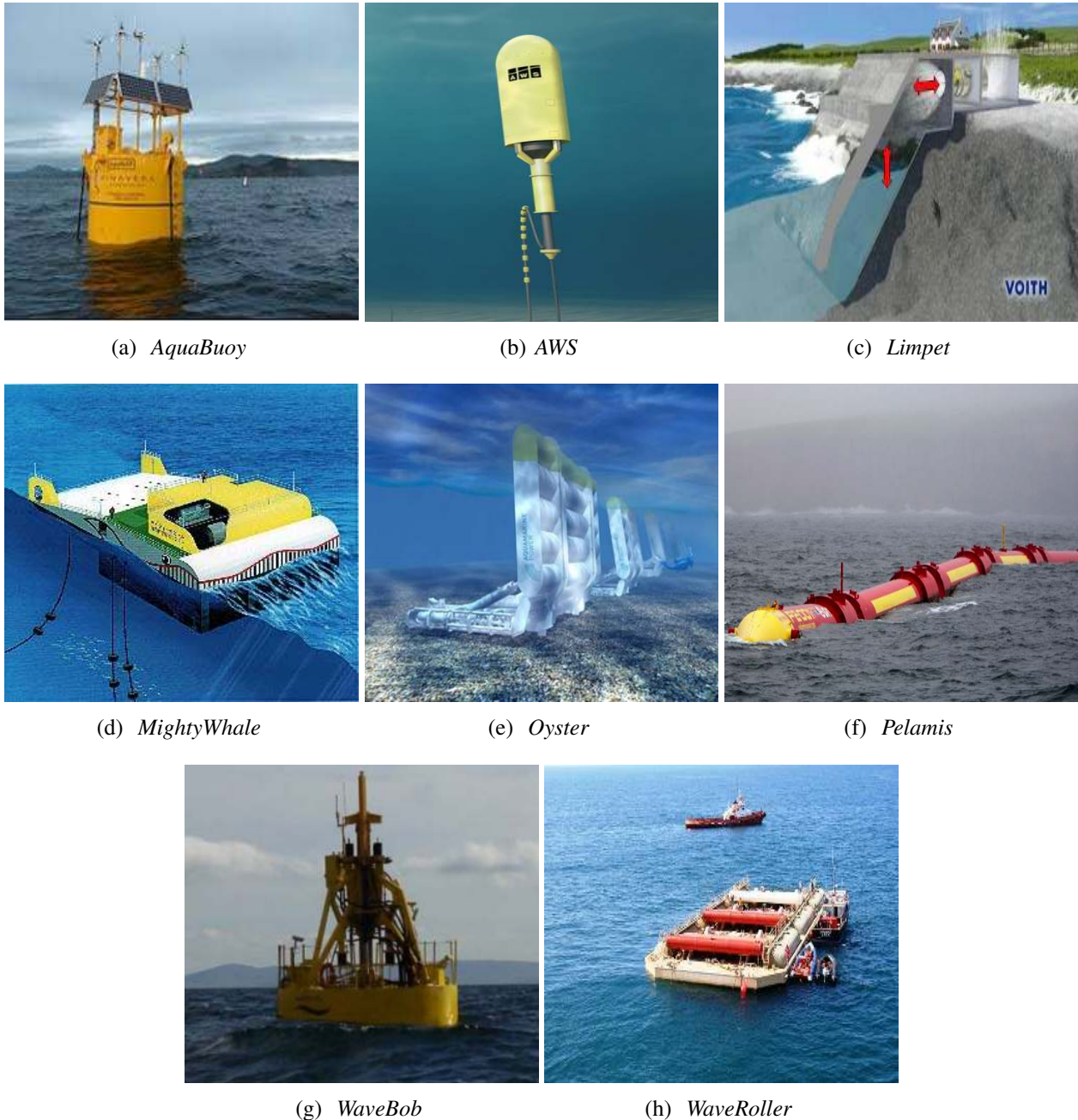


Figure 1.1: Alguns conversores de energia de ondas. Ver relação de princípios físicos e posicionamento na tabela 1.1.

marés ou correntes e então estimar taxas de conversão baseado em tecnologias vigentes.

Em termos de revisão de políticas energéticas, Nagy e Körmendi (2012) situaram a Europa dentro da visão da inclusão de fontes renováveis, enquanto que Newbery (2016) definiu as políticas de incentivo sobre o Reino Unido. Allen et al. (2008) avaliaram a perspectiva do uso de microgeradores domésticos no Reino Unido, encontrando potencial favorável para aplicação. Além disso, abordagens sobre melhorias e ou novas possibilidades de uso para a barragem Severn, no Reino Unido, são propostas (Roberts, 1982; Sathiamoorthy e Probert, 1994), inclusive envolvendo a geração e forneci-

mento elétrico (Reeve et al., 1991).

Robins et al. (2015) avaliaram a distribuição espacial das correntes de maré no noroeste da Europa com o intuito de melhorar a compreensão dos recursos energéticos destas fontes, concluindo que avaliações preliminares destes recursos devem ser baseadas em densidade de energia média anual, em vez da velocidade máxima da maré em determinado período do ano. Williams (1994) revisou as fontes de energias de ondas e marés para a França, Bali e Canadá apresentando resultados promissores.

Gorlov (2001), estudando a circulação gravitacional e algumas aplicações para a extração de energia, concluiu que estas são fontes substanciais de energia renovável para as futuras gerações. A agência Canadense de Hidrologia CHC (*Canadian Hydraulics Institute*) realizou um estudo utilizando modelagem numérica que mapeou a costa canadense produzindo um mapa dos recursos energéticos de fonte marinha da região, considerando as ondas geradas pelo vento e as correntes de maré (Cornett, 2006). Neste estudo foi verificado que a potência elétrica média disponível nos 190 pontos analisados equivaleria a aproximadamente 63% da demanda de energia canadense.

Um estudo similar foi realizado por Hall (2006) nos Estados Unidos, onde os autores identificaram as regiões com os maiores potenciais para a utilização de hidroenergia considerando como de baixo potencial as regiões com potência média anual de até 1 MW.ano^{-1} , e de médio e alto potencial, as regiões com potência média anual entre 1 e 30 MW.ano^{-1} . De acordo com Khan et al. (2009), a energia dos escoamentos de rios e estuários, correntes de marés e outros canais de água artificiais podem ser considerados como uma fonte viável de energia renovável. Defne (2010) investigou o potencial energético das ondas geradas pelo vento e correntes de maré na costa sudeste dos Estados Unidos, através da análise de dados e modelagem numérica, onde verificou um possível potencial de conversão que varia entre 1.0 e 3.0 MW.ano^{-1} . Walters et al. (2013) avaliaram numericamente turbinas de maré no Maine, Estados Unidos, e calcularam a fração teórica de potência convertida além de prever tensões estruturais.

Para a Austrália, um estudo com modelagem computacional avaliou a aplicação de energias renováveis e suas relações com os níveis de emissão de CO₂ (Molyneaux et al., 2013). A modelagem numérica também foi aplicada na Nova Zelândia (Plew e Stevens, 2013) para estimativa energética de turbinas nas correntes de maré no canal Tory. Alnaser (1995) avaliou fontes energéticas no Bahrain, demonstrando que o potencial das marés é de $0,340 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto que das correntes marinhas é

de 552 W.m^{-2} . Uma revisão do estado da energia renovável em Bangladesh demonstrou aumento de 0,3 para 0,5% no uso de renováveis, segundo estatísticas de 2012, sendo necessárias políticas de encorajamento para a utilização destas fontes de energia (Ahmed et al., 2014).

As possibilidades renováveis para Camarões foram abordadas por Wirba et al. (2015), demonstrando grande potencial exploratório, entretanto, com pouco incentivo governamental, o estudo sugeriu investimentos do setor privado e público. Estratégias energéticas mais abrangentes devem ser aplicadas na Líbia em prol do uso de suas riquezas renováveis (Mohamed et al., 2013). A Coreia do Sul, por outro lado, avalia a instalação de uma turbina de 1 MW estimando resultados promissores em sua região costeira sudoeste (Singh e Choi, 2014). Seguindo esta tendência, Goundar e Ahmed (2014a) testaram a aplicação de uma turbina para conversão marinha em Fiji durante 3 meses, resultando em 525 W.m^{-2} de potência. Em adição, estratégias de otimização energética estão sendo abordadas para Busan, uma das maiores cidades da Coreia do Sul, visando tornar esta cidade 100% renovável.

A avaliação do potencial dos recursos renováveis na Turquia (Benli, 2013) demonstra que o país é rico e abundante nesses recursos, entretanto a participação das energias renováveis na geração total de eletricidade é de apenas 35%, faltando políticas de incentivo para o investimento nestas fontes. Purwanto et al. (2015) abordam uma forma de otimizar a matriz energética da Indonésia, possibilitando melhorias de até 33% com o uso de fontes renováveis.

A China ainda discute revisar suas estratégias para cooperações internacionais visando a implementação de projetos em energias renováveis (Xin-gang et al., 2013). Zhao et al. (2016) analisaram a sistemática das políticas de incentivo do governo chinês para a geração de energia renovável, abrangendo energia eólica, solar e pequenas hidrelétricas (capacidade de geração de energia de uma unidade inferior a 50 MW), além de outras fontes.

No Brasil, estimativas iniciais de geração energética através das correntes foram feitas por Marques et al. (2012), em um estudo preliminar, onde investigaram a influência da instalação de turbinas hidrocinéticas na Plataforma Continental do Sul do Brasil, identificando as possíveis alterações nos processos naturais hidrodinâmicos e morfodinâmicos nesta área. Os resultados deste estudo são positivos em relação ao uso das correntes costeiras a fim de obter energia elétrica, onde um valor integrado médio anual de aproximadamente 5 GW.ano^{-1} foi obtido através da utilização de 6 conversores axi-

ais.

Neste estudo, os autores verificaram que os conversores de energia absorvem parte da energia cinética das correntes marinhas, gerando zonas de divergência e convergência de correntes, de acordo com a direção preferencial das mesmas. A maior consequência observada no ecossistema, durante o período estudado, foi o decréscimo da intensidade das correntes, o aumento da concentração de sedimentos suspensos e da evolução do fundo, nas proximidades dos conversores.

Mais recentemente, Kirinus et al. (2015) demonstraram que a Plataforma Continental do Sul do Brasil possui duas regiões com ótimo potencial energético, onde a região mais viável se encontra no entorno do Farol da Conceição, distante 11 km da costa. Nesta região a produção média de energia pode alcançar 40 MWh e ainda valores integrados de 13 GWh.ano⁻¹. Além disso, os autores determinaram através de um estudo de sazonalidade que, durante a primavera, ocorrem os eventos mais propícios à geração de energia. Estes autores concluíram que sítios de conversão de energia das correntes são fontes de energia qualificadas para incrementar a matriz energética brasileira, por serem viáveis e inesgotáveis.

Kirinus e Marques (2015b), investigaram mais a fundo os processos relacionados a implementação numérica ou estrutural de um sítio de turbinas na Plataforma Continental do Sul do Brasil, os autores observaram que os processos turbulentos afetam negativamente a conversão energética, pois uma turbina influencia no caminho do fluxo incidente da turbina seguinte. Além disso, o sítio de 10 turbinas localizado próximo ao Farol da Conceição atingiu uma produção energética anual de 59,39 GWh (16,5 MW), o suficiente para suprir 0,22 % do consumo energético do estado do Rio Grande do Sul em 2010.

O trabalho realizado por Timm (2017), definiu novos caminhos para a definição de sítios de turbinas hidrocínéticas na costa sul brasileira através da utilização do Método Design Construtal. Seus resultados comprovaram ganho de potência de até 24% em relação à estudos anteriores, este ganho se deve justamente por posicionar corretamente as turbinas em relação ao escoamento incidente no sítio, fazendo com que cada turbina converta o máximo de energia disponível das correntes costeiras.

1.1.1 Equipamentos de Conversão de Energia de Correntes

Khan et al. (2009) realizaram um estudo sobre os equipamentos de captação de energia aplicados

para corpos de água existentes, em funcionamento ou ainda em fases iniciais de pesquisa. Estes autores encontraram ao todo 76 equipamentos existentes, que incluem sistemas convencionais com a utilização de turbinas e sistemas não convencionais que não utilizam turbinas, sendo que, com algumas exceções, cada equipamento foi desenvolvido para aplicação em determinado local, correspondendo às características físicas e espaciais do local a ser instalado. As turbinas que mais se destacam para este uso, segundo Khan et al. (2009), são as axiais e as helicoidais.

As turbinas utilizadas para conversão de energia de correntes marinhas podem ser divididas em dois principais tipos: de eixo horizontal (conversores axiais) e de eixo vertical (conversores darrieus e helicoidais), sempre levando em consideração a orientação da corrente incidente.

Khan et al. (2009) analisaram as turbinas existentes demonstrando que existe dominância de turbinas axiais com capacidade comercial, por outro lado, outras turbinas predominam como conceito e sistemas parcialmente completos (em fase final de construção). Entretanto, ao abordar a porcentagem de turbinas em relação ao seu tipo, os autores encontraram grande dominância das turbinas axiais e verticais, com 43% e 33%, respectivamente.

Os desenvolvimentos significativos da última década ocorreram tanto para equipamentos de conversão de energia das marés, quanto de ondas, com pesquisas notáveis sendo realizadas, bem como, com algumas demonstrações de tecnologia apresentadas por diferentes desenvolvedores (Bedard et al., 2010). No campo da energia de correntes de maré ou correntes oceânicas, as turbinas de correntes marítimas de eixo horizontal passaram por pesquisas intensivas na última década.

Comparado com outros dispositivos, atualmente as turbinas de eixo horizontal parecem ser tecnologicamente e economicamente mais viável, além de uma série de turbinas de corrente marítima com possibilidades de implantação (OES, 2016). Atualmente, a tecnologia para conversão de energia através das correntes marinhas ainda se encontra em estágios iniciais com apenas alguns modelos conectados às redes elétricas (Gross, 2004). Vários modelos considerados disponíveis comercialmente podem ser encontrados na tabela 1.2 e figura 1.2.

Table 1.2: Status das tecnologias para a geração de energia através das correntes marinhas em geral (incluindo maré) (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)). A potência indicada é fornecida pelo desenvolvedor. NF = Não Fornecido.

Empresa	Dispositivo	Informações	Dimensões	Potência
Alstom Renewable Power (França) Fonte: Marines (2013)	TGL	Tripod fixo por pilares e pode ser erguido para a superfície	23m de altura por 23 de diâmetro	1 MW
Aquamarine Power Ltd. (Reino Unido) Fonte: Aquamarine (2008)	Neptune Tidal Stream Turbine	Rotores gêmeos de eixo horizontal. Design com 3 lâminas	NF	2.4 MW
Atlantis Resource Corporation PTE Ltd. (Singapura) Fonte: Atlantis (2008)	Nereus and Solon Tidal Turbines	Eixo de rotação horizontal Nereus é extremamente robusto Solon é uma turbina aquática canalizada ao fundo	22.5 m de altura por 18m de diâmetro	1 MW
Blue Energy Ltd. (Canadá) Fonte: Energy (2008c)	Tidal Fence Davis Hydro Turbine	Turbinas fixas em uma linha conhecida como grade de maré. Eixo de rotação vertical Design com 4 lâminas	10m de diâmetro	0,5 MW
Engineering Business Ltd. (Reino Unido) Fonte: Business (2008)	Stingray Tidal Energy Converter	Dispositivo alternativo Utiliza um gerador hidráulico	NF	0,150 MW
Flumill (Noruega) Fonte: Marines (2013)	Flumill	Possibilidade de se levantar a turbina para a superfície	45m de altura e 8 de diâmetro	2 MW
GCK Technology Ltd. (Estados Unidos) Fonte: Technology (2008)	Gorlov Helical Turbine	Eixo vertical de rotação Utiliza lâminas torcidas	1 m diâmetro , 2.5 m de altura	0,07 MW
Geophysical and Industrial Fluid Flows Laboratory (LEGI) of Grenoble University (França) Fonte: Bertrand et al. (2015)	HydroQuest	Três lâminas fixas do tipo Darrius	4m x 1m de diâmetro	NF
Hammerfest Strom AS (Noruega) Fonte: AS. (2007)	Tidal Stream Turbine	Eixo horizontal de rotação Design com 3 lâminas	30 x 23 m diâmetro	1 MW

Continua na próxima página

Table 1.2 – *Continuação da página anterior*

Empresa	Dispositivo	Informações	Dimensões	Potência
Helios Gem (França)	Gem BlueShark Power System	Turbina dupla acoplada à equipamento flutuante	3m de diâmetro x 2	0,250 MW
Kepler Energy (Reino Unido) Fonte: Kepler (2017)	Transverse Horizontal Axis Water Turbine (THAWT)	Turbina helicoidal extremamente longa	10m de diâmetro e 120m de comprimento	4,4 MW
Lunar Energy Ltd. (Reino Unido) Fonte: Energy (2008b)	Lunar Energy Tidal Turbine	Eixo horizontal de rotação Motor e Gerador Hidráulico	20 m de altura por 15 de diâmetro	1 MW
Marine Current Turbines Ltd. (Reino Unido) Fonte: MCT (2008)	SeaGen	Rotores Gêmeos de eixo Horizontal, com duas lâminas	21m de altura por 2 x 16 m de diâmetro	1.2 MW
Ocean Flow Energy Ltd. (Reino Unido) Fonte: Energy (2008a)	Evopod Tidal Turbine	Eixo de rotação horizontal. Estrutura fundeada com design de 5 lâminas	1.5 m de de diâmetro	NF
Open-Hydro Ltd. (Irlanda) Fonte: OpenHydro (2008); Refocus (2008)	Open Centre Turbine	Centro do rotor e estator abertos. Com eixo de rotação horizontal	6 m de a 16m de diâmetro	0,5 a 2 MW
Ponte di Archimede (Itália) Fonte: Marines (2013)	Kobold	Flutuante	5x5m	0,05 MW
Pulse Generation Ltd. (Reino Unido) Fonte: Generation (2008)	Pulse Tidal Hydrofoil	Dispositivo alternativo Utiliza um gerador hidráulico	NF	NF
SMD Hydrovision Ltd. (Reino Unido) Fonte: Hydrovision (2008)	TidEl Stream Generator	Rotores Gêmeos de eixo horizonta. Estrutura fundeada. 2 lâminas	8 m X 2.5 m de diâmetro	1 MW
Sabella (França) Fonte: Marines (2013)	D03, D10, D15	Plataforma sobe e desce a coluna de água independentemente	5.5 a 16m de altura por 3 a 15 de diâmetro	0,2 a 2 MW

Continua na próxima página

Table 1.2 – *Continuação da página anterior*

Empresa	Dispositivo	Informações	Dimensões	Potência
Scotrenewables Tidal Power Limited (Escócia) Fonte: Marines (2013)	SR250	Flutuante	33m de comprimento e 8 de diâmetro	0,25 MW
Seapower Fonte: Bedard (2005)	EximTTPP	Semelhante a uma turbina Savonius	3m de altura por 1.8 de diâmetro	0,44 MW
Tidal Energy Ltd. (Reino Unido) Fonte: Energy (2008d)	DeltaStream Turbine	Eixo de rotação horizontal Design com 3 lâminas	Diâmetro de 15 m foi proposto	1.2 MW
UEK (Suécia) Fonte: Bedard (2005)	Underwater Electric Kite	Turbina flutuante, semelhante a uma pipa	gêmea de 3 metros	0,4 MW
Verdant Power Ltd. (Estados Unidos) Fonte: Power (2008)	Free Flow Turbine	Eixo de rotação horizontal Design com 3 lâminas	21m de altura por 16 de diâmetro	1.2 MW
Voith Siemens (Alemanha) Fonte: Marines (2013)	HyTide	Plataforma sobe e desce a coluna de água independentemente	30m altura por 16 de diâmetro	1 MW

A escolha do rotor adequado para cada local depende de fatores econômicos, políticos, técnicos e ambientais (Khan et al., 2008; Grabbe et al., 2009; Güney e Kaygusuz, 2010; Vennell, 2011a; Marques et al., 2012; Kirinus et al., 2015; Kirinus e Marques, 2015b). Como as energias renováveis são emergentes, atualmente, estes fatores se tornam ainda mais relevantes. Em estudo brasileiro inédito, Fernandes e Rostami (2015), propõem a utilização de um turbina inovadora que consiste em uma placa plana vertical, que permite rodar livremente sobre um eixo de simetria vertical e explora o fenômeno de autorotação para converter a energia da correntes. A turbina se chama *Vertical Axis Autorotation Current Turbine* (VAACT). Entretanto, só existe até então em escala laboratorial.

O Brasil possui aproximadamente 8.000 km de costa e, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), cerca de 80% da população brasileira vive a menos de 200 km do litoral. O consumo de energia elétrica da população brasileira no ano de 2016 foi de 520

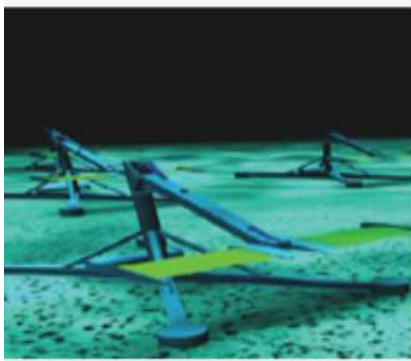
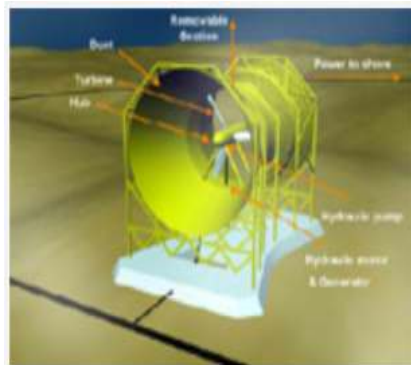
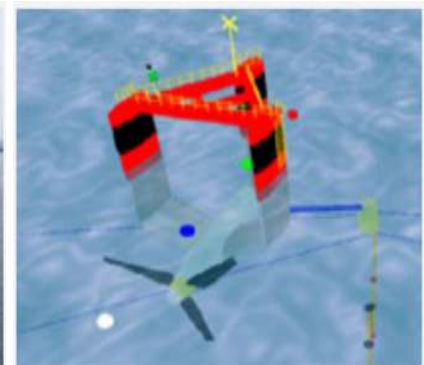
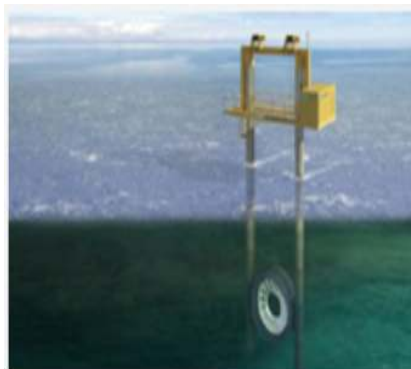
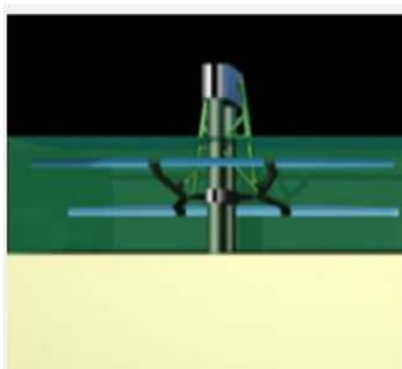
(a) *Neptune Tidal Stream Turbine*(b) *Nereus and Solon Tidal Turbines*(c) *Tidal Fence Davis Hydro Turbine*(d) *Stingray Tidal Energy Converter*(e) *Gorlov Helical Turbine*(f) *Tidal Stream Turbine*(g) *Lunar Energy Tidal Turbine*(h) *SeaGen*(i) *Evopod Tidal Turbine*(j) *Open Centre Turbine*(k) *Pulse Tidal Hydrofoil*(l) *TidEl Stream Generator*

Figure 1.2: Conversores descritos na tabela 1.2 (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)) (cont.).

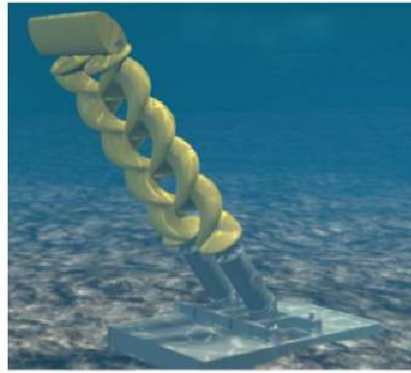
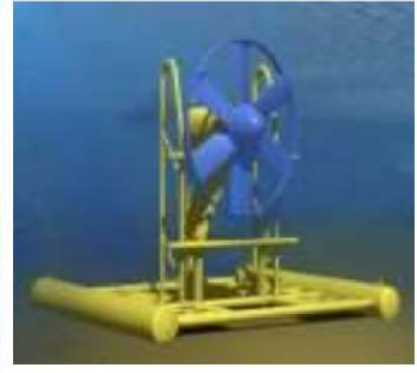
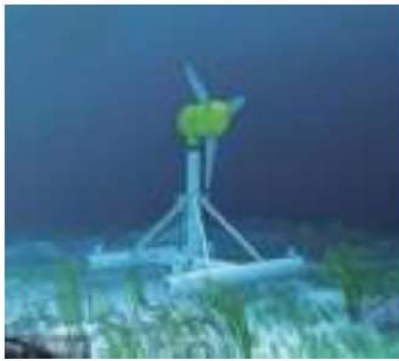
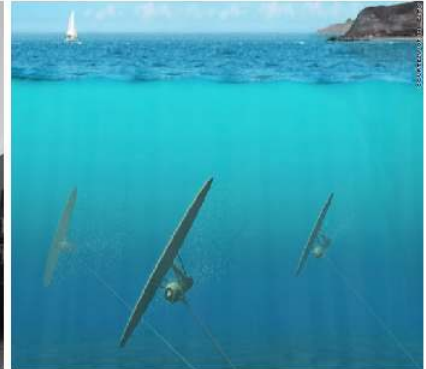
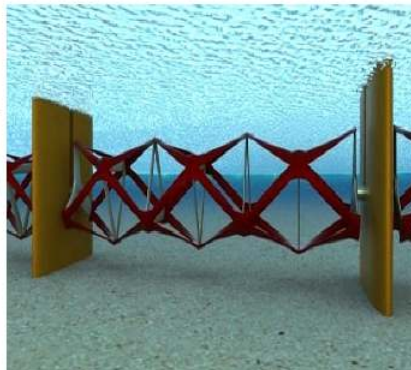
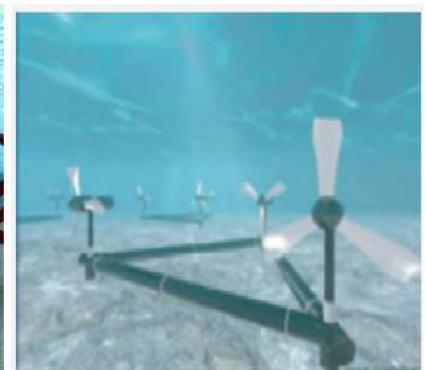
(a) *NTGL - Alstom*(b) *Flumill*(c) *D15 - Sabella*(d) *HyTide*(e) *SR250 - Scotrenewables TPL*(f) *Underwater Electric Kite*(g) *HydroQuest*(h) *THAWT - Kepler*(i) *DeltaStream Turbine*(j) *Free Flow Turbine*(k) *Hammerfest Strom*(l) *BlueShark*

Figure 1.2: Conversores descritos na tabela 1.2 (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)).

(m) *Kobold*

Figure 1.2: *Conversores descritos na tabela 1.2 (Adaptado de Bedard (2005); Rourke et al. (2010) e Marines (2013)).*

TWh, valor inferior aos 578,9 TWh produzidos pelo país, entretanto ainda existe a necessidade de importação de 40,8 TWh de energia externa (EPE, 2017). Novamente, no mais recente Balanço Energético Nacional, não houve menção a fontes de energias renováveis marinhas, além de ainda não existir um mapeamento efetivo da zona costeira brasileira no que diz respeito ao potencial energético utilizável para a conversão em energia elétrica.

1.2 Região de Estudo

A área de estudo consiste na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira (PCSSB) (localizada entre 21°S to 38°S, figura 1.3), que devido as diferenças de geomorfologia (Zembruski, 1979) é dividida entre Plataforma Continental Sul do Brasil (28°S até 35°S, figura 1.3, ao sul da linha tracejada) e Plataforma Continental Sudeste do Brasil (22°S até 28°S, figura 1.3, ao norte da linha tracejada). Estas regiões serão descritas separadamente afim de melhor representar a área de estudo.

1.2.1 A Plataforma Continental Sul do Brasil

A Plataforma Continental Sul do Brasil, localizada entre 28 °S e 35 °S (figura 1.3), apresenta uma linha de costa pouco acidentada, com orientação Nordeste - Sudoeste, formando um ângulo de aproximadamente 37° de inclinação em relação ao Norte geográfico. A batimetria desta região é bastante suave, com maior declividade e quebra de plataforma localizada por volta da isóbata de 180 m (figura 1.3), possuindo uma tendência de alargamento da plataforma continental em direção ao sul, característica da margem continental da América do Sul (Zembruski, 1979).

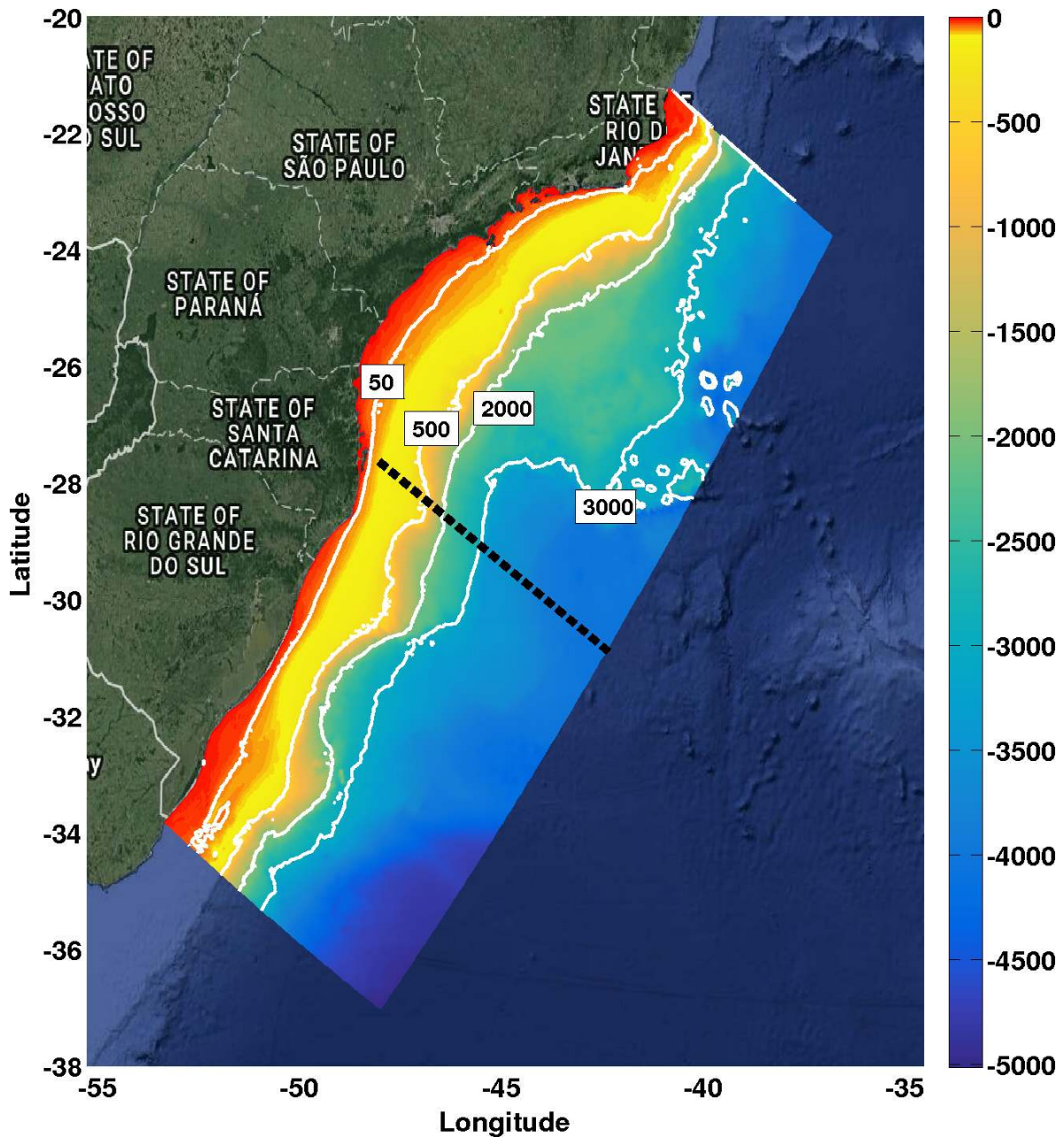


Figure 1.3: Área de estudo. (a) Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira, com batimetria até 5.000 m, com destaque para os quadrados numéricos representando as isóbatas de 50, 500, 2.000 and 3.000 m. A linha tracejada preta divide a Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira.

Esta região é também caracterizada por ser uma área de grande interesse econômico, largamente utilizada para navegação, em função dos Portos de Rio Grande, Montevideu e Buenos Aires, e também pela intensa atividade pesqueira, onde são capturados alguns dos principais recursos pesqueiros do litoral brasileiro (Haimovici et al., 1998). Isto em parte é devido à alta biomassa fitoplanctônica sustentada pela descarga da Lagoa dos Patos, pela pluma do Rio da Prata, e pela ressurgência na quebra da plataforma (Ciotti et al., 1995).

O estuário do Rio da Prata é a maior fonte de água doce para a Plataforma Continental adjacente

na região sudoeste do Atlântico Sul, com uma descarga média de $23.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Piola et al., 1999, 2004) e picos que chegam a mais de $60.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ em anos de eventos El Niño (Piola et al., 2005). As águas oriundas do Rio da Prata formam uma pluma que apresenta forte variação sazonal e interanual (Piola et al., 2005; Möller et al., 2008) em seu deslocamento para o norte, podendo, no inverno, alcançar regiões distantes cerca de 1.000 km da desembocadura do Rio da Prata. No verão, esta pluma recua para uma posição ao sul de 32°S .

Os aportes de água doce da Lagoa dos Patos, cuja desembocadura está próxima da latitude de 32°S , apresentam vazão média de $2.400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Vaz et al., 2006; Barros G. P. e Marques, 2012; Marques, 2012), podendo alcançar picos de $12.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ também em anos de evento El Niño (Möller Jr. e Castaing, 1999; Barros G. P. e Marques, 2012; Marques, 2012). Durante eventos de fortes vazantes, esta água de origem continental se mistura à água presente na plataforma continental adjacente, formando uma camada flutuante de menor massa específica, que pode ser misturada à Pluma do Rio da Prata (Burrage et al., 2008; Marques et al., 2009, 2010b,a, 2012). O aporte de água doce dos rios afluentes ao sistema é máximo durante o final de inverno e primavera, e mínimo no verão e outono (Marques, 2012; Vaz et al., 2006).

A Plataforma Continental Sul do Brasil é uma região caracterizada por uma grande variabilidade espacial e temporal de variáveis oceanográficas como: temperatura, salinidade, concentração de clorofila, nutrientes entre outros, como propriedades intrínsecas que são relacionadas às diversas massas de água encontradas na região (Castro et al., 2006). Com exceção das correntes de maré, as principais fontes geradoras destes movimentos podem estar associadas ao regime de ventos e aos efeitos produzidos por correntes de contorno oeste, além de eventuais processos ligados à flutuabilidade introduzida pela descarga dos rios. É comum distinguir uma porção proximal e uma porção distal da plataforma continental, referidas respectivamente, como plataforma interna e plataforma externa, as quais são geologicamente separadas pela isóbata de 50 m (Mendes, 1994).

O Oceano Atlântico Sudoeste é uma das regiões mais dinâmicas do oceano global (Chelton et al., 1990; Piola e Matano, 2001), sendo caracterizada por grandes contrastes termohalinos e intensa atividade de mesoescala (Gordon, 1989). Além da região da Confluência Brasil-Malvinas, conhecida pela alta variabilidade espacial e temporal (Podestá, 1997; Souza e Robinson, 2004), o Oceano Atlântico Sudoeste compreende a região costeira da Plataforma Continental Sul do Brasil, ambientes subtropicais e subantárticos.

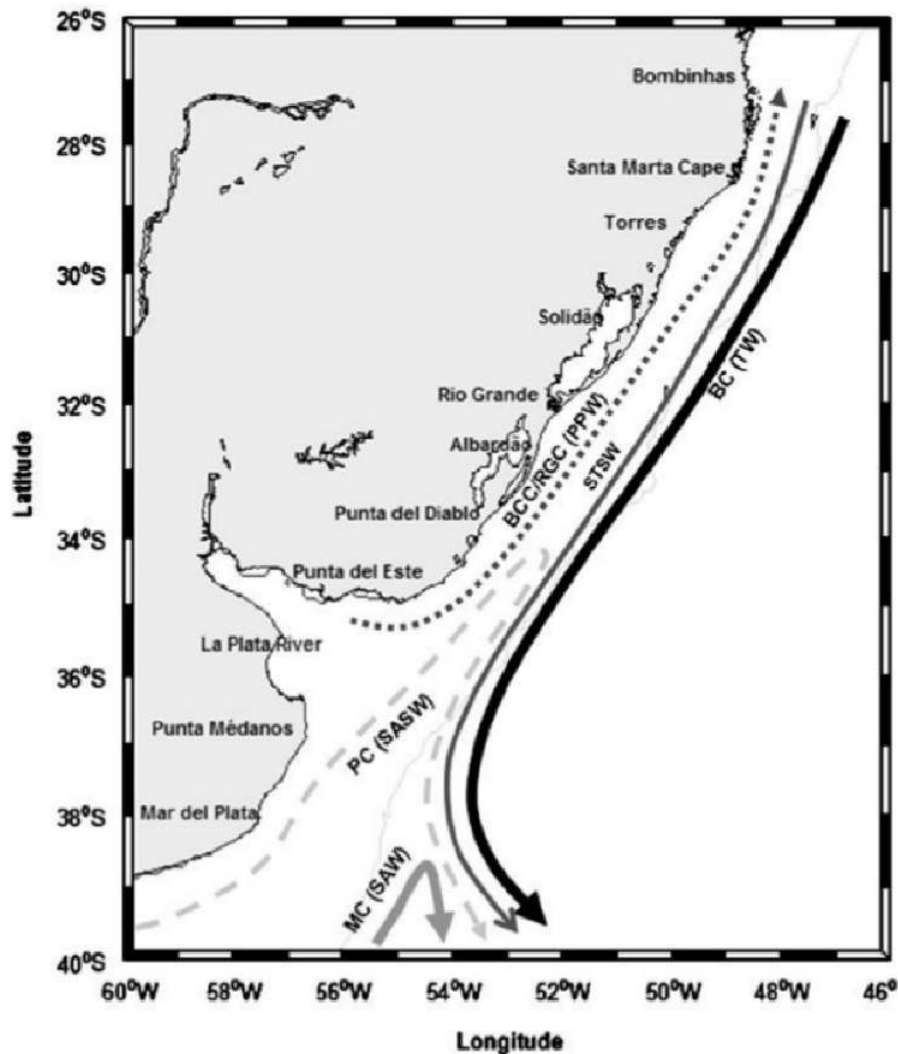


Figure 1.4: Correntes marinhas superficiais e massas de água no inverno. BC: Corrente do Brasil; MC: Corrente das Malvinas; PC: Corrente da Patagônia; BCC/RGC: Corrente Costeira do Brasil ou Corrente do Rio Grande; TW: Água Tropical; SAW: Água Subantártica; SASW: Água Subantártica de Plataforma; PPW: Água da Pluma do Rio da Prata; STSW: Água Subtropical de Plataforma. Fonte: Möller et al. (2008).

Na região da Plataforma Continental Sul do Brasil (figuras 1.4 e 1.5) ocorre o encontro de massas de águas de origem tropical, subantártica e do aporte continental, que através de suas distintas características, tornam a região dinâmica e com grande contraste termohalino. Sua circulação é influenciada principalmente pelas águas da pluma do Rio da Prata, pelos ventos e pela intensidade das correntes de contorno oeste que fluem pela quebra de plataforma Piola et al. (2008), onde existe uma grande variação dos parâmetros físicos devido a sazonalidade.

A alta variabilidade sazonal e interanual no campo de ventos (Piola et al., 2005; Braga e Krusche, 2000), condiciona a ocorrência de ventos de Nordeste (NE) dominantes no verão, que forçam o deslocamento das águas costeiras em direção ao Sul, e ventos de Sudoeste (SO) no inverno, que induzem seu deslocamento em direção ao Norte (Möller et al., 2008; Marques et al., 2009, 2010a,b,

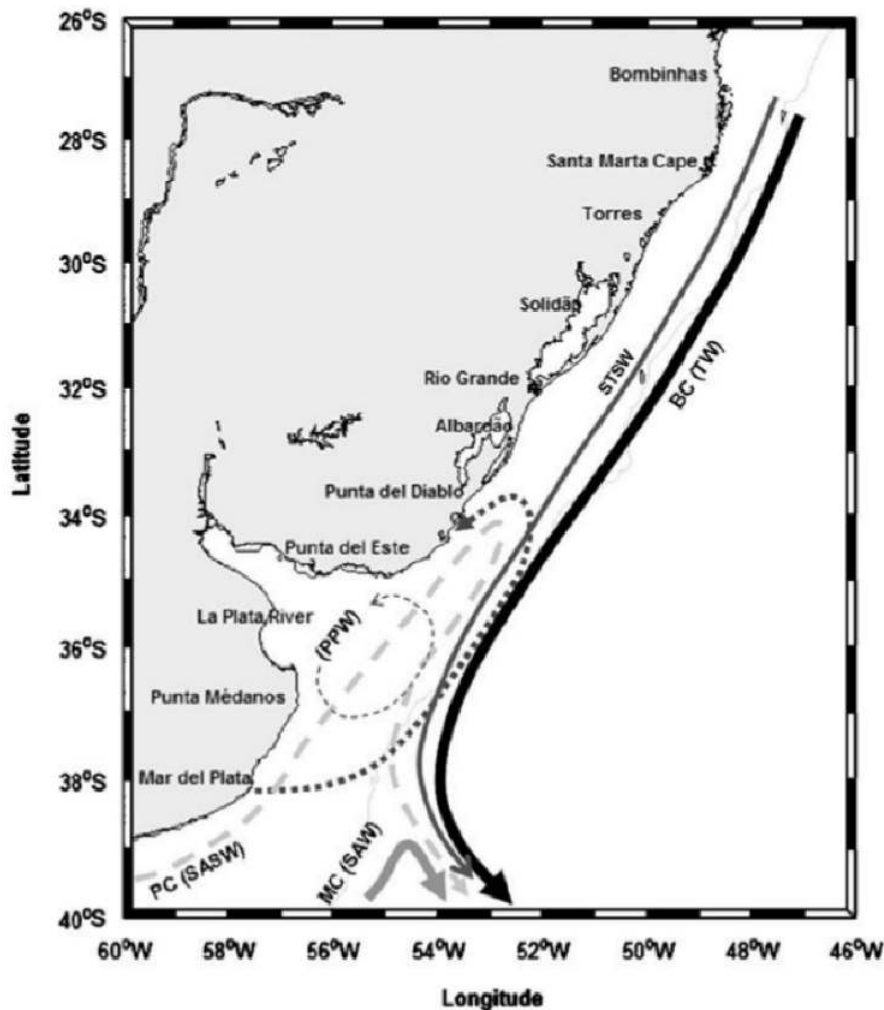


Figure 1.5: *Correntes marinhas superficiais e massas de água no verão. Fonte: Möller et al. (2008).*

2012) . Estas situações podem ser influenciadas de acordo com a intensidade do índice de Oscilação Sul (Piola et al., 2005).

Durante o inverno, a Plataforma Continental Sul do Brasil é dominada por águas de origem subantártica, sendo advectada para norte por uma corrente costeira presente apenas neste período. No entanto, no verão, a região é fortemente influenciada por massas de águas de origem tropical, transportadas para o sul, pela Corrente do Brasil. Além da influência de águas de origem oceânica, a região recebe águas de origem continental como do estuário do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos (Castro et al., 2006). No inverno a região superficial mais próxima a costa é ocupada principalmente pela Pluma do Rio da Prata (plataforma interna figuras 1.4 e 1.5), de forma que, até aproximadamente 100 km de distância estas águas se apresentam verticalmente homogêneas, tanto em temperatura como em salinidade.

No período que se estende de meados da primavera ao verão, a Pluma do Rio da Prata sofre uma

retração em direção sul, e um espalhamento em direção a mar aberto (Möller et al., 2008; Guerrero et al., 1997), isso ocorre devido à maior incidência de ventos de NE (Möller et al., 2008), e ao transporte gerado a partir do cisalhamento deste vento com a superfície do mar. A variação latitudinal da pluma tem influência sobre as demais massas de água presentes na região, seja permitindo que as mesmas ocupem a plataforma ou impedindo que este avanço ocorra (Rosana de Castro, 2009).

Durante o verão, grande parte da plataforma continental fica sob a influência da Água Subtropical de Plataforma e da Água Central do Atlântico Sul, com presença também da Água Tropical em regiões mais ao largo da costa (Möller et al., 2008). Deste modo, o gradiente de temperatura superficial entre a Plataforma Continental Sul do Brasil norte e sul não passa de 10 °C. Nesta estação, a Pluma do Rio da Prata ($S < 33.5$) fica restrita a área ao sul de Rio Grande (32 °S), alcançando maiores distâncias da costa (Rosana de Castro, 2009), de forma que a estratificação vertical fica diretamente relacionada aos gradientes verticais de temperatura.

Soares e Jr (2001) e Rosana de Castro (2009) demonstraram que, com exceção do verão, a área ao sul de Rio Grande está sempre sob a influência das águas da Pluma do Rio da Prata, o que traz impactos no campo de correntes desta região. Isto é confirmado através da série de estudos que, tendo por base a distribuição de temperatura e salinidade, indicam a importância do deságue continental do Rio da Prata e do efeito do vento nos processos de circulação ao longo da plataforma interna e média (Piola et al., 2005, 2008; Möller et al., 2008). Como estes fatores apresentam forte variabilidade sazonal e interanual é de se esperar que o mesmo ocorra com o regime de correntes.

A circulação na Plataforma Continental Sul do Brasil é influenciada principalmente por fenômenos meteorológicos e pelas águas da pluma do Rio da Prata (Piola et al., 2008). Segundo Souza e Robinson (2004) e Möller et al. (2008), as águas da Pluma do Rio da Prata são transportadas para o norte por uma corrente denominada Corrente Costeira do Brasil que flui em sentido contrário ao da Corrente do Brasil (figura 1.4). Enquanto a Corrente do Brasil transporta águas de origem tropical quentes e salinas em direção ao sul, a Corrente Costeira do Brasil transporta águas de baixa salinidade e muito frias em direção ao norte.

Portanto, é possível afirmar que diversos fenômenos com diferentes escalas temporais são responsáveis pela circulação altamente dinâmica na Plataforma Continental Sul do Brasil, como: circulação gerada pelo gradiente termohalino, a passagem de sistemas atmosféricos frontais que influem nos ven-

tos e na circulação local, a penetração de águas frias provenientes do sul e a influência das correntes de contorno oeste.

1.2.2 Plataforma Continental Sudeste do Brasil

A Plataforma Continental Sudeste do Brasil (23°S to 28°S) abrange o estado do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e uma parcela do norte de Santa Catarina (Loder et al., 1998), tem um formato de meia lua convexa, contendo varias ilhas, além da linha de costa variando entre rochosa e praias arenosas. A quebra de plataforma varia de profundidades entre 150 e 180 m, equivalentes a distâncias que variam de 70 a 230 km da costa. Em relação a feições locais, essa região é caracterizada por uma vasta presença de canais, que estão relacionados ao sistema de drenagem continental desenvolvido durante períodos de baixo nível do mar (de Mahiques et al., 2010).

De acordo com Castro (2014), a hidrografia da Plataforma Continental Sudeste do Brasil é composta principalmente por águas salgadas e quentes provenientes da Água Tropical (TW), com intrusões sub-superficiais da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) junto à costa. Estas intrusões causam eventos frequentes de ressurgência, especialmente durante o verão (Mascarenhas Jr. et al., 1971), enquanto que verticalmente ocorrem convergência de mais massas de água (Stramma e England, 1999; Palma e Matano, 2009). Durante o inverno, ocorre o intrusão de fluxo provindo do sul com águas de temperatura relativamente inferior, além de águas do Rio da Prata (Lentini et al., 2001; Möller et al., 2008).

A principal diferença entre a Plataforma Continental Sul do Brasil está na maior influência hidrodinâmica da Corrente do Brasil (BC) (Castro, 2014), pois ela meandra próximo a 200 m de profundidade em Cabo Frio (de Souza e Robinson, 2004), e flui ao longo da quebra da plataforma, apesar de parte se transportar por cima da plataforma continental (da Silveira et al., 2000). Toda a região é fortemente influenciada pela sazonalidade do campos dos ventos com predominância de ventos de nordeste (NE) (Piola et al., 1999; Dottori e Castro, 2009a). Enquanto que a região central da plataforma continental é influenciada por um escoamento em direção norte, da Corrente Costeira do Brasil (BCC), que auxilia no transporte de propriedades do sul (de Souza e Robinson, 2004; Möller et al., 2008).

Ventos de Nordeste tendem a prevalecer gerando uma corrente prevalente unidirecional para sul

(Castro, 2014), entretanto variações sazonais podem gerar ventos sinóticos que promovem a inversão do escoamento ao longo da plataforma continental interna, tanto no verão quanto inverno (Dottori e Castro, 2009a). O padrão de circulação atmosférico varia de acordo com a posição do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (Oliveira, 2002), que é responsável pela estabilidade termodinâmica na região. Este padrão resulta em uma circulação de ventos fracos de Nordeste, que pode ser interrompida pela chegada de sistemas transientes, tais como sistemas frontais, ciclones extratropicais, vórtices ciclônicos dos altos níveis de origem subtropical ou sistemas convectivos de mesoescala (Dereczynski e Menezes, 2015).

Durante o verão, a ASAS se torna mais fraca (em 32 °S) e se afasta da costa, enquanto que no inverno, o seu núcleo está localizado a 27 °S perdendo a habilidade de manter a estabilidade de ventos de Nordeste (Dereczynski e Menezes, 2015). Em adição, durante a estação do inverno, existe maior ocorrência de sistemas transientes e passagem de sistemas frontais. Estes sistemas intensificam as rajadas de ventos estabelecendo a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) de novembro a março Kousky (1988), aumentando a frequência da passagem de frentes para até uma por semana (Dereczynski e Menezes, 2015). Durante o verão este número decresce para ascender novamente durante a primavera (Oliveira, 1986; da. Silva, 2003; Andrade, 2007).

De acordo com Oliveira (1986), a primavera e o inverno são as estações com maior número de passagem de frentes (4,3 e 4 ocorrências ao mês, respectivamente), enquanto que no verão esse número reduz para 3 ocorrências ao mês. A importância do correto entendimento da dinâmica atmosférica nesta região se deve aos processos de geração das ondas, que variam a cada estação (Reguero et al., 2015). De acordo com Espindola e Araújo (2017), a direção das ondas apresenta clara distinção entre altas e baixas latitudes, ainda assim, as ondas possuem alta estabilidade nas regiões ao norte de 28 °S (Contestabile et al., 2015).

Sendo assim, os processos hidrodinâmicos da Plataforma Continental Sudeste do Brasil e sua dinâmica de massas de água controlam os fatores sedimentares que ocorrem na plataforma interna levando a estabilização de diferentes taxas sedimentares (Nagai et al., 2014). Michaelovitch de Mahiques et al. (2002) afirmaram que as taxas sedimentares são superiores próximo a Arraial do Cabo e ao sudeste da Ilha de São Sebastião. O primeiro por influência da Corrente do Brasil, enquanto que o segundo por presença de sedimentos terrígenos (Stramma e England, 1999; Campos et al., 2000a).

Em relação a hidrodinâmica costeira próxima a ilha de São Sebastião, Michaelovitch de Mahiques et al. (2002) afirmaram que a dominância dinâmica se deve à meandros da Corrente do Brasil para o mar aberto, que são potencializados pelo movimento para o norte causado pela água costeira, além da forte dominância por parte de correntes dirigidas pelo vento. Em adição, a ação de processos dinâmicos e complexas batimetria e linha de costa elevam o transporte de material terrígeno em suspensão das regiões costeiras para mar aberto (de Mahiques et al., 1999).

Devido a este intenso e variável padrão de circulação, a PCSSB possui um grande potencial para exploração de energia das correntes marinhas e das ondas. Entretanto, estudos ainda são necessários para aumentar o desenvolvimento e a possibilidade de implantação de dispositivos renováveis na costa brasileira, de forma a disponibilizar energia renovável e de baixo impacto ambiental à população.

1.3 Objetivo Geral

Realizar um mapeamento do potencial energético da PCSSB com respeito à utilização da energia cinética associada à circulação costeira passível de conversão em energia elétrica, bem como, investigar alguns impactos ambientais associados à utilização desta fonte de energia.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Investigar o potencial energético da PCSSB identificando sua variabilidade espacial e temporal, assim como, as regiões com os maiores e menores potenciais energéticos;
- Estimar as taxas de conversão de energia elétrica nas regiões escolhidas considerando parques de conversores hidrocinéticos de forma a estimar as taxas de conversão de energia integradas ao longo do tempo;
- Analisar as alterações ambientais na hidrodinâmica e na morfodinâmica, com relação à presença dos conversores hidrocinéticos nas regiões de maior potencial energético.

1.4 Hipótese

Existe um significativo potencial energético passível de conversão na circulação costeira da Plataforma Continental Sul-Sudeste brasileira e a conversão desta energia em energia elétrica gera im-

pactos significativos no padrão de correntes adjacentes e no transporte de sedimentos de fundo.

1.5 Estrutura da Tese

O **Capítulo 1** apresenta a introdução do trabalho, destacando a importância das pesquisas na área de energias renováveis, e a descrição da região de estudo, os aspectos hidrodinâmicos e físicos que controlam a dinâmica da região estudada, assim como os objetivos deste trabalho.

O **Capítulo 2** apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, descrevendo em detalhes as características dos modelos numéricos utilizados, as fontes de dados utilizadas para forçar o modelo, as ferramentas utilizadas na análise dos resultados.

O **Capítulo 3** possui a descrição das metodologias utilizadas para a realização da sensibilidade da malha numérica escolhida, além da parametrização escolhida através da verificação e validação do modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D . O **Capítulo 4** apresenta abordagem semelhante ao anterior com a validação do modelo de ondas TOMAWAC .

O **Capítulo 5** apresenta os resultados do primeiro artigo da tese, dissertando sobre a investigação do potencial energético da PCSSB para ondas e correntes, e relacionando a variabilidade temporal e espacial dos parâmetros moduladores da energia. No **Capítulo 6** consta o segundo artigo da tese, envolvendo os resultados hidrodinâmicos e morfodinâmicos associados a presença dos sítios de turbinas para conversão da energia das correntes, contendo ainda a avaliação do impacto no escoamento.

No **Capítulo 7** serão apresentadas as conclusões do estudo. No **Capítulo 8**, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros e algumas possibilidades de empregar a metodologia adotada neste trabalho para outros usos, no **Capítulo 9** as referências bibliográficas.

Metodologia

CAPÍTULO 2

Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido pela utilização de modelagem numérica tridimensional e análise direta dos resultados obtidos com a utilização do sistema de modelagem numérica open TELEMAC-MASCARET¹. Neste trabalho foi utilizado a versão v6p3 do sistema TELEMAC. Este sistema de modelagem se utiliza de uma abordagem modular e, neste trabalho, foram utilizados o módulo hidrodinâmico tridimensional TELEMAC-3D , o módulo morfodinâmico SISYPHE , o módulo ondulatório TOMAWAC e um módulo de conversão de energia de correntes que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos (LANSD²).

Estudos pioneiros da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos com este sistema de modelagem foram realizados por Fernandes et al. (2001, 2002) que, utilizando simulações bidimensionais e tridimensionais, descreveram as principais forçantes da circulação estuarina. Recentemente, Marques et al. (2009, 2010a,b, 2012) e Kirinus et al. (2012) realizaram uma série de estudos numéricos tridimensionais na região da Plataforma Continental Sul do Brasil, descrevendo a influência das principais forçantes que controlam a formação, o comportamento e o destino final da pluma da Lagoa dos Patos.

Processos morfodinâmicos foram estudados por Marques et al. (2010a) através do acoplamento

¹www.opentelemac.org

²www.lansd.furg.br

do módulo hidrodinâmico TELEMAC-3D a um módulo de transporte de sedimentos de fundo. Análises da relação entre as ondas geradas pelo vento e as correntes, bem como, as suas contribuições para os processos morfodinâmicos foram realizados por Silva et al. (2012). Em um estudo preliminar, Marques et al. (2012) e Kirinus et al. (2015); Kirinus e Marques (2015b), analisaram a instalação de conversores de energia de correntes na Plataforma Continental Sul do Brasil, e descreveram sua influência nos principais processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos da região, além de discutir alternativas locais mediante influências socioeconômicas (Pereira et al., 2014).

2.1 Módulo Hidrodinâmico - TELEMAC-3D

O sistema TELEMAC é formado por um conjunto de módulos, em duas ou três dimensões, que podem ser utilizados para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica, transporte de sedimentos e ondas geradas pelo vento em regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC-3D é o módulo do sistema TELEMAC que resolve as equações de Navier-Stokes assumindo ou não condições de pressão hidrostática. O modelo considera a evolução da superfície livre como função do tempo, e utiliza equações de advecção e difusão para solucionar o sistema de equações .

Este módulo é utilizado para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfície livre em rios, estuários, regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC-3D resolve as equações diferenciais utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo.

O Método dos Elementos Finitos (Hervouet, 2007; Lopes, 2013) é considerado o mais adequado para estudar sistemas compostos por diferentes compartimentos, como a Lagoa dos Patos e seu estuário, e a região costeira adjacente. Este método permite uma melhor representação dos acentuados gradientes batimétricos, da discretização detalhada da linha de costa além de aplicação de refinamentos diferenciados dentro da grade numérica, fato que por consequência, otimiza o tempo computacional. Desta forma, é possível calcular a elevação do nível do mar, as componentes das velocidades de corrente e as concentrações dos traçadores em cada ponto do domínio computacional.

Os principais resultados obtidos em cada ponto da malha computacional são a velocidade nas três direções e a concentração de quantidades transportadas, enquanto o principal resultado da malha na

camada superficial é a elevação da superfície livre.

Este modelo numérico pode levar em conta a influência de efeitos como:

- Influência da temperatura e salinidade da água do mar;
- Fricção com o fundo oceânico;
- Influência da força de Coriolis;
- Influência de condições meteorológicas como: precipitação, pressão atmosférica e ventos;
- Descarga de rios;
- Consideração de trocas de calor com a atmosfera;
- Fontes e sumidouros de fluido e/ou quantidade de movimento dentro do domínio;
- Modelos de turbulência simplificados ou mais complexos (comprimento de mistura, $k - \epsilon$ ou $k - \omega$);
- Zonas secas dentro do domínio, como ilhas;
- Transporte e difusão de traçadores pelas correntes com a criação ou desaparecimento de termos.

2.1.1 Equacionamento do modelo TELEMAC-3D

Todo o equacionamento do modelo TELEMAC-3D foi elaborado por Jean-Michel Hervouet e seus colaboradores que desenvolveram o sistema de modelagem em 1987 no Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia Elétrica Francesa (R&D-EDF). As equações são baseadas nas formulações de Navier-Stokes, um dos pilares da mecânica de fluidos, e informações mais detalhadas do seu equacionamento podem ser encontradas no livro *Free surface flows: Modelling with the finite element methods* (Hervouet, 2007) e no manual do modelo (Pham e Joly, 2016).

A equação da continuidade (equação 2.1) e a equação de conservação da quantidade de movimento (equações 2.2 e 2.3) são obtidas das relações da dinâmica dos fluidos geofísicos, e representadas em um sistema de coordenadas cartesiano. No módulo tridimensional, o modelo TELEMAC-3D considera as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq para resolver as equações de Navier-Stokes,

além de solucionar utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (Hervouet e Van Haren, 1996; Hervouet, 2007). Para que a maioria das equações possa responder a hipótese da pressão hidrostática é aplicada, a pressão sendo representada na equação 2.4.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \nu \nabla^2 (U) + F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \nu \nabla^2 (V) + F_y \quad (2.3)$$

$$p = p_{atm} + \rho_o g (Z_s - z) + \rho_o g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz + p_d \quad (2.4)$$

Onde, U , V e W representam as componentes da velocidade, t é o tempo, g a aceleração da gravidade, Z_s é a elevação da superfície, z é a profundidade em uma camada qualquer, ν é o coeficiente de viscosidade cinemática, p é a pressão, enquanto que p_{atm} é a pressão atmosférica, ρ_o é a massa específica média, $\Delta \rho$ representa a variação da massa específica, g a aceleração da gravidade, Z_s a elevação da superfície livre, z a profundidade de uma camada qualquer e F_x e F_y os termos fonte nas direções x e y , respectivamente. $\nabla^2(U)$ e $\nabla^2(V)$ são os operadores laplacianos no plano das coordenadas cartesianas.

A aproximação hidrostática considera a exclusão após análise de escala dos termos da velocidade vertical, W , que possuem pequenas escalas, desprezando assim a difusão, os termos fonte e a aceleração na vertical. Portanto, os termos que consideram as variações da pressão hidrostática e da gravidade são mantidos na equação vertical de quantidade de movimento, de forma que, a pressão em um ponto depende apenas da pressão atmosférica na superfície e do peso da coluna de água sobre a porção do fluido. Entretanto o TELEMAC-3D permite ao usuário escolher calcular as variações de pressão na coluna de água através da opção não-hidrostática, onde o termo W recebe equacionamento semelhante aos termos U e V .

A aproximação de Boussinesq considera que a diferença na massa específica ($\Delta\rho$) em relação a um valor de referência (ρ_o) é supostamente pequena. Desta forma, como a equação do estado relaciona a massa específica do fluido com a concentração dos traçadores na massa de água, é possível definir a sua influência nas equações hidrodinâmicas.

Segundo Pham e Joly (2016), o algoritmo básico do TELEMAC-3D pode ser dividido em 3 passos computacionais (três passos fracionados). O primeiro passo consiste em encontrar a componente da velocidade advectada apenas resolvendo os termos advectivos nas equações do momentum. No segundo passo computado, a partir das velocidades advectadas, a nova componente da velocidade leva em conta os termos difusivos e os termos fontes na equação da conservação da quantidade de movimento. Estas duas soluções permitem encontrar um campo de velocidade intermediário.

Finalmente, o algoritmo do TELEMAC-3D calcula a superfície livre através da integração vertical das equações da continuidade e do momentum, incluindo os termos de pressão. Todos os outros termos são levados em consideração nos dois passos anteriores.

Termos fonte das equações de quantidade de movimento

Fricção com o fundo

No fundo, a tensão de cisalhamento ($\vec{\tau}$) atuando no fluido se opõe a velocidade de corrente (\vec{u}) e pode ser descrita em relação a um vetor normal (\vec{n}), de acordo com a equação 2.5.

$$\vec{\tau} = -\vartheta \frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{n}} \quad (2.5)$$

Onde ϑ é a viscosidade dinâmica absoluta do fluido. O conhecimento desta tensão é possível a partir do conhecimento do comportamento do fluxo. Modelos de turbulência podem fornecer esta estimativa, baseado no conhecimento da velocidade de corrente próximo ao fundo, assim, equação 2.6 representa a tensão de cisalhamento.

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U} \quad (2.6)$$

Considerando, as unidades Da tensão de cisalhamento dadas em ($kg.m^{-1}.s^{-2}$), em que C_f é um coeficiente de fricção adimensional. Por definição, esta equação serve para a determinação da tensão

de cisalhamento sendo baseada na hipótese de que é obtida longe o suficiente da barreira sólida. Desta forma, juntando as equações anteriores 2.5 e 2.6, obtêm-se a relação presente na equação 2.7.

$$\nu \frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{n}} = \frac{1}{2} C_f \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U} \quad (2.7)$$

A tensão $\nu \frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{n}}$ é obtida na formulação variacional dos termos de difusão em elementos finitos. Portanto, qualquer modelo de turbulência irá fornecer uma fórmula para a estimativa desta tensão baseada no conhecimento da rugosidade do fundo e do fluxo na vizinhança da barreira sólida.

Frequentemente, os modelos de turbulência fornecem a expressão para o cisalhamento de velocidade ou o coeficiente de arrasto. Assim, existe uma série de fórmulas para a estimativa do coeficiente de arrasto que podem ser usadas pelo modelo TELEMAC-3D, entre elas, a fórmula de Manning, que é utilizada neste trabalho:

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (2.8)$$

onde, m é o coeficiente de Manning e h é a profundidade da água.

Influência do vento

A influência dos ventos é considerada no modelo numérico como uma condição bidimensional no contorno superficial. A tensão de cisalhamento superficial gerada pelo vento pode então ser descrita segundo a equação 2.9.

$$\nu \frac{\partial \vec{u}_H}{\partial n} = \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} \vec{\chi} \cdot |\vec{\chi}| \quad (2.9)$$

De forma que, a massa específica do ar é definida como $\rho_{ar} = 1,29 kg.m^{-3}$, \vec{u}_H representa a velocidade horizontal na superfície livre do fluido e $\vec{\chi}$ representa a intensidade do vento 10 metros acima do nível do mar. O coeficiente da influência do vento a_{vento} (adimensional) é dado por Flather

(1976) de acordo com a relação presente na equação 2.10.

$$a_{vento} = \begin{cases} 0,656 \times 10^{-3} & \text{Se } |\vec{\chi}| \leq 5 \text{ m.s}^{-1} \\ (-0,12 + 0,137|\vec{\chi}|) \times 10^{-3} & \text{Se } 5\text{m.s}^{-1} \leq |\vec{\chi}| \leq 19,22 \text{ m.s}^{-1} \\ 2,513 \times 10^{-3} & \text{Se } |\vec{\chi}| \geq 19,22 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad (2.10)$$

É importante ressaltar que a influência do vento é um fenômeno complexo que depende da rugosidade da superfície livre, da intensidade do vento e da distância na qual a observação é feita a partir da superfície livre do mar.

Força de Coriolis

Esta força é considerada pelo fato de a Terra ser um referencial não inercial e aparece devido ao movimento de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo. Esta força é somada às equações do movimento em referenciais inerciais na forma de um termo fonte. A aceleração de Coriolis em uma certa latitude (θ) é dada pelas equações 2.11 e 2.12, para u e v respectivamente.

$$fv = 2\omega v \sin \theta \quad (2.11)$$

$$-fu = -2\omega u \sin \theta \quad (2.12)$$

onde, $\omega = \frac{2\pi}{86164}$ representa a velocidade de rotação da Terra, o período representa um dia sideral (de rotação) terrestre (Hervouet, 2007).

Trocas de calor com a atmosfera

A potência térmica liberada para a atmosfera por unidade de área (P_t) é proporcional a $T - T_{ar}$, sendo T a temperatura da água na superfície do mar e T_{ar} a temperatura do ar.

Desta forma, através de conceitos termodinâmicos (Hervouet, 2007) a potência térmica é definida de acordo com a equação 2.13, onde α é o coeficiente de troca de calor em ($W.m^{-2}. ^\circ C^{-1}$). Portanto,

o fluxo de calor ϕ pode ser escrito através da equação 2.14.

$$P_t = \alpha(T - T_{ar}) \quad (2.13)$$

$$\phi = -\rho C_P v_T \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = -\rho C_P v_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.14)$$

Onde v_T é o coeficiente de difusão de calor na água e $C_P = 4,18 \text{ J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Pelo agrupamento das duas equações (2.13 e 2.14) pode ser obtida a equação da condições de contorno (equação 2.15).

$$v_T \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{A}{\rho C_P} (T - T_{ar}) \quad (2.15)$$

O coeficiente A inclui fenômenos como a radiação, convecção do ar em contato com a água e o calor latente produzido pela evaporação da água. (Sweers, 1976) expressou o coeficiente A de acordo com a temperatura da água T e a velocidade do vento χ (em m.s^{-1}) medida no ponto, como:

$$A = (4,48 + 0,049T) + 2021,5b(1 + |\vec{\chi}|)(1,12 + 0,018T + 0,00158T^2) \quad (2.16)$$

O parâmetro b varia de acordo com a localização, seu valor médio para o oceano Atlântico é de 0,0025, e seu valor máximo é encontrado no Mediterrâneo, alcançando 0,0035.

Termos de flutuabilidade e pressão atmosférica

Os termos do gradiente de pressão atmosférica e os termos de flutuabilidade que aparecem nos termos do gradiente de pressão são integrados com os termos fonte, de forma que são relativos aos eixos Ox e Oy :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \approx -\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial \rho_{atm}}{\partial x} + g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_Z^{Z_s} \frac{\Delta\rho}{\rho_o} dz \right] \quad (2.17)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \approx -\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial \rho_{atm}}{\partial y} + g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_Z^{Z_s} \frac{\Delta\rho}{\rho_o} dz \right] \quad (2.18)$$

A utilização destes traçadores possibilita o cálculo de variações na densidade para os termos

de fluatibilidade. O modelo TELEMAC-3D considera algumas possibilidades de cálculo de massa específica no modelo incorporando os efeitos dos traçadores em conjunto ou separadamente através de equações simplificadas. A massa específica da água pode então ser calculada como função da temperatura e da salinidade.

Equação da massa específica da água do mar

A massa específica da água do mar é calculada como função da salinidade S e da temperatura da água do mar. Estas variações são dadas de acordo com a equação 2.19, se $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ kg.m}^{-3} < S < 42\text{ kg.m}^{-3}$:

$$\rho = \rho_{ref}[1 - (T(T - T_{ref})^2 - 750S) \times 10^{-6}] \quad (2.19)$$

onde, T_{ref} representa a temperatura de referência de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que ρ_{ref} se refere à massa específica de referência nesta temperatura quando a salinidade é zero, resultando em $\rho_{ref} = 999,972\text{ kg.m}^{-3}$.

Modelos de Turbulência

Simulações oceânicas que possuem um número de Reynolds excessivamente grande correspondem a escoamentos com comportamento turbulento. Desta forma, o módulo TELEMAC-3D oferece ao usuário opções diferenciadas. Essas opções consistem em escolher o modelo de turbulência vertical e horizontal que são aplicados aos cálculos das velocidades e dos traçadores.

Neste trabalho foi utilizado o modelo k- ϵ , que resulta do acoplamento da solução das equações do balanço para k (energia turbulenta, equação 2.20) e para ϵ (dissipação turbulenta, equação 2.21). Aplicando o modelo k- ϵ sempre requererá o uso de uma malha bidimensional mais refinada do que as malhas em que os outros modelos de turbulência trabalham, aumentando o tempo computacional. O modelo k- ϵ é representado pelo seguinte equacionamento:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P - G - \epsilon \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} [P + (1 - C_{3\varepsilon})G] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.21)$$

onde $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ representa a energia cinética turbulenta do fluido, $\varepsilon = \nu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j}$ representa a dissipação da energia cinética turbulenta, $P = \nu_T \left[\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}$ é o termo de produção da energia turbulenta, $G = -\frac{\nu_T}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ é o termo fonte devido a forças gravitacionais, sendo Pr_t o Número de Prandtl e ν_T verifica a igualdade: $\nu_T = C_\eta \frac{k^2}{\varepsilon}$. Os valores: $C_\eta, Pr_t, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ são constantes do modelo k- ε .

Variáveis Escalares - Traçadores

Um escalar pode ser definido como uma substância, partícula ou propriedade presente na água, tal como temperatura, salinidade, sedimentos em suspensão, nutrientes ou não nutrientes. Estes ainda podem ser considerados ativos, quando há interação com a hidrodinâmica, ou passivos quando não interagem com os processos hidrodinâmicos.

A evolução temporal destes escalares depende dos processos advectivos e difusivos, sendo que o primeiro é controlado pelas correntes e ação dos ventos e o último pelos processos turbulentos, além de fontes e sumidouros. A equação que controla o transporte destes traçadores pode ser escrita em três dimensões, em sua forma conservativa como:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \text{div}(\rho C \vec{U} + q) = F_{\text{fonte}} \quad (2.22)$$

onde, C representa a concentração de um traçador arbitrário que pode ser a salinidade, a temperatura ou quaisquer das propriedades citadas acima. F_{fonte} representa a taxa de criação do traçador e q o fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta. A equação de advecção e difusão, em sua forma não conservativa pode ser escrita como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \vec{\nabla} C = \text{div}(\nu_C \vec{\nabla} C) + F_{\text{fonte}} \quad (2.23)$$

com, v_C representando o coeficiente de difusão turbulenta associada ao traçador considerado.

Para maiores informações sobre o equacionamento do modelo TELEMAC-3D e aplicações para a região de estudo, consultar Marques et al. (2009), Hervouet e Van Haren (1996) e Hervouet (2007).

2.2 Módulo Morfodinâmico - SISYPHE

O SISYPHE é um módulo de simulação de transporte de sedimentos e morfodinâmica que faz parte do sistema de modelagem numérica open TELEMAC-MASCARET³. Neste módulo, as taxas de transporte de sedimentos, divididas em carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*) e material em suspensão (*suspended load*), são calculadas em cada ponto da malha como função de vários fluxos (velocidade, profundidade da água, altura da onda, etc.), além de parâmetros do sedimento (diâmetro do grão, densidade relativa, velocidade de sedimentação, etc.).

A carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*) é calculada utilizando fórmulas clássicas de transporte de sedimentos provenientes da literatura. A carga em suspensão é determinada resolvendo uma equação de transporte adicional para a concentração de sedimentos em suspensão integrado na vertical. A equação de evolução do fundo (equação de Exner) pode ser resolvida usando elementos finitos ou através da formulação de volumes finitos.

Neste trabalho, foi utilizada a opção de transporte sedimentar por carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*). Portanto, somente a formulação relacionada a esta forma de transporte será abordado nesta seção.

O SISYPHE é aplicável a sedimentos não coesivos (uniformes ou graduados), sedimentos coesivos e misturas areia-lama. A composição do sedimento é representada por um número finito de classes, cada uma caracterizada pelo seu diâmetro médio, densidade de grão e velocidade de sedimentação. Os processos de transporte de sedimentos também podem incluir os efeitos da inclinação do fundo, dos leitos rígidos e das correntes secundárias. Para os sedimentos coesivos, o efeito da consolidação do leito pode ser considerado.

Interações, aplicações e influências do SISYPHE com sedimentos coesivos não serão tratados neste trabalho, para mais informações sobre simulação de sedimentos coesivos consultar Normant

³www.opentelemac.org

(2000); Yang e Hamrick (2003); Leupi et al. (2008); Villaret et al. (2011); Chapalain e Guillou (2011); Van (2012) e Tassi e Villaret (2014).

A tensão de cisalhamento do leito, decomposta em fricção superficial e arrasto de forma, pode ser calculada através da imposição de um coeficiente de atrito (Strickler, Nikuradse, Manning, Chézy ou definido pelo usuário) ou pela previsão da rugosidade de fundo, através de simulações hidrodinâmicas.

O SISYPHE pode ser aplicado a uma grande variedade de condições hidrodinâmicas incluindo rios, estuários e aplicações costeiras, onde os efeitos de ondas sobrepostas a uma corrente de maré podem ser adicionados (Jacoub et al., 2007; Tassi, 2007; Huybrechts et al., 2010; Villaret et al., 2011; Chapalain e Guillou, 2011; Villaret et al., 2012; Goll e Kopmann, 2012; Goll et al., 2013; Villaret et al., 2013; Wang et al., 2014; Jia et al., 2015).

Informações mais detalhadas sobre o equacionamento do SISYPHE ou diferentes opções de configuração podem ser encontradas no manual técnico do SISYPHE (Tassi e Villaret, 2014).

2.2.1 SISYPHE e a camada de fundo

A figura 2.1 auxilia na compreensão da relação entre o SISYPHE e as camadas de fundo. Nesta figura, o espaço em azul representa a parcela hidrodinâmica da malha, dominada pelos processos calculados pelo TELEMAC-3D, espaçado verticalmente pelas camadas sigma. Esta camada é seguida pela porção sedimentar, em marrom, no qual o SISYPHE realiza a mobilização de sedimentos. Por fim, a última porção, em cinza, é chamada de camada rígida e limita a malha numérica em sentido vertical.

Entre as camadas hidrodinâmicas e de sedimentos, existe uma camada de interface, na qual ocorrem as transferências de energia das correntes de fundo gerando consequentemente os processos de transporte junto ao fundo (*bedload*) ou a suspensão dos sedimentos, resultando assim na evolução da batimetria.

A camada de sedimentos no SISYPHE (porção marrom na figura 2.1) é estratificada de acordo com um número de camadas definido pelo usuário, podendo ainda receber informações da porcentagem de cada classe de grãos presentes nos sedimentos. A espessura da camada sedimentar presente no modelo é, por padrão, de 100 metros. Abaixo da última camada sedimentar encontra-se o fundo rígido, ou seja, o limite inferior da malha numérica.

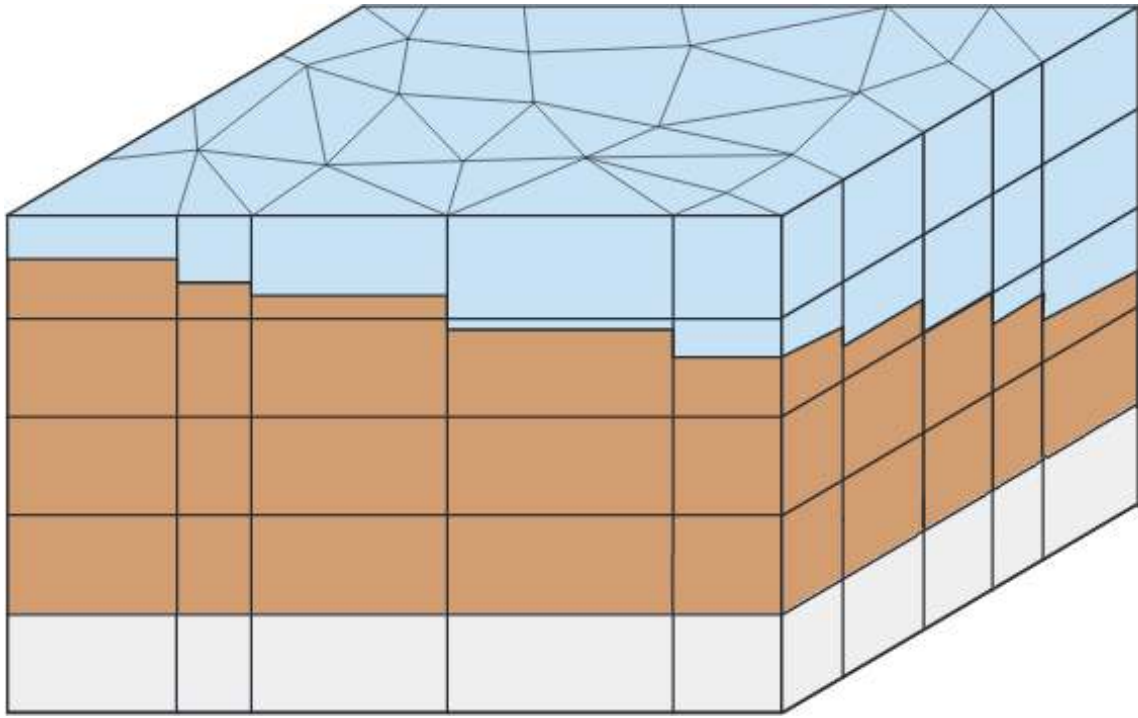


Figure 2.1: Camadas do modelo morfodinâmico. Em azul está representado o fluido hidrodinâmico presente na coluna de água, em marrom as camadas sedimentares e em cinza a camada profunda intransponível. Adaptado de Tassi e Villaret (2014)

2.2.2 Interações fluido-sedimento

Para sedimentos finos não coesivos, com tamanho de grão médio⁴ de $d_{50} > 60\mu m$, o diâmetro do grão e sua densidade (ρ_s) são parâmetros chave para determinar a sua resistência a erosão e as taxas de transporte sedimentar.

Quando o SISYPHE está acoplado ao TELEMAC-3D, o coeficiente de arrasto com o fundo é alinhado à velocidade próxima ao fundo para possibilitar a inclusão de possíveis desvios por fluxos verticais. A magnitude do coeficiente de arrasto com o fundo está relacionada com a velocidade integrada na vertical, exceto quando a Lei de Fricção de Nikuradse é aplicada. Nesse caso, a velocidade de fricção u_* está relacionada a velocidade próxima ao fundo $u(z_1)$ assumindo um perfil de velocidade logarítmico (equação 2.24).

$$u(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z_1}{z_0} \right) \quad (2.24)$$

onde, z_0 é a distância vertical de uma borda limite, expressa como função da rugosidade de fundo de Nikuradse ($z_0 = \frac{k_s}{30}$), com k_s sendo a altura da rugosidade do grão, z_1 a distância mais próxima

⁴ d_{50} é o tamanho do grão com 50% de material fino por peso

do fundo medida em coordenadas verticais z , e alinhada contra a direção da aceleração da gravidade, com $\kappa = 0.41$ representando a constante de von Kármán.

No TELEMAC-3D, z_1 é igual a velocidade na camada computacional de fundo. Para fundos lisos ou uniformes, a altura da rugosidade do grão é aproximadamente $k_s \approx 3d_{50}$ (Julien, 2010).

2.2.3 Transporte de sedimentos

Quando a corrente induz atrito cisalhante no fundo, as partículas de sedimento começam a se mover através de rolamento, saltação e arrasto (ver figura 2.2a) com a carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*).

O movimento das partículas de sedimento junto ao fundo não é contínuo nem uniforme (figura 2.2b), quando a corrente exerce atrito acima do valor de limiar crítico algumas partículas são elevadas e carreadas pela corrente por pequenas distâncias (figura 2.2c). Entretanto as partículas mais finas são transportadas em suspensão por longas distâncias, não sendo contabilizadas no transporte junto ao fundo (figura 2.2d).

O transporte junto ao fundo ocorre em uma camada muito fina concentrada na camada próxima ao fundo ($z = Z_{ref}$), onde interações entre partículas ocorrem ($z < Z_{ref}$). O material em suspensão é definido como a concentração do fluxo sedimentar integrado na vertical, desde o topo da camada do transporte junto ao fundo ($z > Z_{ref}$) até a elevação do nível do mar. A carga total sedimentar Q_t (equação 2.25) inclui o transporte pelo fundo Q_b e o material em suspensão Q_s , de acordo com a figura 2.3.

$$Q_t = Q_b + Q_s. \quad (2.25)$$

Entretanto, neste trabalho, o transporte em suspensão não está sendo considerado, portanto:

$$Q_t = Q_b. \quad (2.26)$$

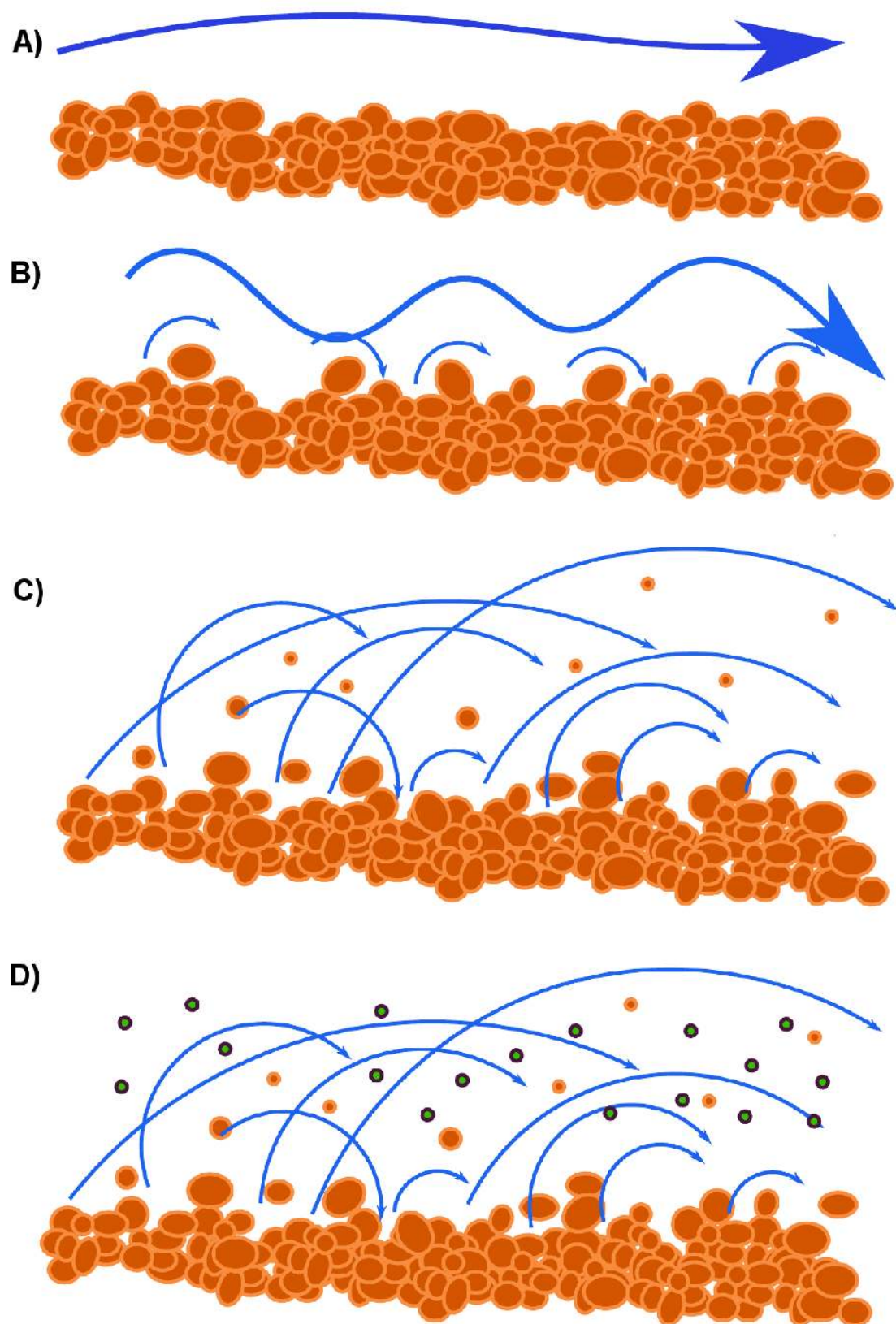


Figure 2.2: Transporte de sedimentos junto ao fundo (bedload) no SISYPHE. A) Início da transferência de movimento; B) Rolamento; C) Saltação e D) Arrasto. Adaptado de Kopmann et al. (2013)

Parâmetro de Shields

O número crítico de Shields ou atrito cisalhante crítico adimensional Θ_c é definido através da equação 2.27.

$$\Theta_c = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (2.27)$$

onde, τ_c é o atrito cisalhante crítico adimensional para os sedimentos em movimento incipiente. Valores de Θ_c podem ser especificados pelo usuário ou calculados pelo modelo como função não dimensional do diâmetro do grão $D_* = [\frac{\rho_s}{\rho - 1} \frac{g}{v^2}]^{1/3}$, de acordo com a relação presente na equação 2.28.

$$\frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} = \begin{cases} 0.24D_*^{-1}, & D_* \leq 4 \\ 0.14D_*^{-0.64}, & 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04D_*^{-0.10}, & 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013D_*^{0.29}, & 20 < D_* \leq 150 \\ 0.045, & 150 \leq D_* \end{cases} \quad (2.28)$$

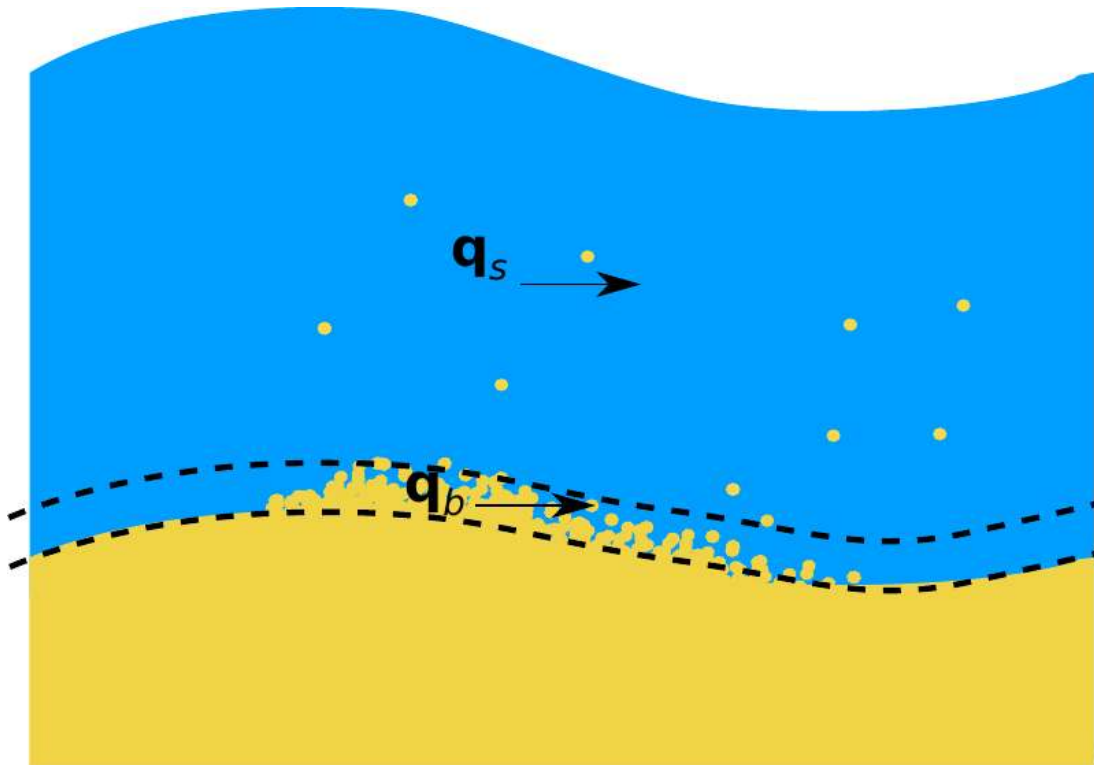


Figure 2.3: Parcelas do transporte pelo fundo e em suspensão. Adaptado de Kopmann et al. (2013)

onde, τ_c e d_{50} estão em $N.m^{-2}$ e em metros, respectivamente.

2.2.4 Carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*)

O transporte de material junto ao fundo ocorre em uma pequena região próxima ao leito marinho ($z < Z_{ref}$). Esta camada se adapta rapidamente à quaisquer mudanças na condição do fluxo, tornando válido a condição de equilíbrio. A taxa de transporte do fundo pode então ser calculada por algumas fórmulas de equilíbrio do transporte de sedimentos, em função de vários fluxos e parâmetros sedimentares, assumindo que a taxa de transporte corresponde a condição de saturação.

Evolução do fundo

Para calcular a evolução do fundo, o SISYPHE utiliza a equação de Exner (equação 2.29) que denota que a variação da espessura do sedimento de fundo pode derivar de um simples balanço de massa e por isso é válido para a condição de equilíbrio.

$$(1 - n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \nabla \cdot Q_b = 0, \quad (2.29)$$

onde, n é a porosidade do fundo não coesivo ($n \approx 0.4$ para sedimentos não coesivos), Z_f é a elevação do fundo do mar, e Q_b ($m^2.s^{-1}$) o transporte de volume sólido por unidade de comprimento.

Formulação para o transporte junto ao fundo

Para correntes apenas (sem efeito das ondas) um grande número de formulações semiempíricas podem ser encontradas na literatura para calcular as taxas de transporte junto ao fundo. No SISYPHE o usuário escolhe entre as diferentes formulações disponíveis, incluindo Meyer-Peter e Müller, Engelund-Hansen e Einstein-Brown.

A maioria dessas formulações assumem uma condição limiar para o início da erosão (como exemplo, Meyer-Peter e Müller, Van Rijn e Hunziker). Outras formulações são baseadas em um conceito similar de energia (como Engelund-Hansen), ou podem ser derivados da abordagem estatística (como Einstein-Brown, Bijker, etc.). A taxa adimensional do transporte de areia induzido por correntes Φ_s é

apresentada na equação 2.30, sendo, $\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho}$ a densidade relativa.

$$\Phi_s = \frac{Q_b}{\sqrt{g(\rho_r - 1)d_{50}^3}} \quad (2.30)$$

O transporte de sedimento pelo fundo geralmente é apresentado como a tensão total (τ , força por unidade de área) que o fluxo exerce sobre o fundo. Entretanto, somente uma porção desta tensão age sobre os grãos de sedimentos para produzir transporte. Para estimar as taxas de sedimentos transportados, deve ser realizado um particionamento desta tensão em parcelas que agem especificamente nos grãos de sedimentos. Esta parcela é chamada de tensão de fricção superficial τ_0 (*skin friction stress*, ou *grain stress*).

A taxa adimensional do transporte de areia induzido por correntes Φ_s é, em geral, expressa como função tensão de fricção superficial não dimensional, ou parâmetro de Shields θ' (equação 2.31), sendo, μ o fator de correção para a tensão de fricção superficial.

$$\theta' = \frac{\mu \tau_0}{(\rho_s - \rho)gd_{50}}, \quad (2.31)$$

Formulação para o transporte de sedimentos

A fórmula do transporte é definida pelo usuário, podendo ser qualquer formulação pré-definida ou programada. O SISYPHE possui formulações predefinidas que levam em consideração o efeito de ondas (Bijker, Bailard, Dibajnia and Watanabe, etc.) ou para grãos de diferentes tamanhos (Hunziker). Para este trabalho, foi escolhido a formula de Meyer-Peter-Müller (Meyer-Peter e Muller, 1948) (equação 2.32).

$$\Phi_b = \begin{cases} 0 & \text{se } \theta' < \theta_c \\ \alpha_{mpm}(\theta' - \theta_c)^{3/2} & \end{cases} \quad (2.32)$$

sendo, α_{mpm} sendo um coeficiente ($\alpha_{mpm} = 8$ por padrão) e θ_c o parâmetro crítico de Shields ($\theta_c = 0.047$ por padrão).

Esta é uma formulação clássica para transporte de fundo e foi validada para transporte de sedimentos grosseiros variando de $0.4 \text{ mm} < d_{50} < 29 \text{ mm}$ (Meyer-Peter e Muller, 1948), sendo baseada

no conceito do entranhamento inicial (Maniatis et al., 2017). Esta formulação se adapta para fluxos altos e baixos de sedimentos pelo fundo, além de leito marinho com fundo ondulado (*rippled bottoms*).

Efeito de quebra com o fundo (*Bed slope effect*)

O efeito de haver uma queda na batimetria influencia positivamente nas taxas de transporte em direção ao decréscimo batimétrico e reduz, por consequência, o transporte aclive de sedimentos pelo fundo. No SISYPHE um fator de correção é aplicado tanto para a magnitude quanto para a direção das taxas de transporte, antes da equação de evolução do fundo ser resolvida.

O fator de correção utilizado foi definido através do método de magnitude das taxas de transporte pelo fundo. O método de Koch e Flokstra (Koch e Flokstra, 1981) aplica um fator $1 - \beta \frac{\partial Z_f}{\partial \varphi}$ multiplicado à intensidade das taxas de transporte junto ao fundo Q_{b0} , de acordo com a equação 2.33.

$$Q_b = Q_{b0} \left(1 - \beta \frac{\partial Z_f}{\partial \varphi} \right), \quad (2.33)$$

onde, φ é a coordenada da direção da corrente e β um fator empírico ($\beta = 1.3$ por padrão). Este efeito age em quedas batimétricas de forma semelhante a adicionar um termo difusivo na equação de evolução do fundo. Este fator de correção tende a reduzir instabilidades em regiões de grande variação batimétrica.

Planos de Maré (*Tidal flats*)

Os planos de maré são áreas do domínio computacional onde a altura da água pode chegar a valores nulos durante uma simulação. Isto ocorre geralmente em locais próximos a costa que sofrem grandes variações na elevação da superfície livre do mar. Neste estudo, está sendo aplicado como altura mínima para ser considerado zona de plano de maré igual a 0.001 m . Desta forma, caso ocorra de um nó da costa ficar com a altura da água inferior a este valor, este nó é considerado seco e sem mudanças morfodinâmicas, durante este passo de tempo (Hervouet et al., 2011)

2.3 Módulo Ondulatório - TOMAWAC

O módulo ondulatório TOMAWAC (TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation) foi utilizado para avaliar a variabilidade das ondas na área de estudo. Esse módulo é parte do sistema open TELEMAC-MASCARET, de acordo com Benoit (2003) o modelo é espectral (equação 2.34) e baseado na equação da conservação da densidade de ação da onda (equação 2.35), podendo ser utilizado na sua forma estacionária e não-estacionária.

Neste trabalho, somente o modo não-estacionário foi utilizado. Este modo consiste em decompor o espectro direcional das ondas em um número finito de frequências e direções de propagação. Esse modelo é chamado de terceira geração - como o modelo WAM (Wave Model) ((Komen et al., 1996)), por não impor nenhuma parametrização sobre a distribuição direcional ou espectral da energia ou da ação da onda. Todo componente do espectro da ação da onda evolui no tempo de acordo com os processos modelados pelo software.

$$N(x, \mathbf{k}, t) = N(x, y, k_x, k_y, t) \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{k}_x)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_y)}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (2.35)$$

onde, N representa o espectro direcional de ação das ondas, x e y são as coordenadas do sistema, k_x e k_y são as componentes em x e y do vetor do número de onda, tal que, $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (k \cdot \sin\theta, k \cdot \cos\theta)$ e t corresponde ao tempo. A equação (2.35) representa que, em uma situação geral de propagação de ondas em um ambiente instável e não-homogêneo (correntes ou nível do mar variando no tempo e espaço), a ação da onda é preservada dentro dos termos fonte e de dissipação, definido por Q .

Entretanto, a equação 2.35 resolvida pelo TOMAWAC precisa de algumas considerações. Em geral, quando as ondas se propagam em um ambiente instável e não-homogêneo, a variância da densidade direcional do espectro (equação 2.36) não é mantida, então, uma nova quantidade deve ser introduzida chamada de espectro direcional de ação das ondas. Essa quantidade denotada $N(f, \theta)$ se manterá constante (sem considerar termos fonte e sumidouros) mesmo se o meio de propagação não for homogêneo ou estável (Garret e Bretherton, 1969; Willebrand, 1975; Phillips, 1977; Komen et al.,

1996).

$$F(f, \theta) = \frac{E(f, \theta)df d\theta}{\rho g} \quad (2.36)$$

O espectro direcional de ação das ondas se relaciona com a variância da densidade direcional do espectro de acordo com a relação presente na equação 2.37.

$$N = \frac{F}{s} \quad (2.37)$$

onde, s representa a frequência angular intrínseca ou relativa, ou seja, esta é a frequência angular observada em um sistema de coordenadas se movendo na velocidade da corrente \vec{u} . Esta frequência é diferente da frequência angular absoluta ω , observada em um sistema fixo de coordenadas. As duas frequências estão conectadas pela relação do efeito Doppler (equação 2.38) na presença de uma corrente \vec{u} integrada na vertical.

$$\Omega(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) = \omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \vec{u} \quad (2.38)$$

Considerando esta relação, e a notação de derivada total no tempo (equação 2.39), que também é utilizada na equação 2.35, são finalizadas as hipóteses necessárias para o modelo resolver o problema.

$$\dot{g} = \frac{dg}{dt} = \frac{\partial g}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial g}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial g}{\partial y} \quad (2.39)$$

Sendo assim, a equação 2.35 pode ser agora transposta para outro sistema de coordenadas qualquer capaz de discretizar o espectro direcional, como (\mathbf{k}, θ) , (f_a, θ) ou (f_r, θ) (Tolman, 1991; Komen et al., 1996), sendo f_a e f_r frequência angular absoluta e frequência relativa, respectivamente. Entretanto, trabalhando com (x, y, k_x, k_y) , o sistema de coordenadas canônicas pode ser mantido e as equações de propagação (também chamadas de Equações de Hamilton) são escritas na forma da equação 2.40.

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\partial \Omega}{\partial k_x} & e & \dot{y} = \frac{\partial \Omega}{\partial k_y} \\ \dot{k}_x = \frac{\partial \Omega}{\partial x} & e & \dot{k}_y = \frac{\partial \Omega}{\partial y} \end{cases} \quad (2.40)$$

A relação de dispersão para o caso sem corrente é dado pela equação 2.41.

$$\sigma^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (2.41)$$

onde, $f_r = \frac{\sigma}{2\pi}$ é a frequência relativa das ondas, e d é a altura da água. Através da equação 2.40 de Hamilton, pode-se demonstrar que:

$$\frac{\partial \dot{x}}{x} + \frac{\partial \dot{y}}{y} + \frac{\partial \dot{k}_x}{k_x} + \frac{\partial \dot{k}_y}{k_y} = 0 \quad (2.42)$$

ou seja, $\text{div}(\Psi) = 0$, sendo $\Psi = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{k}_x, \dot{k}_y)$. Desta forma, a evolução da equação 2.35 pode ser escrita na forma de transporte de acordo com a equação 2.43, ou em sua forma reduzida (equação 2.44).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial N}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial N}{\partial y} + \dot{k}_x \frac{\partial N}{\partial k_x} + \dot{k}_y \frac{\partial N}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \Psi \cdot \text{grad}_{\mathbf{k}, x}(N) = Q \quad (2.44)$$

As taxas de transferência são dadas pela teoria linear das ondas (equação 2.45) (Mei, 1983; Tolman, 1991; Komen et al., 1996; Benoit, 2003)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = C_g \frac{k_x}{k} + U_x \\ \dot{y} = C_g \frac{k_y}{k} + U_y \\ \dot{k}_x = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} - k_x \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \\ \dot{k}_y = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial y} - k_y \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \end{array} \right. \quad (2.45)$$

onde, C_g é a velocidade relativa (ou intrínseca) de grupo das ondas (equação 2.46), observado por um

sistema de coordenadas se movendo na velocidade da corrente.

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \alpha \frac{\sigma}{k}, \text{ onde } \alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (2.46)$$

Desta forma, a modelagem do espectro do estado do mar consiste em solucionar as equações 2.35 ou 2.43, utilizando as equações cinemáticas (2.45). A formulação da equação de transporte (equação 2.43) vêm sendo adotada no TOMAWAC devido à sua proximidade com outras equações hidráulicas.

Para solucionar a equação (2.43), o TOMAWAC discretiza o espectro direcional (N) em um número finito de frequências relativas de onda (f_{r_i}) e direções (θ_i) solucionando a equação (2.43) para cada componente (f_{r_i}, θ_i).

Para calcular a energia por unidade de área de ondas progressivas, pode ser utilizada a teoria linear de acordo com a equação 2.47. Onde a representa a amplitude a onda.

$$E = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (2.47)$$

Entretanto, para que a energia de um espectro multidirecional seja calculada, é necessário discretizar a energia em frequência e direção. Sendo assim, a integração de $E(f, \theta)$ ao longo das frequências e direções discretizadas fornece a energia por unidade por área das ondas multidirecionais (equação (2.48)).

$$\sum_f^{f+df} \sum_\theta^{\theta+d\theta} \frac{1}{2} \rho g a_m^2 = E(f, \theta) df d\theta \quad (2.48)$$

onde a_m é a amplitude da onda para cada componente do elemento e está relacionada a variação da densidade do espectro direcional (equação 2.36) de acordo com a equação 2.49.

$$a_m = \sqrt{2F(f, \theta) df d\theta} \quad (2.49)$$

A relação conectando a variação da densidade do espectro direcional (equação 2.36) e a elevação

do nível do mar é escrita na forma da equação 2.50.

$$\eta_w(x, y, t) = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} \sqrt{2F(f, \theta)} df d\theta \cos[k(x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta) - \omega t + \varpi] \quad (2.50)$$

onde ϖ é a fase da onda em radianos. É importante ressaltar que a fase das ondas varia de $[0; 2\pi]$ com densidade uniforme. O momento m_n de n-ordem ($n= 0, 1, 2, \dots$) da variação da densidade do espectro direcional é definido pela equação 2.51.

$$m_n = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} F(f, \theta) df d\theta \quad (2.51)$$

onde dentre todos os momentos, a 0-ordem é igual a variância da elevação do nível do mar, de acordo com a relação a seguir (equação 2.52).

$$\langle \eta_w^2 \rangle = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \eta_w^2(t) dt = m_0 = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} F(f, \theta) df d\theta \quad (2.52)$$

onde m_0 representa a variação do estado do mar no momento de ordem 0 de espectro de onda. Essa relação demonstra que, em particular, o momento m_0 afeta na determinação da altura de onda significativa espectral H_{m_0} através da relação (equação 2.53).

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.53)$$

2.3.1 Discretização Espectro-Angular

No TOMAWAC o domínio da frequência considera uma série de números de frequências (NF) em progressão geométrica de acordo com a equação 2.55 (TOMAWAC, 2017).

$$f_n = f_1 \cdot q^{n-1} \quad (2.54)$$

onde, f_1 é a frequência mínima, e a frequência máxima é $f_1 \cdot q^{NF-1}$, n varia de 1 a NF e q representa a razão entre as frequências. A discretização angular varia no intervalo de propagação de 0 a 360°, sendo discretizado em um número de direções (ND) igualmente distribuídas de acordo com a equação

2.55.

$$\theta_m = \frac{(m-1).360}{ND} \quad (2.55)$$

Sendo que m varia de 1 a ND . Combinando a relação de frequência e direção supracitada, é possível discretizar uma malha bidimensional espectro angular contendo ND pontos. O TOMAWAC utiliza uma representação polar onde as frequências são medidas radialmente e a propagação das direções correspondem ao valor do ângulo em relação ao eixo da origem vertical.

A figura 2.4 representa o sistema de coordenadas polar utilizado pelo modelo, neste caso, são apresentadas 25 frequências e 12 direções. A origem do sistema está no sentido positivo da ordenada do sistema cartesiano e o aumento dos graus ocorre em sentido horário.

2.4 Módulo de Conversão de Energia

Para representar uma turbina hidrocínética numericamente, primeiro é necessário compreender a dinâmica do escoamento dos fluidos ao redor de uma turbina e, além disso, adicionar o processo de conversão de energia e seus efeitos sobre o escoamento.

Desta forma, a primeira aproximação que pode ser feita é a de associar a turbina a um corpo cilíndrico imerso na água e fixo em um fundo rígido. Quando um escoamento contorna este corpo sólido, fenômenos de grande complexidade podem ocorrer, em razão da interação entre diferentes tipos de camadas cisalhantes.

Uma análise global do campo de escoamento real em torno de um cilindro circular é apresentada por Zdravkovich (1997). Como mostrado na figura 2.5, a velocidade média local do fluido pode ser maior, igual, ou menor à velocidade da corrente livre, dividindo o escoamento em quatro regiões distintas:

- i. uma estreita região de fluxo retardado;
- ii. duas camadas limite na superfície do cilindro;
- iii. duas zonas de descolamento e aceleração do escoamento;

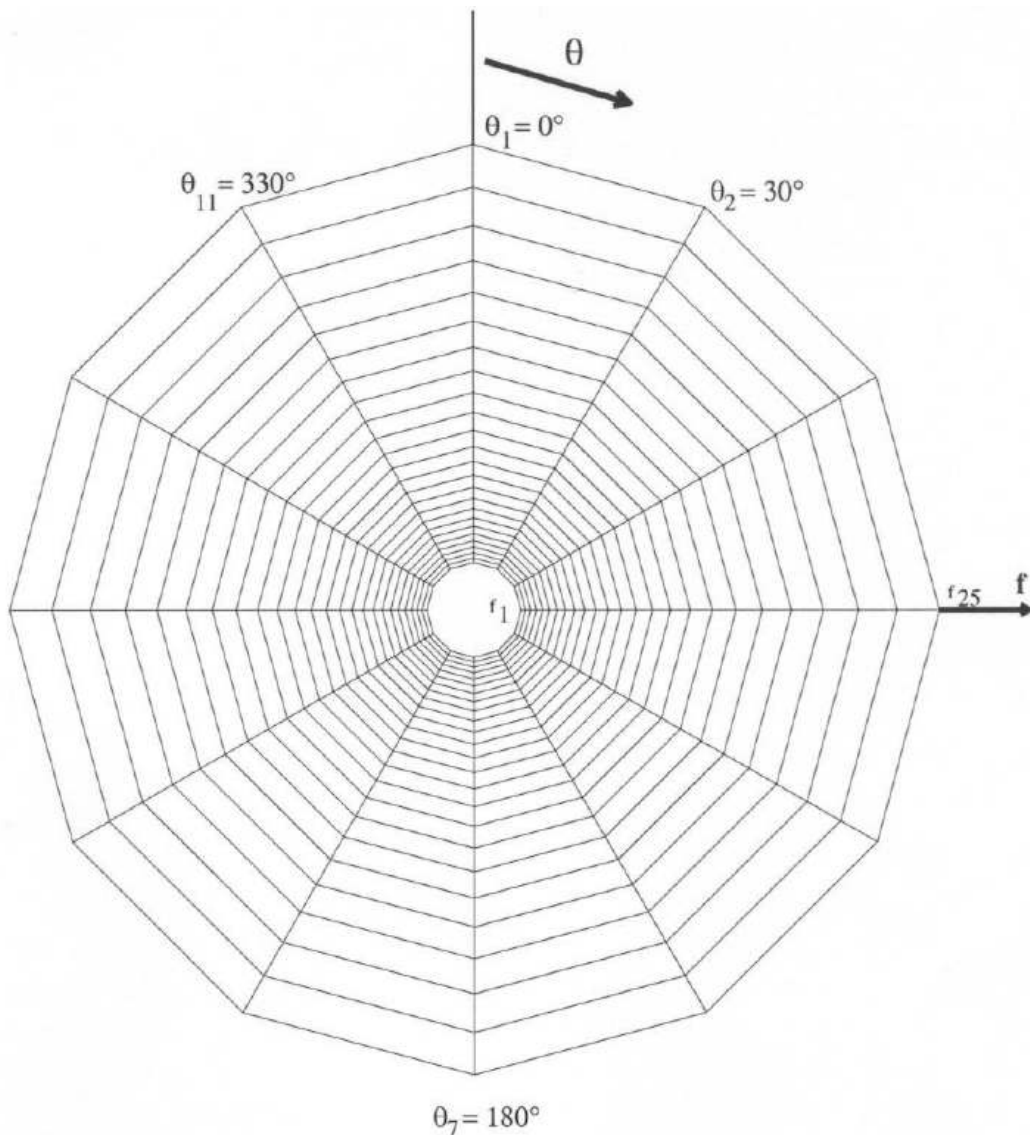
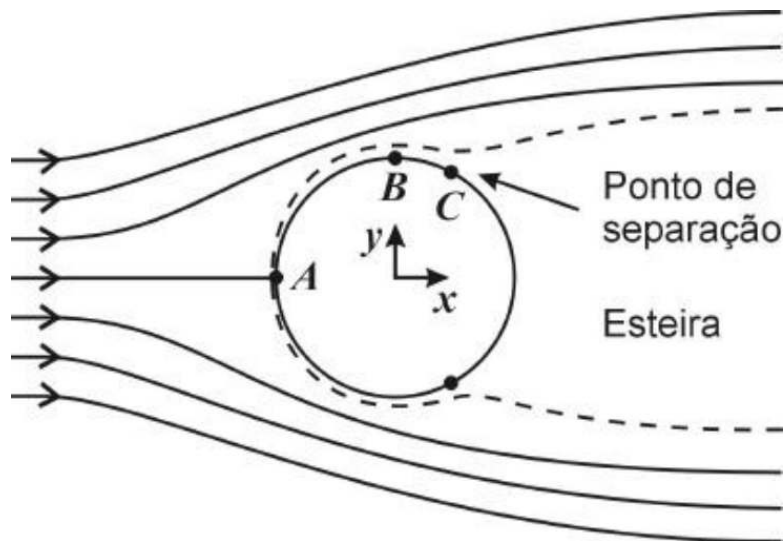


Figure 2.4: Sistema de coordenadas polares utilizado pelo TOMAWAC , neste caso, são 25 frequências e 12 direções. Adaptado de TOMAWAC (2017)

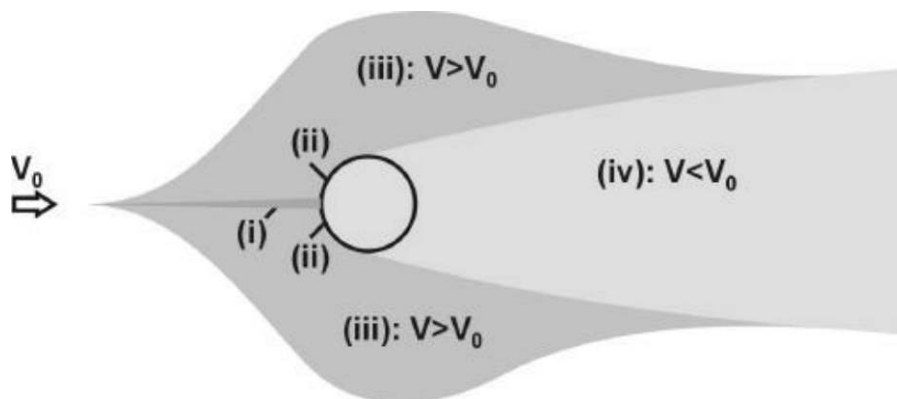
iv. uma larga região de separação do escoamento, formando esteiras turbulentas.

Na região do escoamento retardado (i), localizada a montante do cilindro, ocorrem inesperadas flutuações de velocidade devido à divergência do fluxo que ocorrerá. As camadas limite do cilindro (ii) estão sujeitas a um gradiente de pressão favorável, seguido por uma pequena região de gradiente de pressão adverso, antes da separação.

A separação da camada limite continua se desenvolvendo a jusante, com linhas cisalhantes livres, inicialmente perto da esteira. A região do descolamento e aceleração (iii) pode ser fortemente afetada pela limitação de bordas (quando houver aplicação para túneis de corrente), e o escoamento perturbado é vigorosamente influenciado pela baixa pressão na esteira.



(a) *Escoamento viscoso e incompressível em torno de um cilindro circular estacionário.*



(b) *Esquema da perda de velocidade ao encontrar o conversor*

Figure 2.5: *Regiões de perturbação do escoamento, segundo Zdravkovich (1997)*

A maioria das pesquisas envolvendo o escoamento ao redor de cilindros, foca a região da esteira (iv), na qual fenômenos bastante interessantes são observados. Em linhas gerais, as duas camadas cisalhantes, que se formam de ambos os lados do corpo sólido, se prolongam na direção do escoamento, confinando a região da esteira. Uma vez que a zona mais interna das camadas cisalhantes, em contato com a esteira, se move mais lentamente do que a sua parte externa, em contato com a corrente livre, estas camadas tendem a se enrolar em torno de si mesmas, formando vórtices discretos, cujo comportamento dinâmico dá origem a diferentes padrões de escoamento.

Na visão superior (eixo x-y) de uma turbina submersa como pode ser observado na figura 2.6, como consequência da existência do corpo sólido no caminho do fluxo, efeitos como a divergência do fluxo é primeiramente notado. Posteriormente, atrás da turbina, são observadas as zonas turbulentas.

De forma simplificada, a velocidade u_1 atinge a turbina, onde parte dela é convertida e atravessa

a turbina (u_3), enquanto outra parcela diverge da turbina (u_4). A velocidade u_4 geralmente tende a ser superior do que u_1 , por outro lado, a velocidade u_3 tende a ser $\frac{2}{3}$ inferior do que u_1 (Fallon et al., 2014). Esta redução pode ser ainda superior, podendo alcançar $\frac{1}{3}$ de u_1 devido a perdas causadas pelo encontro das águas lentas e turbulentas que ocorrem atrás da turbina devido aos escoamentos de maior magnitude ao redor da turbina (Garrett e Cummins, 2007).

A região atrás da turbina, na qual u_3 predomina, consiste em uma zona de sombra para a corrente incidente (figura 2.5 a e b), além de possuir alta turbulência e vorticidade, é onde geralmente ocorrem esteiras turbulentas. Ao se tratar das influências tridimensionais, maiores impactos podem ser descritos no escoamento.

Na figura 2.7 está esquematizada a visão longitudinal (eixo x-z) de uma turbina e suas influências em 4 estágios (tracejado e círculos azuis, Z1-Z4), sendo o primeiro estágio (Z1) distante previamente a turbina, (Z2) imediatamente antes da turbina, (Z3) imediatamente após a turbina e (Z4) a zona em que o fluxo lento da esteira retorna a velocidade padrão local. Após Z4, o fluxo está longe o suficiente para sofrer influência da turbina e o fluxo retorna a sua uniformidade.

De acordo com o esquema da figura 2.7, o fluxo passando por uma turbina terá uma redução na sua velocidade entre os planos Z1 e Z3. A corrente imediatamente após a turbina (entre Z3 e Z4) tem uma intensidade inferior à corrente divergida ao redor do rotor e deve se expandir para satisfazer a conservação de quantidade de movimento. Esta ação gera a zona turbulenta atrás da turbina (com

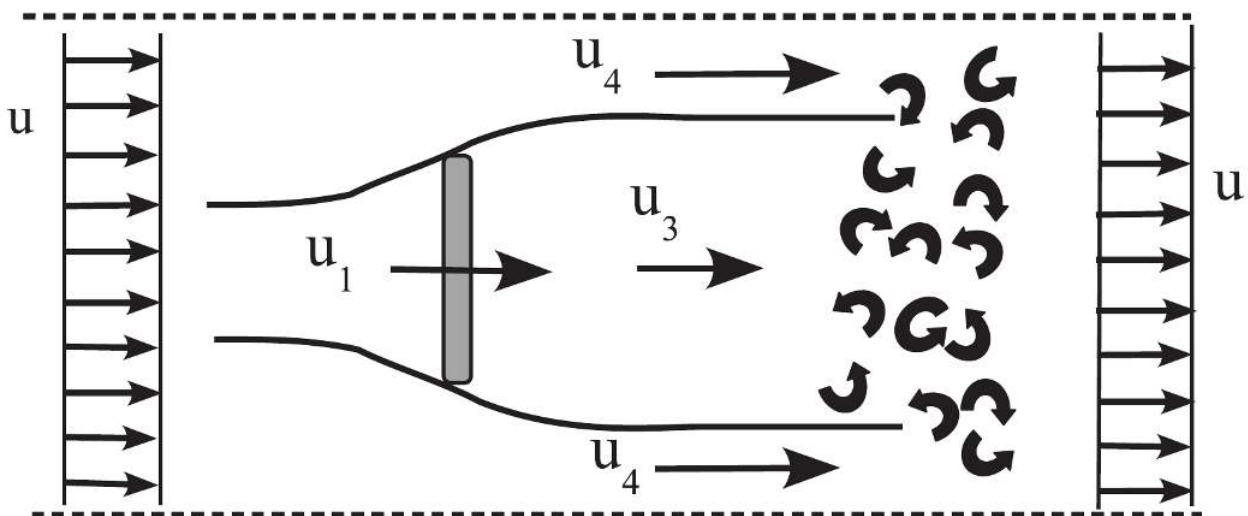


Figure 2.6: Vista superior de um fluxo incidindo sobre uma turbina. U representa o fluxo não perturbado, enquanto que U_1 , U_2 , U_3 e U_4 representam mudanças no fluxo de acordo com a sua relação com a posição da turbina. Adaptado de Vennell (2011b)

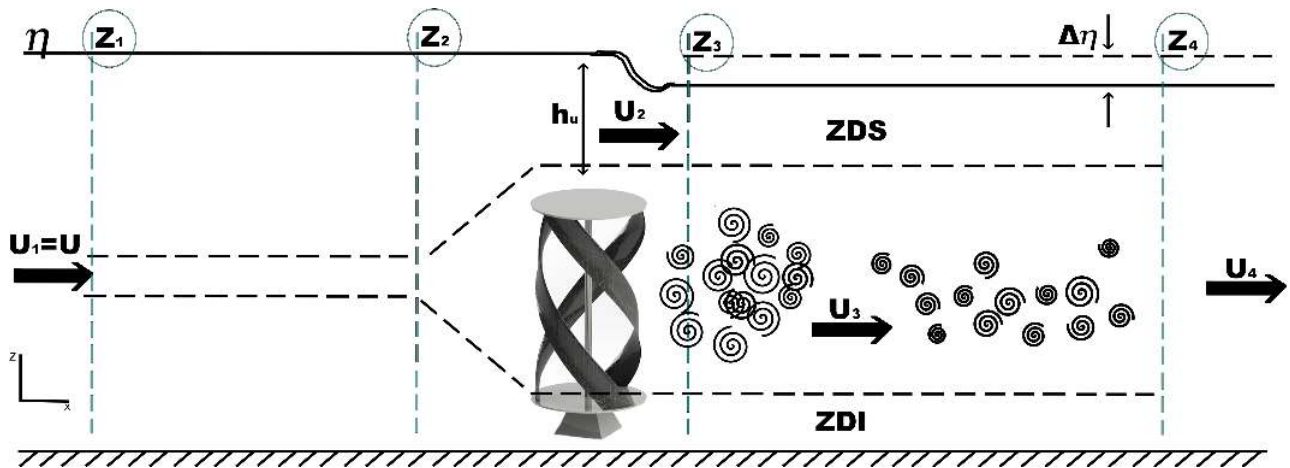


Figure 2.7: Esquema longitudinal (eixo x - z) das influências de uma turbina. A relação entre as velocidades é: $U_2 \geq U \geq U_1 \geq U_4 \geq U_3$. ZDI significa Zona de Divergência Inferior, enquanto que ZDS é a Zona de Divergência Superior. Adaptado de Kolekar e Banerjee (2015) e Vogel et al. (2016).

formato cônico atrás do rotor) que também contém mistura turbulenta.

Outro processo relacionado com a presença de um rotor é o desenvolvimento de duas regiões, aqui definidas como ZDS e ZDI. Essas zonas ocorrem devido a diferença de velocidade causada pela presença do rotor, tornando a velocidade nessas zonas superior quando comparada com o fluxo não perturbado e sem a turbina.

A uma distância suficientemente grande da turbina, a turbulência se dissipa inteiramente e o fluxo retorna ao seu estado não perturbado desenvolvido previamente ao encontro com o rotor (Z1). Em adição a esta redução de velocidade após a turbina, a extração de energia também gera impacto na elevação do nível do mar, gerando um decréscimo de nível ($\Delta\eta$) ocorrendo entre Z1 e Z5 (Fallon et al., 2014).

Esta redução no nível do mar e na velocidade atrás da turbina serão particularmente importantes quando forem considerados sítios/fazendas de conversão de energia, onde várias turbinas são acopladas para extrair o máximo de energia de um determinado local, além de influenciar o transporte sedimentar na região.

O fluxo não perturbado (Z1) se move através da turbina (Z2 e Z3) exercendo força nos rotores da turbina, e em resposta a terceira Lei de Newton, a turbina exerce uma força igual e oposta, ou seja, impulso sobre fluxo. Desta forma, o impulso da turbina pode ser expresso de acordo com a equação

2.56

$$P = \frac{1}{2} \zeta \rho A v^3 \quad (2.56)$$

onde, P representa a potência elétrica convertida em *Watts* (W), ζ é o coeficiente de eficiência da turbina de acordo com Gorlov (2001), A é a área do rotor ($D * H$) e v a velocidade incidente. Sendo assim, o módulo de conversão de energia simula a dinâmica do fluxo através da turbina por incorporar o impulso da turbina como uma força externa nas equações de quantidade de movimento do TELEMAC-3D (equações 2.1, 2.2 e 2.3), gerando conseqüentemente, a divergência de fluxo observada nos esquemas das figuras 2.6 e 2.7.

A parametrização utilizada no módulo de conversão de energia pode ser observada na tabela 2.1, advinda de textos como Douglas et al. (2008), Gorlov (2010), Marques et al. (2012), Kirinus et al. (2015); Kirinus e Marques (2015b), além de Rüncos et al. (2005).

Table 2.1: Parâmetros utilizados no módulo de conversão de energia.

Parâmetros	Medidas
Velocidade de início de movimento	0,2 m.s ⁻¹
Velocidade nominal	1,5 m.s ⁻¹
Potência nominal	242 kW
Altura do conversor	20 m
Raio do conversor	10 m
Coefficiente de eficiência da turbina (ζ)	0,35

2.5 Acoplamento

O sistema open TELEMAC-MASCARET possui duas formas de acoplamento. A primeira é chamada de método de corrente e consiste na inclusão de resultados de simulações pretéritas, como por exemplo, simular ondas com o módulo TOMAWAC e adicionar ao módulo hidrodinâmico (TELEMAC-3D) o efeito ondulatório. O outro método é chamado de acoplamento interno, que utiliza os módulos interativamente durante cada passo de tempo do modelo, transmitindo as mudanças em parâmetros (como erosão e sedimentação) em tempo real.

O acoplamento interno simultâneo entre os módulos hidrodinâmico, morfodinâmico e ondulatório

só existe atualmente para o módulo hidrodinâmico TELEMAC-2D (TOMAWAC, 2017), que devido integração vertical da equação de Navier-Stokes resultando na equação de Saint-Venant (Hervouet, 2007; Pham e Joly, 2016) facilita os cálculos concomitantes entre morfodinâmica e as ondas, inclusive representando corretamente efeitos de interação onda-corrente (Villaret et al., 2013).

Para este trabalho, o método de acoplamento interno foi utilizado, onde o SISYPHE pode ser automaticamente acoplado ao modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D. O SISYPHE é chamado dentro do modelo hidrodinâmico, realizando trocas entre os programas através de uso direto de memória (sem salvar arquivos externos). O módulo ondulatório TOMAWAC foi aplicado sem acoplamento.

Sendo assim, a figura 2.8 apresenta uma esquematização do acoplamento entre o TELEMAC-3D e o SISYPHE. Partindo do passo de tempo inicial ($ts_n = 0$) com condições iniciais para a hidrodinâmica e morfodinâmica (b^0) (ver figura 2.8a), o modelo TELEMAC-3D é inicializado gerando uma corrente u^n (figura 2.8b).

Posteriormente o modelo morfodinâmico SISYPHE é acionado (figura 2.8c), aplicando a velocidade incidente u^n em suas equações e gerando transporte pelo fundo (q_b), após o cálculo do transporte, o resultado do movimento sedimentar é finalizado (figura 2.8d). Por fim, a nova batimetria é atualizada para o TELEMAC-3D, repetindo esse ciclo por n vezes.

Em outras palavras, o funcionamento do acoplamento se dá em cada passo de tempo, onde as variáveis hidrodinâmicas (campos de velocidade, elevação do nível do mar e tensão de cisalhamento com o fundo) são transferidas para o modelo morfodinâmico, que retorna os dados da elevação do fundo atualizado para o modelo hidrodinâmico (figura 2.9).

Baseado no princípio da conservação de energia e pela utilização da equação das turbinas adaptadas para a aplicação em ambientes marinhos, os conversores de energia das correntes foram acoplados ao módulo hidrodinâmico TELEMAC-3D (figura 2.9).

Durante cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico (figura 2.9) a velocidade das correntes é calculada e transferida para o módulo de conversão de energia, que converte parte da energia das correntes em energia elétrica através da equação padrão de turbinas (equação 2.56). Além disso, a velocidade das correntes é atualizada para manter o balanço de energia do modelo numérico TELEMAC-3D.

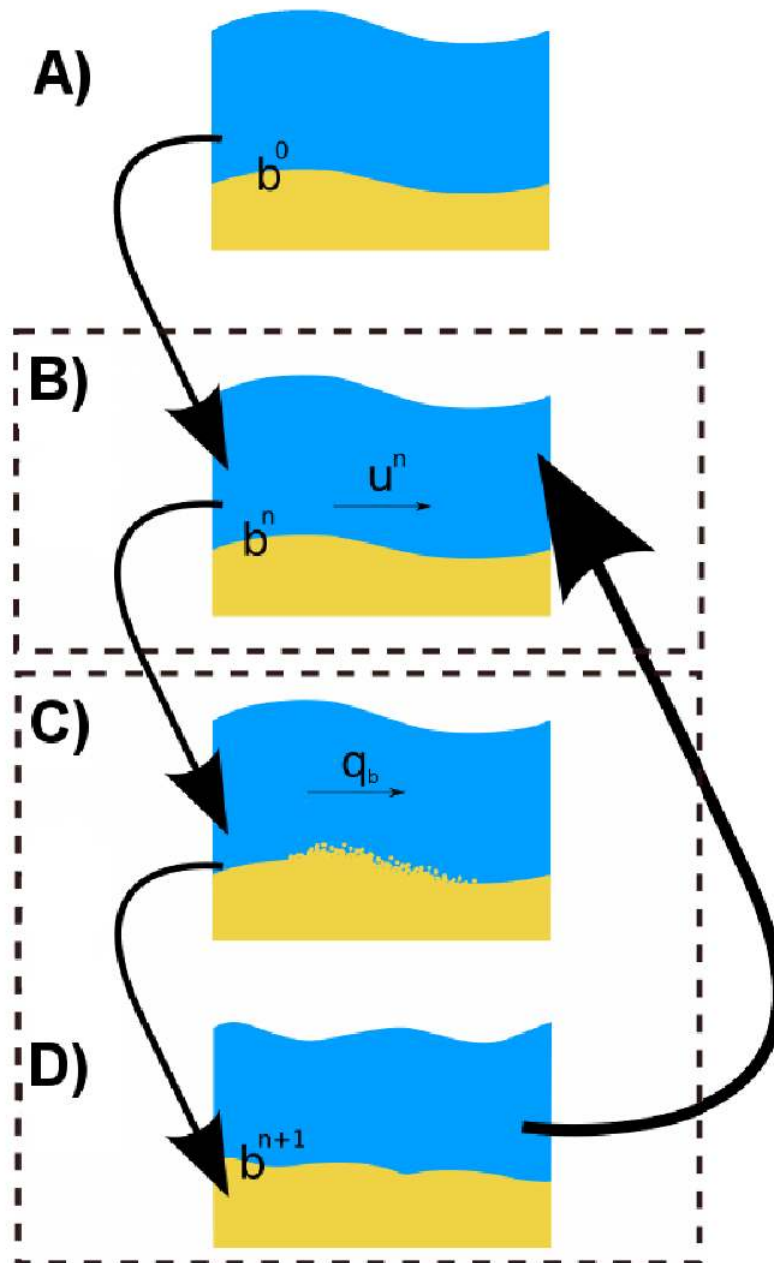


Figure 2.8: Esquema do acoplamento entre o modelo hidrodinâmico e morfodinâmico. A) Modelo inicia os cálculos considerando uma condição de fundo b^0 ; B) Ocorre a mudança do passo de tempo e a velocidade é alterada pelo modelo hidrodinâmico; C) A nova velocidade gera movimento de carga pelo fundo q_b ; D) O modelo morfodinâmico calcula todo o processo de movimentação e devolve a nova batimetria resultante da influência da velocidade neste passo de tempo. O ciclo de interações retorna para B. Adaptado de Kopmann et al. (2013)

O módulo TOMAWAC não foi acoplado ao TELEMAC-3D, nem ao SISYPHE, para que, dessa forma, a avaliação de seus resultados seja puramente ondulatória e sem influência de outros fenômenos.

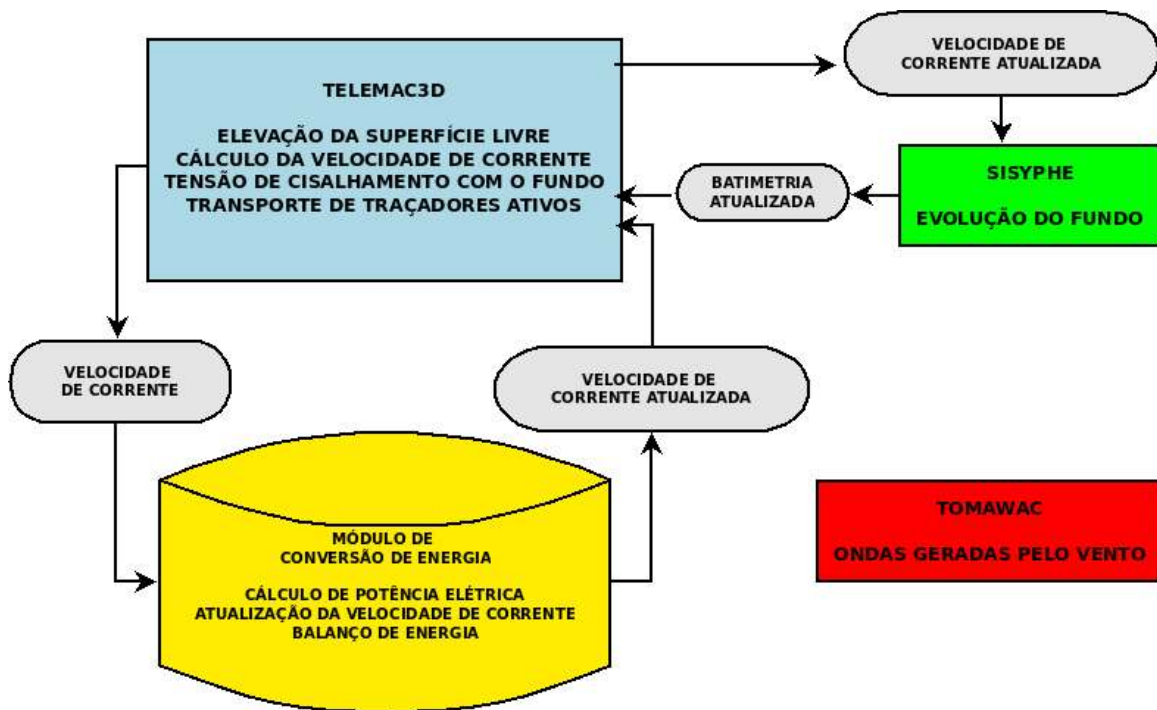


Figure 2.9: Fluxograma apresentando a interação completa entre os diferentes módulos do sistema open TELEMAC-MASCARET.

2.6 Geração da Malha de Elementos Finitos

A utilização de malhas batimétricas não estruturadas (com elementos triangulares) permite uma boa representação das características batimétricas e morfológicas na grade do modelo numérico. Este tipo de malha otimiza a simulação, permitindo representar com resolução adequada as regiões de morfologia complexa, como por exemplo, a região da ilha de Florianópolis e a zona costeira adjacente.

A qualidade dos resultados calculados pelo modelo está diretamente relacionada aos dados batimétricos utilizados para a geração da malha. Desta forma, para obter a melhor representação possível das características batimétricas da região costeira adjacente foi necessário combinar dados batimétricos de diferentes fontes.

2.6.1 Estruturação da Malha Batimétrica

As malhas batimétricas produzidas para este trabalho foram criadas pela combinação de diferentes conjuntos de dados batimétricos.

- 1) Para a região costeira foram utilizados a base de dados batimétricos da Diretoria de Hidrografia

e Navegação (DHN), realizado por Cardoso et al. (2014), disponíveis no sítio da marinha⁵, extraídos das seguintes cartas náuticas (figura 2.10):

- N^o 830 Porto de Cabedelo;
- N^o 2104 Canal São Gonçalo;
- N^o 2200 Lagoa Mirim;
- N^o 21050 Rio Itariri ao Arquipélago dos Abrolhos;
- N^o 21070 Cabo Frio ao Cabo Santa Marta Grande;
- N^o 21100 Cabo Orange a Ponta Tucuma;
- N^o 21200 Ponta Tucuma a Ponta do Guara;
- N^o 21300 Cabo Norte ao Cabo Maguari;
- N^o 21400 Cabo Maguari a Ponta Boicucanga;
- N^o 21500 Ponta Boiucucanga a Ilha Mangunca;
- N^o 21600 Ilha Maiiau a Tutoia;
- N^o 21700 Tutoia a Ponta dos Patos;
- N^o 21800 Ponta Itapage a Fortaleza;
- N^o 21900 Ponta Maceió ao Cabo Calcanhar;
- N^o 22100 Cabo Calcanhar a Cabedelo;
- N^o 22200 Cabedelo a Maceió;
- N^o 22300 Maceió a Aracaju;
- N^o 22700 Ponta Cumuruxatiba a Conceição da Barra;
- N^o 22800 Conceição da barra a Vitória;
- N^o 22900 Vitória ao Cabo São Tomé;
- N^o 23000 Cabo de São Tomé ao Rio de Janeiro;
- N^o 23200 Santos a Paranaguá;
- N^o 23300 Paranaguá a Imbituba;
- N^o 23400 Imbituba a Pinhal;

⁵<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-nauticas/cartas.html>

- Nº 23500 Pinhal a Rio Grande;
- Nº 23600 Rio Grande ao Arroio Chui;

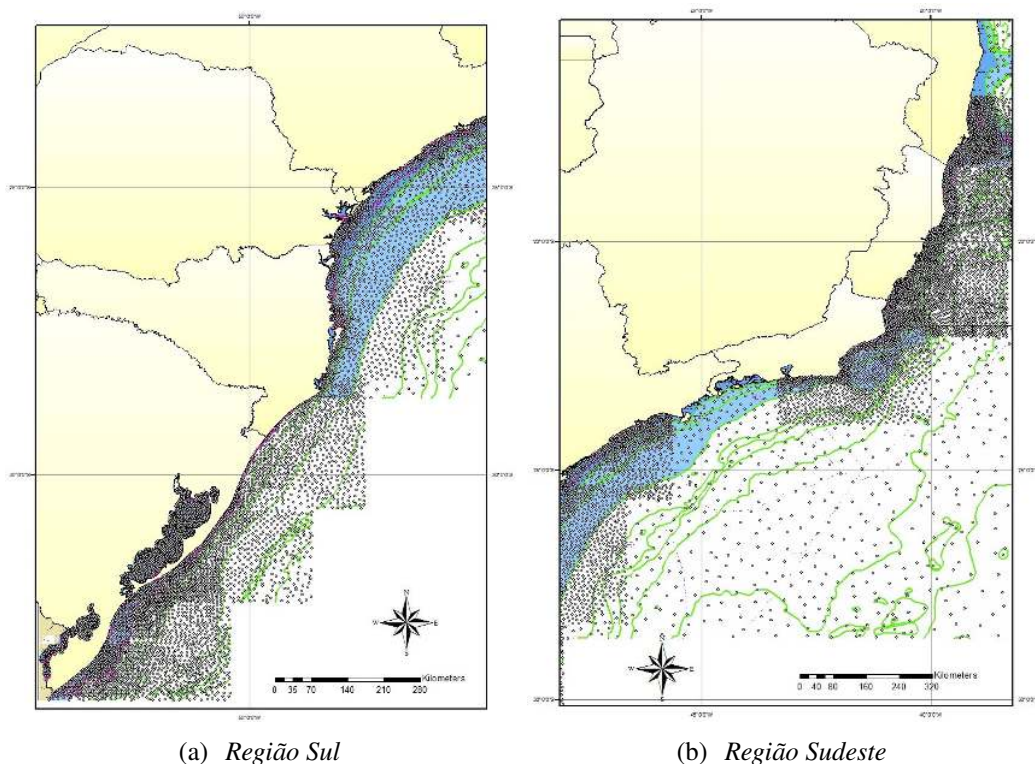


Figure 2.10: Cartas náuticas digitalizadas para a região (a) sul e (b) sudeste do Brasil. Pontos representam dados adquiridos de batimetria provenientes das cartas náuticas.

2) Os dados batimétricos na região costeira foram complementados com:

- a. Levantamentos batimétricos realizado pela Marinha do Brasil como parte do plano Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC⁶), além de dados do projeto ReviZZE⁷ (figuras 2.11 a e 2.11 b).
- b. Levantamentos batimétricos realizados pela Universidade Federal do Rio Grande - FURG, através dos projetos: AREPE, CONVERSUT, ECOPEL, SUESTE, ARGO, ECOSAR, LA-PLATA, PRONEX e MCT-II, resultando na figura 2.11 (c).
- c. Levantamentos batimétricos realizados pela Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI (figura 2.11 d).

⁶<https://www.mar.mil.br/secirm/leplac.html>

⁷<http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha/programa-revizee/item/7606>

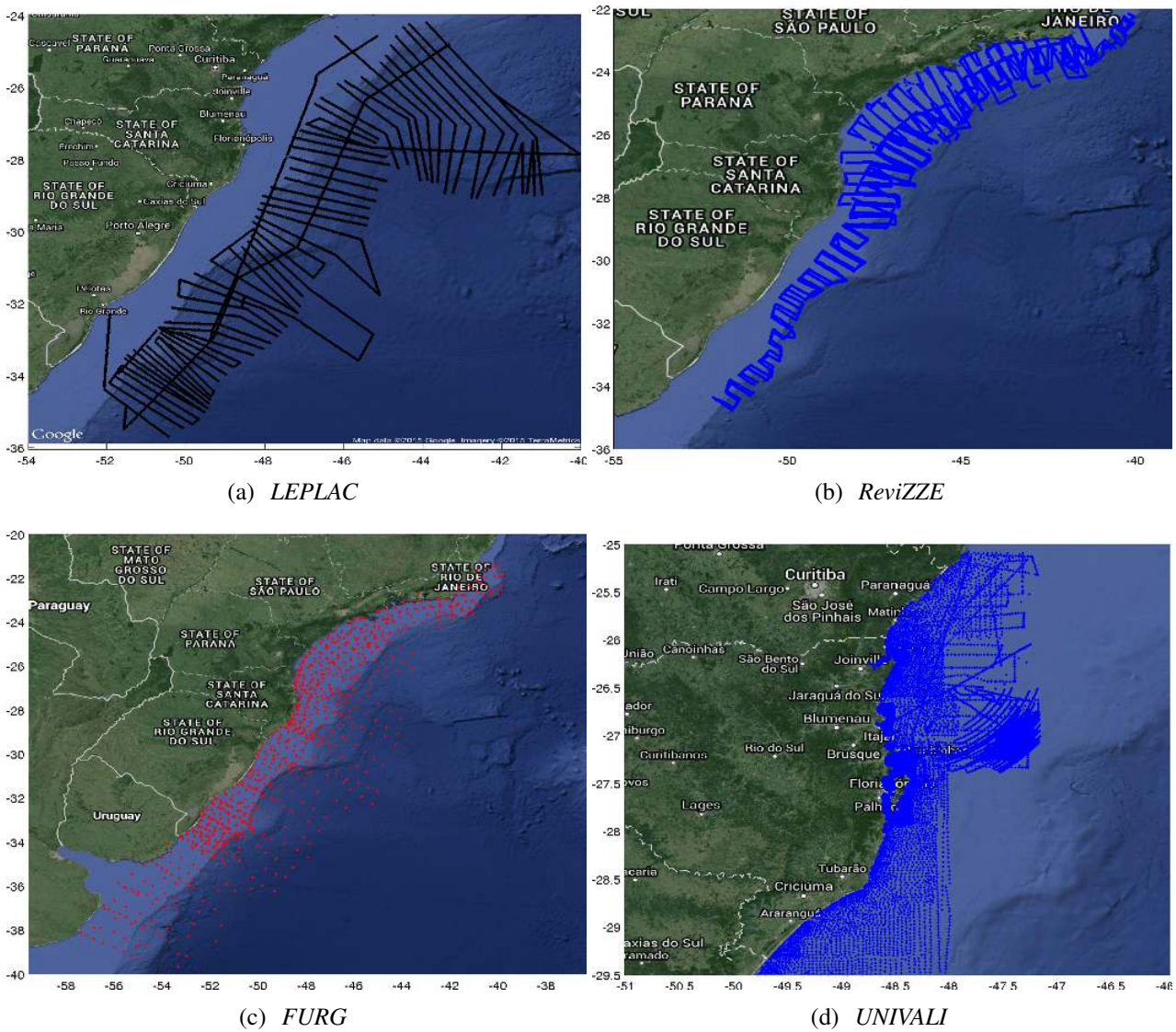
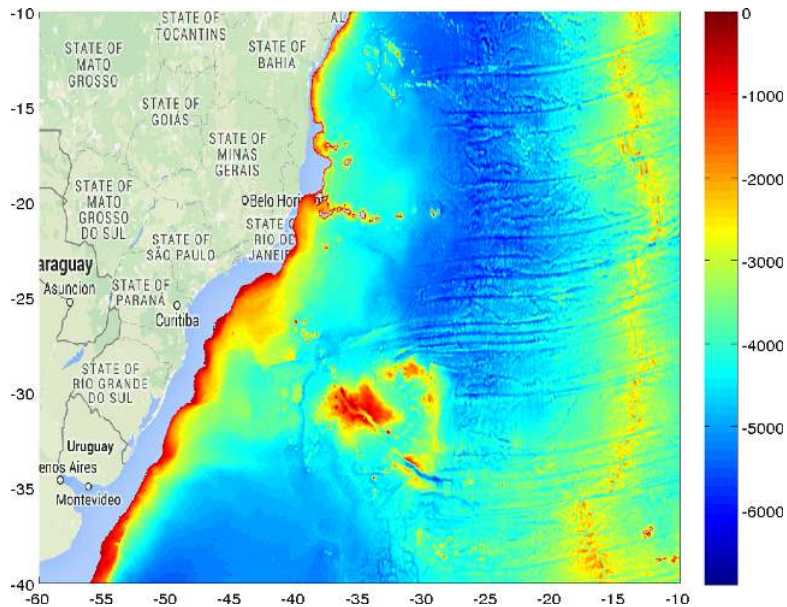


Figure 2.11: Pontos contendo dados batimétricos provenientes dos projetos (a) LEPLAC e (b) ReviZZE. Dados batimétricos provenientes de vários projetos da (c) FURG e (d) UNIVALI.

- 3) Devido a ausência ou pouca frequência de dados na região oceânica, os dados batimétricos oceânicos mais profundos que 400 metros (figura 2.12 a) foram complementados com dados provenientes do GEBCO⁸ (General Bathymetric Chart of the Oceans). Esta abordagem foi utilizada para preservar os dados coletados em regiões costeiras e, ao mesmo tempo, melhorar a batimetria em oceano aberto.



(a) *GEBCO*



(b) *Banco de dados*

Figure 2.12: Dados batimétricos provenientes do banco de dados global GEBCO (a) com profundidades entre 0 e -400m foram removidos do banco de dados. Banco de dados batimétricos costeiros utilizado (b). A linha vermelha demonstra o limite oceânico da malha. Os dados do GEBCO foram excluídos desta figura para melhor visualização.

⁸http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

2.6.2 Malha Computacional

Os dados batimétricos foram agrupados (figura 2.12 b.) e inseridos no software Blue Kenue para a geração da malha numérica de elementos finitos. Este software foi desenvolvido pelo *Canadian Hydraulic Centre (CHC)* e recentemente agregado a lista de programas recomendados para usuários do sistema open TELEMAC-MASCARET, sendo uma de suas funções a de criação de malhas de elementos finitos, além da visualização de resultados de saída do modelo.

O domínio computacional desenvolvido para este trabalho se estende do sul da cidade do Chuí, no Rio Grande do Sul, ao norte do estado do Rio de Janeiro. Além da região costeira adjacente, este domínio alcança uma profundidade de aproximadamente 5.000 m (figura 2.13) se estendendo entre as latitudes de 22°S e 34°S e as longitudes de 53°W e 37°W.

Para este trabalho foram desenvolvidas três malhas computacionais com números de nós variando de 100.000 a 350.000 pontos. Uma análise de sensibilidade de malha foi realizada (ver seção 3.1.1) para definir a malha com a melhor quantidade de pontos para a representação dos processos neste domínio.

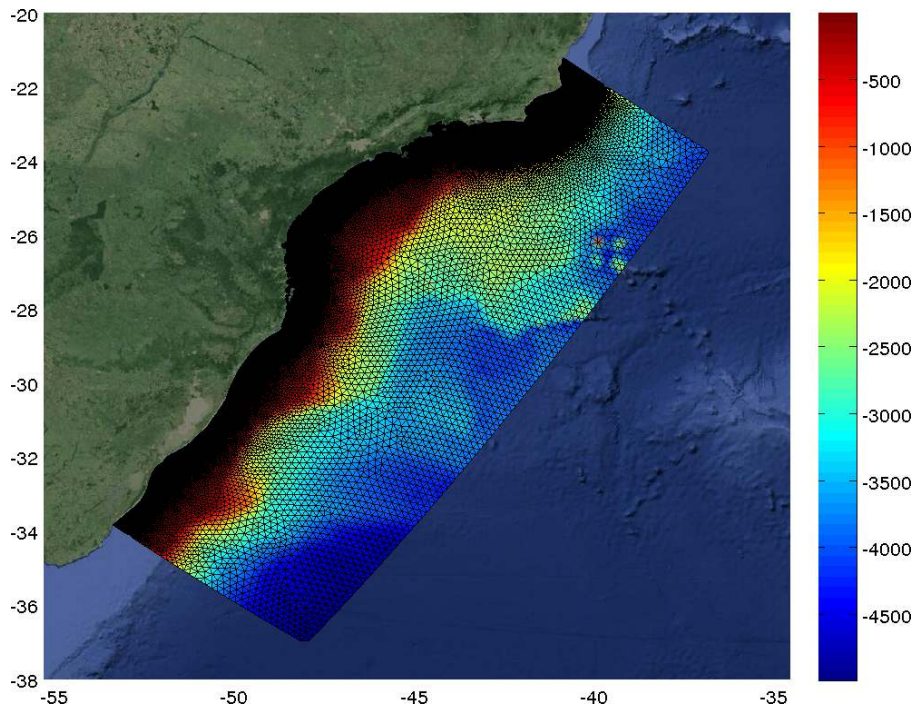


Figure 2.13: Malha numérica em elementos finitos. Podendo ser notado a variação do refino da malha na medida em que a região costeira se aproxima.

Discretização vertical da malha

A discretização espacial utilizada está baseada no método de elementos finitos, utilizando prisma com seis nós de forma que os lados verticais são quadrangulares. Sua projeção horizontal bidimensional se constitui de elementos finitos triangulares com interpolação linear, de forma que é possível construir uma malha tridimensional duplicando os triângulos no domínio quantas vezes se fizer necessário (figura 2.14). Neste sentido, o cálculo em duas e/ou três dimensões se torna possível utilizando a mesma malha.

Para construir o domínio prismático tridimensional basta realizar a repetição do domínio bidimensional ao longo da vertical em camadas superpostas (planos). Estes planos têm elevações variáveis e as condições necessárias são que a elevação dos pontos pertencentes à vertical obrigatoriamente aumentem do fundo para a superfície.

Transformação sigma

A superfície livre do modelo evolui com o tempo de forma que as elevações z da malha tridimensional variam de um passo de tempo para outro. Contudo, é possível executar a mudança das variáveis, tanto como fixar a malha durante um passo de tempo. A mudança das variáveis adotada

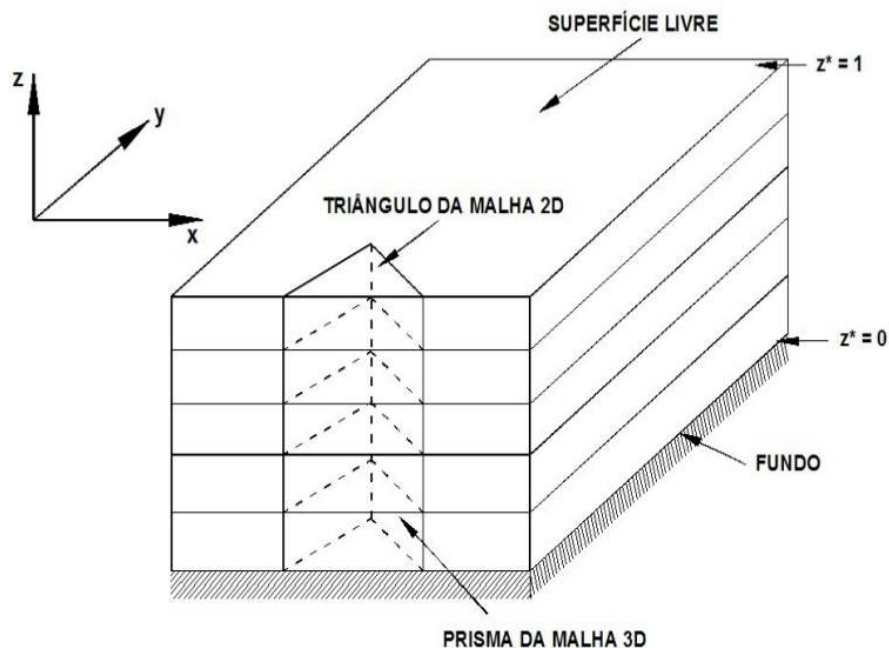


Figure 2.14: Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bidimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet e Van Haren (1996)).

neste trabalho foi a de transformação sigma, consistindo em transformar um sistema de coordenadas vertical z para um sistema z^* independente do tempo. A transformação sigma clássica utilizada neste trabalho é representada pela equação 2.57.

$$z^* = \frac{z - z_f}{Z_s - z_f} \quad (2.57)$$

onde, z_f representa a profundidade local medida na malha e Z_s a elevação da superfície livre. Esta transformação é realizada nas equações da conservação da quantidade de movimento e de concentração de traçadores para que seja feita a troca de um sistema de coordenadas (x, y, z) para o sistema de coordenadas (x, y, σ) , que permite acompanhar os limites superficiais e de fundo.

A escolha apropriada dos níveis verticais deve seguir um balanço entre custo computacional, a qualidade da estrutura do fluxo tridimensional desejada para o tipo de estudo proposto e o modelo utilizado. Na tabela 2.2 estão alguns trabalhos que utilizaram níveis sigma para diferentes locais e modelos.

No caso de ambientes estuarinos, devido as súbitas variações de densidade na região das frentes, uma boa definição vertical é requerida. Para isso, utilizando o TELEMAC-3D acoplado ou não, geralmente são utilizados 15 níveis sigmas para a Lagoa dos Patos (Kirinus et al., 2012; Marques et al., 2014; Kirinus e Marques, 2015a).

Por outro lado, Lövstedt e Almström (2015) utilizaram 8 níveis sigma em seu estudo devido a pequena extensão de sua malha estuarina (30 km), em prol de aumentar a qualidade da malha horizontal (300.000 nós). Da mesma forma, Maximova et al. (2015) optaram por 5 níveis sigma para valorizar uma malha com 450.000 pontos para o estuário de Scheldt na Holanda. Walther et al. (2014) utilizaram 16 níveis sigma em uma malha restrita de 7.000 pontos para avaliar ondulatória e sedimentação do estuário do Rio Loire na França.

Para ambientes costeiros e/ou oceânicos, o número de níveis sigma varia de 15 a 21 envolvendo o modelo TELEMAC-3D. Kirinus e Marques (2015a) realizaram testes iniciais na região sudeste brasileira com 15 níveis sigma em uma malha horizontal considerada pequena para a região (100.000 pontos).

No caso da aplicação do TELEMAC-3D acoplado ao ECOS (*Easy Coupling Oil System*) os autores

Table 2.2: Utilização de níveis sigma de acordo com diferentes autores, modelos utilizados e ambientes de estudo. σ : Níveis sigma; PCA: Plataforma Continental Adjacente; NI: Não Informado; DF: Diferenças Finitas

Referência	Local	Ambiente	σ	Pontos	Modelo
Marques et al. (2009); Kirinus et al. (2012); Marques et al. (2014); Kirinus e Marques (2015b), entre outros.	Lagoa dos Patos, Brasil	Estuarino	10-15	20.000 a 100.000	Telemac-3d
Lövstedt e Almström (2015)	Skälderviken, Suécia	Estuarino	8	300000	Telemac-3d
Maximova et al. (2015)	Scheldt, Holanda	Estuarino	5	450000	Telemac-3d
Walther et al. (2014)	Loire, França	Estuarino	16	7100	Telemac-3d
Cooper e Day (2015)	California, EUA	Costeiro e PCA	21	NI	Telemac-3d
Kirinus e Marques (2015a)	Sudeste do Brasil	Costeiro e PCA	15	115320	Telemac-3d
Marques et al. (2017); Monteiro et al. (2017)	Tramandaí, Brasil	Costeiro e PCA	15	28414	Telemac-3d + ECOS
Harari e de Camargo (1998); Harari et al. (2000)	Santos, Brasil	Costeiro e PCA	11	DF	POM
Alves (2006)	Rio Grande do Sul, Brasil	Costeiro e Oceânico	23	DF	POM
Lemos (2006)	Espírito Santo, Brasil	Costeiro e Oceânico	21	DF	POM
Pereira (2013)	Oceano Atlântico Sul e Tropical	Costeiro e Oceânico	22	DF	POM
Chassignet et al. (2009)	Global	Costeiro e Oceânico	15	DF	HYCOM

utilizaram 15 níveis e uma malha de poucos pontos devido a elevada complexidade numérica desse acoplamento (Marques et al., 2017; Monteiro et al., 2017). Cooper e Day (2015) aplicaram 21 níveis sigma em seu estudo, em uma malha costeira na região da Califórnia, Estados Unidos.

Algumas aplicações do modelo POM (*Princeton Ocean Model*) na região sul e sudeste brasileira demonstram uma escolha de níveis sigma bem ampla, de 11 a 22 níveis. Os trabalhos pioneiros de Harari e de Camargo (1998); Harari et al. (2000) na Bacia de Santos utilizaram 11 níveis sigma.

Melhores resoluções verticais foram adotadas em simulações da região costeira dos estados do Rio Grande do Sul e Espírito Santo (Alves, 2006; Lemos, 2006). Chassignet et al. (2009), ao modelar o Oceano Atlântico Sul e Tropical adotaram 22 níveis sigma, entretanto, seu objetivo estava em analisar concentrações de clorofila, portanto variações verticais de propriedades foram pouco mencionadas.

Sendo assim, neste trabalho foram utilizados 20 níveis sigma para a geração de condições iniciais e de contorno, sendo que estes níveis foram distribuídos igualmente de forma a fornecer uma melhor resolução das camadas superficiais e de fundo. A figura 2.15 mostra uma visão esquemática da distribuição de 6 níveis sigma ao longo da malha utilizada neste trabalho.

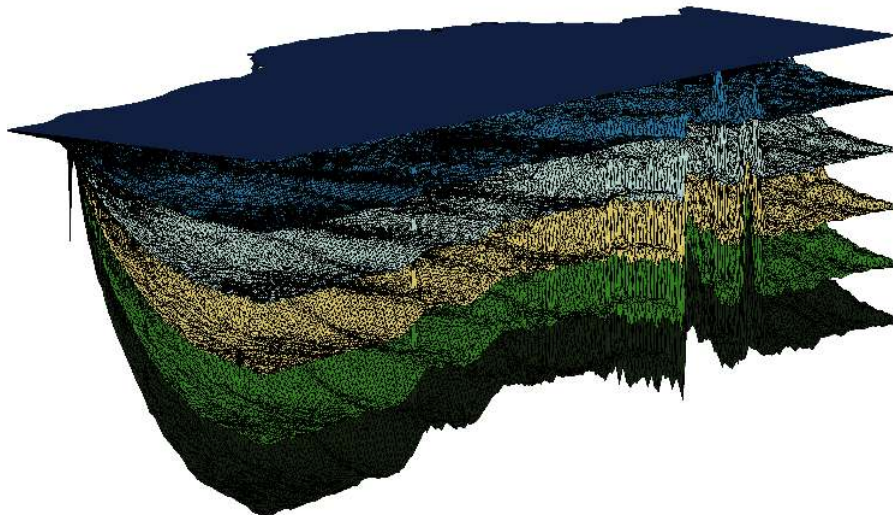


Figure 2.15: *Representação tridimensional de 6 níveis sigma da malha numérica.*

2.7 Fontes de Dados Utilizadas como Condições Iniciais e de Contorno

As fontes de dados, para compor as condições iniciais e de contorno, provêm quatro bancos de dados: o HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*⁹), o NCEP/NCAR *Reanalysis* da NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*¹⁰), o WW3 (*WAVEWATCH III*¹¹) e o *OSU OTPS Global Tidal Solutions*¹².

2.7.1 HYCOM

O modelo HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*, (Bleck, 2002)) é um modelo de circulação geral (Mellor, 2004). As coordenadas verticais são isopicnais no oceano aberto e estratificado, entretanto próximo à costa muda suavemente para coordenadas sigma, que seguem o fundo.

Esta aplicação de coordenadas híbridas amplia o alcance geográfico dos modelos de coordenadas isopicnais tradicionais em direção à mares costeiros. Esta metodologia mantém as vantagens significativas de modelos isopicnais e ainda permite maior resolução em zonas rasas, desta forma fornece melhor representação de processos físicos oceanográficos.

A resolução horizontal do HYCOM global é de $0,083^\circ$ (~ 7 km em médias latitudes) e seus resultados oceânicos fazem parte de um sistema operacional assimilativo e de previsão (*nowcast/forecast*) chamado NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*). De acordo com Cummings e Carroll (2006), o produto HYCOM-NCODA é um esquema de interpolações multivariadas que utiliza dados observados para realizar assimilação de dados, como satélites (altimetria), temperatura da superfície do mar (*Multi-Channel Sea Surface Temperature*), XBTs (*expendable bathythermographs*), CTDs (*conductivity temperature depth*) e bóias ARGO (Feder, 2000). Desta forma, a combinação de dados observados e modelados oferece estimativas mais precisas com o estado do mar para previsões.

⁹<http://hycom.org/>

¹⁰<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

¹¹<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>

¹²<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

2.7.2 Reanalysis - NOAA

O projeto NCEP/NCAR *Reanalysis* teve início no ano de 1991 através de um projeto de assimilação de dados que pretendia auxiliar no entendimento das questões relacionadas às mudanças climáticas (Kalnay e Kanamitsu, 1996). Atualmente, ele utiliza o estado da arte em sistemas de análise e previsão para realizar a assimilação de dados com cobertura temporal desde o ano de 1948 até o presente. Muitas variáveis estão disponíveis para *download* gratuito com variação temporal de quatro dados por dia ou médias diárias e mensais.

A cobertura espacial dos dados do Reanalysis é global, com variação de $1,90^\circ$ em longitude por $1,875^\circ$ de latitude. Além disso, as suas variáveis possuem distribuição vertical de 17 níveis de pressão (acima do nível do mar). No contorno superficial, as variações espaço-temporais do vento foram interpoladas e aplicadas a cada nó do domínio do modelo numérico (figura 2.19). De forma complementar os dados de pressão atmosférica e temperatura do ar junto à superfície do oceano foram forçados de forma similar aos ventos, possibilitando que os processos de troca de calor com a atmosfera fossem levados em consideração no modelo.

2.7.3 WW3

O modelo WW3 foi desenvolvido pelo Centro de Modelagem Ambiental da NOAA (EMC-NOAA), órgão responsável pelo desenvolvimento e implementação de previsões climáticas para os Estados Unidos, além de fornecer resultados globais de seus produtos.

Sendo assim, o WAVEWATCH III oferece resultados de modelagem de ondas globais com resolução de $1,25^\circ$ em longitude por 1° de latitude. Os dados possuem periodicidade de 6 horas (00z, 06z, 12z e 18z)¹³ e datam desde 1997 até o presente. Entre as variáveis disponíveis para acesso estão: Altura significativa das ondas (H_s), Período de pico das ondas (T_p), Direção de pico das ondas (D_p), além da velocidade do vento meridional e zonal.

2.7.4 Maré astronômica

A partir da versão 6.2 do sistema open TELEMAC-MASCARET a maré astronômica pode ser utilizada através de um módulo programado pelos desenvolvedores (Pham e Lyard, 2012; Pham et al.,

¹³o z aqui representa hora “ZULÚ”, em referência ao GMT “Greenwich Mean Time”, onde 12z representa 12:00h GMT.

2013). Nestas versões do sistema de modelagem, a maré astronômica é calculada através da assimilação de dados do modelo global OTPS (*OSU Tidal Prediction Software*) (Egbert e Erofeeva, 2002) pertencente a *Oregon State University* (OSU). Sendo que este modelo global de marés oceânicas contempla as 29 principais constituintes de maré (Pham et al., 2013).

A maré é calculada no *OTPS* através dos dados de altimetria do sensor *TOPEX/Poseidon*, submetidos a filtro passa-baixa e reamostrados para todo o período de passagem do satélite (Egbert e Erofeeva, 2002). Eventuais erros e *outliers*¹⁴ encontrados são eliminados, resultando em uma longa série temporal de amplitudes onde são estimadas as constantes harmônicas. Os dados de maré são então impostos em toda a borda oceânica da malha computacional.

2.8 Condições Iniciais

As condições iniciais de cada módulo estão apresentadas no fluxograma da figura 2.16. Cada módulo necessita de dados específicos para seu correto funcionamento, enquanto outros podem ser iniciados somente com parametrização. Para cada simulação específica deste trabalho (ver capítulo 3), a aplicação das condições iniciais foram as mesmas, mudando apenas a data inicial. Nesta seção serão tratadas as condições específicas dos estudos de caso.

Para o módulo hidrodinâmico - *TELEMAC-3D* (figura 2.16), os dados de condição inicial são impostos em todos os nós da malha oceânica. O *HYCOM* é responsável por prover dados para as variáveis oceânicas (velocidade U e V , salinidade, temperatura), onde todos os dados são posteriormente interpolados para todos os níveis sigma.

A aplicação desta fonte de dados como condição inicial está representada na figura 2.17. Neste caso, está representado o dia 01-01-2003, ou seja, o primeiro dia da simulação dos estudos de caso nos quais foram aplicados, na camada superficial, os dados de salinidade (figura 2.17a), temperatura (figura 2.17b) e velocidade u e v (figura 2.17c e d). A maré astronômica é adicionada através da assimilação de dados do modelo global OTPS (*OSU Tidal Prediction Software*), em todos os nós superficiais do modelo.

Para inicializar o módulo ondulatório - *TOMAWAC*(figura 2.16), são necessários dados de onda

¹⁴Medida que varia dois desvios padrões da média, sendo tratada com um erro de medição e deve ser desconsiderada da amostra.

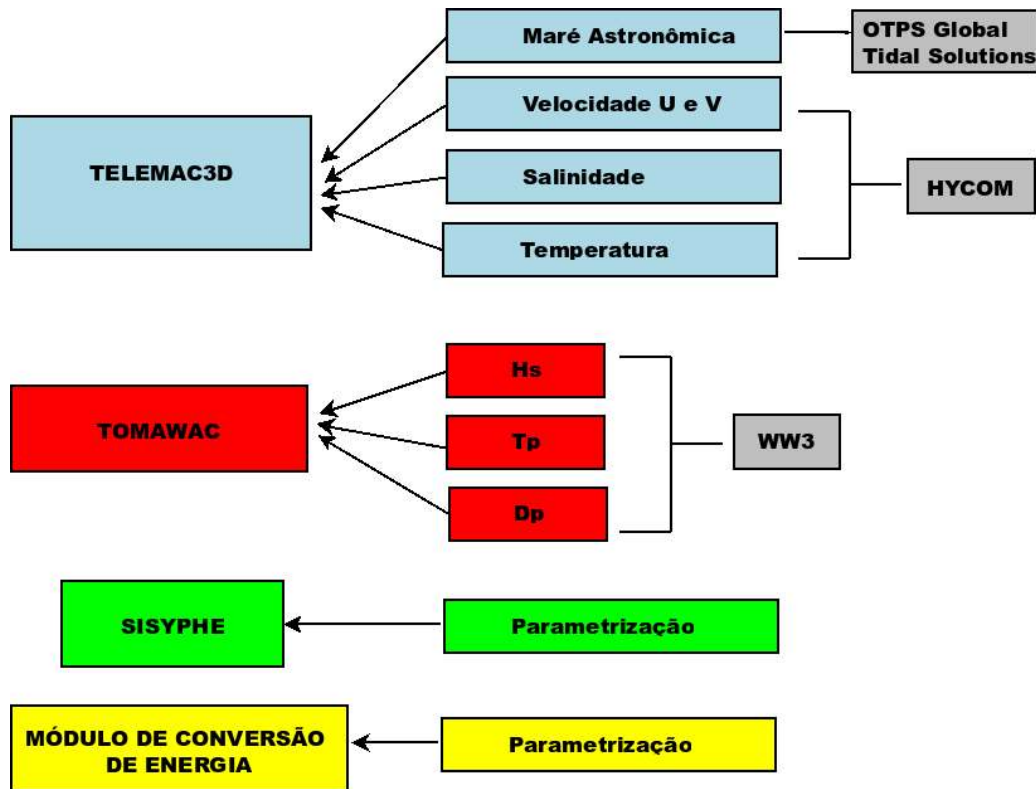


Figure 2.16: Fluxograma da relação entre os bancos de dados e as condições iniciais de cada módulo.

global, neste caso foram utilizados os do modelo global WAVEWATCH III. Sendo assim, dados para o dia 01-01-2003 são apresentados na figura 2.18, correspondendo respectivamente, a altura significativa das ondas, período de pico e direção de pico.

No caso dos módulos morfodinâmico (SISYPHE) e do módulo de conversão de energia das correntes, a condição inicial é imposta através de parametrização. No SISYPHE foi imposto uma distribuição homogênea de sedimentos em toda a malha computacional. Este sedimento possui granulometria de 2 mm, estando entre as classes de areia média e grossa. Esta abordagem foi utilizada devido a ausência de dados sedimentológicos com ampla distribuição na área de estudo.

O módulo de conversão de energia das correntes é parametrizado através de equacionamento (ver capítulo 2.4), e se utiliza da velocidade incidente nas turbinas para gerar energia, além de manter o balanço de energia local.

2.9 Condições de Contorno

Além de condições iniciais definidas através do uso de parâmetros e campos de propriedades, o modelo numérico necessita de condições de contorno para realizar o cálculo das variáveis. Para

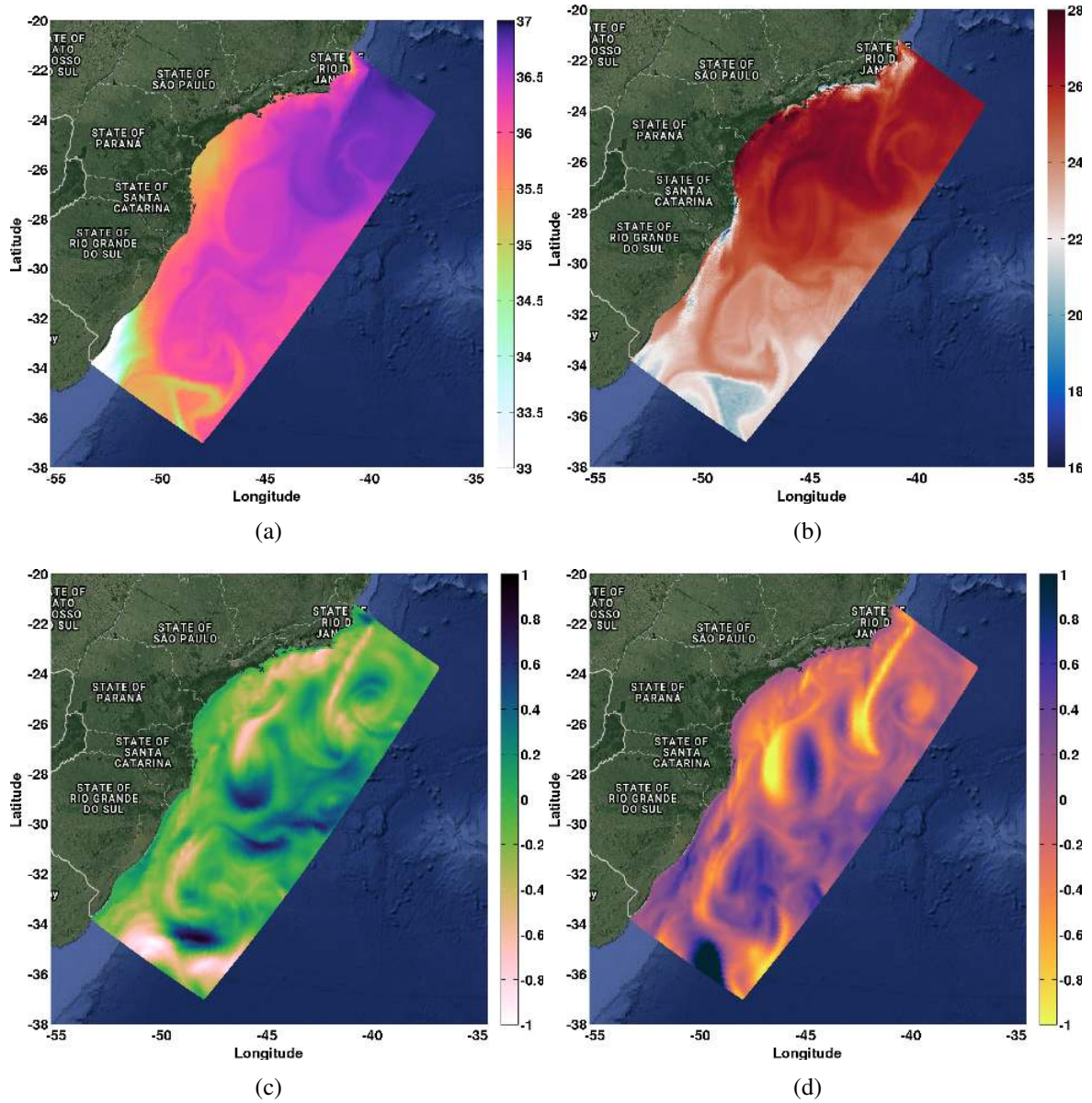


Figure 2.17: Condições iniciais hidrodinâmicas provenientes do HYCOM para a camada superficial do módulo TELEMAC-3D . (a) Salinidade, (b) Temperatura (°C), (c) Velocidade u (m.s⁻¹) e (d) Velocidade v (m.s⁻¹).

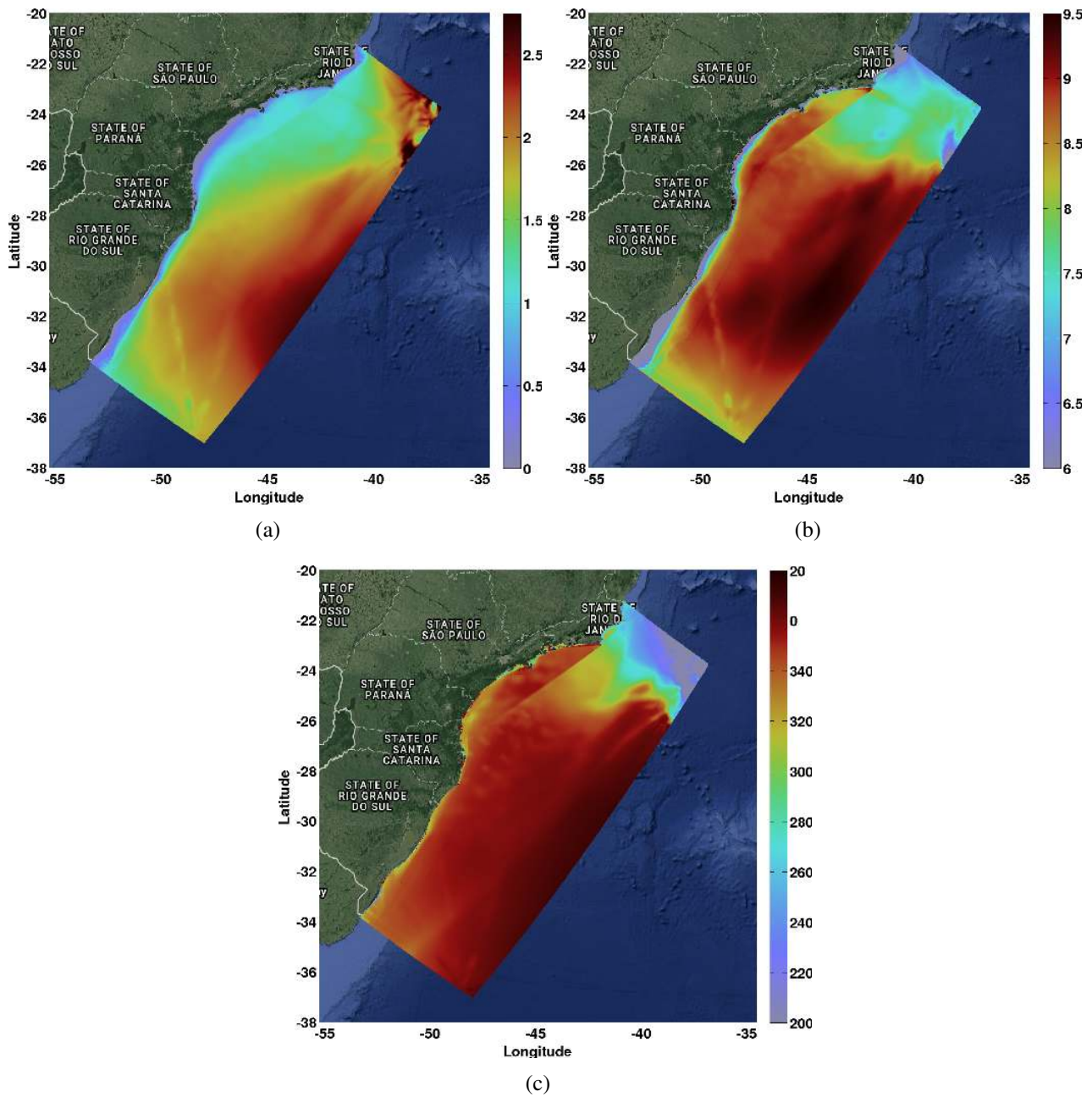


Figure 2.18: Condições iniciais ondulatórias provenientes do WW3 para a camada superficial do módulo TOMAWAC. (a) Altura significativa das ondas (m), (b) Período de pico (s), (c) Direção de pico (°).

todas as simulações deste trabalho foram utilizadas as mesmas fontes de condições iniciais e de contorno, mudando apenas a data da simulação e os cenários de acoplamento. O módulo TELEMAC-3D considera dois tipos de condição de contorno, o líquido e o superficial.

Nos contornos líquidos podem ser prescritas oscilações, fontes de quantidade de movimento ou de descarga fluvial (como por exemplo, a desembocadura de rios ou as fronteiras oceânicas). Os contornos líquidos são compostos por fronteiras continentais e oceânicas. Neste trabalho, nenhuma fonte de contorno líquido foi imposta nas fronteiras continentais. Entretanto na fronteira oceânica foram prescritos a maré astronômica, as velocidades de correntes, a salinidade e a temperatura (Figura 2.19).

O segundo tipo são os contornos superficiais, onde podem ser prescritas ondas de superfície, ventos ou campos de escalares. No contorno superficial deste trabalho foram prescritos dados de vento (componente zonal e meridional), pressão atmosférica e temperatura do ar de forma a simular as trocas de calor com a atmosfera (Figura 2.19).

Os dados utilizados como condições iniciais e de contorno foram extraídos de diferentes fontes para o domínio do modelo (figura 2.16). Posteriormente foram interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos. Todos os dados foram adicionados mantendo a variação temporal original fornecida pelos bancos de dados utilizados (ver seção 2.7).

No TELEMAC-3D os dados do HYCOM-NCODA para as variáveis temperatura, salinidade e componentes da velocidade de corrente (u e v) foram interpolados para todos os pontos da malha em todos os níveis sigma (figura 2.19), sendo utilizados como condição inicial e de contorno para os períodos estudados. Os dados foram impostos diariamente na borda oceânica (figura 2.19).

No módulo ondulatório TOMAWAC foi implementado em sua borda oceânica (contorno líquido), os dados de altura significativa das ondas, período de pico e direção de pico. Além disso, no contorno superficial foram utilizados dados de vento (componente zonal e meridional) do WW3. A variação temporal dos dados do WW3 foi mantida, ou seja, no contorno os dados foram impostos de 6 em 6 h.

Nos módulos morfodinâmico (SISYPHE) e de conversão de energia das correntes, nenhuma condição de contorno externa foi adicionada. Entretanto, o (SISYPHE) possui uma condição de conservação do balanço de volume, ou seja, todo o sedimento existente no domínio é mantido, não existem

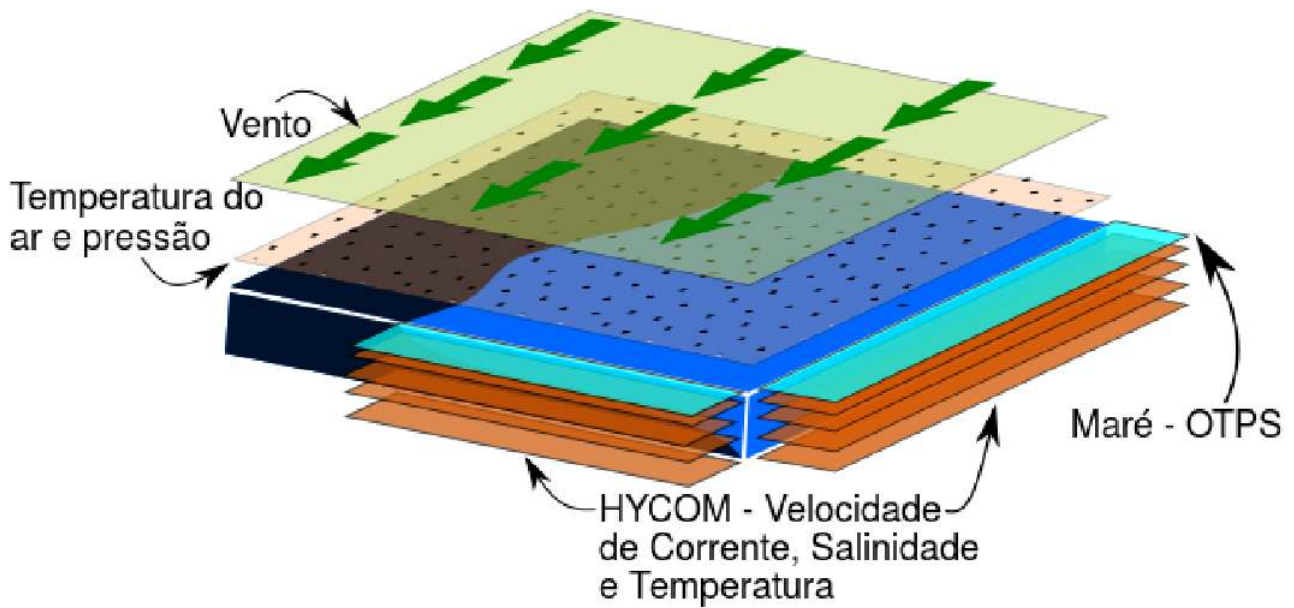


Figure 2.19: Contornos líquidos (HYCOM e OTPS) e superficiais (Vento, Temperatura do ar e Pressão atmosférica) utilizados nas simulações. O contorno terrestre é considerado uma parede fechada. Adaptado de da Silva (2018) (em preparação).

fontes e nem sumidouros na abordagem utilizada.

2.10 Métodos para Análise dos Resultados

Para atingir os objetivos supracitados, o sistema de modelagem numérica open TELEMAC-MASCARET será aplicado em três simulações distintas, que serão amplamente abordadas nos capítulos 2, 3 e 4. Os estudos de caso contemplam (1) primeiramente o uso do módulo ondulatório TOMAWAC, (2) o uso do modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D associado ao módulo morfodinâmico SISYPHE e a comparação deste cenário com a adição das turbinas programadas numericamente no módulo de conversão de energia (3).

Atendendo ao objetivo específico de identificar a variabilidade espacial e temporal dos recursos energéticos (ondas e correntes) na região de estudo, análises de variação sazonal e mensal foram realizadas de acordo com Cornett (2008), além de análises de ondaletas espaciais e temporais (Liu et al., 2007). Os resultados desta abordagem permitem elucidar os locais mais viáveis a nível de recursos energéticos além dos períodos de tempo nos quais estes recursos sofrem influências positivas e negativas por parte de variáveis oceanográficas e meteorológicas.

As estimativas de taxas de conversão foram realizadas através de análise de séries temporais da energia produzida pelos sítios de turbinas. Além disso, a influência das estruturas foi avaliada

através dos resultados morfodinâmicos indicando mobilidade das áreas de deposição/erosão além da evolução do fundo marinho. A influência tridimensional no fluxo costeiro também será abordada através de transectos médios durante todo o período de simulação, fornecendo informações sobre as tendências de mudança no fluxo vertical durante o período estudado.

Parametrizações, verificação e validação do
modelo TELEMAC-3D

CAPÍTULO 3

Parametrizações, verificação e validação do modelo

TELEMAC-3D

3.1 Performance e Parametrização

A partir do início do desenvolvimento deste trabalho se tornou necessária a avaliação da performance da malha e o aperfeiçoamento da parametrização do modelo para o estudo proposto. Sendo assim, foram realizados testes de sensibilidade de malha, sensibilidade do modelo, verificação do modelo, validação do modelo e por fim, o estudo de cenários para concretização dos objetivos propostos.

Esta seção se dedica a explorar melhor os aspectos e importâncias destes testes para melhorar a precisão dos resultados encontrados, seguindo a ordem apresentada no fluxograma da figura 3.1. Primeiramente foram realizados testes de sensibilidade de malha, com simulações de 45 dias de duração, essa análise serviu para definir a melhor relação custo computacional e a precisão dos resultados.

Após a escolha da malha computacional mais apropriada, testes de parametrização do modelo com testes de diferentes parâmetros físicos foram realizados. Esta verificação foi realizada para três anos (2012, 2013 e 2014) distintos objetivando encontrar diferentes cenários hidrodinâmicos e desta forma definir a melhor parametrização, através de 28 comparações, para o modelo frente as condições

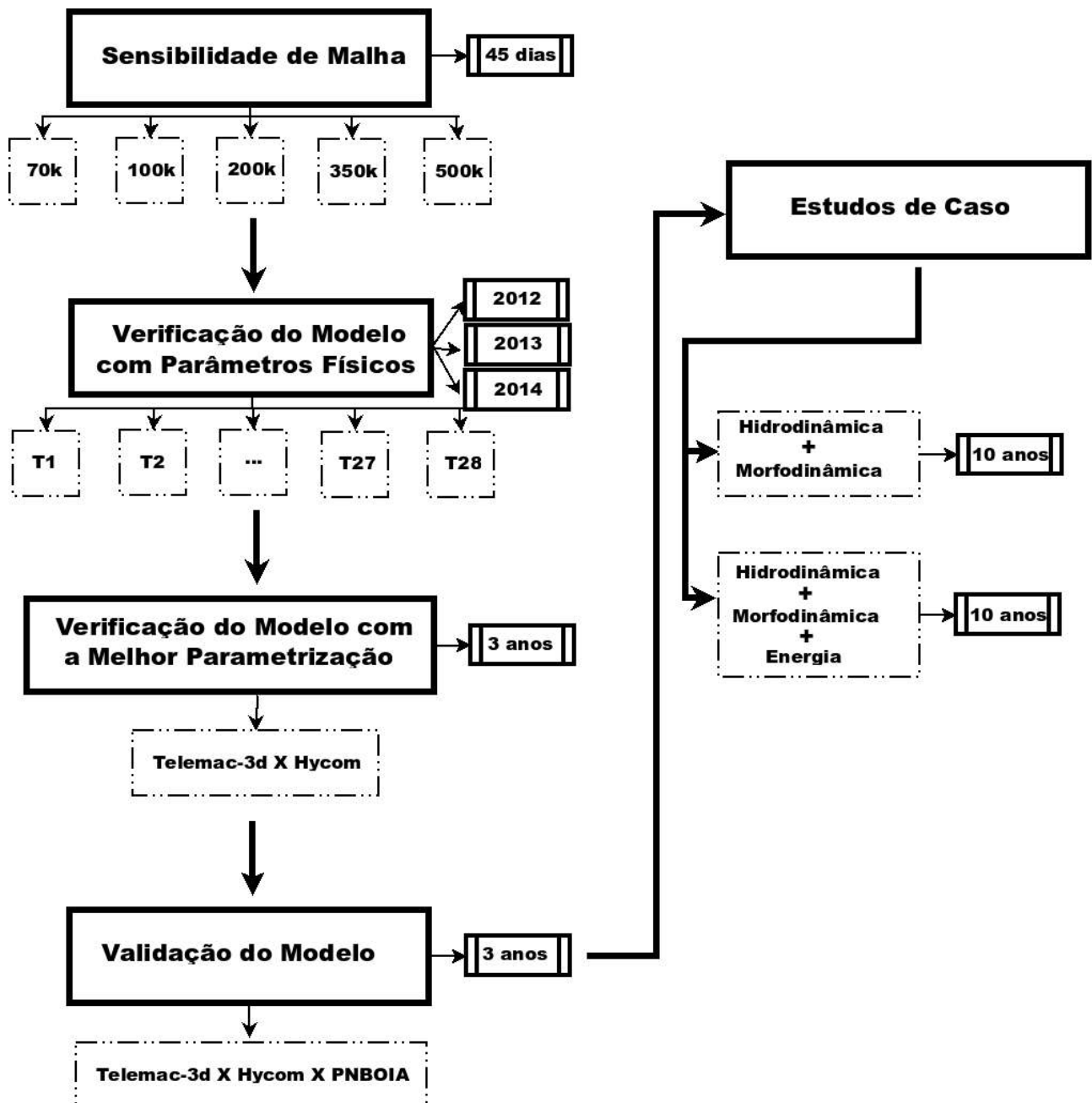


Figure 3.1: Fluxograma relacionando o desenvolvimento do estudo realizado.

oceanográficas.

Em posse da melhor parametrização para o período, uma simulação contínua de três anos (2012 a 2014) foi realizada e seus resultados comparados com os do HYCOM. Essa análise priorizou comprovar que o modelo TELEMAC-3D possui a capacidade de representar o período analisado, e que pode ser utilizado para simulações de longo período.

A validação do modelo foi realizada com a simulação contínua de três anos (2012 a 2014) objetivando comparar séries temporais dos dados do modelo TELEMAC-3D com o HYCOM e com os dados observados das PNBOIAS (Programa Nacional de Boias). Neste caso, parâmetros estatísticos e

indicadores de performance foram utilizados para demonstrar a habilidade do modelo TELEMAC-3D em simular o ambiente estudado.

Por fim, através das informações obtidas nos processos de sensibilidade de malha, parametrização e validação do modelo foram propostos dois estudos de caso (figura 3.1), ambos simulados pelo período de 10 anos (2003 a 2012). O primeiro é uma análise hidrodinâmica e morfodinâmica objetivando compreender os processos oceanográficos e sedimentares da região de estudo. Esta simulação visa também fornecer informações pertinentes para a definição de locais de interesse para a instalação de turbinas hidrocínéticas.

Para o segundo estudo de caso, foi adicionado o módulo de conversão de energia, e turbinas hidrocínéticas foram adicionadas em pontos de considerada importância energética na região de estudo. Detendo assim, um cenário anterior e outro posterior a um possível empreendimento energético, facilitando a análise de impactos pontuais nas regiões de interesse.

Para concluir todas as simulações propostas neste trabalho foi necessário a utilização de uma ampla estrutura computacional fornecida pelos seguintes grupos: Laboratório de Análises Numéricas e Sistemas Dinâmicos (LANSD-FURG¹), Laboratório de Multi-Usuários do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC-FURG²), além do apoio do supercomputador do Centro Nacional de Supercomputação na Região Sul (CESUP-UFRGS³) pertencente ao Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho (SINAPAD).

Todas as simulações, exceto as de estudo de caso, foram concluídas com a estrutura computacional da FURG (LANSD e PPGMC, ver tabela 3.1), entretanto para as simulações de estudo de caso, envolvendo longo período simulado (10 anos), foi necessário a utilização do supercomputador do CESUP, que conta com 1.536 núcleos e 4.096 GB de RAM. A configuração da estrutura computacional utilizada como apoio ao desenvolvimento deste trabalho pode ser verificada na tabela 3.1.

O tempo de processamento de cada cenário simulado pode ser estimado através da tabela 3.2, que representa o tempo computacional do acoplamento entre o TELEMAC-3D e o SISYPHE. Nesta estimativa de processamento, não estão sendo consideradas pausas por problemas técnicos, como falta de luz ou queda no sistema do CESUP e nem o tempo gasto para *backups* e reinicialização das

¹www.lansd.furg.br

²www.modelagemcomputacional.furg.br

³www.cesup.ufrgs.br

simulações.

Apesar do tempo de simulação aparentar ser rápido ao se utilizar 120 núcleos (aproximadamente 80 dias, de acordo com a tabela 3.2), as simulações com 10 anos de duração levaram aproximadamente 6 meses para serem finalizadas devido as dificuldades apresentadas anteriormente.

Table 3.1: Configuração dos computadores utilizados em todas as etapas do desenvolvimento da tese.

Computador	Processador	Núcleos	RAM
Lansdmod01	Intel Core i7-4770 CPU 3.40GHz	8	16 Gb
Lansdmod02	Intel Core i7-4770 CPU 3.40GHz	8	16 Gb
Lansdmod03	Intel Core i7-3770 CPU 3.50GHz	8	16 Gb
Lansdmod04	Intel Core i7 CPU 930 2.80GHz	8	12 Gb
Workstation05	Intel Core i7-4960X CPU 3.60GHz	12	32 Gb
Workstation06	Intel Core i7-4960 CPU 3.60GHz	12	32 Gb
PPGMC-01	Intel Xeon CPU ES-2650 2.00GHz	16	32 Gb
SGI Altix1 x32	AMD Opteron 6176 SE 2.3 GHz	12	64 Gb
SGI Altix2 x32	AMD Opteron 6238 SE 2.9 GHz	12	64 Gb

Table 3.2: Estimativa de tempo para o modelo hidrodinâmico acoplado ao morfodinâmico. A malha desta simulação contém 205.617 nós, e 20 níveis verticais totalizando 4.112.340 de nós.

Malha	Núcleos	Duração	Dias simulados
200k	48	18d 15h 21m	365
200k	96	10d 0h 6m	365
200k	120	8d 0h 0m	365

3.1.1 Sensibilidade da Malha Computacional

A verificação da malha computacional contou com a criação de várias malhas de diferentes tamanhos, áreas e formatos, seguindo a metodologia indicada por Cezana (2007) e dos Santos (2011). Por fim, foi verificado que a área compreendida entre o sul do estado do Rio Grande do Sul e o norte do estado do Rio de Janeiro, e seus respectivos limites oceânicos (figura 2.13) possuía condições adequadas para a realização das verificações iniciais.

O principal objetivo do teste de sensibilidade da malha computacional foi investigar a independência dos resultados em função da resolução dos elementos discretos da malha (Cezana, 2007), pois os erros numéricos provenientes da discretização das equações de conservação e da quantidade de movimento são minimizados com o aumento do refinamento espacial da malha. Assim, a malha utilizada nas simulações deve ser refinada o suficiente para garantir que as estruturas e feições oceanográficas existentes na área de estudo sejam representadas corretamente. Entretanto, não pode extrapolar as limitações computacionais a ponto de inviabilizar a realização do estudo.

Sendo assim, analisar a sensibilidade da malha computacional consiste em: (1) Definir uma malha computacional funcional para a área de estudo; (2) Replicar este domínio (com os mesmos limites horizontais e verticais) com diferentes números de pontos através da aplicação de novos critérios de refino, aumentando a granularidade das malhas; (3) Comparar as malhas e definir qual possui a melhor performance em relação ao custo computacional e o resultado gerado.

Para avaliar a sensibilidade da malha foram desenvolvidas cinco malhas com diferentes resoluções para simular 45 dias do ano de 2004 (tabela 3.3). A malha 1 possui cerca de 70.000 nós, a malha 2 aproximadamente 100.000 nós, a malha 3 definida por cerca de 200.000 nós, a malha 4 com aproximadamente 350.000 nós, enquanto a malha 5 foi concluída com aproximadamente 500.000 nós.

A tabela 3.3 mostra o período e os parâmetros físicos escolhidos para a realização das simulações de sensibilidade de malha. Apesar de cinco malhas terem sido construídas, a malha 1 e 5 não foram testadas até o fim por gerar muitas instabilidades no domínio e por falta de poder computacional, respectivamente. As malhas restantes estão representadas na figura 3.2 e serão posteriormente chamadas de 100, 200 e 350. Os mesmos critérios (polígonos) foram aplicados em todas as malhas, sendo apenas modificado o grau de refinamento de cada critério para aumentar ou diminuir os pontos

das malhas.

Para comparar a sensibilidade entre as malhas foram escolhidos seis pontos (figura 3.2) na região costeira com distância equivalente entre eles, sendo que a posição dos pontos está apresentada na tabela 3.4. Foram analisadas a intensidade da velocidade de corrente e a elevação do nível do mar nestes pontos.

Para a velocidade de corrente (figura 3.3) pode ser observado que as três simulações representam a mesma tendência de reprodução da velocidade em todos os pontos. Entretanto, a malha 100 (linha azul) apresenta maiores discrepâncias em relação às outras malhas (linha preta e vermelha) em todos os pontos. Pouca diferença pode ser observada entre as malhas 200 e 350. Ao observar a elevação do nível do mar (figura 3.4) as diferenças entre as três malhas é pouco perceptível, com maior desvio da malha 100 nos pontos 1, 2 e 4.

Para ressaltar as diferenças entre a sensibilidade das malhas (resolução) e a precisão dos resultados gerados, um método de filtragem foi aplicado. A intensidade da velocidade e a elevação do nível do mar foram divididos em suas componentes de alta e baixa frequência, com período de corte em 72 horas - através de um filtro de janela de Lanczos (Thomson e Emery, 2014), e seu erro relativo (equação 3.1) foi confrontado entre as malhas (tabela 3.5). Os resultados das simulações permitem a

Table 3.3: Configuração das simulações de sensibilidade de malha.

Período de simulação	01/01/2004 a 15/02/2004
Salvamento dos resultados	a cada 3 horas
Paralelismo	12 núcleos
Passo de tempo	90 s
Projeção Geográfica	WGS-84
Coefficiente de Coriolis	Variável
Modelo de turbulência horizontal	k- ϵ
Modelo de turbulência vertical	k- ϵ
Lei de fricção de fundo	Manning
Lei de fricção lateral	Manning
Tidal Flats	Sim
Níveis Sigma	15
Coefficiente de influência do vento	1.10^{-6}

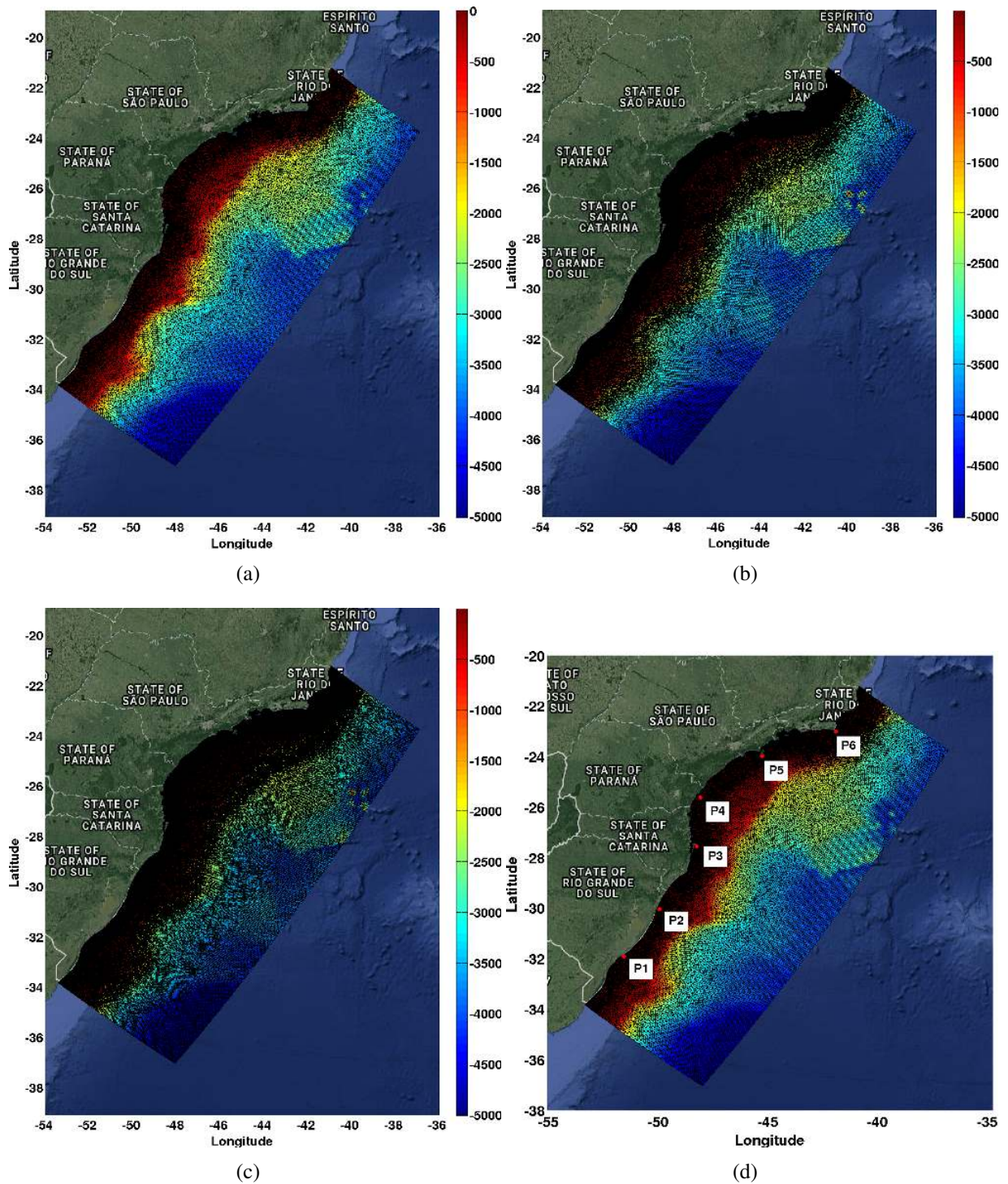


Figure 3.2: Malhas computacionais de elementos finitos desenvolvidas para a análise de sensibilidade. Malhas com (a) 102.585, (b) 205.617 e (c) 352.393 nós. (d) Malha com a localização dos pontos comparados.

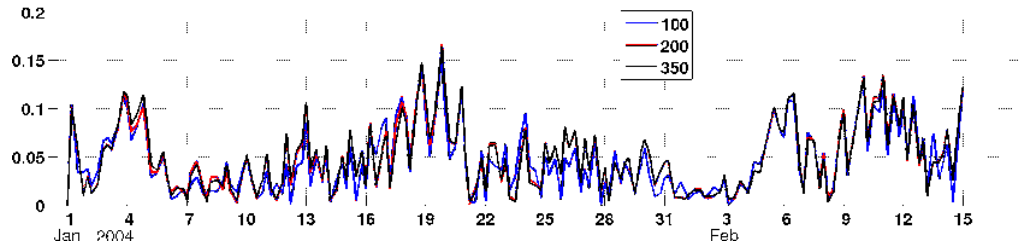
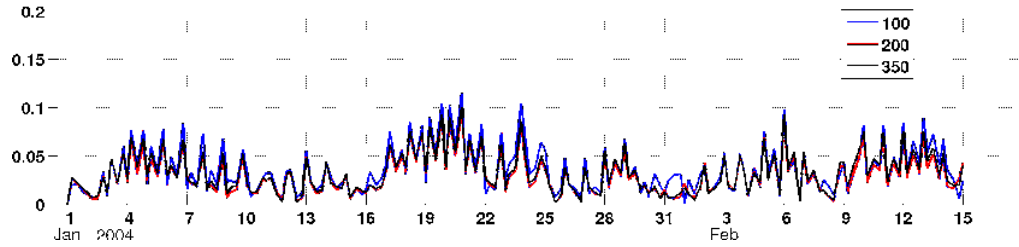
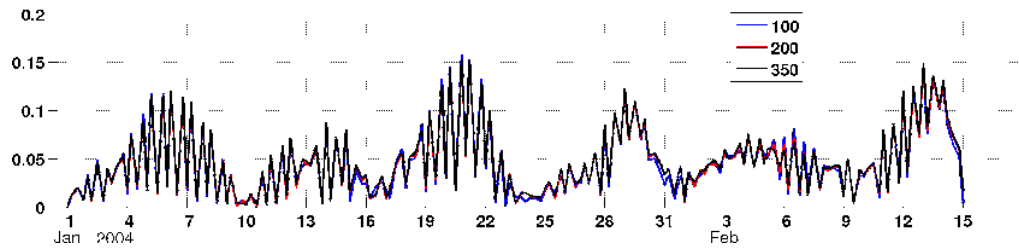
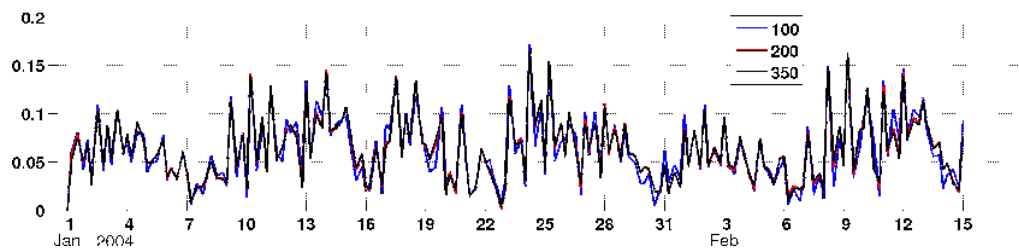
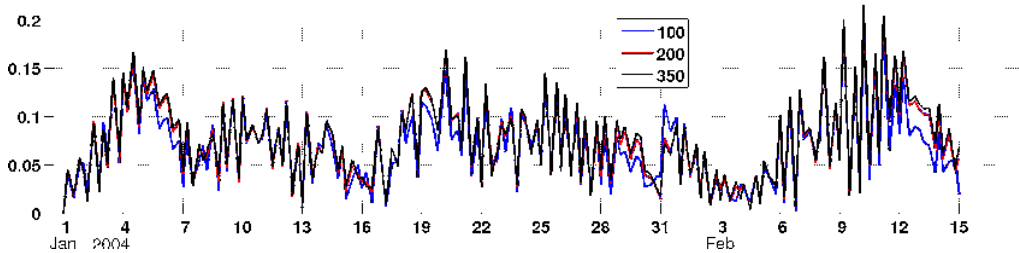
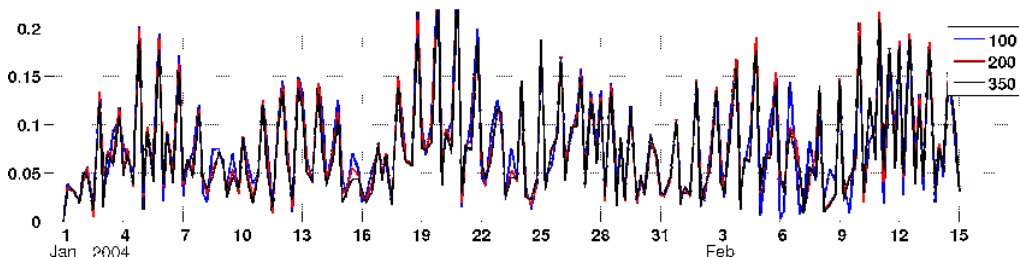
(a) *Ponto 1*(b) *Ponto 2*(c) *Ponto 3*(d) *Ponto 4*(e) *Ponto 5*(f) *Ponto 6*

Figure 3.3: Intensidade da corrente ($m.s^{-1}$) nos 6 pontos escolhidos variando no tempo.

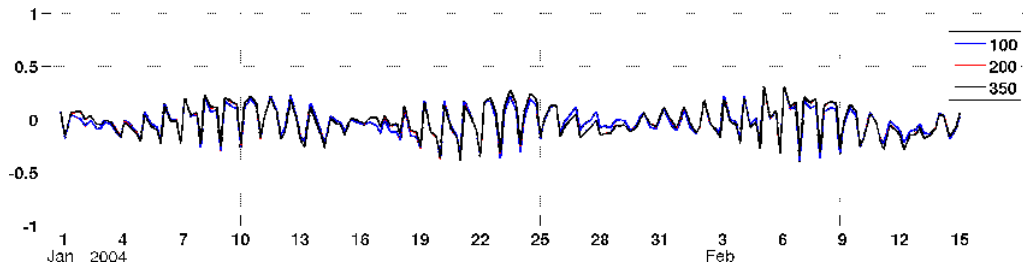
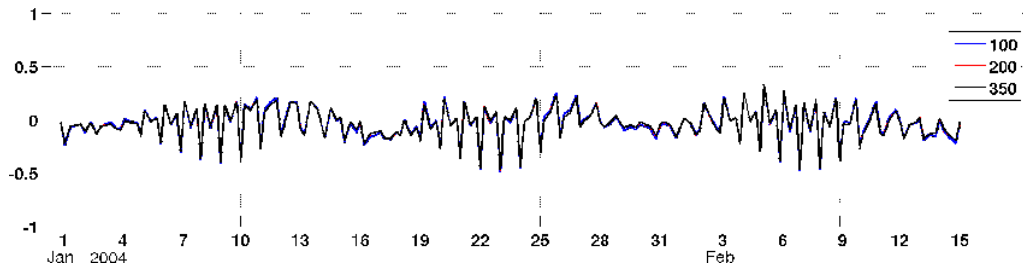
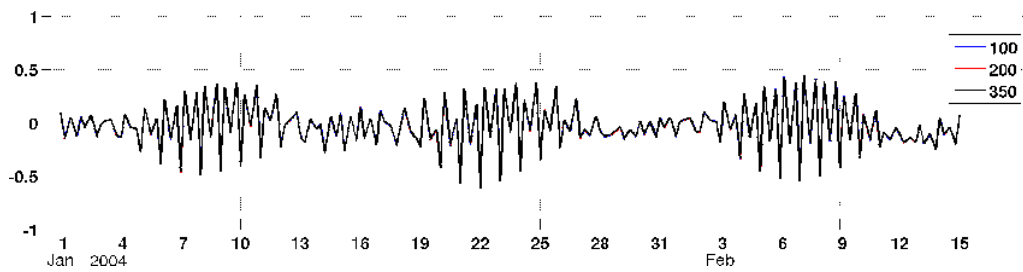
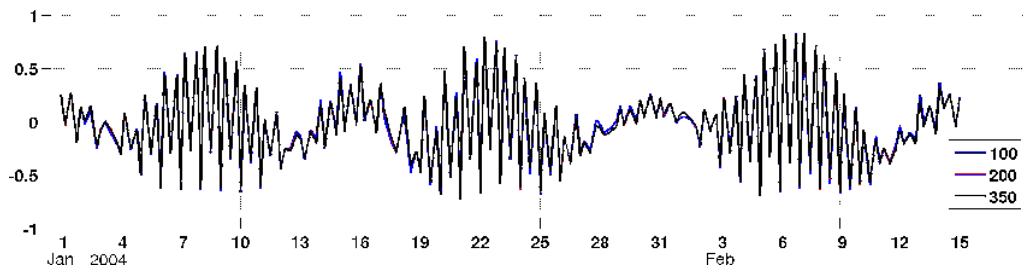
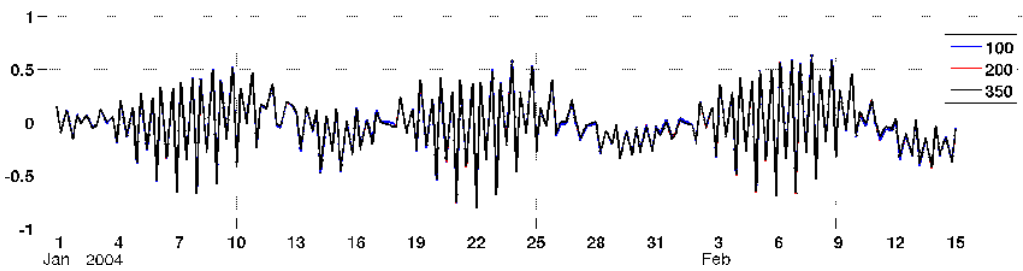
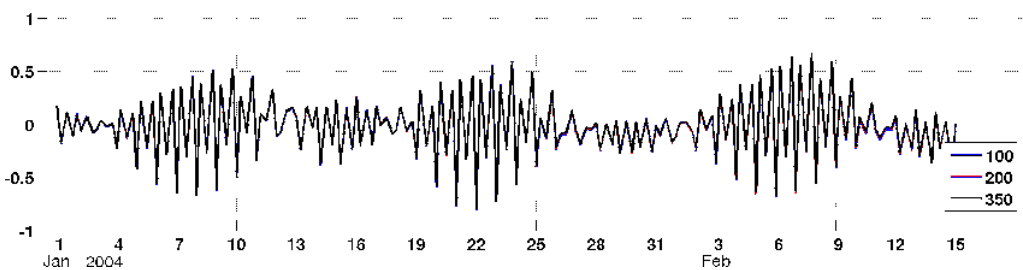
(a) *Ponto 1*(b) *Ponto 2*(c) *Ponto 3*(d) *Ponto 4*(e) *Ponto 5*(f) *Ponto 6***Figure 3.4:** Elevação do nível do mar (m) nos 6 pontos escolhidos variando no tempo.

Table 3.4: Posição dos pontos comparados e a cidade mais próxima como ponto de referência.

Ponto	Longitude	Latitude	Proximidade
1	51° 38' 38,59'' W	31° 54' 31,40'' S	São José do Norte - RS
2	50° 1' 22,69'' W	30° 2' 16,01'' S	Tramandaí - RS
3	48° 20' 8,04'' W	27° 32' 55,17'' S	Florianópolis - SC
4	48° 9' 29,76'' W	25° 36' 53,78'' S	Ilha do Mel - PR
5	45° 21' 8,45'' W	23° 58' 38,81'' S	Ilha de São Sebastião - SP
6	41° 58' 51,10'' W	23° 1' 9,65'' S	Arraial do Cabo - RJ

aplicação dessa metodologia devido ao passo de salvamento escolhido (tabela 3.3) a cada 3 h.

$$ER = \frac{\left| \left(\frac{\sum_{i=1}^n Malha1}{n} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^n Malha2}{n} \right) \right|}{\left| \frac{\sum_{i=1}^n Malha2}{n} \right|} \quad (3.1)$$

De acordo com Maciel e Stella (2012) a comparação do desvio padrão de séries temporais de velocidade em diferentes malhas resulta em correta avaliação da sensibilidade das malhas estudadas. Desta forma, a tabela 3.5 apresenta a porcentagem do erro relativo destes pontos, representando assim a diferença entre os cenários. Pode ser observado que os maiores valores de desvio estão nas altas frequências, sendo que as maiores diferenças estão na comparação da malha 100 com a malha 350 (100 – 350), tanto para alta (12.04%, 19.69%) quanto para baixa (6.85%, 6.45%) frequência, seja para o nível ou velocidade, respectivamente.

O erro relativo entre as malhas 100 – 200 é maior na alta frequência (11,70% e 17,86%) quando comparado com a baixa frequência (3,69% e 6,37%). Desta forma, a malha 100 pode ser excluída da análise, pois apresenta as maiores diferenças quando comparada com as malhas 200 e 350. Já na comparação das malhas 200 – 350 são encontrados os menores valores de erro absoluto, demonstrando que existe pouca diferença entre os resultados calculados utilizando malhas com aproximadamente 200.000 ou 350.000 nós para a área de estudo.

Em relação as variações entre os resultados encontrados (200 – 350), as tendências foram semelhantes estando dentro dos limites aceitáveis (inferiores a 5%). Portanto, a malha 200 foi escolhida, devido a análise supracitada somado ao menor custo computacional, para os estudos subsequentes (seções 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4).

Table 3.5: Diferença entre as malhas em alta e baixa frequência.

		Erro Relativo (%)		
		100-200	100-350	200-350
Nível	Alta	11,70	12,04	2,40
	Baixa	3,69	6,85	3,88
Velocidade	Alta	17,86	19,69	4,61
	Baixa	6,37	6,45	2,52

3.1.2 Verificação do modelo com parâmetros físicos

O modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D foi avaliado em relação as suas possíveis configurações (tabela 3.6). Primeiramente, foram testadas diferentes condições de contorno oceânicas e superficiais, incluindo bancos de dados como o modelo de marés FES⁴ (Finite Element Solution, (Lefèvre et al., 2002)) e as fontes de dados de vento do NOAA-WAVEWATCH⁵ III (WW3) e do ERA-INTERIM-ECMWF⁶.

Foram também testadas as diferentes variações temporais de dados fornecidas pelas diferentes fontes de dados de vento, com dados a cada 3 h, 6 h ou 24 h. Conseqüentemente, o coeficiente de influência do vento também foi testado para cada caso, considerando valores entre 10^{-5} e 10^{-6} , além do coeficiente de influência variável. Desta forma, 28 testes foram considerados (tabela 3.6).

Por fim, a diferença entre os níveis sigma também foi analisada, comparando os resultados entre 15 e 20 níveis igualmente espaçados (i) ou diferentemente espaçados (d) seguindo as recomendações de Goll et al. (2011). Para esta simulação, foi escolhido o período de 3 anos de duração, entre os anos de 2012 e 2014, onde primeiramente, cada ano foi simulado separadamente afim de aumentar a precisão das análises.

A utilização do coeficiente de influência do vento variável adicionou às simulações, perturbações e inconsistências numéricas, além da incapacidade em reproduzir feições oceanográficas típicas. Foi observada a inabilidade do modelo em transmitir o efeito de frentes atmosféricas em sua camada líquida superficial, gerando campos de divergência inconsistentes.

Em relação a discretização vertical, um número inferior de níveis sigma demonstrou inferior

⁴<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes.html>

⁵<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>

⁶<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

Table 3.6: Simulações para a verificação de parâmetros. Coeficiente de Influência do Vento (CIV); Variável (Var); Variação Temporal dos dados de vento em horas (Vt).

Caso	CIV	Cond. Contorno	Vt	Fonte do vento	Sigma	Ano
T1	10^{-6}	Hycom + FES	24x24	Reanalysis	15	2012
T2	10^{-6}	Hycom + <i>OTPS</i>	24x24	Reanalysis	15	2012
T3	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	24x24	Reanalysis	15	2012
T4	10^{-6}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	15	2012
T5	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	15	2012
T6	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	24x24	Reanalysis	15	2012
T7	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	15	2012
T8	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	20d	2012
T9	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	20i	2012
T10	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	15	2014
T11	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	20d	2014
T12	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	20i	2014
T13	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2012
T14	Var	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2014
T15	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	WW3	20i	2012
T16	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2014
T17	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	20i	2012
T18	6.10^{-6}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2014
T19	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	15	2014
T20	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	15	2014
T21	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	15	2012
T22	6.10^{-6}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	15	2014
T23	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2012
T24	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	WW3	15	2012
T25	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	20i	2013
T26	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2013
T350-27	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	3x3	ECMWF	20i	2014
T28	10^{-5}	Hycom + <i>OTPS</i>	6x6	Reanalysis	15	2013

reprodutibilidade das camadas de massa específica e conseqüentemente da formação do padrão de correntes oceânicas. Por outro lado, o uso de 20 níveis sigma igualmente ou diferentemente espaçados não demonstrou diferenças significativas entre os testes realizados.

O banco de dados do ERA-INTERIM-ECMWF é considerado robusto (precisão espacial de $0,125^{\circ} \pm 14km$) e mais preciso para utilização modelos de previsão climática (*forecast*, Dabernig et al. (2015)), entretanto a sua utilização como condição de contorno do TELEMAC-3D se provou um desafio. Apesar de ter sido testado em todos os anos, e com diferentes coeficientes de influência do vento, grandes dificuldades foram encontradas em manter o padrão hidrodinâmico da simulação. Muitas vezes o TELEMAC-3D não suportava o detalhamento do campo de ventos sobre a malha computacional

impossibilitando a transferência de energia adequada através da tensão de cisalhamento superficial, gerando incertezas numéricas.

Outro fator que pode estar associado aos problemas encontrados ao utilizar os dados do ERA-INTERIM-ECMWF, são os dados oceanográficos utilizados como condição de contorno. Os dados do HYCOM possuem excelente precisão espacial em relação a outros modelos oceânicos ($0,083^\circ \pm 7 \text{ km}$), entretanto, no decorrer de uma simulação no TELEMAC-3D, estes dados são adicionados apenas nos contornos oceânicos, podendo gerar uma defasagem no transporte de propriedades dos contornos em relação a influência do vento sobre a superfície líquida do modelo.

Uma influência negativa ao uso deste banco de dados de vento pode estar na grande extensão da malha computacional utilizada. Testes futuros devem visar o uso e definir a melhor abordagem e aplicação destes bancos de dados. Devido às incertezas e constantes erros encontrados na utilização do ERA-INTERIM-ECMWF e do WW3, foi feita a opção pelo banco de dados do Reanalysis da NOAA.

Desta forma, foi concluído que a melhor parametrização para a malha de estudo escolhida (tabela 3.12) considera o coeficiente de influência do vento de 10^{-5} , as condições de contorno oceânicas do HYCOM + *OTPS*, com dados de vento provenientes do Reanalysis, com variação temporal de 6 em 6 h. Além disso, foi observado que a utilização de 20 níveis sigma igualmente espaçados apresentam os melhores resultados.

Table 3.7: Configuração definitiva das simulações.

Período de simulação	2012	2013	2014
Salvamento dos resultados	24 horas	24 horas	24 horas
Paralelismo	12 núcleos	12 núcleos	12 núcleos
Passo de tempo	90 s	90 s	90 s
Projeção Geográfica	WGS-84	WGS-84	WGS-84
Coeficiente de Coriolis	Variável	Variável	Variável
Modelo de turbulência horizontal	k- ϵ	k- ϵ	k- ϵ
Modelo de turbulência vertical	k- ϵ	k- ϵ	k- ϵ
Lei de fricção de fundo	Manning	Manning	Manning
Lei de fricção lateral	Manning	Manning	Manning
Tidal Flats	Sim	Sim	Sim
Níveis Sigma	20	20	20
Coeficiente de influência do vento	1.10^{-5}	1.10^{-5}	1.10^{-5}

3.1.3 Verificação do modelo com a melhor parametrização

O conceito de verificação do modelo é utilizado amplamente pela comunidade científica no sentido de comparar os resultados do modelo utilizado com outros dados disponíveis que não sejam observados *in situ*. Os dados utilizados nesta comparação provêm de outros modelos, de atlas ou referências bibliográficas (Bourban et al., 2012).

Neste caso, a verificação foi realizada entre os resultados do modelo TELEMAC-3D com os resultados do modelo HYCOM. Esta comparação foi realizada com o intuito de se comprovar que o TELEMAC-3D mantém as características hidrodinâmicas do modelo global HYCOM. Sendo assim, a média, o desvio padrão e a média da diferença absoluta entre os resultados do TELEMAC-3D e do HYCOM foram calculadas durante os 3 anos estudados, entre os anos de 2012 e 2014, conforme é apresentado nas figuras 3.5 a 3.8.

Os campos médios de salinidade do HYCOM e do TELEMAC-3D apresentam o mesmo padrão de distribuição espacial (figuras 3.5 a e 3.5 b). Entretanto, a salinidade do TELEMAC-3D apresenta uma tênue redução na intensidade, na zona costeira da região sudeste, e com as maiores diferenças no estado do Rio Grande do Sul.

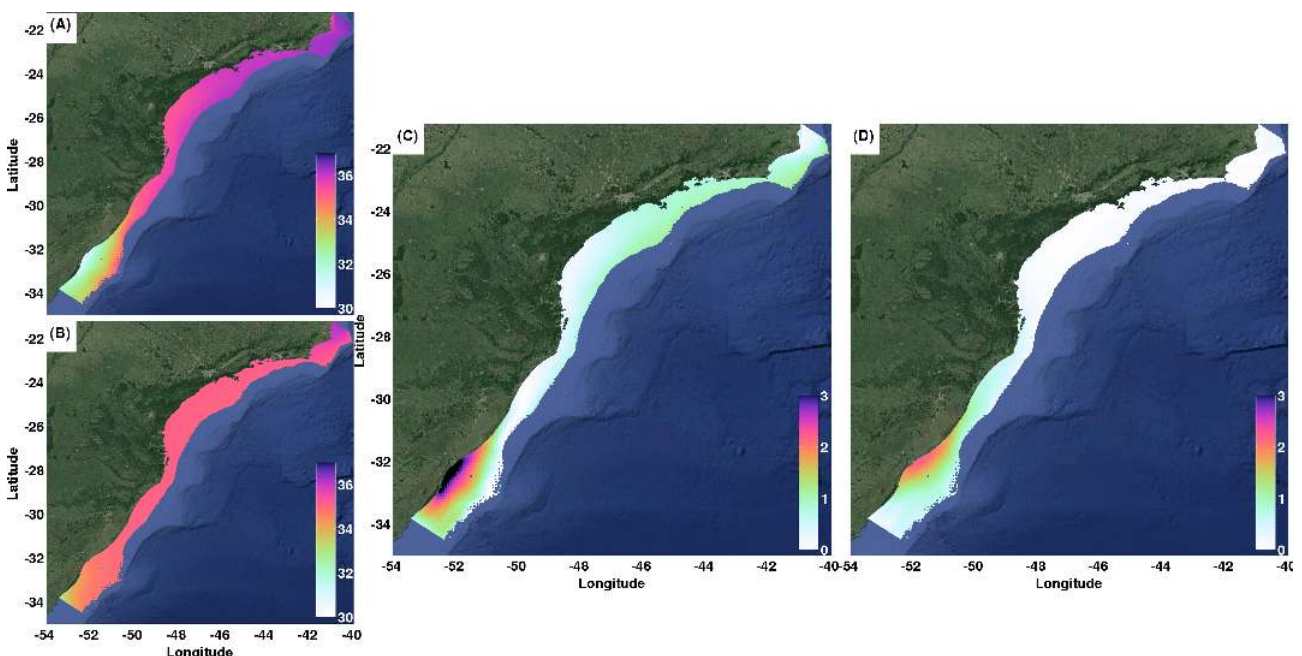


Figure 3.5: Mapas de salinidade. Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).

Esta notável diferença pode ser melhor observada na figura 3.5 c, especificamente na desembocadura da Lagoa dos Patos, com diferenças de salinidade superiores a 3. Isto se deve ao fato de não ter

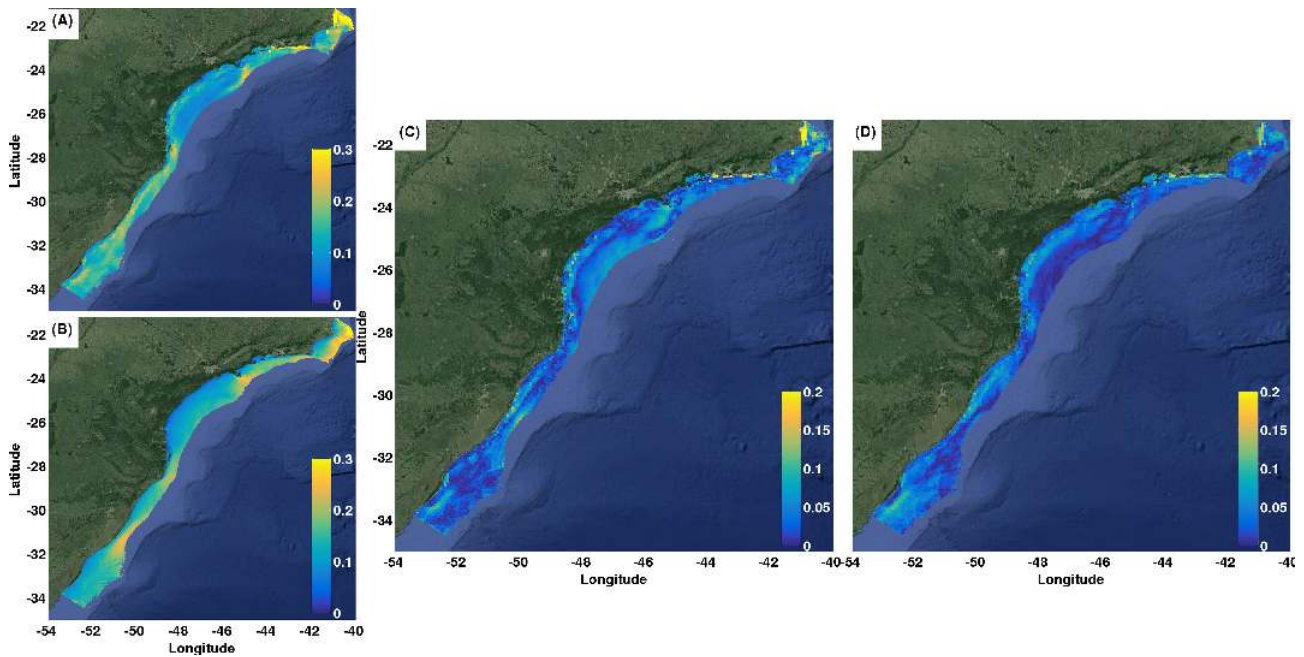


Figure 3.6: Intensidade da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$). Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).

sido incluída vazão de água doce na simulação do TELEMAC-3D. Enquanto que o HYCOM aplica em seus resultados uma vazão para a Lagoa dos Patos e para o Rio da Prata (Schiller e Kourafalou, 2010), sendo que apenas este último é incluído no TELEMAC-3D através da imposição do HYCOM como condição de contorno.

Apesar da grande diferença na salinidade desta região, no restante do domínio a diferença média fica em torno de 1. Em relação ao desvio padrão médio (figura 3.5 d), somente na desembocadura da Lagoa dos Patos são percebidos desvios em torno de 2 de salinidade.

Os resultados para a intensidade da corrente apresentam alta correlação entre HYCOM e o TELEMAC-3D (figuras 3.6 a e b) apresentando altas e baixas médias nas mesmas regiões para ambos os modelos numéricos. Esta boa correlação é ressaltada nos mapas de diferenças e desvio padrão (figuras 3.6 c e d). Sendo assim, a intensidade da corrente foi analisada para as suas componentes zonal (u) e meridional (v) (figuras 3.7 e 3.8) apresentando um padrão de variabilidade espacial similar.

As maiores diferenças entre os resultados do HYCOM e do TELEMAC-3D estão situadas próximo a Ilha de São Sebastião, em São Paulo (figuras 3.7 c e 3.8 c). Ambas as componentes apresentam desvio padrão inferior a $0.2 m.s^{-1}$, essa diferença se deve a falta de definição da linha de costa do HYCOM, que considera a Ilha de São Sebastião uma península. Esta consideração causa convergência das correntes no sentido *offshore* deste local, enquanto que o TELEMAC-3D possui o canal de

São Sebastião corretamente definido, gerando, por outro lado, a divergência do fluxo entre o canal e *offshore*.

Apesar de algumas disparidades em certos locais, os modelos comparados demonstram boa correlação. Um fator que pode afetar essa análise é a divisão espacial dos dados do HYCOM, que possui uma média de distribuição de um dado para cada 7 km, enquanto a malha utilizada para as simulações do TELEMAC-3D possui a distribuição de um dado por quilometro em toda região costeira. Essa diferença espacial corrobora para uma perda de definição pontual entre os resultados comparados.

Sendo assim, pode ser concluído que o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D mantém as características hidrodinâmicas do modelo global HYCOM, através do uso das parametrizações definidas na sessão 3.1.2 presentes na tabela 3.8.

3.1.4 Validação do modelo TELEMAC-3D

O processo de validação de um modelo consiste em comparar seus resultados com dados observados "in situ" (Bourban et al., 2012). A fonte de dados observados pode variar dependendo do sensor capaz de captar as informações necessárias, ou os dados podem ser captados em modelos físicos em escala reduzida do problema analisado.

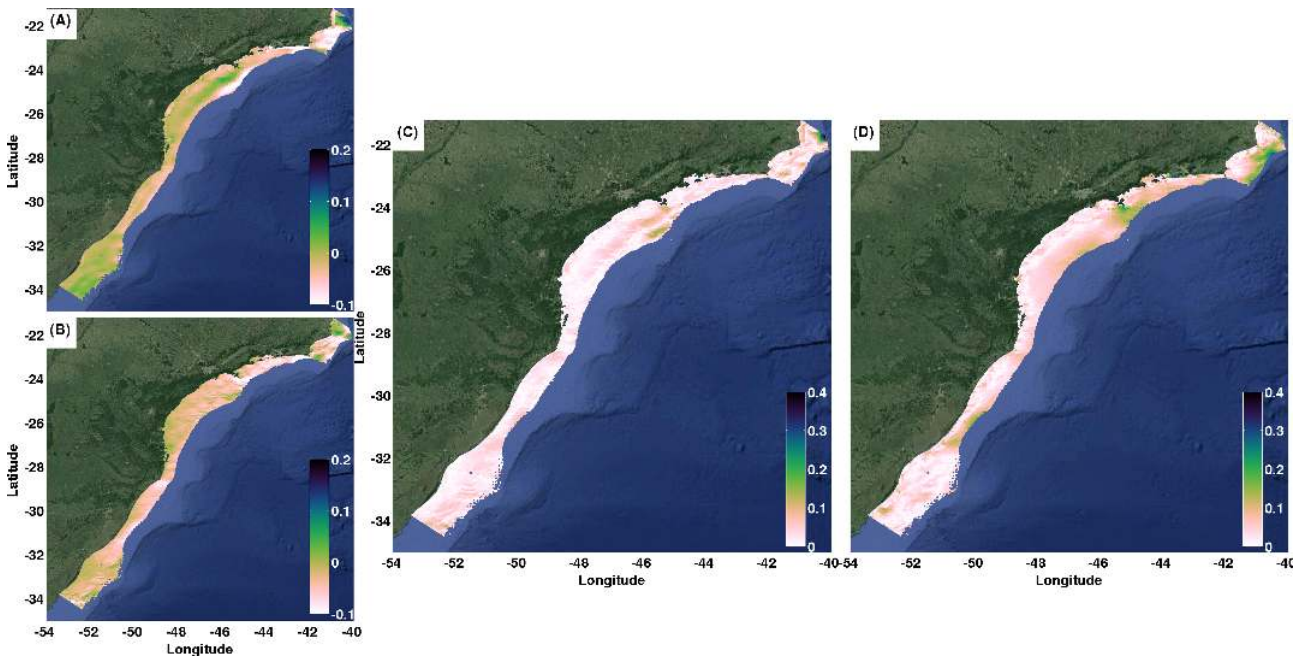


Figure 3.7: *Componente u da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$). Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).*

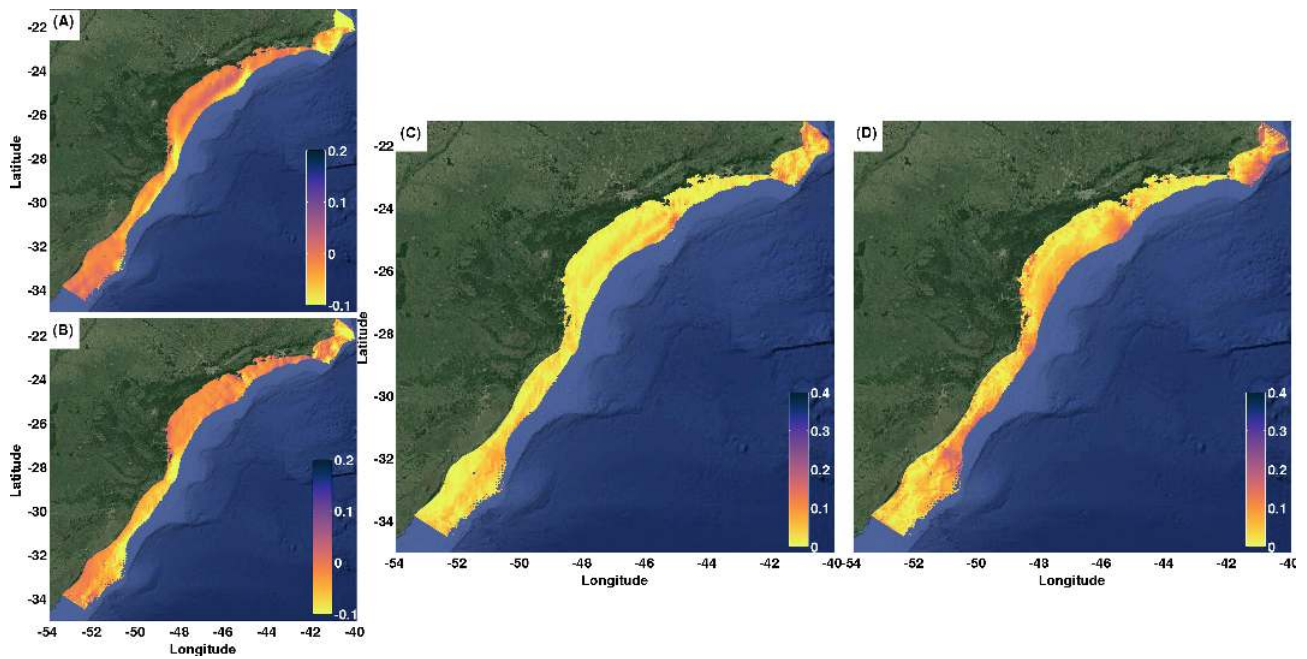


Figure 3.8: Componente v da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$). Médias do HYCOM (A) e do TELEMAC-3D (B). Média da diferença absoluta entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (C). Média do desvio padrão entre o TELEMAC-3D e o HYCOM (D).

Table 3.8: Configuração das simulações para verificação da parametrização escolhida.

Período de simulação	2012 a 2014
Salvamento dos resultados	24 horas
Paralelismo	120 núcleos
Passo de tempo	90 s
Projeção Geográfica	WGS-84
Coefficiente de Coriolis	Variável
Modelo de turbulência horizontal	$k-\varepsilon$
Modelo de turbulência vertical	$k-\varepsilon$
Lei de fricção de fundo	Manning
Lei de fricção lateral	Manning
Tidal Flats	Sim
Níveis Sigma	20
Coefficiente de influência do vento	1.10^{-5}

A validação de modelos morfodinâmicos é extremamente complexa. Santoro et al. (2015) validou o SISYPHE com dados de um *Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP* obtendo dados de material particulado indiretamente através da intensidade do *backscatter*. A validação do modelo morfodinâmico DELFT3D-FLOW (Lesser et al., 2004) foi realizada através de comparações de transporte sedimentar entre dados modelados e coletados em um tanque de correntes de modelos físicos.

Dorfmann et al. (2012) não conseguiram validar o SISYPHE devido a complexidade do estudo proposto e por limitações numéricas. Jia et al. (2015) validaram o SISYPHE através da coleta de duas imagens de diferentes datas utilizando sensor Lidar (*Light Detection And Ranging*), calculando assim a variação topográfica entre elas. Cordier et al. (2015) falharam na validação do SISYPHE devido ao fundo do rio estudado ser composto por pedregulhos (diâmetros $> 0.25 m$). Portanto, neste estudo, nenhuma validação foi realizada para o modelo morfodinâmico SISYPHE devido a ausência de dados.

Os resultados das simulações do modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D foram comparados com os dados provenientes de boias do Programa Nacional de Boias - PNBOIA. O PNBOIA possui 5 boias fixas e 297 boias de deriva, sendo a contribuição brasileira para o Global Ocean Observation System⁷ (GOOS), que é desenvolvido e gerenciado pelo Programa HIDROSFERA da Divisão de Sensoriamento Remoto⁸ (DSR) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.

A validação foi realizada comparando os dados de velocidade de corrente de três boias do PNBOIA, que ficam localizadas no Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e em São Paulo, com os dados do modelo HYCOM e do modelo TELEMAC-3D. A posição geográfica e o período amostral utilizado estão contidos na tabela 3.9.

Analisando as séries temporais da intensidade da corrente (figura 3.9), pode ser observado que

⁷<http://www.goosbrasil.org/>

⁸<http://www.dsr.inpe.br/>

Table 3.9: Informações dos equipamentos (PNBOIA) nos quais os dados foram utilizados nas comparações. T_i e T_f se referem, respectivamente, ao tempo inicial e final das series temporais utilizadas nas comparações. As séries podem se estender além deste período.

Local	Código	Latitude	Longitude	Profundidade	T_i	T_f
Rio Grande do Sul	69152	-31.5666	-49.8713	200m	06/02/2012	25/11/2014
Santa Catarina	69150	-28.8333	-47.6000	200m	30/09/2012	08/10/2013
São Paulo	69151	-25.2833	-44.9333	200m	01/01/2012	02/10/2012

o HYCOM está subestimado em relação ao TELEMAC-3D para os dados de São Paulo (SP) (figura 3.9c). Por outro lado, na região do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC) (figuras 3.9a e figura 3.9b), o TELEMAC-3D está subestimado em relação ao HYCOM. Ambos os modelos representam adequadamente as tendências de aumento e decréscimo da intensidade da corrente.

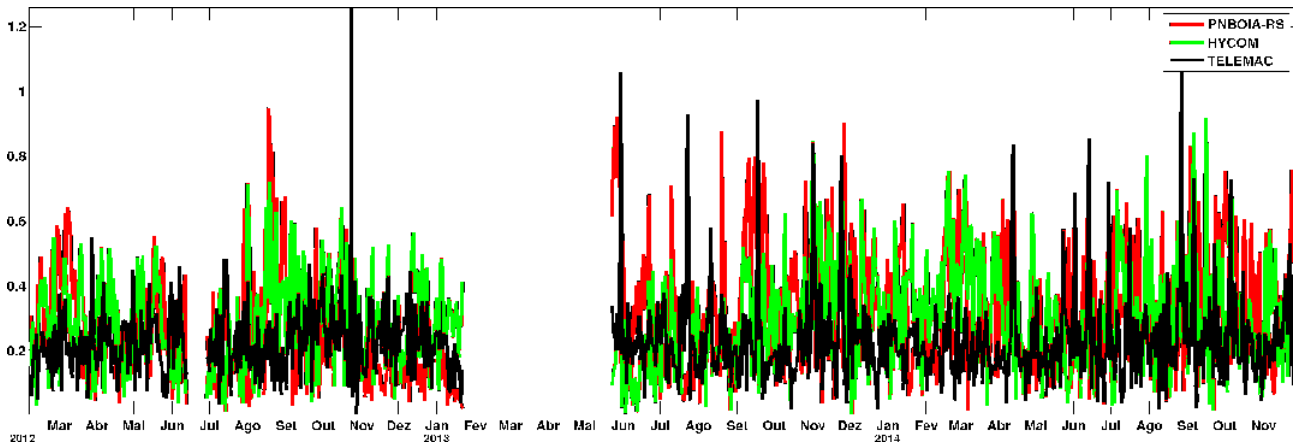
Ao separar as intensidades em suas componentes U e V, pode ser observado que o HYCOM mantém sua componente U em sentido negativo, por quase todo o período analisado, na posição das três PNBOIAS (figuras 3.10). Por outro lado, o TELEMAC-3D apresenta inversões no sentido da componente U mantendo tendência correlata às PNBOIAS. Na região de São Paulo (figura 3.10c) ambos os modelos demonstram baixa correlação entre os dados observados.

Para a componente V da velocidade (figura 3.11), o HYCOM mantém o padrão de subestimação para o Rio Grande do Sul (figura 3.11a) e São Paulo (figura 3.11c). Entretanto, nas três PNBOIAS os dois modelos conseguem manter boa reprodutibilidade dos cenários demonstrados nos dados medidos.

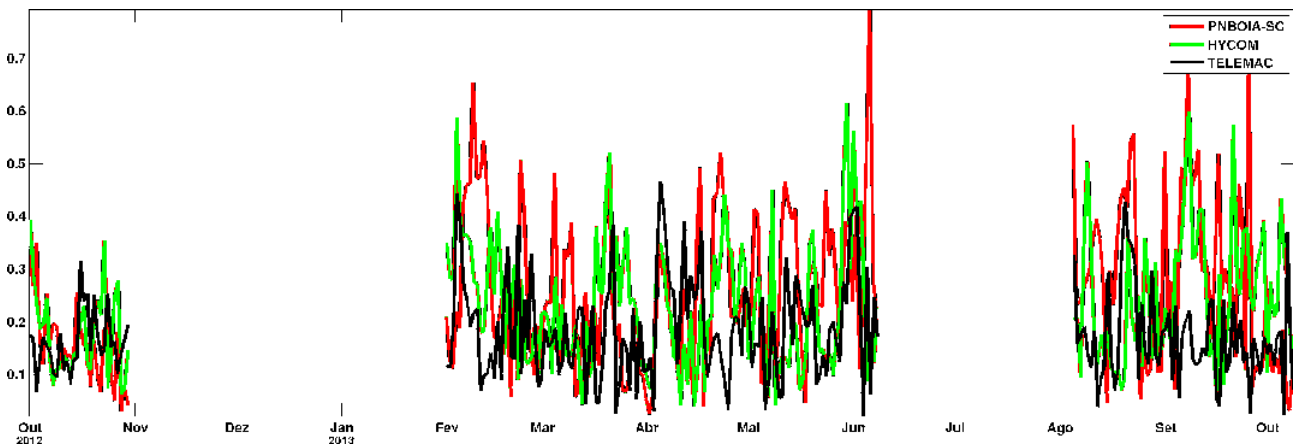
Para melhor avaliar as comparações, indicadores de performance foram utilizados de acordo com Hallak e Filho (2011) e Teegavarapu (2013), e suas formulações estão presentes na tabela 3.10. A seguir, será dada preferência ao uso de siglas em língua inglesa para a identificação dos diversos erros e índices estatísticos, de forma a manter uma melhor conformação à literatura científica disponível atualmente.

Li e Heap (2011) apresentaram uma extensa discussão sobre estas medidas e suas utilidades em relacionar modelos e métodos. Critérios para escolha dos melhores indicadores para cada caso também são abordados. Sendo assim, os indicadores de performance utilizados foram:

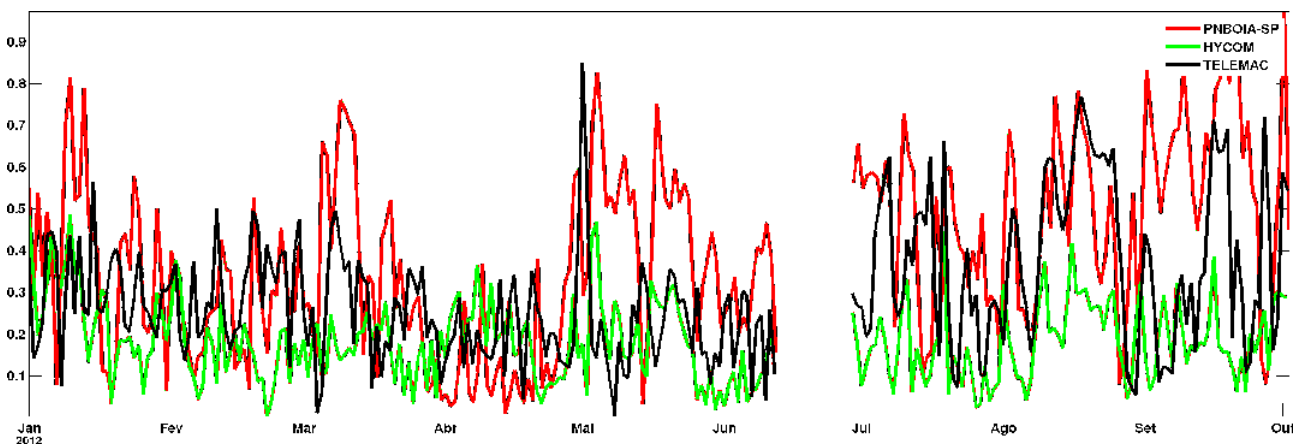
- **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE):** é comumente usada para expressar a precisão dos resultados numéricos com a vantagem de que o RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada;
- **Erro Médio Absoluto (MAE):** por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos (*outliers*), o MAE é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (Fox, 1981);
- **Índice de concordância de Willmott (IC):** possui a vantagem de padronizar a magnitude das



(a)

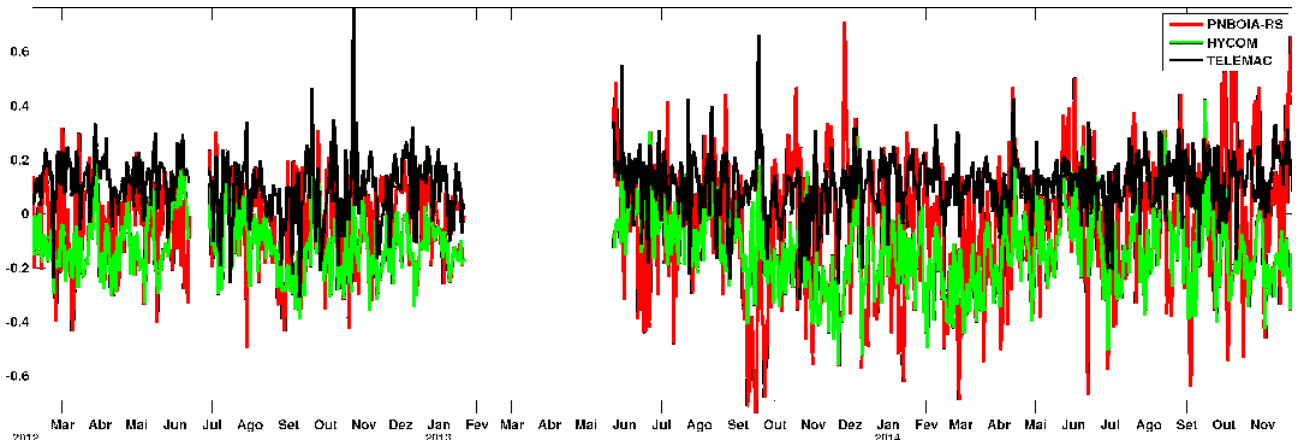


(b)

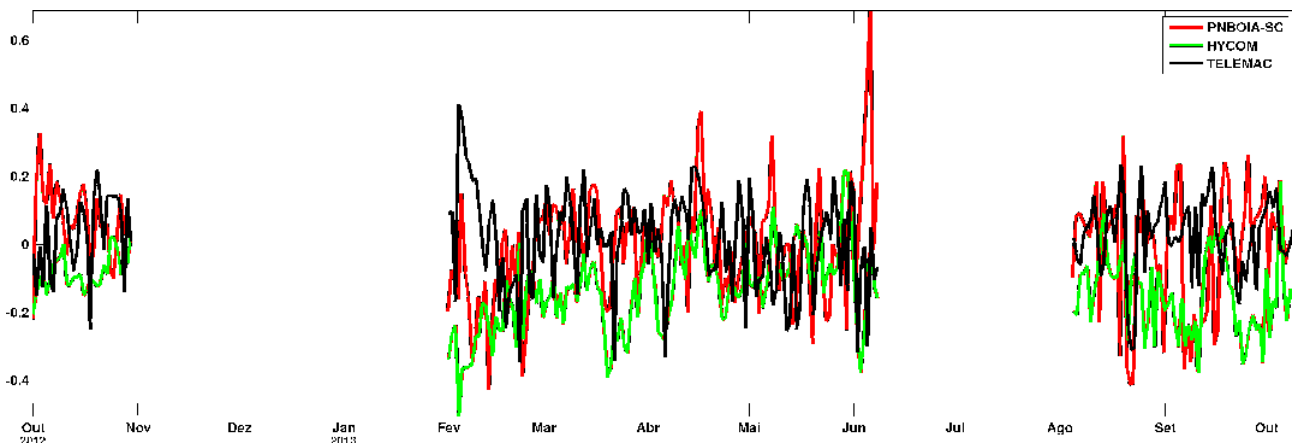


(c)

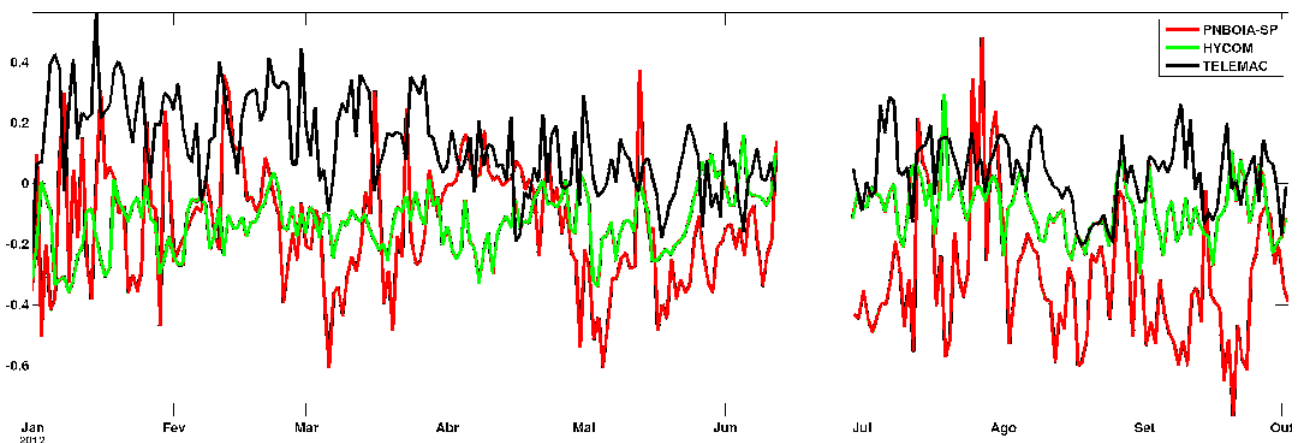
Figure 3.9: Séries temporais da intensidade da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$) entre TELEMAC-3D (preto), HYCOM (verde) e PNBOIA (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b) e São Paulo (c).



(a)

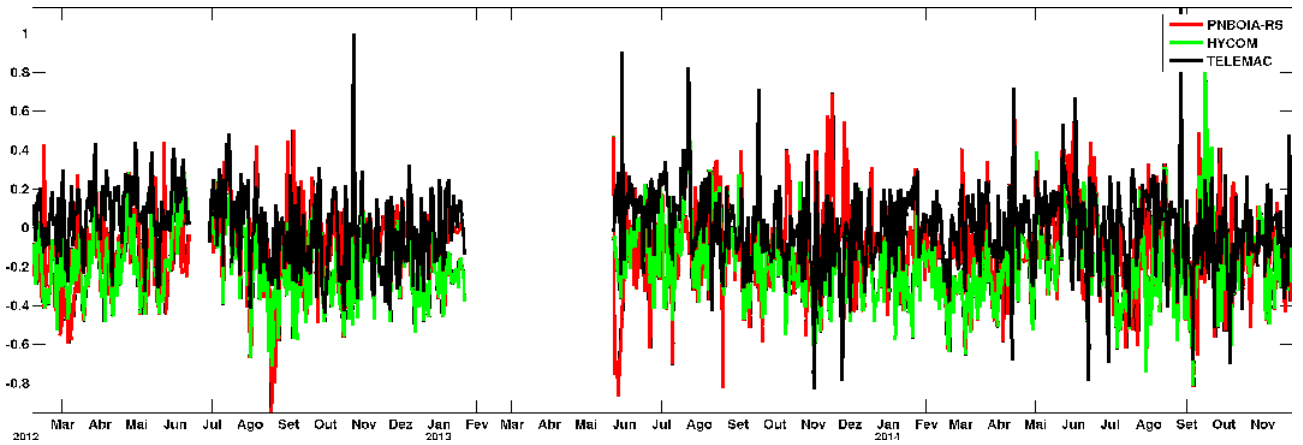


(b)

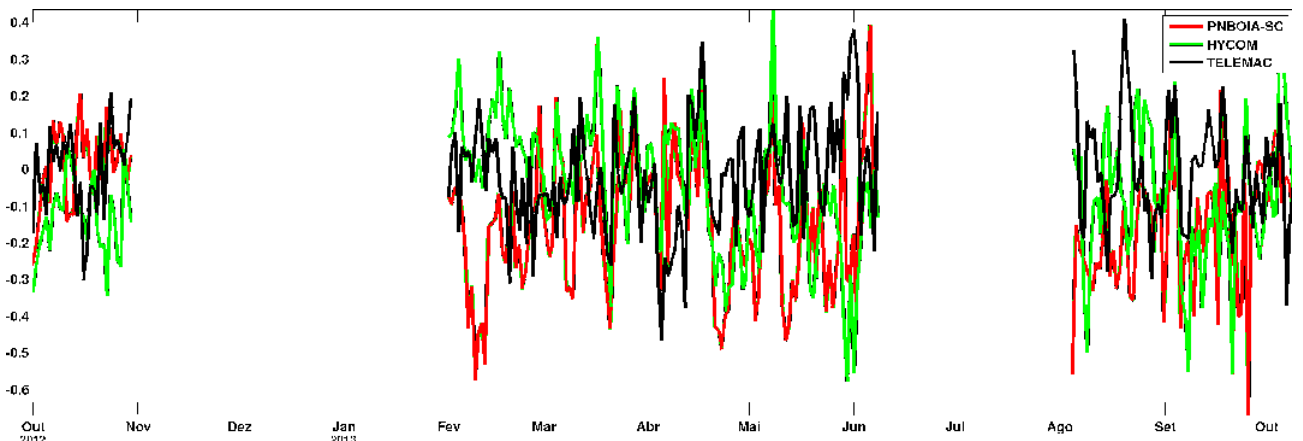


(c)

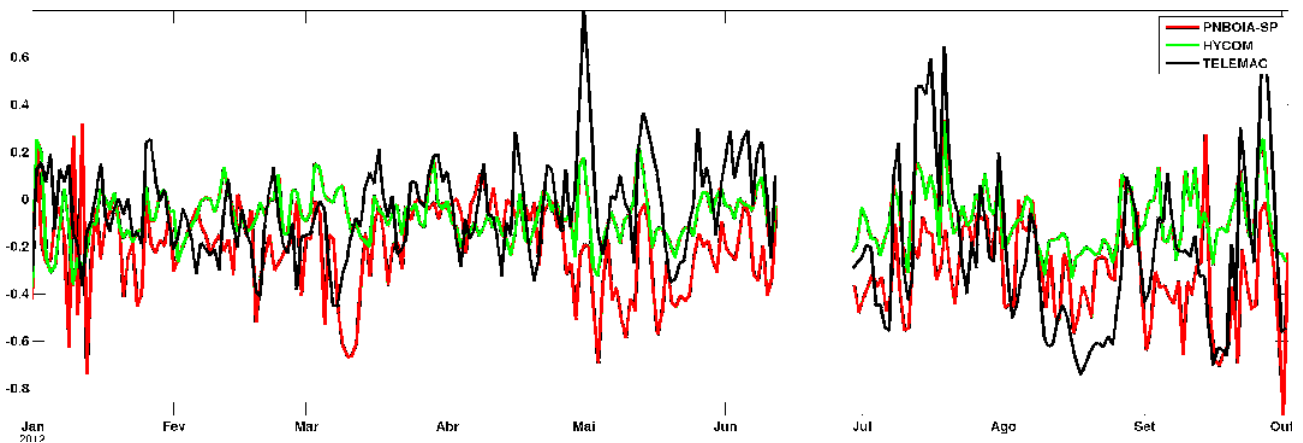
Figure 3.10: Séries temporais da componente U da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$) entre TELEMAC-3D (preto), HYCOM (verde) e PNBOIA (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b) e São Paulo (c).



(a)



(b)



(c)

Figure 3.11: Séries temporais da componente V da velocidade de corrente ($m.s^{-1}$) entre TELEMAC-3D (preto), HYCOM (verde) e PNBOIA (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b) e São Paulo (c).

variáveis, retendo as informações médias, evitando a amplificação dos *outliers* (Willmot, 1982; Teegavarapu, 2013);

- **Erro Quadrático Médio (MSE):** o MSE é similar ao MAE, porém mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado (Wilks, 2006).
- **Relação de Variância (RVAR):** relaciona o modelo e a observação indicando superestimação ou subestimação;

Table 3.10: Indicadores de performance utilizados e o resultado desejado para encontrar a melhor concordância entre modelo e observação. n : Quantidade de dados observados; obs : Dado observado; mod : Dado modelado; obs_{mean} : Média dos dados observados; mod_{mean} : Média dos dados modelados; obs_{var} : Variância dos dados observados; mod_{var} : Variância dos dados modelados;

Indicador de Performance	Resultado desejado
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - mod)^2}{n}}$	Quanto menor, melhor a concordância entre modelo e observação.
$MAE = \frac{\sum obs - mod }{n}$	Quanto menor, melhor a concordância entre modelo e observação.
$IC = 1 - \frac{\sum (obs - mod)^2}{\sum mod - mod_{mean} + obs - obs_{mean} }$	Se IC = 1, indica concordância perfeita entre o modelo e observação.
$MSE = \frac{1}{n} * \sum (obs - mod)^2$	MSE = 0, indica simulação perfeita.
$RVAR = \frac{mod_{var}}{obs_{var}}$	Deve ser próximo a 1, indicando que as variâncias entre dados observados e modelados é igual.

Esta metodologia oferece ferramentas adicionais às verificações diretas tradicionais das soluções numéricas, comumente realizadas por meio da comparação visual dos campos simulados. Sendo assim, na tabela 3.11 estão apresentadas as comparações entre os dados modelados e observados. Na coluna T-3D, está a relação entre os modelo TELEMAC-3D e as PNBOIAS, enquanto que na coluna HYC estão os resultados dos indicadores de performance para o HYCOM contra as PNBOIAS.

Por outro lado, na coluna TxH, foi realizada uma comparação entre o TELEMAC-3D e o HYCOM, respectivamente como dado modelado e observado. Esta análise tem objetivo de verificar a proximidade ou disparidade entre os resultados dos dois modelos utilizados. Os menores (melho-

res) indicadores (RMSE,MAE/IC,RVAR,MSE) entre as comparações da PNBOIA estão grifados em cinza.

Na tabela 3.11, pode ser observado que o MAE é sempre inferior ao RMSE, devido ao fato dele não ser afetado por *outliers*. Também é possível perceber que o RMSE do HYCOM (HYC) é sempre inferior ao do TELEMAC-3D (T-3D) em todos os casos. Entretanto melhores valores do MAE se alternam entre os dois modelos, sendo menores para o T-3D para a intensidade no Rio Grande do Sul e para a componente U em São Paulo.

Pelos resultados do RMSE e do MAE, existe melhor concordância entre os dados do HYCOM com a PNBOIA do que com o TELEMAC-3D. Entretanto, essa diferença entre os modelos é tênue, variando de 0 para $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ (T-3D - HYC), no Rio Grande do Sul para a intensidade, e em São Paulo para a componente V, respectivamente. Devido a esta pequena margem de diferença não se pode concluir como uma melhor concordância.

Desta forma, os indicadores de performance IC, MSE e RVAR foram aplicados. O Índice de Concordância (IC) demonstra a perfeição com que o modelo pode reproduzir a observação, sendo o maior valor encontrado (0,86) para a componente V do HYCOM em São Paulo. Os ICs do TELEMAC-3D foram todos inferiores aos do HYCOM, entretanto, variando de 0,01 a 0,07, em Santa Catarina para a intensidade e em São Paulo para a componente V, respectivamente.

O MSE apresentou valores baixos e próximos a zero em todos os casos, indicando boa concordância entre as simulações e observações. Ou seja, quanto menor o valor do MSE, mais próximo as duas séries estão de uma linha de melhor ajuste. No caso da Relação de Variância (RVAR) existe grande disparidade entre TELEMAC-3D e o HYCOM. A variância é uma medida de dispersão que mostra quão distantes os valores estão da média, logo, se RVAR for igual a 1 significa que ambos os dados, observação e medida, possuem a mesma relação de distância entre a média.

Sendo assim, valores muito baixos de RVAR demonstram que a variância dos dados observados é superior do que a variância dos dados modelados, o oposto também é válido. Os resultados apontam tanto para o HYCOM quanto para o TELEMAC-3D em certos casos como o melhor modelo. A comparação TxH apresenta valores elevados de RVAR em vários casos demonstrando maior variância dos dados do TELEMAC-3D em relação aos dados do HYCOM.

Mesmo assim, a melhor representação dos dados da PNBOIA foi feita pelos modelos para a

componente V da velocidade na boia do Rio Grande do Sul (RVAR T-3D = 0,94 e RVAR HYC = 0,93), seguido pelo HYCOM em Santa Catarina (0,97). Entretanto no caso de São Paulo, na componente V, o TELEMAC-3D apresentou mais variância da média do que os dados da PNBOIA, por isso o resultado de RVAR foi superior a 1, contudo, neste mesmo caso apresentou bom IC (0,79) e um alto RMSE ($0,27 m.s^{-1}$), indicando que o modelo foi capaz de manter o padrão de velocidade, entretanto apresentou alguns *outliers* em relação as medidas da PNBOIA.

Este teste de validação indicou uma boa reprodutibilidade do modelo para a velocidade na zona costeira da Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira. As séries temporais de velocidade de corrente calculadas pelo modelo em superfície indicam que modelo consegue reproduzir bem as tendências observadas. As diferenças entre o HYCOM e o TELEMAC-3D são mínimas e comprovam a aplicabilidade deste modelo na área de estudo.

A validação de modelos morfodinâmicos é extremamente complexa. Santoro et al. (2015) validou o SISYPHE com dados de um *Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP* obtendo dados de material particulado indiretamente através da intensidade do *backscatter*. A validação do modelo morfodi-

Table 3.11: Comparação dos indicadores de performance entre intensidade da corrente e suas componentes dos modelos contra as três localidades das PNBOIAS. **T-3D:** TELEMAC-3D; **HYC:** HYCOM; **TxH:** TELEMAC-3D como dado modelado e HYCOM como dado observado. RMSE, MAE estão em $m.s^{-1}$.

		Intensidade			Comp. U			Comp. V		
		T-3D	HYC	TxH	T-3D	HYC	TxH	T-3D	HYC	TxH
RS (69152)	RMSE	0.21	0.21	0.18	0.24	0.23	0.15	0.26	0.25	0.19
	MAE	0.16	0.17	0.14	0.19	0.18	0.11	0.20	0.19	0.14
	IC	0.81	0.83	0.85	0.77	0.81	0.89	0.78	0.81	0.88
	MSE	0.04	0.04	0.03	0.06	0.05	0.02	0.07	0.06	0.04
	RVAR	0.51	0.76	1.51	0.26	0.37	1.43	0.94	0.93	0.99
SC (69150)	RMSE	0.16	0.16	0.14	0.21	0.18	0.18	0.23	0.21	0.23
	MAE	0.13	0.13	0.11	0.16	0.14	0.14	0.18	0.17	0.18
	IC	0.86	0.87	0.88	0.81	0.85	0.83	0.79	0.84	0.78
	MSE	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05
	RVAR	0.39	0.65	1.65	0.65	0.50	0.77	0.69	0.97	1.42
SP (69151)	RMSE	0.23	0.19	0.17	0.23	0.22	0.15	0.27	0.19	0.22
	MAE	0.19	0.15	0.13	0.19	0.17	0.11	0.21	0.14	0.18
	IC	0.81	0.84	0.86	0.79	0.80	0.87	0.79	0.86	0.83
	MSE	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.02	0.07	0.03	0.05
	RVAR	0.61	0.22	0.37	0.36	0.22	0.61	1.94	0.39	0.20

nâmico DELFT3D-FLOW (Lesser et al., 2004) foi realizada através de comparações de transporte sedimentar entre dados modelados e coletados em um tanque de correntes de modelos físicos.

Dorfmann et al. (2012) não conseguiram validar o SISYPHE devido a complexidade do estudo proposto e por limitações numéricas. Jia et al. (2015) validaram o SISYPHE através da coleta de duas imagens de diferentes datas utilizando sensor Lidar (*Light Detection And Ranging*), calculando assim a variação topográfica entre elas. Cordier et al. (2015) falharam na validação do SISYPHE devido ao fundo do rio estudado ser composto por pedregulhos (diâmetros $> 0.25 m$). Portanto, neste estudo, nenhuma validação foi realizada para o modelo morfodinâmico SISYPHE devido a ausência de dados.

3.2 Estudo de Caso

Afim de alcançar os objetivos apresentados, duas simulações de estudo de caso foram realizadas (figura 3.1):

- A. Hidrodinâmica + Morfodinâmica;
- B. Hidrodinâmica + Morfodinâmica + Conversão de Energia.

Através da simulação A, foram descritas as condições oceânicas da área de estudo de forma a apontar os melhores locais para implantar parques de turbinas hidrocinéticas. Por outro lado, a simulação B, já possui as turbinas instaladas nos locais mais energéticos e visa avaliar o impacto que esta instalação traria para as correntes marinhas e para o padrão natural de transporte de sedimentos junto ao fundo.

Ambas as simulações foram iniciadas e finalizadas no mesmo período (01-01-2003 a 31-12-2012), compreendendo 10 anos de simulação. Para completar esta tarefa, o supercomputador do CESUP-UFRGS (tabela 3.1) foi utilizado. Os parâmetros utilizados nas simulações estão resumidamente descrito na tabela 3.12.

Table 3.12: Configuração definitiva das simulações.

	Caso	A	B
TELEMAC-3D	Período de simulação	2003 a 2012	
	Salvamento dos resultados	24 h	
	Paralelismo	120 núcleos	
	Passo de tempo	90 s	
	Passo de salvamento	Diário	
	Projeção geográfica	WGS-84	
	Coefficiente de coriolis	Variável	
	Modelo de turbulência horizontal	k- ϵ	
	Modelo de turbulência vertical	k- ϵ	
	Lei de fricção de fundo	Manning	
	Lei de fricção lateral	Manning	
	<i>Tidal Flats</i>	Sim	
	Níveis sigma	20	
	Coefficiente de influência do vento	1.10 ⁻⁵	
SISYPHE	Passo de salvamento	Diário	
	Transporte pelo fundo	Sim	
	Classe de sedimento	1 - Areia	
	Diâmetro médio dos grãos	2 mm	
	Massa específica do sedimento	2650 kg/m ³	
	Fórmula de transporte pelo fundo	Meyer-Peter-Müller	
	Fórmula da evolução do fundo	Exner	
	Ângulo de fricção dos sedimentos	40°	
ENERGIA	Módulo da Energia	Desligado	Ligado
	Velocidade de início de movimento	—	0,2 m.s ⁻¹
	Velocidade nominal	—	1,5 m.s ⁻¹
	Potência nominal	—	242 kW
	Altura do conversor	—	20 m
	Raio do conversor	—	10 m
	Coefficiente de eficiência da turbina (η)	—	0,35

Parametrizações, verificação e validação do
modelo TOMAWAC

CAPÍTULO 4

Parametrizações, verificação e validação do modelo TOMAWAC

4.1 Parametrização e Validação

Para as simulações do TOMAWAC, a mesma malha numérica das simulações hidrodinâmicas foi utilizada. Sendo assim, somente foram realizadas análises de verificação do modelo com parâmetros físicos e a validação do TOMAWAC.

A performance do modelo ondulatório TOMAWAC foi extensivamente avaliada em relação as suas possíveis configurações. Para a realização desses testes, vários parâmetros foram modificados e testados totalizando 36 simulações, os testes foram realizados de forma cruzada contendo variações dos parâmetros presentes na tabela 4.1.

O número de frequência e direções foi testado pois é diretamente relacionado ao tempo computacional e a capacidade de representar corretamente o processo ondulatório. Da mesma forma, o número de frequências e a frequência mínima alteram as ondas simuladas assim como a curva de crescimento devido ao vento. Os coeficientes de geração do vento, arrasto com o fundo e dissipação por *whitecapping* também foram avaliados em busca da melhor parametrização.

Table 4.1: Configuração dos testes de validação das simulações das ondas. O cabeçalho da tabela representa os parâmetros testados sendo: (A) Número de frequências, (B) Frequência mínimas, (C) Variação da frequência, (D) Número de direções, (E) Coeficiente de geração do vento, (F) Curva de crescimento devido ao vento, (G) Coeficiente de arrasto do vento, (H) Coeficiente de arrasto com o fundo, (I) Coeficiente de dissipação por *whitecapping*.

Caso	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	15	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
2	15	0,05	1,1	12	1,8	0,011	0,001288	0,038	4,5
3	15	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
4	15	0,05	1,1	12	2	0,011	0,001288	0,038	4,5
5	15	0,05	1,1	12	2	0,020	0,001288	0,038	4,5
6	16	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
7	17	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
8	20	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
9	15	0,05	1,1	15	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
10	15	0,05	1,1	20	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
11	15	0,05	2	15	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
12	15	0,05	3	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
13	15	0,05	4	15	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
14	15	0,05	1,1	15	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
15	15	0,1	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
16	15	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,380	4,5
17	15	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
18	15	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	0,45
19	15	0,05	1,1	12	1,850	0,011	0,001288	0,038	4,5
20	15	0,05	1,1	12	1,9	0,011	0,001288	0,038	4,5
21	15	0,05	1,1	12	1,950	0,011	0,001288	0,038	4,5
22	15	0,05	1,1	12	1,2	0,012	0,001288	0,038	4,5
23	15	0,05	1,1	12	1,2	0,013	0,001288	0,038	4,5
24	15	0,05	1,1	12	1,2	0,010	0,001288	0,038	4,5
25	15	0,05	1,8	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
26	15	0,05	1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
27	15	0,070	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
28	15	0,080	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
29	25	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
30	15	0,05	1,1	36	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
31	20	0,05	1,1	36	1,2	0,011	0,001288	0,038	4,5
32	15	0,05	1,1	12	1,1	0,011	0,001288	0,038	4,5
33	15	0,05	1,1	12	1,2	0,005	0,001288	0,038	4,5
34	15	0,05	1,1	12	1,930	0,011	0,001288	0,380	4,5
35	15	0,05	1,1	12	1,930	0,011	0,001288	0,380	4,5
36	15	0,05	1,1	12	1,2	0,011	0,001288	0,280	4,5

As simulações foram realizadas para o ano de 2013 e comparadas com os dados das PNBOIAS do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo (tabela 3.9), além de comparadas com os dados

de uma boia meteo-oceanográfica (Modelo “WaveScan”) pertencente a empresa FUGRO Oceanor, localizada a 13 km ao oeste da Ilha do Cabo Frio, em Arraial do Cabo, RJ (22,9957°S, 42,1919°W), a uma profundidade de 20 m.

Esta boia foi fundeada no dia 15 de julho de 2013 pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), através do projeto SIODOC (Sistema de Obtenção de Dados Ambientais para a Defesa), objetivando manter constante monitoramento ambiental da área onde são realizados testes de equipamentos e metodologias oceanográficas.

A comparação das séries temporais da melhor simulação (ver parametrização na tabela 4.4) com os dados observados estão apresentados na figura 4.1. Apesar dos dados observados conterem baixo período amostral (5 a 9 meses) e ainda interrupção na medição dos dados, as séries temporais do TOMAWAC apresentam boa tendência de reproduzir as características observadas pelos dados observados.

As maiores diferenças entre dados observado e o dado modelado podem ser vistas nos gráficos da direção de pico, onde o TOMAWAC demonstra baixa capacidade de reproduzir eventos de rápida mudança na direção das ondas. Essa diferença pode ser melhor observada nos dados da PNBOIA-SC (figura 4.1c.), especificamente entre os meses de fevereiro e abril que apresentam 6 picos de direção no dado observado, os quais o modelo não conseguiu reproduzir.

Sendo assim, os mesmos indicadores de performance aplicados anteriormente para a comparação do TELEMAC-3D (seção 3.1.4) foram aplicados para as séries temporais dos dados de ondas. Entretanto, devido a não-linearidade dos dados de período e direção de pico, foi necessária a aplicação de parâmetros específicos para a análise ondulatória (Khandekar, 1989; Zambresky, 1989; Khandekar, 1998; Legates e McCabe, 1999; Melo et al., 2008; dos Santos, 2009; Melo et al., 2010; Delle Monache et al., 2011; Bitew e Gebremichael, 2011; Edwards et al., 2014b; Jama et al., 2015; Oleinik et al., 2017, 2018) *in press*, entre outros).

Os parâmetros estatísticos adicionados estão na lista abaixo e presentes na tabela 4.2, esses, aliados a outros indicadores aplicados anteriormente, são conhecido como "*godness-of-fit*" (Legates e McCabe, 1999), que significa parâmetros estatísticos limitados de 0 a 1 indicando a habilidade do modelo de descrever a realidade. Vale ressaltar que *outliers* não foram removidos das séries temporais em ambos os dados, em oposição ao que recomenda Reguero et al. (2012b).

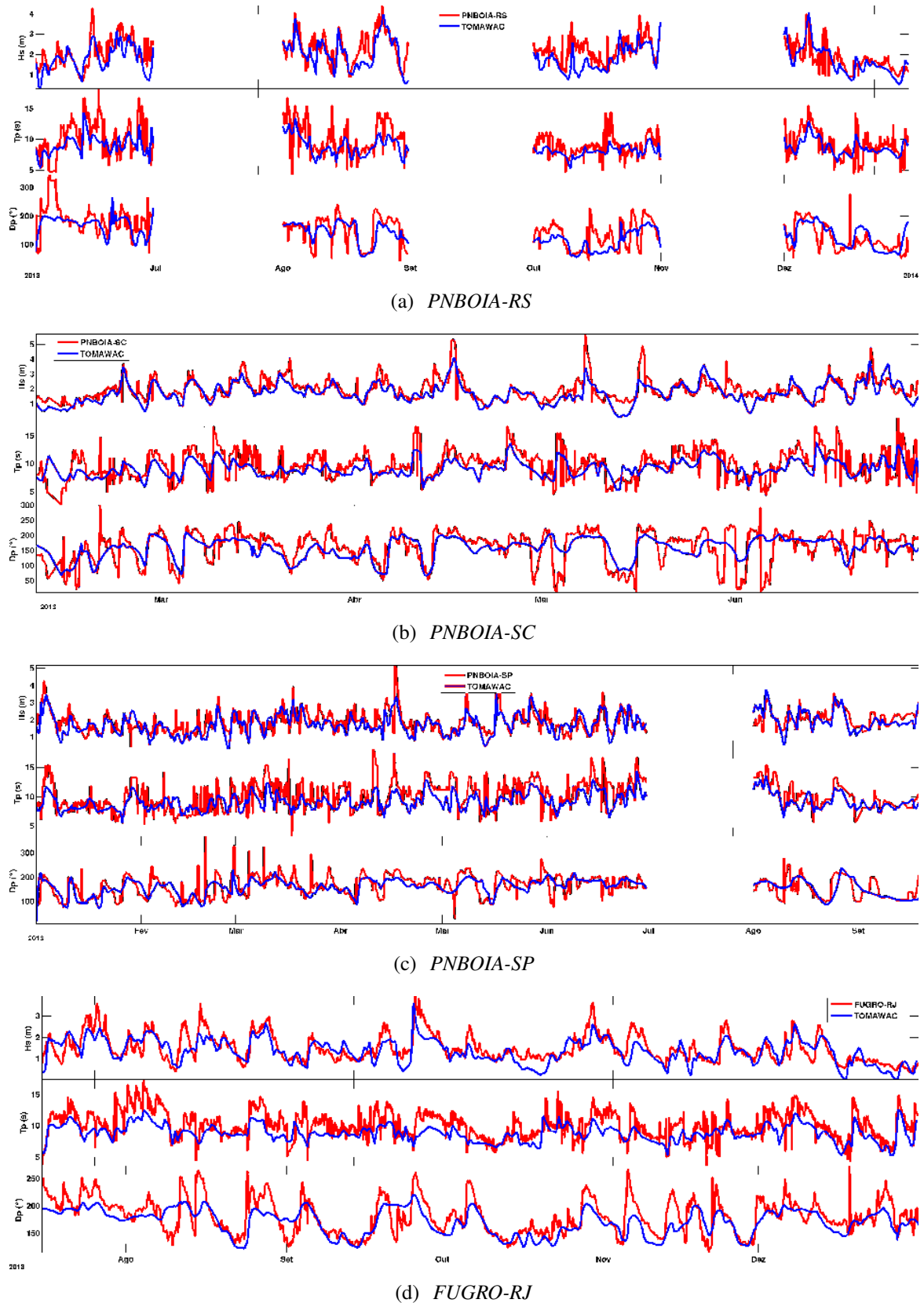


Figure 4.1: Séries temporais da altura de ondas significativa espectral (m), período de pico (s) e direção de pico ($^\circ$) entre TOMAWAC (azul), e dados observados (vermelho). Séries localizadas nas regiões das PNBOIAS do Rio Grande do Sul (a), Santa Catarina (b), São Paulo (c) e a boia da FUGRO no Rio de Janeiro (d).

- **Erro absoluto (ER)** : Quantidade da diferença média entre os dois dados analisados.
- **Viés** : Valor médio da diferença entre os resultados do modelo e observações. Estima os erros sistemáticos que podem ter como origem na falta de habilidade do modelo em representar o ambiente estudado (Melo et al., 2008, 2010; Delle Monache et al., 2011; Edwards et al., 2014b).
- **Viés relativo (rViés)**: Apresenta o viés como uma fração da média dos dados observados, ou seja, estima a densidade relativa de erros ao invés da verdadeira densidade de erros (Viés) (Khan et al., 2016).
- **Índice de espalhamento (SI)**: Apresenta a porcentagem da diferença entre o erro quadrático médio e a média dos dados observados, ou seja, indica o porcentagem do erro esperado para determinado parâmetro (Melo et al., 2008; Edwards et al., 2014b).
- **Inclinação quadrática média (SS)**: Resultado de uma análise de regressão na qual nenhum dos dois conjuntos de dados é considerado como perfeito, mas ambos contribuem igualmente para o erro (Melo et al., 2008; dos Santos, 2009).
- **Coefficiente de correlação de Pearson (R)**: O coeficiente de Pearson reflete a correlação linear entre os dados comparados (Zambresky, 1989; Legates e McCabe, 1999; Edwards et al., 2014b).
- **Coefficiente de correlação de Spearman (r_s)**: O coeficiente de Spearman demonstra a força da correlação monotônica entre os dados, e pode ser utilizada no caso de dados não-lineares como período e direção das ondas (Wilks, 2006).

A verificação estatística das séries temporais está apresentada na tabela 4.3, onde os melhores parâmetros entre as comparações estão grifados em cinza. A partir deste momento, a altura de ondas significativa espectral (H_{mo}) e o período de pico (T_p) serão analisados, não fazendo parte da comparação os valores de direção de pico (Melo et al., 2008).

Os valores de RMSE para H_{mo} são baixos (próximos a 0,5 m) para todos os locais, com menor valor para a boia da FUGRO-RJ, refletindo esta tendência nos valores do MAE com 0,44 m e 0,35 m respectivamente, valor abaixo do encontrado por outros autores (Lalbeharry, 2002; Melo et al., 2008; dos Santos, 2009; Edwards et al., 2014a). O Índice de Concordância (IC) demonstra a perfeição com

que o modelo pode reproduzir a observação, havendo proximidade entre as comparações com melhor reprodução na boia da FUGRO-RJ.

Em relação ao RVAR, valores próximos a 1 foram encontrados para a PNBOIA-SC e SP, enquanto que nos outros casos houve maior variação da série em relação à média. O MSE deve ter valores próximos a zero para apresentar perfeição, e em todos os casos, os valores tenderam a zero, com menor valor para FUGRO-RJ (0,20).

O T_p , que é um parâmetro não linear, apresentou RMSE em torno de 2 s para todas as boias e um valor de 1,53 s para o caso da boia FUGRO-RJ. Resultados relevantes se comparados com valores de referência comparados em outras localidades (Janssen et al., 1997; Bidlot et al., 2002). O MAE segue essa tendência com 1,19 s e o IC, por outro lado, não foi capaz de caracterizar o T_p , com valores negativos e próximos a zero, indicando concordância pobre ou nula entre modelo e dado real (Willmot, 1982; Teegavarapu, 2013).

Table 4.2: Indicadores de performance e parâmetros estatísticos utilizados e o resultado desejado para encontrar a melhor concordância entre modelo e observação. n : Quantidade de dados observados obs : Dado observado; mod : Dado modelado; obs_{mean} : Média dos dados observados; mod_{mean} : Média dos dados modelados; d_i : Diferença entre grupos da boia e modelo.

Parâmetro	Resultado desejado
$ER = \frac{ \left(\frac{\sum mod}{n}\right) - \left(\frac{\sum obs}{n}\right) }{\left \frac{\sum obs}{n}\right }$	Quanto menor, melhor a concordância entre modelo e observação.
$Viés = \frac{\sum mod - obs}{n}$	Se o resultado é positivo, o modelo tende a superestimar medições, se negativo, o modelo tende a subestimar as medições. Valor ideal igual a zero
$rViés = \frac{Bias}{obs_{mean}}$	Se o resultado é positivo, o modelo tende a superestimar medições, se negativo, o modelo tende a subestimar as medições. Valor ideal igual a zero
$SI = \frac{RMSE}{obs_{mean}}$	Quanto menor, melhor a concordância entre modelo e observação.
$SS = \sqrt{\frac{\sum(mod)^2}{\sum(obs)^2}}$	Situação ideal SS=1; Valores de SS menores que 1 significam subestimativa do modelo e valores maiores significam superestimativa
$R = \frac{\sum[(mod - mod_{mean})(obs - obs_{mean})]}{\sqrt{[\sum(mod - mod_{mean})^2][\sum(obs - obs_{mean})^2]}}$	Quanto mais próximo a 1 indica melhor correlação linear
$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$	Valores próximos a 1 indicam maior correlação

O RVAR apresenta grandes valores já que os dados podem variar de 0 a 19 s, desta mesma forma, o MSE também possui valores altos, já que este parâmetro ressalta as diferenças individuais, sendo sensível aos grandes erros pontuais.

Devido a isso, a tabela 4.3 foi complementada com outros parâmetros estatísticos (Viés, SS, SI, R, etc) de acordo com Khandekar (1989); Janssen et al. (1997); Khandekar (1998); Bidlot et al. (2002) entre outros. A verificação estatística de vários modelos de ondas globais foi avaliada por Khandekar (1989) e Khandekar (1989) utilizando esta metodologia. Estes autores concluíram que modelos apresentando SI inferior a 35% são considerados adequados para o ambiente simulado, ou seja todas as comparações estão adequadas de acordo com este índice (Bidlot et al., 2002).

Os valores da média e desvio padrão da boia e modelo estão dentro do padrão aceitável, apresentando também erro relativo, viés e viés relativo próximos a zero indicando excelente concordância entre o dado observado e o simulado. Para o SS, os valores encontrados são superiores a 1, ou seja, indicando tênue superestimação do modelo sobre os dados observados.

Os coeficientes de correlação de Pierson (R) e Spearman (r_s) foram aplicados para verificar se a

Table 4.3: Comparação dos indicadores de performance entre Altura Significativa das ondas (H_{mo}) e Período de Pico (T_p) em relação as três localidades das PNBOIAS, além da boia pertencente a FUGRO. RMSE, MAE, BIAS, mod_{mean} , obs_{mean} , mod_{std} , obs_{std} estão nas unidades dos parâmetros analisados, e SI está em porcentagem.

	RS (69152)		SC (69150)		SP (69151)		RJ (FUGRO)	
	H_{mo}	T_p	H_{mo}	T_p	H_{mo}	T_p	H_{mo}	T_p
RMSE	0.46	2.00	0.57	2.07	0.52	2.03	0.44	1.53
MAE	0.36	1.64	0.43	1.70	0.40	1.62	0.35	1.19
IC	0.78	-0.43	0.69	-0.35	0.70	-0.26	0.79	0.13
RVAR	1.29	2.83	1.10	3.30	1.02	2.94	1.33	2.85
MSE	0.21	3.98	0.33	4.30	0.27	4.12	0.20	2.35
mod_{mean}	2.07	9.54	1.97	9.85	1.92	10.10	1.49	10.06
obs_{mean}	1.82	8.70	1.75	9.10	1.81	9.14	1.35	8.79
mod_{std}	0.71	2.45	0.70	2.53	0.62	2.46	0.64	2.19
obs_{std}	0.69	1.38	0.67	1.40	0.61	1.43	0.57	1.30
ER	0.33	0.18	0.42	0.19	0.28	0.18	0.44	0.19
Viés	0.25	0.84	0.22	0.74	0.11	0.96	0.13	1.27
rViés	0.14	0.10	0.13	0.08	0.06	0.10	0.10	0.14
SI (%)	33	24	33	23	29	22	34	23
SS	1.13	1.12	1.12	1.10	1.05	1.12	1.10	1.16
R	0.69	0.63	0.70	0.65	0.65	0.69	0.74	0.72
r_s	0.65	0.56	0.72	0.62	0.62	0.66	0.75	0.70

correlação entre as séries temporais de H_{mo} e T_p apresentavam diferença linear. Os resultados apontam proximidade entre os coeficientes com valores entre 0,60 e 0,70. Apesar de ser mais aplicado, valores de R encontrados na literatura divergem quando modelos são comparados com observações como afirma Lalbeharry (2002) com variações de 0,62 a 0,91, enquanto que Cox et al. (1999) para as mesmas comparações encontraram valores entre 0,82 e 0,93.

Coefficientes de correlação são parâmetros estatísticos confiáveis e amplamente utilizados, sendo assim, o resultado encontrado na tabela 4.3 simplesmente indica correlação inferior a 0,70 entre as duas series de dados analisados. Essa afirmação apoia a capacidade do modelo TOMAWAC em reproduzir os ambientes estudados baseado nas séries de dados observados apresentadas nas figuras 4.1.

4.2 Estudo de Caso

Afim de alcançar os objetivos apresentados, uma simulação de estudo de caso foi proposta (figura 3.1). Através da simulação das ondas, foram descritas as condições oceânicas da área de estudo de forma a apontar os melhores locais para se utilizar conversores de energia das ondas.

A simulação foi iniciada e finalizada no mesmo período (01-01-2003 a 31-12-2012), compreendendo 10 anos de simulação, utilizando a parametrização definida anteriormente nos processos de calibração e validação. Estes parâmetros são resumidos na tabela 4.4.

Table 4.4: Configuração definitiva da simulação das ondas.

TOMAWAC	Período de simulação	2003 a 2012
	Passo de tempo	3600 s
	Passo de salvamento	12 h
	Número de frequências	15
	Frequência mínimas	0.05
	Varição da frequência	1.1
	Número de direções	12
	Nível de medição do vento	10 m
	Coefficiente de geração do vento	1.2
	Curva de crescimento devido ao vento	0.011
	Coefficiente de arrasto do vento	1.2875^{-3}
	Coefficiente de arrasto com o fundo	0.038
	Coefficiente de dissipação por whitecapping	4.5

Artigo I:

*Into the long-term simulation for marine
energy exploitation*

*Autores: Kirinus, E. P.; Oleinik, P. H.;
Marques, W. C.*

CAPÍTULO 5

Into the long-term simulation for coastal ocean energy exploitation

Kirinus, E. P.; Oleinik, P. H.; Marques, W. C.

Abstract: Waves and ocean currents have been widely researched worldwide as possible renewable sources. Recent findings relate viable energy spots with high power output focusing in local dynamic impacts disregarding long-term viability. This study underlines the importance of resource assessment performed throughout long-term simulations attempting to improve the understanding of spatial-temporal variability controlling the dynamic patterns of feasible spots for oceanic renewable energy. The hydrodynamic and the spectral wave models TELEMAC-3D and TOMAWAC were run over 10 years period, from 2003 to 2012. Sources of high current intensity and wave height were found in five spots around the Southern Brazilian Shelf (SBS) and Southeast Brazil Bight (SBB), where they were further analyzed for frequency of high occurrence, variability analysis during months and seasons, as well as, spatial and temporal variability. The results points out that renewable energy from ocean currents have more stability for conversion in the SBS, while waves present better conditions in the SBB. The weaker seasons for energy conversion were Autumn and Summer, respectively, with the stronger seasons varying. Waves variability demonstrate highly correlation with atmospheric dynamics regarding the passage of frontal systems, in opposition of currents that are mainly forced by local wind-driven setup.

Keywords: Renewable Energy; Variability; Waves; Currents; Telemac-3D, TOMAWAC

5.1 Introduction

The last decade has seen a revival of marine renewable devices developed all around the world (Clément et al., 2002; Khan et al., 2009; O Rourke et al., 2010; Esteban e Leary, 2012; Ng et al.,

2013; Malki et al., 2014), as in another hand there is a need for cost-effective and efficient renewable power options (Nagy e Körmendi, 2012; Newbery, 2016). Today, the renewable energy landscape is formed by six main categories (Bollmann et al., 2010): winds, waves, tides, ocean currents, osmotic power and ocean thermal (Valente de Souza e Marques, 2016).

Some of the most interesting regions in the ocean with the highest kinetic energy potential are located within western boundary currents. Several studies in literature approach the tidal conversion concept, but few mention the energy from ocean currents itself. Recent studies by Akimoto et al. (2013); Shirasawa et al. (2016) assessed the energy from Kuroshio currents, while Finkl e Charlier (2009); Yang et al. (2014a) supported energy conversion from the Gulf stream currents.

Akimoto et al. (2013) proposed that the Kuroshio current can be exploited with floating devices, with great amount of energy viability, in addition Shirasawa et al. (2016) introduced a new prototype to harvest energy from Kuroshio in a harsh 500 *m* deep environment. Finkl e Charlier (2009) studied the impact of turbines inside the Gulf stream, while Yang et al. (2014a) focused in nearshore current energy harvesting at the Florida current. Regarding this matter, strong western currents provides strong stream in its core, among high depths far away from the coast, which spread towards the shore promoting highly dynamic setup nearshore in a more welcoming environment than at open ocean.

Notwithstanding, wave energy resources are being vastly studied (Cornett, 2008; Besio et al., 2016). An early stage of any marine renewable energy extraction project is resource assessment. Regions with complex geometry, high variability of wind patterns and extensive areas delivers specific wave propagation properties (Tuomi et al., 2014), and also give rise to large spatial and temporal variability in the wave properties. The presence of relatively shallow areas and often occurring convergent wind patterns may lead to occasional wave energy concentration in some areas (Soomere, 2016). This feature requires a high spatial resolution of wave simulations and also a careful choice of wave measurement (Pelinovsky e Kharif, 2016).

According to Clément et al. (2002), there are difficulties facing wave power developments that needs to be addressed, such as the irregularities in wave amplitude, phase and direction, that threaten the maximum efficiency of a device over the entire range of excitation frequencies. In fact, the usage of long-term simulations aids some of these difficulties enhancing the knowledge of the harvest site even further (Marques et al., 2012; Kirinus et al., 2015; Kirinus e Marques, 2015b; Besio et al., 2016;

Lavidas et al., 2017; Oleinik et al., 2018), thus proves that a short simulation for evaluating a desirable site is not recommended resulting in misleading assessment (Folley et al., 2012).

The study area comprehend the South-Southeastern Brazilian Shelf (between -21°S to -38°S , figure 5.1) which is sub-divided into Southern Brazilian Shelf (SBS) and Southeast Brazil Bight (SBB) due to diverging dynamic pattern behavior. Several authors have extensively described both regions.

The SBS, located between 28°S and 35°S , continentally bounded with the Rio Grande do Sul and Santa Catarina States, has a slightly rugged shoreline, which is oriented Northeast - Southwest. The bathymetry of this region is quite soft, with the higher slope and shelf break located near the 180 m isobath (Zembruscki, 1979).

Located near the Brazil-Malvinas confluence zone, the study area is known for its high spatial and temporal variability (Podestá, 1997; Souza e Robinson, 2004; Soares et al., 2007b) and the con-

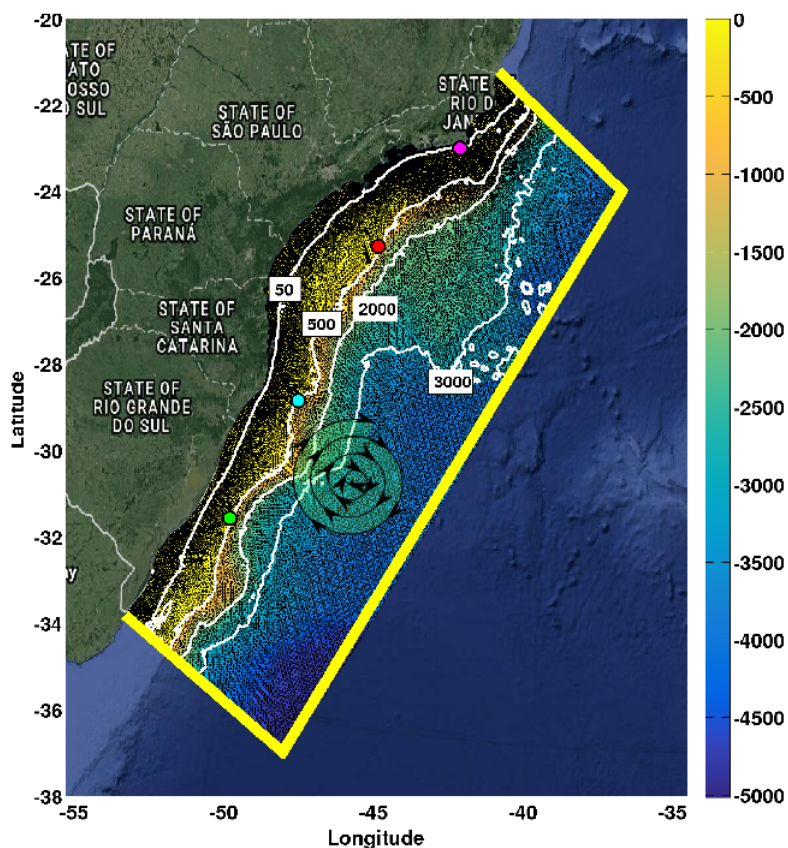


Figure 5.1: Study area located in the South-Southeastern Brazilian Shelf. In addition, the numerical grid used in this work with 205,617 nodes disposed in 20 vertical sigma levels. The yellow lines represent the oceanic liquid boundaries and the spiral represents the atmospheric surface conditions. The dots represent the in situ data from buoys: PNBOIA-RS (green), PNBOIA-SC (cyan), PNBOIA-SP (red) and FUGRO-RJ (magenta). Bathymetry is shown in the color bar and also using the isolines for 50, 500, 2,000 and 3,000 m.

vergence of several water bodies (Soares e Jr, 2001; Castro et al., 2006; Möller et al., 2008). Thus, the Southwest Atlantic Ocean is one of the most dynamic regions of the global ocean (Chelton et al., 1990; Piola e Matano, 2001; Soares et al., 2007a), characterized by large thermohaline contrasts and intense mesoscale activity (Gordon, 1989; Matano et al., 2010).

The high seasonality of the wind fields (Piola et al., 2005; Braga e Krusche, 2000) is characterized by the dominance of Northeast (NE) winds during the Summer and Southwest (SW) winds during the Winter, which drive the coastal circulation through the SW and NE, respectively (Möller et al., 2008; Marques et al., 2009, 2010b, 2012; Kirinus e Marques, 2015b). These winds can be enhanced by El Niño Southern Oscillation (ENSO) events (Piola et al., 2005).

The SBB spans from 23°S to 28°S (Loder et al., 1998), comprises the Paraná, São Paulo and Rio de Janeiro states, with a convex moon shaped shoreline accounting with several islands and mostly rocky shoreline. The shelf-break depth varies between 150 - 180 m. The main feature differing this regions from the SBS is the major influence of the Brazil Current (BC). Since this current mostly flows along the continental slope, although part of its transport takes place on the continental shelf, near the shelf break (da Silveira et al., 2000).

According to Castro (2014), the hydrography of the SBB is composed mostly by a salty and warmer Tropical Water (TW) with subsurface intrusions of the South Atlantic Central Water (SACW) in the coast causing frequent events of upwelling, specially during Summer (Mascarenhas Jr. et al., 1971). Vertically there are more water masses convergence (Stramma e England, 1999; Palma e Matano, 2009). During Winter, there are equatorward along-shelf intrusions into the SBB by waters with relatively low temperatures and salinities that originate from the SBS (Lentini et al., 2001; Möller et al., 2008).

Winds tends to prevail in NE directions delivering a monotonic south current, but in terms of seasonal variabilities (Castro, 2014), synoptic wind stress can promote or reverse the flow transport along-shelf for both Winter and Summer seasons (Dottori e Castro, 2009a). The atmospheric circulation of the SBB and SBS varies among them as the first is directly influenced by the South Atlantic Subtropical Anticyclone (SASA) while the latter is a propagation zone for low pressure systems usually carrying cold fronts (Oliveira, 2002; Dereczynski e Menezes, 2015).

The SASA is responsible for good thermodynamic stability resulting in NE winds of weak inten-

sity in the whole SBB. Although during Summer, SASA become weaker (at 32°S) and apart from the coast, while during Winter, the core is located northwards at 27°S losing its ability to maintain steady NE winds (Dereczynski e Menezes, 2015). In addition, during Winter season, there are transient cold frontal systems arriving from the SBS. These systems enhance wind gusts, establishing the South Atlantic Convergence Zone during November to March Kousky (1988), and increasing the passage of frontal systems to one at week (Dereczynski e Menezes, 2015). During Summer, this number decreases to increase later on Spring season (Oliveira, 1986; da. Silva, 2003; Andrade, 2007).

The importance of better understanding the atmospheric dynamics and its variability is related with wave generation process and how it varies each season (Reguero et al., 2015). Accordingly to Espindola e Araújo (2017) the wave direction presents a clear distinction from low latitudes with high latitudes. That can be harvested for energy conversion despite relatively low power level because these waves presents high seasonal stability north of 28°S (Contestabile et al., 2015).

In order to gain reliable information on possible changes in the waves and currents dynamic patterns during long periods, it is necessary to apply long-term numerical simulations due to the absence of long-term observational data. Long scenario simulation provides robust estimations and insights on the study area presenting further examination of location and increasing awareness on site selection for wave and current energy. Subsequently, the main objective of this work is use a 10 years long simulation to narrow even further the possible assessment sites for waves and currents energy conversion in the SBS and SBB. In addition, determine the spatial-temporal variability controlling the dynamic patterns that makes those regions reliable sources of oceanic renewable energy.

5.2 Methodology

5.2.1 TELEMAC System

What first started as a numerical model for dams, thermal and nuclear power stations at the Research and Development Department of Electricité de France (EDF) (Hervouet, 2007), open TELEMAC-MASCARET¹ is nowadays an open source powerful integrated modeling tool for use in the field of free-surface flows.

Open TELEMAC-MASCARET is formed by a conjunction of modules, in two or three dimensi-

¹www.opentelemac.org

ons, which can be used to study hydrodynamics, sediment transport, dredging processes, river floods, waves generated by winds, transport of oil spills and pollutants, renewable energy and more (Kopmann e Markofsky, 2000; Marques et al., 2010a; Maerker et al., 2011; Marques, 2012; Kirinus e Marques, 2015b; Costi et al., 2017; Marques et al., 2017; Oleinik et al., 2018).

The present work was developed using this numerical modeling system in the v6p3 version, specifically by using the three-dimensional hydrodynamic module TELEMAC-3D and the module for wind-driven waves called TOMAWAC. For a full documentation of TELEMAC-3D and TOMAWAC modules, the authors recommend the following references Hervouet (2007); Pham e Joly (2016); TOMAWAC (2017).

5.2.1.1. TELEMAC-3D

The TELEMAC-3D model solves the Navier-Stokes equations by considering local variations in the free surface of the fluid, neglecting specific mass variations in the mass conservation equation, and considering the hydrostatic pressure and Boussinesq approximations to solve the motion equations (Hervouet, 2007). The model is based on finite element techniques to solve the hydrodynamic equations (equations 5.1 to 5.4) and relies on the sigma coordinate system for the vertical discretization in order to follow the surface and bottom boundaries (Hervouet e Van Haren, 1996).

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \nu \nabla^2 (U) + F_x \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \nu \nabla^2 (V) + F_y \quad (5.3)$$

$$p = p_{atm} + \rho_o g (Z_s - z) + \rho_o g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz + p_d \quad (5.4)$$

where, U , V and W represent the velocity components, t is time, g the gravity acceleration, Z_s is the elevation of the surface, z is a depth in any layer, ν is the kinematic viscosity coefficient, F_x

and F_y are the moment source terms, p is the pressure while p_{atm} is the atmospheric pressure, ρ_0 is the reference density, $\Delta\rho$ represents the density variation, while $\nabla^2(U)$ and $\nabla^2(V)$ are the Laplacian operator for Cartesian coordinates.

The finite element techniques is used to spatially discretize the hydrodynamic equations considering the sigma levels for the vertical discretization and the Multidimensional Upwind Residual Distribution (MURD) for the advection of three-dimensional variables. The vertical discretization consists of 20 sigma levels distributed equally top to bottom. In order to solve the horizontal and vertical turbulence, the k- ϵ model was used, once the numerical mesh is highly refined supporting such method.

5.2.1.2. TOMAWAC

The wave module TOMAWAC (TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation) was used to evaluate the waves generated by the winds in the study area. In the general case of wave propagation in an unsteady medium (sea currents and/or water levels varying in time and space), a common way of describing the wave field is through wave action, which is conserved during propagation (Phillips, 1977). TOMAWAC is a spectral model (Benoit, 2003) based on the action balance equation which governs the wave evolution in Cartesian coordinates in the following forms:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{k}_x)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_y)}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (5.5)$$

where, $N(k_x, k_y, x, y, t)$ is the wave action density, t is time, the position vector $x = (x, y)$ represents the spatial location in a Cartesian coordinate system, $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (k \sin\theta, k \cos\theta)$ represents the wave number vector for directional spectrum discretization, with θ denoting the wave propagation direction and Q referencing the total source term.

In the unsteady form, TOMAWAC decompose the directional wave spectra in a finite number of propagation frequencies and directions, being called as a third generation wave model, such as WAM (Wave Model, Komen et al. (1996)), due to not impose any parametrization over the directional distribution, spectral energy nor wave action. Every components of the wave action spectra evolve in time accordingly with the processes modeled by the software.

For the propagation equation, all terms rely on the Doppler relation applied to the wave dispersion, as shown in equation 5.6.

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\partial \Omega}{\partial k_x} & e & \dot{y} = \frac{\partial \Omega}{\partial k_y} \\ \dot{k}_x = \frac{\partial \Omega}{\partial x} & e & \dot{k}_y = \frac{\partial \Omega}{\partial y} \end{cases} \quad (5.6)$$

TOMAWAC calculates wind-driven waves taking into account most of the main physical processes involved such as: shoaling, whitecapping, bottom friction-induced dissipation, non-linear interactions between waves and depth-induced refraction. TOMAWAC, however, does not take diffraction and reflection into account (TOMAWAC, 2017).

5.2.1.3. Simulation Setup

The performance analysis of TELEMAC-3D was carried on during 3 years, from 2012 to 2014, while the simulation using TOMAWAC was performed only during 2013. The case scenarios were run over 10 years, from 2003 to 2012. All the parametrization adopted for the long-term simulation were established throughout extensive validation and performance tests, presented in section 5.3.

TELEMAC-3D setup included parallelism with 12 and 120 cores, for validation and case study, respectively, with time step of 90 s and daily recording step. The Coriolis coefficient was considered variable in space and k- ϵ model was used to simulate the horizontal and vertical turbulence. The friction law of Manning was implemented in the lateral and bottom boundaries and 20 sigma levels were used for vertical discretization of the domain.

Alternatively, TOMAWAC was parametrized with 3,600 s for time step and saving step of 12 h. The number of discretized directions and frequencies chosen were 12 and 15, respectively.

5.2.2 Initial and Boundary Conditions

The entire data sets used for initial and boundary conditions were obtained from four global data sources: HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model²), NCEP/NCAR Reanalysis from NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*³), WW3 (WAVEWATCH III⁴) and OTPS (*Oregon*

²<http://hycom.org/>

³<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

⁴<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>

State University Tidal Prediction Software) Global Tidal Solutions⁵.

5.2.2.1 Superficial and Boundary Conditions for TELEMAC-3D

HYCOM results from NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*) offers great horizontal resolution (0.083° in mid latitudes) and also reliable data since its products are assimilated with observational data (Cummings e Carroll, 2006). Data sets from salinity, temperature and current velocity were interpolated in the oceanic boundary conditions (figure 5.1) during the entire period of simulation.

The atmospheric superficial conditions were imposed in all the mesh (figure 5.1, black arrows), with NCEP/NCAR Reanalysis from NOAA winds, air temperature and atmospheric pressure. This data were imposed 6 hourly in order to promote better weather influence in the study area.

Furthermore, the tides were imposed directly on TELEMAC-3D (Pham e Lyard, 2012; Pham et al., 2013), with the results from the OTPS Global Tidal Solutions (Egbert e Erofeeva, 2002) developed by the Oregon State University.

5.2.2.2 Superficial and Boundary Conditions for TOMAWAC

To perform the numerical simulations, data from WAVEWATCH III Tolman (2009) and from the NCEP/NCAR Reanalysis Kalnay e Kanamitsu (1996) were used to represent the liquid and superficial boundaries of the model, respectively.

The model started from the rest and the surface boundary was set with winds from the NCEP/NCAR Reanalysis, with temporal resolution of 6 h. The oceanic boundaries were set by the imposition of the integrated parameters significant wave height (H_s), peak period (T_p) and peak direction (D_p) from WAVEWATCH III with spatial resolution of 30 arc minutes and a temporal resolution of 3 h.

⁵<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

5.3 Model Performance and Validation

5.3.1 Grid sensibility

Firstly a grid sensibility test were performed using 5 different finite element meshes developed exactly with the same boundaries whilst changing the refinement, consequently changing the number of nodes in each mesh. The main goal of this analysis was to investigate the independence of the results regarding spatial resolution of the mesh elements. According to Cezana (2007), the numerical error are intrinsic and related with solving the momentum equations and they can be minimized trough refinement of the mesh. Also, the mesh chosen need to represent properly the oceanographic features in a friendly time consuming computational cost.

The meshes tested had approximately 70,000, 100,000, 200,000, 350,000 and 500,000 nodes. However, the first and last meshes were not taken into this analysis due to inconsistencies that promoted high iterations and numerical errors in the model. The meshes ran over 45 days and the data were compared against each other for sea surface height (ssh) and velocity filtered in low and high frequency. According to Maciel e Stella (2012), the comparison of deviation between time series in different meshes infers correct evaluation of their sensibility.

The absolute error between the meshes of 100,000 and 200,000 nodes is higher for the high frequency of ssh (velocity) in 11,70% (17.86%), when compared with low frequency in 3,69% (6,37%). Regarding the meshes 100 – 350, the differences of ssh in high (low) frequency and velocity filtered in high (low) frequency are even higher for being 12,04% (19,69%) and 6,85% (6,45%), respectively.

When comparing the meshes of 200,000 and 350,000 nodes, minor differences are obtained, being into acceptable statistical range (lower than 5%). Thus proving that the mesh with 100,000 nodes is unfit to represent the features on the study area and, that the meshes with 200,000 and 350,000 nodes are statistically identical. Consequently, the mesh with 205,617 nodes (figure 5.1) is chosen to carry on the simulations used in this work.

5.3.2 Validation and Calibration

In order to calibrate and validate the hydrodynamic model, 28 runs of a three years long simulation (2012 - 2014) was performed in order to compare the simulated results with observational data.

TOMAWAC, otherwise, was calibrated only for 2013, comprising 101 runs. For the sake of clarity the results in this section will be resumed.

The calibration of all simulations was performed by comparing the time series from TOMAWAC (H_{mo} and T_p) and TELEMAC-3D (intensity of current velocity) with the time series measured by the wave buoys from PNBOIA and FUGRO. The PNBOIA (Programa Nacional de Boias) is an ongoing project for gathering and providing oceanographic and meteorological data along the Brazilian coast and the adjacent Atlantic Ocean.

The data used to calibrate the numerical model were obtained from Fugro Brasil⁶ (containing only wave data), from a buoy located approximately 5.6 km off the coast of Arraial do Cabo (22.9957°S, 42.1919°W, 20 m depth). The data from PNBOIA were obtained on the coast of Rio Grande do Sul (31.5666°S, 49.8713°W, 500 m depth), Santa Catarina (28.8333°S, 47.6000°W, 500 m depth) and São Paulo (25.2833°S, 44.9333°W, 500 m depth) (figure 5.1).

Time series provides a visual representation of the comparison between models and the buoys, although using well known performance skills and statistical metrics can be quantified for better understanding this comparison (Fox, 1981; Willmot, 1982; Janssen et al., 1997; Lalbeharry, 2002; Wilks, 2006; Melo et al., 2008, 2010; Hallak e Filho, 2011; Li e Heap, 2011; Chawla et al., 2013; Teegavarapu, 2013). The equations to compute these metrics are presented in Table 5.1.

According to Table 5.2, H_{mo} presents low RMSE values (near to 0.5 m) in all locations, with minimal at FUGRO buoy. This tendency is corroborated by low MAE values with 0.44 m e 0.35 m, respectively. These values are lower than those found by other authors (Lalbeharry, 2002; Melo et al., 2008; dos Santos, 2009; Edwards et al., 2014a). The Index of Concordance (IC) of Willmot (Willmot, 1982) represents the ability of the model to reproduce the observations, being the best fit is for FUGRO buoy (IC = 0.79).

Regarding RVAR, values closer to 1 were found for PNBOIA-SC and SP, while in the other buoys there were higher variance in relation to the average. The MSE must have values closer to zero to consider perfection, in all cases this parameter tends to zero, with best result for FUGRO buoy (MSE = 0.20).

Conversely, T_p is not a linear parameter, RMSE around 2 s for all buoys with outstanding result

⁶<http://metocean.fugrogeos.com/Marinha/>

Table 5.1: Measurements used to assess the performance of the model against buoy. n : Number of observations or samples; obs : Observed values; mod : Modeled data; obs_{mean} : Mean of observed values; mod_{mean} : Mean of modeled values; obs_{var} : Variance of observed values; mod_{var} : Variance of modeled values; d_i : Difference between ranks of buoy and model.

Statistical metric	Desirable results
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(obs-mod)^2}{n}}$	Closer to 0 (best).
$MAE = \frac{\sum obs-mod }{n}$	Closer to 0 (best).
$IC = 1 - \frac{\sum(obs-mod)^2}{\sum mod-mod_{mean} + obs-obs_{mean} }$	If IC = 1, indicates a perfect simulation (best), otherwise, if IC \rightarrow 0 the model simulation is unacceptable.
$MSE = \frac{1}{n} \times \sum(obs - mod)^2$	MSE = 0, indicates a perfect simulation (best).
$RVAR = \frac{mod_{var}}{obs_{var}}$	Must be closer to 1 (best), indicating that the variance of the observed and modeled data are the same.
$ER = \frac{ \left(\frac{\sum mod}{n}\right) - \left(\frac{\sum obs}{n}\right) }{\left \frac{\sum obs}{n}\right }$	The lowest the better agreement between model and buoy.
$Bias = \frac{\sum mod - obs}{n}$	If bias > 0, the model overestimate the buoy, otherwise is also valid. Ideal result is bias = 0 (best).
$rBias = \frac{Bias}{obs_{mean}}$	If rbias > 0, the model overestimate the buoy, otherwise is also valid. Ideal result is rbias = 0 (best).
$SI = \frac{RMSE}{obs_{mean}}$	The lowest value, the better agreement between model and buoy.
$SS = \sqrt{\frac{\sum(mod)^2}{\sum(obs)^2}}$	Ideal situation is SS = 1 (best); If SS > 0 the model overestimate the buoy, otherwise is also valid.
$R = \frac{\sum[(mod-mod_{mean})(obs-obs_{mean})]}{\sqrt{[\sum(mod-mod_{mean})^2][\sum(obs-obs_{mean})^2]}}$	Must be closer to 1 (best), indicating better linear correlation between the data.
$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)}$	Must be closer to 1 (best), indicating better monotonical correlation between the data.

for FUGRO buoy if compared with other studies (Janssen et al., 1997; Bidlot et al., 2002). MAE parameter follows this pattern with 1.19 s and IC was unable to characterize T_p , performing negative values or close to zero, indicating poor or null concordance between the data (Willmot, 1982; Teegavarapu, 2013).

RVAR in contrast presents higher values since the data can vary from 0 to 19 s, moreover, MSE

Table 5.2: Comparison between statistical metrics for wave and current data. Spectral significant wave height (H_{mo}), peak period (T_p) and current intensity (**Int**) analyzed among the three PNBOIA buoy and also a FUGRO buoy. RMSE, MAE, BIAS, mod_{mean} , obs_{mean} , mod_{std} , obs_{std} are in the same units of the parameters, SI is in percentage. NA = Not Applied.

	RS (69152)			SC (69150)			SP (69151)			RJ (FUGRO)	
	H_{mo}	T_p	Int	H_{mo}	T_p	Int	H_{mo}	T_p	Int	H_{mo}	T_p
RMSE	0,46	NA	0,21	0,57	NA	0,16	0,52	NA	0,24	0,44	NA
MAE	0,36	NA	0,16	0,43	NA	0,13	0,40	NA	0,19	0,35	NA
IC	0,78	NA	0,81	0,69	NA	0,86	0,70	NA	0,81	0,79	NA
RVAR	1,29	NA	0,51	1,10	NA	0,39	1,02	NA	0,61	1,33	NA
MSE	0,21	NA	0,04	0,33	NA	0,03	0,27	NA	0,06	0,20	NA
mod_{mean}	2,07	9,54	0,29	1,97	9,85	0,25	1,92	10,10	0,39	1,49	10,06
obs_{mean}	1,82	8,70	0,23	1,75	9,10	0,18	1,81	9,14	0,30	1,35	8,79
mod_{std}	0,71	2,45	0,18	0,70	2,53	0,15	0,62	2,46	0,22	0,64	2,19
obs_{std}	0,69	1,38	0,13	0,67	1,40	0,09	0,61	1,43	0,16	0,57	1,30
Bias	0,25	0,84	0,07	0,22	0,74	0,07	0,11	0,96	0,09	0,13	1,27
SI (%)	33	24	NA	33	23	NA	29	22	NA	34	23
SS	1,13	1,12	NA	1,12	1,10	NA	1,05	1,12	NA	1,10	1,16
R	0,69	0,63	NA	0,70	0,65	NA	0,65	0,69	NA	0,74	0,72

also have high values, mostly because these parameters enhance the individual differences of the data, being particularly sensible to large punctual errors.

In spite of these differences, wave statistical metrics (Bias, SS, SI, R) were applied to the analysis (Khandekar, 1989; Janssen et al., 1997; Khandekar, 1998; Bidlot et al., 2002). Statistical verification among several models performed by Khandekar (1989) e Khandekar (1998) using these methods concluded that models with SI lower than 35% are considered able to predict the studied environment, for this reason all comparisons (Table 5.2) shows competence according to SI (Bidlot et al., 2002).

Values of mean and standard variation are within the acceptable range, with bias close to zero indicating excellent agreement between observed and predicted data. For SS, the values are higher than 1, which means a slight overestimation of the model data over the buoy. The Pierson correlation coefficient (R) remains around 0.70 for all comparisons, which according to Lalbeharry (2002) is an acceptable result.

TELEMAC-3D ability to predict the buoy data was evaluated for the intensity of velocity Table 5.2). RMSE (MAE) have low values in all comparisons ranging from 0.16 to 0.24 $m.s^{-1}$ (0.13 to 0.19 $m.s^{-1}$) and IC higher than 0.81, with best fit in all cases for the PNBOIA-SC buoy. The MSE presented low values closer to zero in all cases, indicating good agreement between model and buoy.

RVAR values have high discrepancy among them, ranging from 0,39 to 0,61, which are related to the variance of the data, since it represents the distance between the data and its average. In conclusion, RVAR results point out that in some cases the model is able to represent the velocity pattern, although having some outliers in relation with the PNBOIA observations that reduce the RVAR value.

This section evaluated a validation that proved the good reproducibility of the model for waves and currents in the South-Southeastern Brazilian Shelf. The statistical performance analyses indicates that the hydrodynamic model TELEMAC-3D and wave model TOMAWAC can reproduce properly the tendencies observed.

5.4 Results and Discussions

In order to predict the potential of a certain region, several authors commonly use to evaluate power potential from a small amount of observed data (from days to months) (Defne et al., 2009; Bahaj e Myers, 2004). In other cases, models are applied but also for a short period of time, i.e. seconds to months considering tidal energy (Myers e Bahaj, 2005; Defne et al., 2011b; Divett et al., 2013; Work et al., 2013; Bai et al., 2014; Chen e Lam, 2014; Sánchez et al., 2014; Ruopp et al., 2015; Thiébot et al., 2015; Sufian et al., 2017). Despite several of these authors want to study specifically certain processes or patterns in the flow regarding energy conversion, sometimes energy generation prognostics are assessed.

Long period simulations are conversely being traded for short runs and statistical analysis to assess further periods of time. Some authors used a different approach in order to simulate oceanic currents, Marques et al. (2012) performed a 1.5 years long simulation in order to evaluate energy conversion from currents and sediment impacts. Pereira et al. (2014); Kirinus et al. (2015); Kirinus e Marques (2015b) used a 1 year climatological (containing long period average of weather and oceanic data) simulation in order to apply the tendency of the oceanic pattern into the energy converters.

For waves, in contrasting from the above, studies with long period is easily found, from estimations using only WW3 data base (Besio et al., 2016) to long run simulations spanning 5 to 12 years using several different models such as ECMWF ERA-INTERIM, WW3, SWAM, MIKE-21 and also coupled models (Cornett, 2008; Arinaga e Cheung, 2012; Atan et al., 2016; Besio et al., 2016; Van-

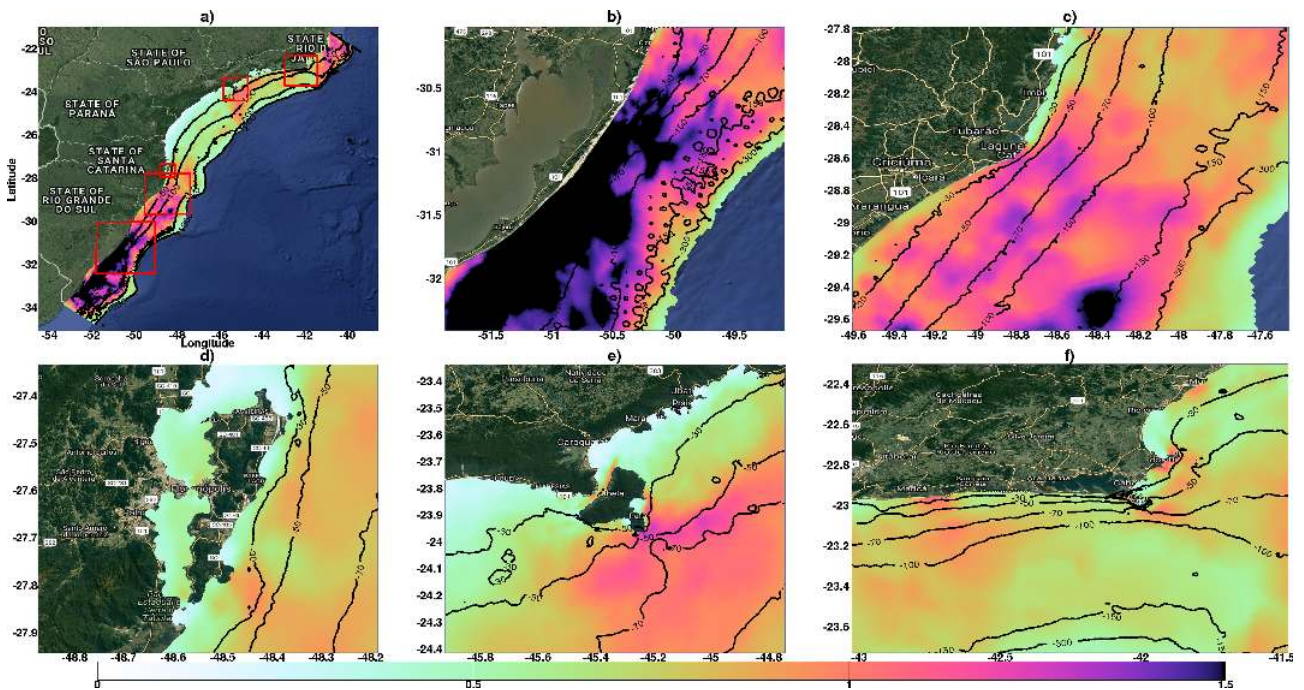


Figure 5.2: Maximum of current intensity for 2006, with zoom in 5 areas with the highest velocity. (b) Z1: Rio Grande do Sul littoral, (c) Z2: Santa Marta Cape, (d) Z3: Florianópolis Island, (e) Z4: São Sebastião Island, (f) Z5: Arraijal do Cabo. The color bar for all areas is forced to a maximum scale of $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ despite image (b) surpassing this value.

nucchi e Cappiotti, 2016; Lisboa et al., 2017; Fairley et al., 2017; Lavidas et al., 2017) In the case of energy from currents specifically, where its predictability rely on several meteorological factors, short term data or simulations fails to explore its full potential.

5.3.1.1. General approach for energy suitability

Regarding worldwide studies involving energy/potential availability for marine renewable sources that uses numerical modeling as a tool for the assessment, it is accurate to point out a resemblance in the general approach for the locational assessment of energy.

The methodology commonly used (Conner et al., 1998; Cornett, 2006; Hall, 2006; Defne, 2010; Defne et al., 2009, 2011a,b; Arinaga e Cheung, 2012; Work et al., 2013; Plew e Stevens, 2013; Walters et al., 2013; Robins et al., 2015; Baek et al., 2016) is to present the maximum velocity (wave height) for tidal (wave) converters and then calculate the power output in order to extrapolate for a farm of converters.

Our intention in this work is not to undermine these authors works, quite the opposite, we want to propose a new approach for energy assessment, despite the data or the uses intended. In the case of energy from marine currents specifically, where its predictability rely on several meteorological

factors, short term data or simulations fail to explore its full potential.

Lets take as an example the maximum intensity velocity for the year 2006 presented in figure 5.2. According to this result, the Rio Grande do Sul littoral have maximum velocities greater than 1.5 m.s^{-1} in an area with approximately 400 km^2 , which makes it the best region for energy conversion in comparison to others selected regions.

According to (Cornett, 2008) the maximum of the parameter (i.e. velocity intensity or wave height) provides a measure of the environment harshness and will likely be an important factor influencing future attempts at wave/current energy resource development.

In fact, using the maximum velocity as a single proxy just offer lack of liability since it only shows relation with high power conversion and its absence of any variability. In opposition of high power conversion, in some cases, it is more important to find a safe low power spot with stability to convert energy for a long period.

The predictability of this environment is hard to explore without further analysis so conclude that a region is good for energy conversion and delineate energy conversion prognostics is not only wrong but full biased. Taking a year by random such as 2006 and electing some region as best is the same as neglecting all the spatial and temporal variations in the oceanic and weather conditions imposed in the model.

2006 year was chosen by random for this case, this year had atypical Southern Oscillation Index (SOI)⁷, ranging from 1.7 to -1.3 meaning that it begins as a La Niña and ended as El Niño. Disregarding local influences (Fernandes et al., 2002; Parise et al., 2009; Cera e Ferraz, 2015), ENSO fluctuations exerts main impact in the atmospheric frontal system that regulates the meeting between the Maritime Polar air mass and the Continental Tropical air mass, that consequently impacts the Brazil-Malvinas confluence Marques (2005); Marques et al. (2009); Piola et al. (2005); Marques et al. (2014). This affects for instance the regional dominant winds (Northeast - NE, Southwest - SW) that can be enhanced by ENSO events (Piola et al., 2005), resulting in high hydrodynamic variations in the region as seen in Figure 5.2b.

We were able to proof in this section that one year nor one simulation is not capable to predict the randomness of the oceanic dynamic environment and further analysis need to be carried out in order

⁷<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>

to assemble more knowledge regarding temporal variation from the areas of interest.

5.3.1.2. Variability Analysis - Waves and Currents

The approach adopted hereafter aims to detect time change variations that could enhance or jeopardize some soon-to-be viable region delivering trustworthy predictions. Furthermore, equipment assessment will not be taken into account for this study, since the major proxy for choosing wave energy device are long period (7 – 10 s) and large amplitude (around 2 m) (Clément et al., 2002), being large amplitude mandatory as wave period ideally varies for each device implicating operational efficiency (Arinaga e Cheung, 2012).

Despite the idea of variability analysis being proposed first by Cornett (2008) only recently, it began to be used widely (Atan et al., 2016; Vannucchi e Cappiotti, 2016; Lisboa et al., 2017; Espindola e Araújo, 2017). As pointed out by Neill et al. (2014), a long period simulation can be decomposed into its cycles in order to demonstrate its variability, resulting in a important proxy that may affect the viability of any prospective energy extraction project (Cornett, 2008).

Decomposing 10-year current and wave simulation into austral seasons (Figures 5.3 and 5.4) regarding mean velocity and wave height, a more reliable scenario is presented in comparison with the prior maximum velocity comparison (Figure 5.2). First, the variability of the current velocity (Figure 5.3) in the State of Rio Grande do Sul (Z1) is high ranging from 0.25 to 0.4 m.s⁻¹ demeriting this regions as yearly stated.

The same season variations can be seen in the coast of the states of Santa Catarina (Z3) and in the north of São Paulo (Z4), with, in all cases, lower intensities occur in Summer and Autumn in opposition of Winter and Spring with higher values. The wave height follows the same pattern for all seasons (Figure 5.4) although the lower heights are presented in Summer and Spring, with higher heights occurring in Autumn and Winter. In all seasons, the 1 m wave height is closer attached to the 50 m isobath.

The mean data is able to represent a 10-year simulation with daily sampling, according to figures 5.2, 5.3 and 5.4 our data spam is in average around 0.3 m.s⁻¹ with maximum values of 1.2 m.s⁻¹ in the areas of interest, disregarding Z1. This analysis retrieves an important result, that the current velocity in higher latitudes tends to feature a strong seasonal variability, in addition the wave presents

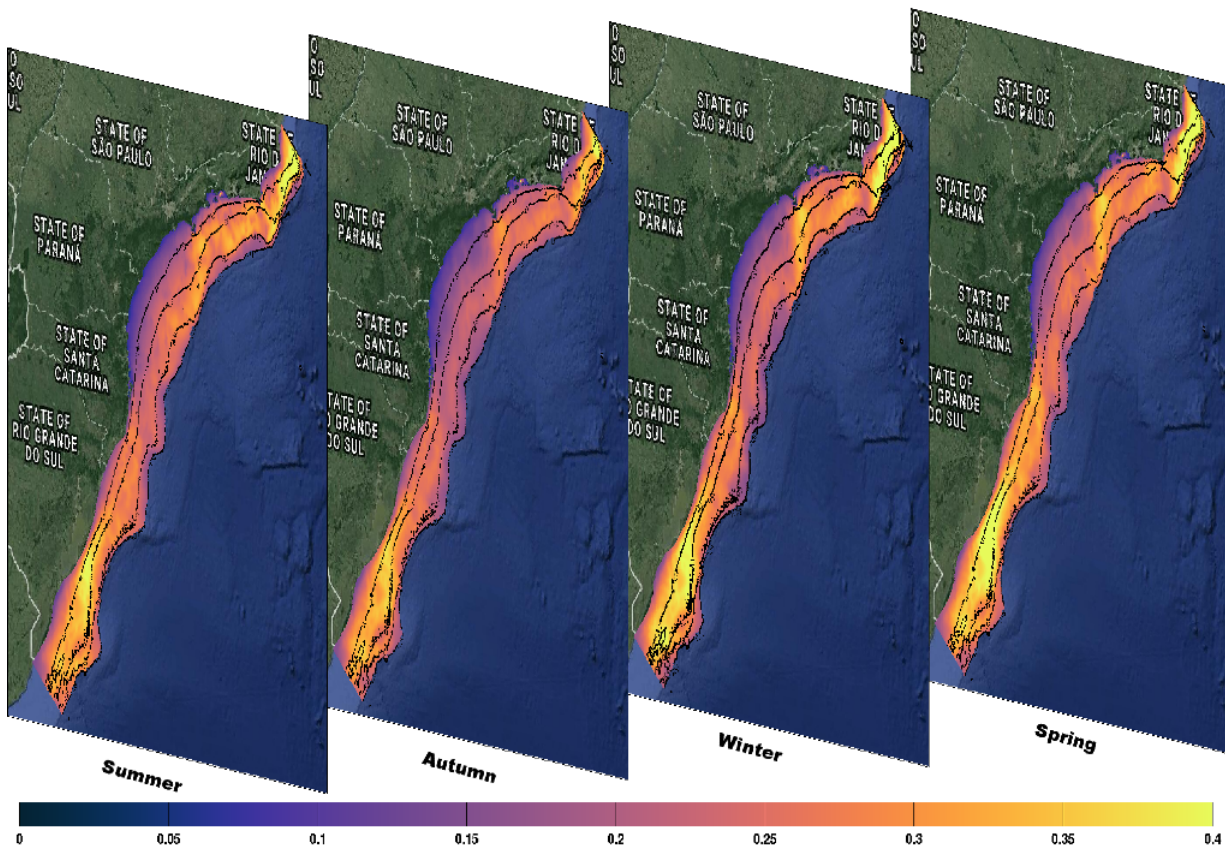


Figure 5.3: Mean current velocity ($m.s^{-1}$) for the austral seasons. Summer (DJF), Autumn (MAM), Winter (JJA) and Spring (SON).

a more uniform distributions among latitudes.

Despite the latitudinal influence in the current intensity and wave height, and its seasonal variation, for a viable extraction site it is required constant power throughout time (Hong et al., 2014). Following this assumption, a frequency analysis was performed on both data sets in order to reduce the search for viable regions inside the five zones.

Establish a cutting range for the data may vary accordingly to the selected converting device Cornett (2008) due to its cut-in speed or wave height design for the device, so in this case, current intensity values lower than $0.30 m.s^{-1}$ and wave height below 1.5 m were neglected. Equal or higher values were integrated generating a field of frequency for viable high power spots. The frequency of viable spots are shown in figures 5.5 (left and right panel), that contradicts the widespread mean seasonal values (Figures 5.3 and 5.4), enhancing even narrow regions within the five selected zones. These zones are the centre region of Rio Grande do Sul State (Z1), Santa Marta Grande Cape (Z2) and Southeast of Florianópolis Island (Z3) - both situated in Santa Catarina State, Southeast of São Sebastião Island in São Paulo State (Z4) and nearby regions of Arraijal do Cabo in Rio de Janeiro

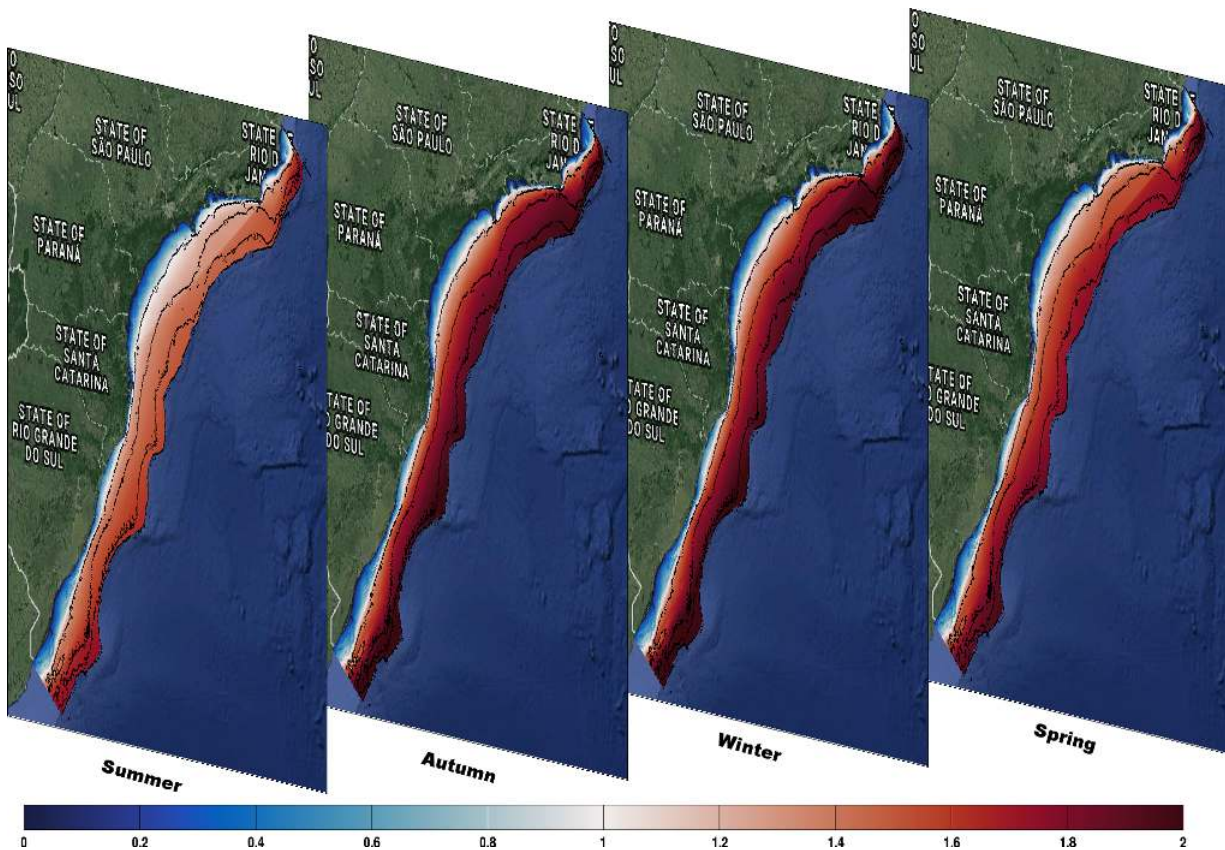


Figure 5.4: Mean wave height (m) for the austral seasons. Summer (DJF), Autumn (MAM), Winter (JJA) and Spring (SON).

State (Z5).

For currents (figure 5.5, left panel), the best zone is Z1 where in almost 90% of the time it presents velocity above 0.30 m.s^{-1} , followed by Z4 with approximately 70 % of the time. In addition, Z2 and Z5 have minor regions with circa 60% of time above 0.30 m.s^{-1} . Interestingly, these regions are well located regarding bathymetric features (around 50 m). The coast of Santa Catarina state (Z3) depicted poorly performance (30%) for velocity within the criteria chosen. It is essential to notice that a 10% deficit in this frequency analysis means that the selected spot has 1 year period of velocities under 0.30 m.s^{-1} , since the simulation period contains 10 years.

For waves, the scenario is slightly different (figure 5.5 right panel) since depth plays a major role on its dynamic, despite winds (Guimarães et al., 2014). The 100 m isobath draws the line for reducing more than 10% of the wave height in all zones. Even with this setback there are still possibilities for viability in this regions. The best case is Z5, where the sudden narrowing of the isobaths allow the wave fetch to reach the coast 75% of the time with heights above 1.5 m. In fact several wave energy converting devices rely on average height waves and moderate period variations (Clément

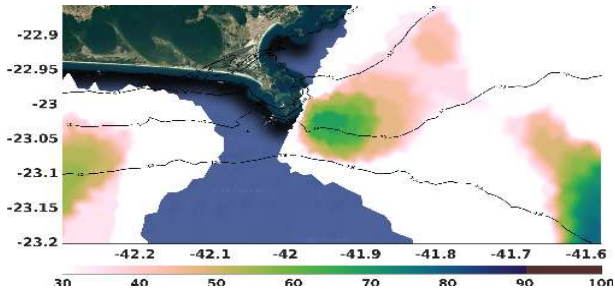
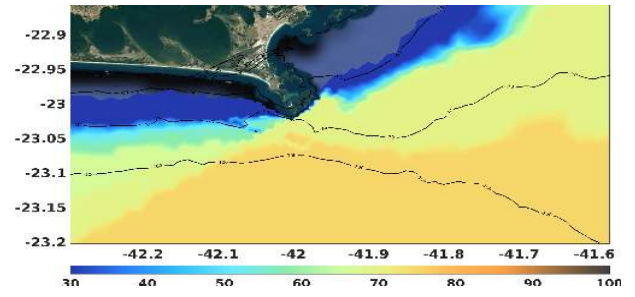
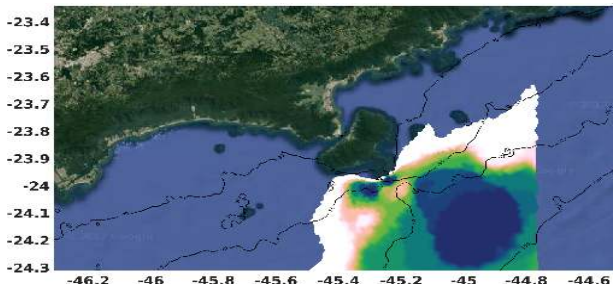
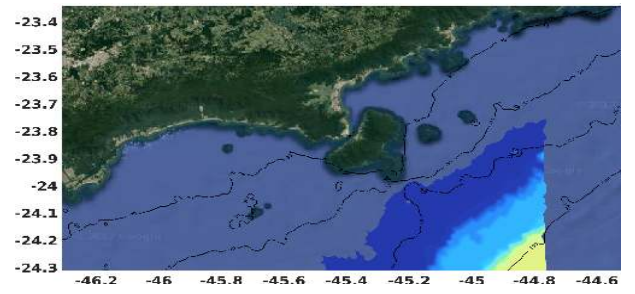
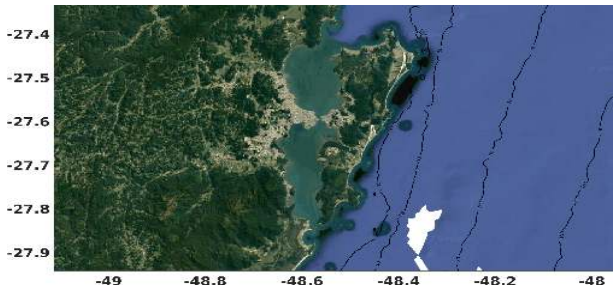
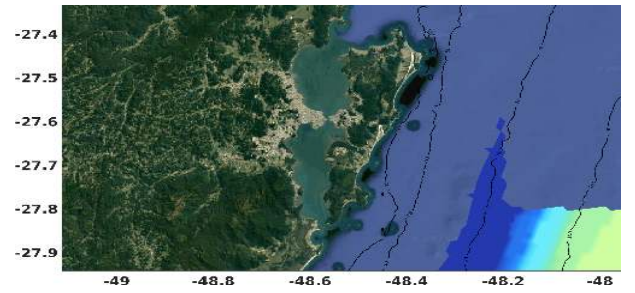
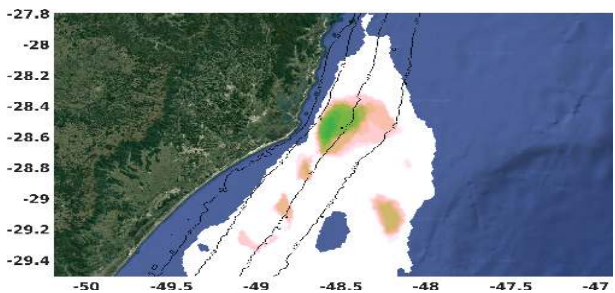
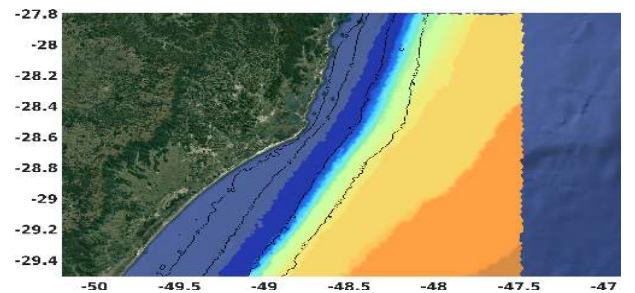
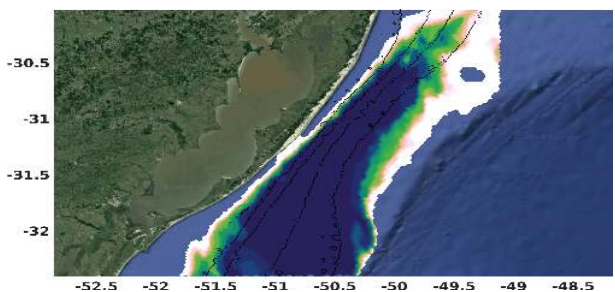
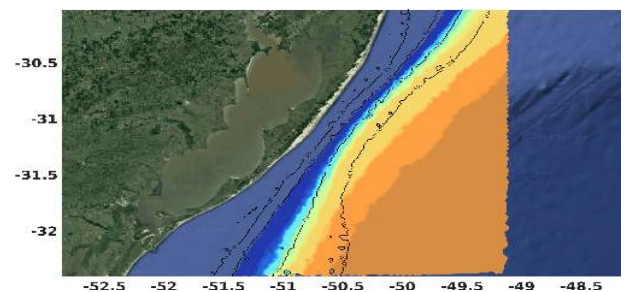
(a) $Z5$ (b) $Z5$ (c) $Z4$ (d) $Z4$ (e) $Z3$ (f) $Z3$ (g) $Z2$ (h) $Z2$ (i) $Z1$ (j) $Z1$

Figure 5.5: Frequency filter applied to current velocity (Left) and mean wave height (Right). Scale values are in percentage. Five zones of interest were selected.

et al., 2002; Cornett, 2008), meaning that wave height is not the only proxy limiting wave extraction in these zones.

In order to present a more accurate measure of the seasonal influences, Cornett (2008) defined the Seasonal Variability Index (SV). This is a parameter effective to quantify variability relative to its mean level on a 3-month seasonal time scale, and is not influenced by variability at shorter time scales. SV can be defined in equation 5.7. This measure can be applied for monthly variability as well as Lisboa et al. (2017) defined (see equation 5.8) a Monthly Variability Index (MV) with similar meaning to SV.

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_{year}} \quad (5.7)$$

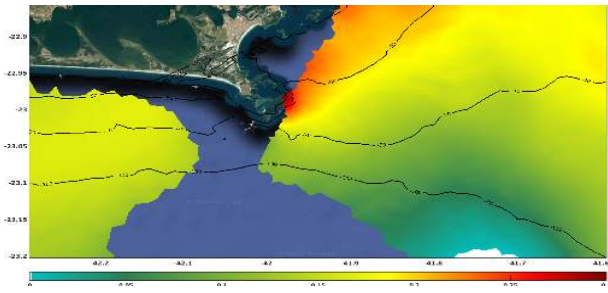
$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M4}}{P_{year}} \quad (5.8)$$

where, P_{S1} (P_{M1}) is the mean of the proxy (i.e wave height, current intensity or power) for the higher season (month), while P_{S4} (P_{M4}) is the mean for the lower season (month) and P_{year} is the yearly mean for the entire period.

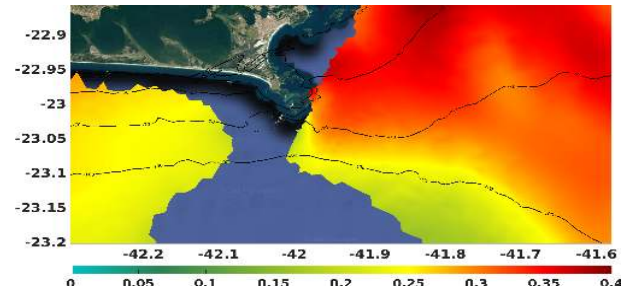
Accordingly to equations 5.7 and 5.8, the result expected for SV and MV is a dimensionless value that represents the many times that the stronger season (month) prevails over the weaker season (month) in relation to the mean annual values.

Methods proposed by Cornett (2008) were applied into the predefined high frequency regions (figures 5.5 left and right) aiming to evaluate the variability only for the viable zones under the cut criteria (current intensity values higher than 0.30 m.s^{-1} and wave height up to 1.5 m).

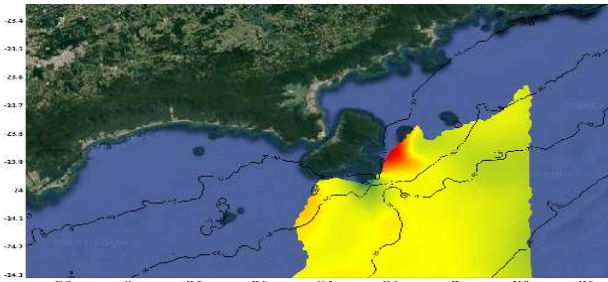
Firstly, the current velocity presents high dominance of Spring season in all zones except Z5, in opposition, the weaker season is Autumn (table 5.3). The SV parameter indicates the dominant season (DS) surpass the weaker season, regarding austral seasons, with velocities $0.17 \sim 0.24$ (minimum~maximum) times greater than the annual mean velocity. According to figure 5.6 (left panel), this seasonality dominance only prevails in minor spots underneath the best frequency regions (figure 5.5), meaning that in these locations there is higher fluctuation of velocity above 0.30 m.s^{-1} during a period of one year.



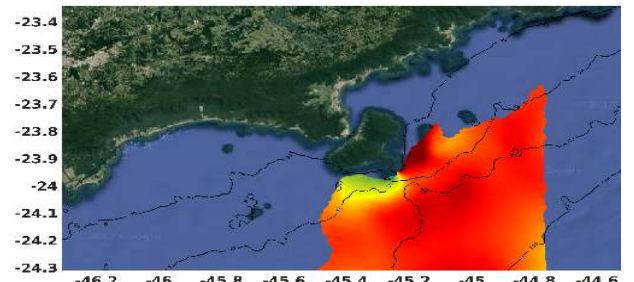
(a) Z5



(b) Z5



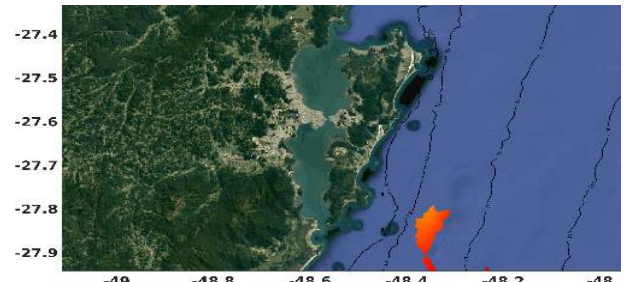
(c) Z4



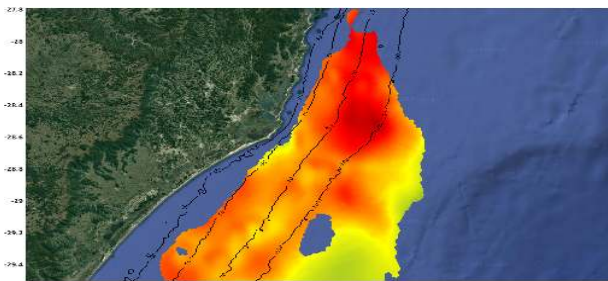
(d) Z4



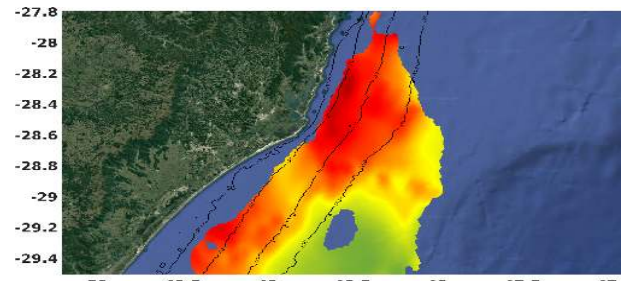
(e) Z3



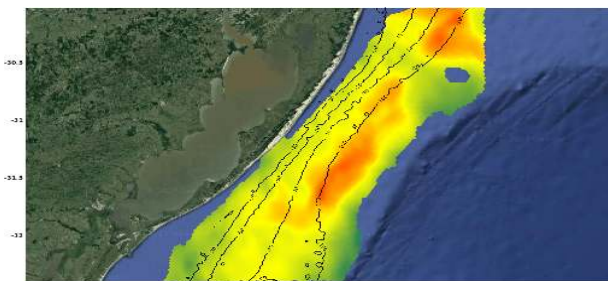
(f) Z3



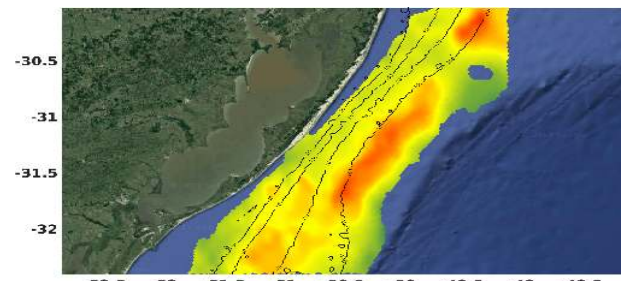
(g) Z2



(h) Z2



(i) Z1



(j) Z1

Figure 5.6: (Left Panel) SV and (Right Panel) MV applied for the values of current velocity above $0,30 \text{ m.s}^{-1}$.

Table 5.3: Variability analysis between wave and current data. DS and DM stands for Dominant Season and Month, respectively in opposition for WS and WM meaning Weaker Season and Month. SV and MV are dimensionless. Months and seasons are abbreviate until their third letter. Zones ranging from 1 to 5 according to figure 5.2.

	Parameters	Current velocity (m.s^{-1})					Wave Height (Hmo) (m)				
	Zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Season	DS	SPR	SPR	SPR	SPR	WIN	WIN	AUT	SPR	AUT	WIN
	WS	AUT	AUT	AUT	AUT	AUT	SUM	SUM	SUM	SUM	SUM
	Mean SV	0.17	0.22	0.24	0.17	0.14	0.15	0.18	0.10	0.25	0.27
	Mean	0.30	0.25	0.13	0.20	0.25	1.32	1.32	0.38	0.67	1.33
	Max	0.46	0.36	0.30	0.38	0.35	2.19	2.03	1.49	1.79	2.05
	Std	0.07	0.05	0.06	0.08	0.05	0.53	0.47	0.51	0.49	0.55
	Month	DM	NOV	SEP	SEP	SEP	SEP	SEP	MAY	SEP	MAY
WM		APR	MAR	MAR	APR	JUN	FEB	FEB	FEB	FEB	FEB
Mean MV		0.23	0.29	0.32	0.30	0.27	0.26	0.31	0.21	0.34	0.35
Mean		0.30	0.25	0.13	0.20	0.25	1.32	1.32	0.38	0.67	1.33
Max		0.47	0.37	0.31	0.41	0.39	2.27	2.22	1.60	1.90	2.12
Std		0.07	0.05	0.06	0.08	0.05	0.53	0.47	0.51	0.49	0.55

Regarding the Monthly Variability Index (MV) where the dominant month (DM) for current velocity is in majority in September. This means that winter DS for Z5 is also the end of Winter, in addition to Z1 - MV for November being also the end of Spring. As for the weaker month (WM), for Z1 to Z4 it represents the beginning of Autumn, but in Z5 the WM is represented by June, the last month of Autumn.

The dominance of MV in Z5 is near the higher values 0.27, but near the coast its values are up to 0.35 (figure 5.6 right panel), which means that September has 0.35 times stronger currents than June near the coast. All zones present a high MV (figure 5.6 right panel) that can be associated or not in spatiality with SV (figure 5.6 left panel), as it occurs in Z1, Z2 and Z3, but Z4 and Z5 differs spatially between MV and SV distribution.

A different behavior is shown in Z4 according to Dottori e Castro (2009b), firstly during Autumn, the passage of cold fronts are more frequent and are associated with stronger winds which generates wind stress that results in weak alongshore currents in Z4. Although, Dottori e Castro (2009b) point out that in this region the current dominance is prevailed by a wind-forced alongshelf current that are more energetic than the cross-shelf current due to the barotropic influence caused by the wind forcing. This result corroborates with the high MV seen in figure 5.6 (right panel) that spreads throughout the entire Z4.

On the other hand, Z5 weaker/dominant variability is connected to the resurgence of Cabo Frio, an important feature in this region caused by the strong influence of coastal upwelling of the South Atlantic Central Water due to the local wind regimes and coastal geomorphology (Cirano et al., 2006). This upwelling happens during the entire year (Batista et al., 2017), with yearly variation in its strength. Thus occurs strongly during September to March, but with great interannual variability (Elias, 2009), being able to affect drastically the velocity and thermal gradients on its surroundings (Campos et al., 2000a).

The major weather condition that promote the upwelling is the northeast winds driven by the South Atlantic Anticyclone increasing the Ekman transport southwards, while in opposition, the passage of cyclonic low pressure systems that generate winds from southwest/south direction breaking the upwelling by converging water level in the coast trough Ekman transport (Elias, 2009). Generally, NE wind events are longer in duration than SW/S wind events (Coelho-Souza et al., 2012).

Provided that, for the currents in Z5 the MV index supports the analysis in order to exclude certain assumptions for the SV, such as a whole season dominance, since in some cases (Z1 and Z5 - DM) the high SV is associated with the unstable period of time during season changes (i.e Winter to Spring to Summer).

In order to evaluate the wave variability first we must address to the dynamic behind wave generation in the SBB and SBS. There are two mainly agents responsible for the waves in the study region, firstly, the wind fields originated by the South Atlantic Anticyclone being frequently changed by the passage of cyclones and extratropical anticyclone. Secondly, by winds related with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) which location varies through north during Summer and southward during Winter, presenting anomalous behavior during El Niño years enhancing the strength of west and northeast winds Carvalho (2010).

Atmospheric changes in this magnitude contribute to the formation or intensification of frontogenesis between $30\sim 60^{\circ}\text{S}$ and $40\sim 60^{\circ}\text{W}$ (Pezza e Ambrizzi, 2003). In fact, this region presents seasonal variation of its maximum cyclogenesis as in summer its located between $25\sim 35^{\circ}\text{S}$, while in winter at $45\sim 50^{\circ}$ (Taljaard, 1967). The extratropical cyclones dislocate the frontal systems causing cold front which generates wind driven waves with monthly periodicity van Loon (1965).

For the waves (table 5.3), there is a wider fluctuation in DS as the latitude decrease equatorward,

in opposition of the WS with summer being the weakest season in all zones. There are local processes that affect more wave height than seasonality, as it can be seen in zones 1 to 3, as they have low SV (0,10~0,18) (figure 5.7 left panel), in opposition with zones 4 and 5 with higher SV (0,27~0,29). This happens, specifically in the south of Brazil due to the meeting of large meteorological systems that periodically forms and develop storms (Parise et al., 2009) resulting in maximum wave height modeled, and also high mean values. Zones 4 and 5 presents a higher SV, meaning that the wave height can have values ~ 0.25 times higher than the average annual wave height.

The DM sort out the previously wider inconsistency of DS in all zones, since the monthly dominance is sustained by mainly 2 months. This results support the previous assumption made for the currents, that the change of seasons promotes dynamic changes in the wave heights, with its specific months promoting the greater changes with MV variations from 0.26~0.35 (figure 5.7 right panel). Regarding WM, February was the least dominant month due to its harsh hot weather in Brazil (becoming mild poleward) with prevalence of Northeastern winds (Braga e Krusche, 2000; Malandrin et al., 2007; Pereira et al., 2009a; Campos et al., 2010; Pianca et al., 2010; Silveira et al., 2012; Pavanate e Fleischfresser, 2016).

The method proposed by Cornett (2008) support a new way to understand the complexity of the periodic cycles in the whole data. Closing up this knowledge gap promotes better understanding of the study area as developers efforts shall be divided into choosing the proper device for each locations and also increase their awareness of even further minor cycles of events that could put at risk the project.

5.3.1.3. Spatial Variability of the Currents

In order to investigate the spatial variability of each zone, wavelet power spectrum were calculated for current velocity and significant wave height across the 50 m isobath (figure 5.8), around this depth, the highest frequency were found in most regions. The third zone (Z3) is from now on omitted from the analysis due to dissatisfactory results. Within this analysis, the processes in different time scales were approached behalf the usage global wavelet power spectrum and afterwards, two-dimensional spectral wavelet analysis.

The 50 m isobath is presented in figure 5.8 with the place in which it intersects each zone, with

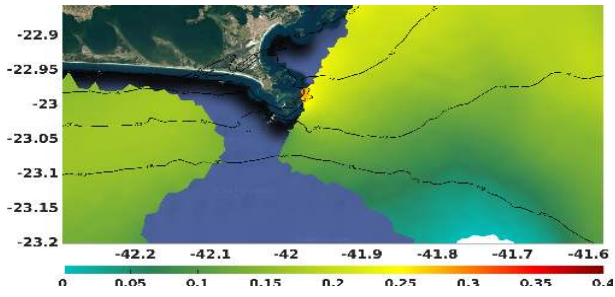
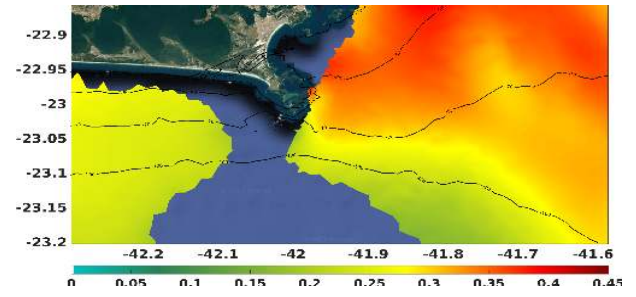
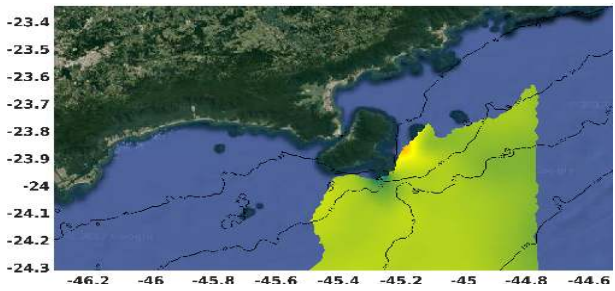
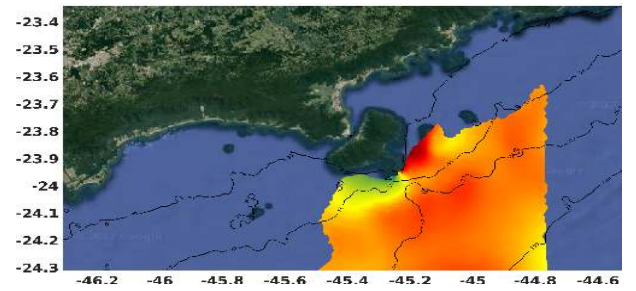
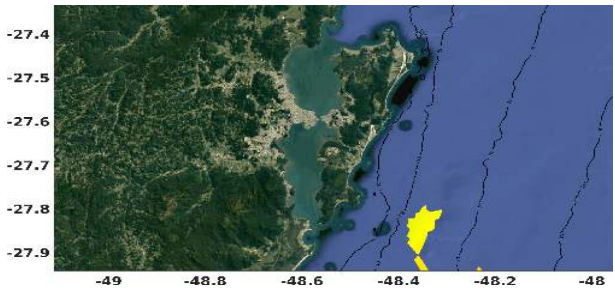
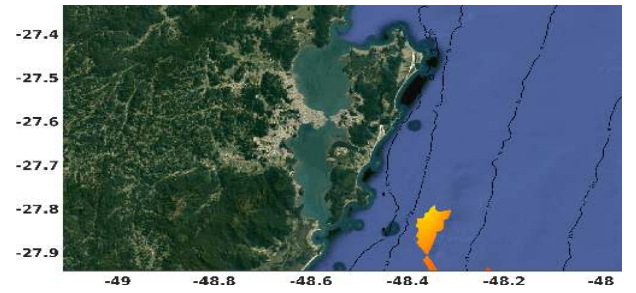
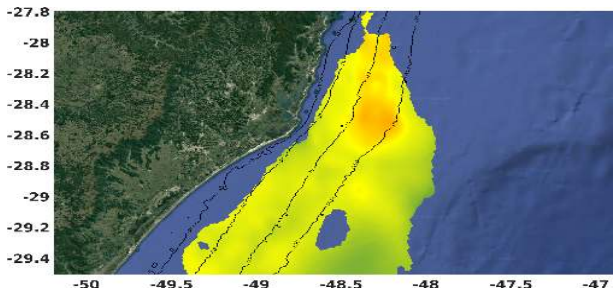
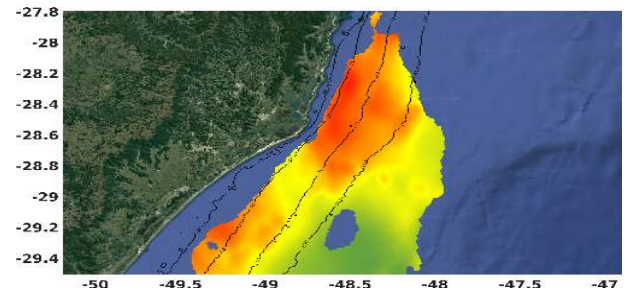
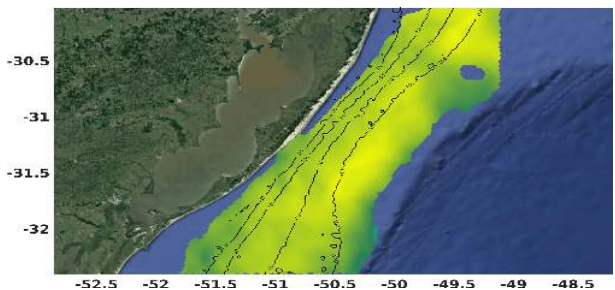
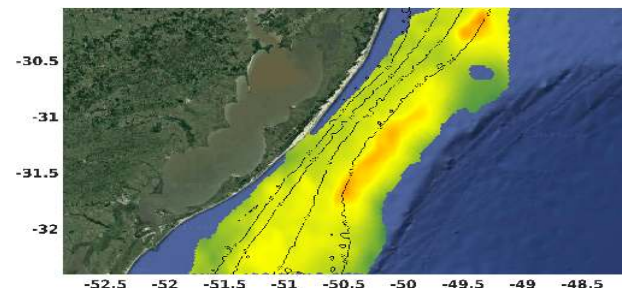
(a) Z_5 (b) Z_5 (c) Z_4 (d) Z_4 (e) Z_3 (f) Z_3 (g) Z_2 (h) Z_2 (i) Z_1 (j) Z_1

Figure 5.7: (Left Panel) SV and (Right Panel) applied for the values of wave height above 1,50 m

the distance from the origin as well. Time series were taken from nearby points across the entire line to perform the two-dimensional wavelet analysis. Firstly, the global wavelet power spectrum for the current velocity (figure 5.9) presents great differences among latitudes. Strong energy occurs in the 4-16 days period and also narrow zones of low confidence correlation in Z1 and Z2 in opposition with high correlation in northern regions (Z4 and Z5). The global spectrum also shown medium energy located at 32-64 days (starting at 1,000 km) related to inter-seasonality, and a high energy noise in the 256 - 512 days period which may be related to inter-annual processes, but in this case, these processes are below the 95% confidence level line.

For the significant wave height global wavelet power spectrum (figure 5.10), a narrow range of periods is shown with high importance (8-32 days), also presenting strong differences northwards. Z1, Z2 and Z3 presents low variability despite some regions with high power, as for Z5, almost the entire region is affected by processes from 8 to 32 days of occurrence. The same high energy noise is observed for long periods of 512 - 1,024 days but with no confidence level.

A few assumptions can be made from both global wavelet power spectrum (figures 5.9 and 5.10). Mainly, the agent of processes interacting with waves and currents in all regions is the wind due to the

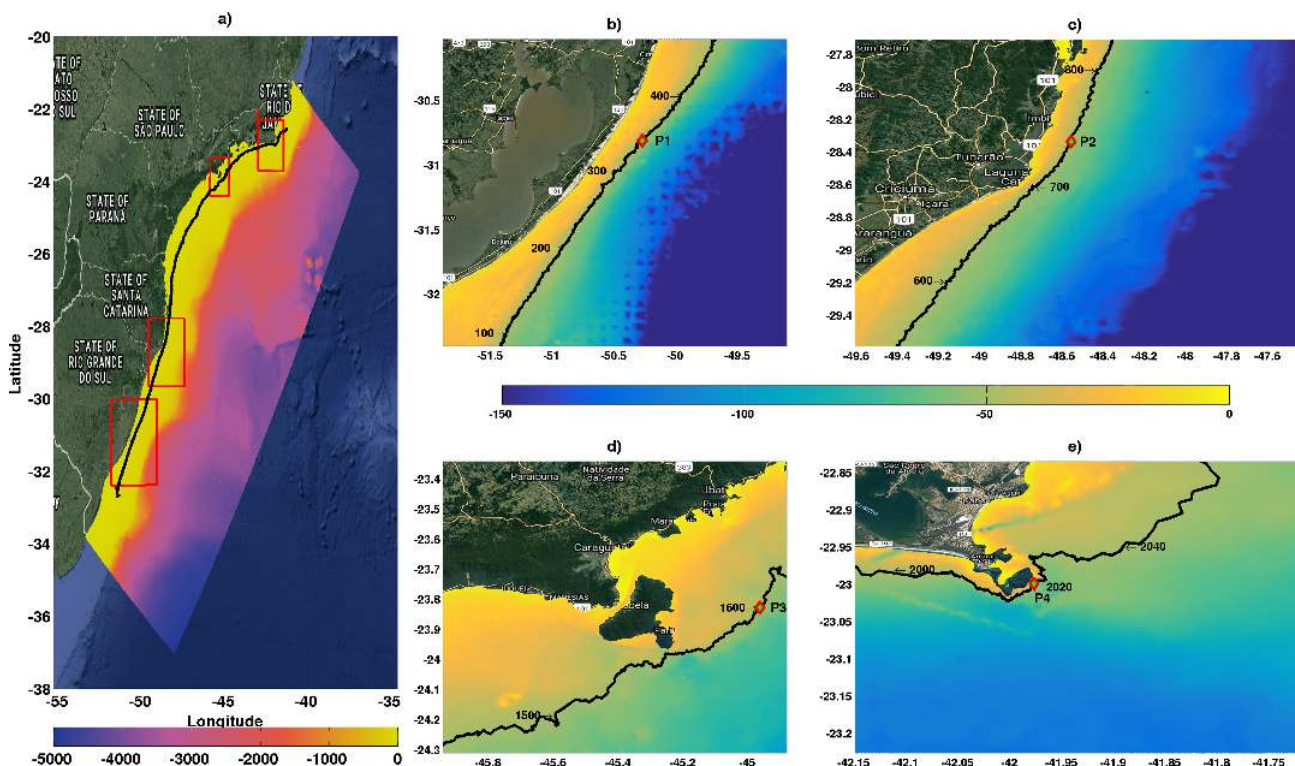


Figure 5.8: (A) Details of the 50 m isobath in the entire domain. The origin of the selected line is right above Z1. The distance from the origin is counted in kilometers at each zone. (B) Z1, (C) Z2, (D) Z4, (E) Z5. Red-greenish diamonds are points of interest for the upcoming sections.

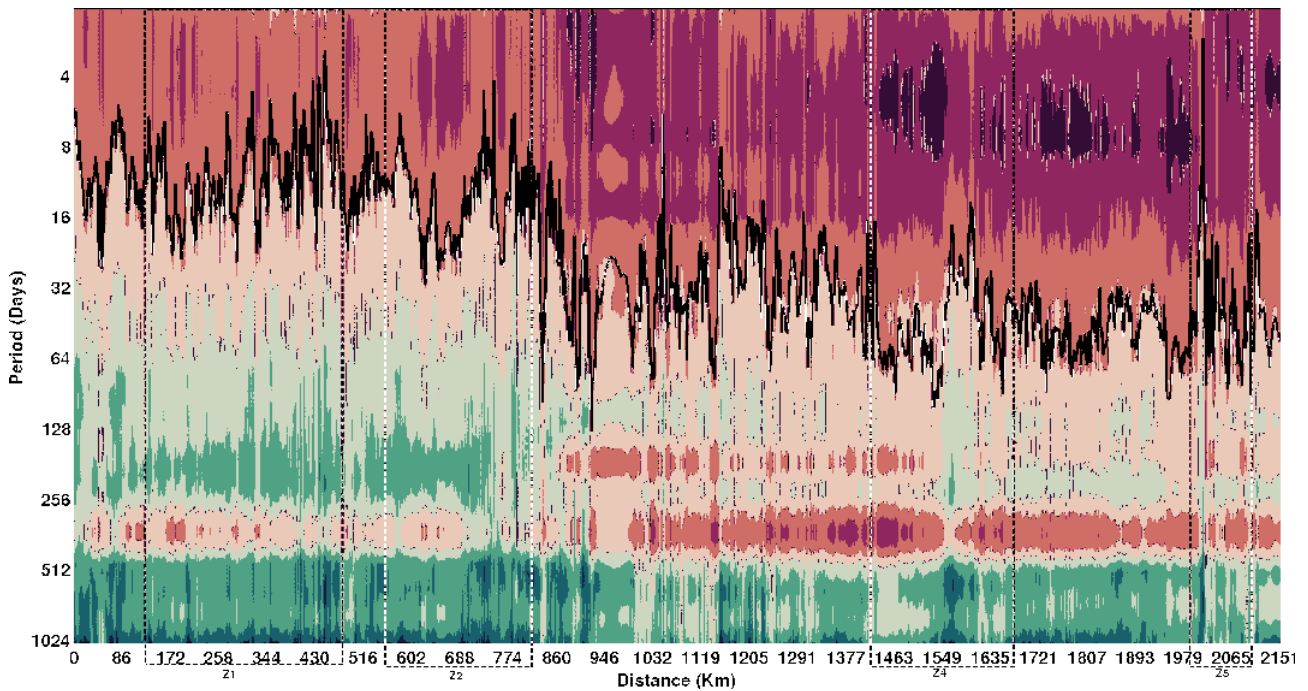


Figure 5.9: Global wavelet power spectrum across the space using Morlet wavelet for the current velocity at the 50 m isobath. Solid contour lines enclose regions of greater than 95% confidence level for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.95. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

period scale where in those region it effects becomes important. Winds are the principal mechanism behind wave formation and also for promoting strong currents to develop.

In both variables there is a noticeable change in periodicity patterns among the distance (near 900 km - northern of Santa Catarina Island, -27°S), which causes an intensification (weakness) in the variability of currents (waves) northwards in opposition to a more (less) steady environment southwards. In resume, as greater the purple shading (figures 5.9 and 5.10), the more unstable the region is, resulting in poor viability for both cases.

Thus, associated with the previous section analysis support the following, that regions Z1 and Z2 are viable spots for current energy assessment, although presents huge periods that may influence wave energy devices causing discontinuities in energy conversion (Hong et al., 2014). An opposing scenario is observed in Z4 and Z5 as the currents have huge time variability that may jeopardize energy converters in this region, while for waves, despite minor fluctuations, there are good regions within the high amplitude/frequency zones.

In opposition to any regular wavelet analysis, the aim with the following analysis is to find exactly the spots where there are low variability for cycles lower than 30 days, whilst, near or above the

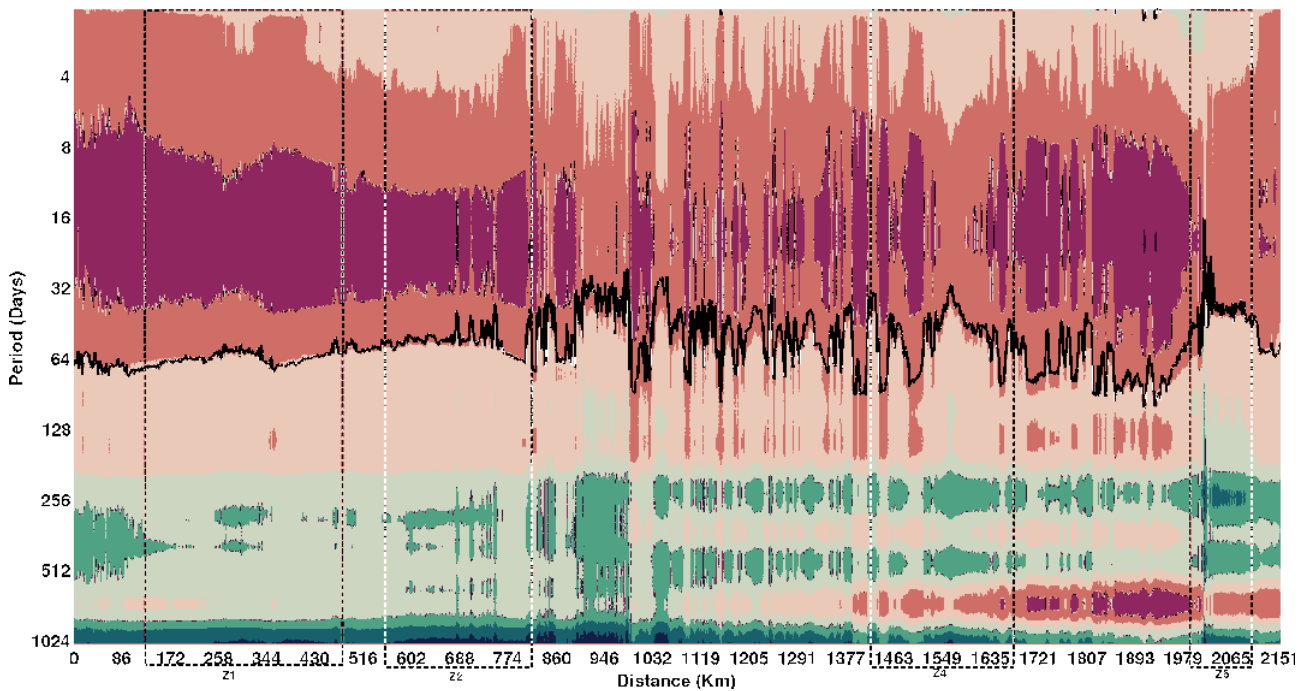


Figure 5.10: Global wavelet power spectrum across the space using Morlet wavelet for the spectral significant wave height at the 50 m isobath. Solid contour lines enclose regions of greater than 95% confidence level for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.95. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

95% confidence line. The two-dimensional local wavelet power spectrum for current velocity (figure 5.11a.) shows that in Z1 and Z2 there is a dominance of a blueish color map meaning low variability in these spots. Time series of temporal mean variance (figure 5.11b.) indicates that cycles lower than 30 days are 95% significant over the whole studied period, and that most significant events normally occur during austral Autumn and Winter. Most significant events are observed northward the study region and these findings are supported by the time series of spacial mean variance (figure 5.11c.), indicating the low variability in Z1 and Z2. The contrary happens in Z4 and Z5 with intense variability leading consequently to high instability in the currents over the whole studied period.

The two-dimensional wavelet for the significant height (figure 5.12) shows almost a mirrored version of the currents wavelet. Most significant events are observed southward, where Z1 and Z2 presents high wave height variability during the entire 10 year period, while Z4 and Z5 show a more steady pattern. In this case, a very interestingly spot stands out inside Z4, where the mean variance time series reach almost null values, meaning that in this place, there is high amplitude waves with high frequency of occurrence, and also low variability during 10 years of simulation. On the other hand, time series of temporal mean variance (figure 5.12b.) indicates that cycles 95% significant

lower than 30 days occur during any season over the 10 years period.

Spatially spectral analysis were able to provide an important oversight about each zone going beyond the variability analysis priorly proposed. In fact, this method proves to be very useful in determine specific subregions within previous defined zones regarding with engineering/design parameters.

5.3.1.4. Temporal Variability

Finally a temporal variability analysis is needed in the subregions defined by the spatial analysis in order to unravel the power spectra of the dynamic patterns involved in these areas. The wavelet method is able to demonstrate the occurrence of relevant events of energy conversion regarding time scales through local and global power spectrum (Torrence e Compo, 1998; Morettin, 2004; Liu et al., 2007).

The integrated cross-wavelet analysis was performed in the four points selected accordingly to low spatial variability (see figure 5.8). Interestingly, the local and global wavelet power resulted

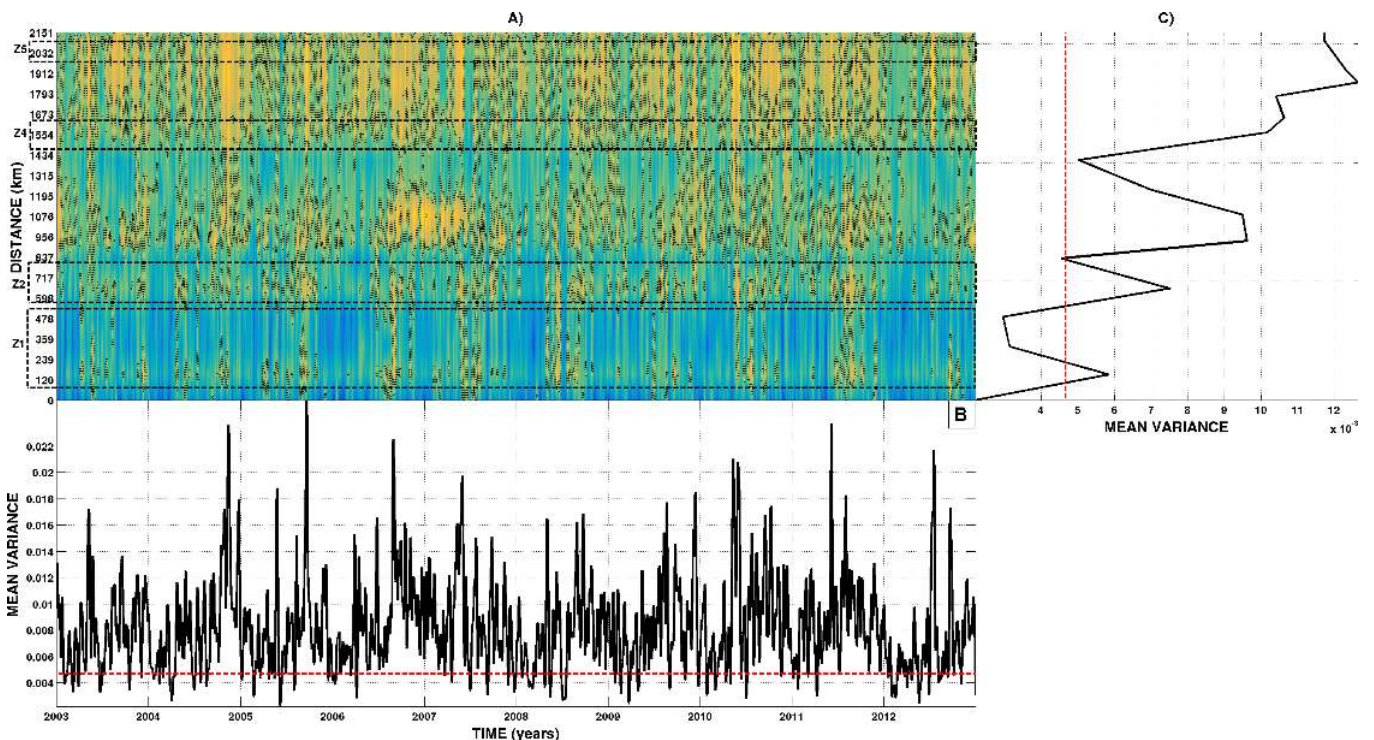


Figure 5.11: (A) Two-dimensional local (2 - 30 days averaged) wavelet power spectrum for the current velocity at the 50 m isobath. (B) Mean variance of the studied period, where values beneath the red tendency dashed line represents 95% of confidence level. (C) Temporal series of the spacial mean variance of each location. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

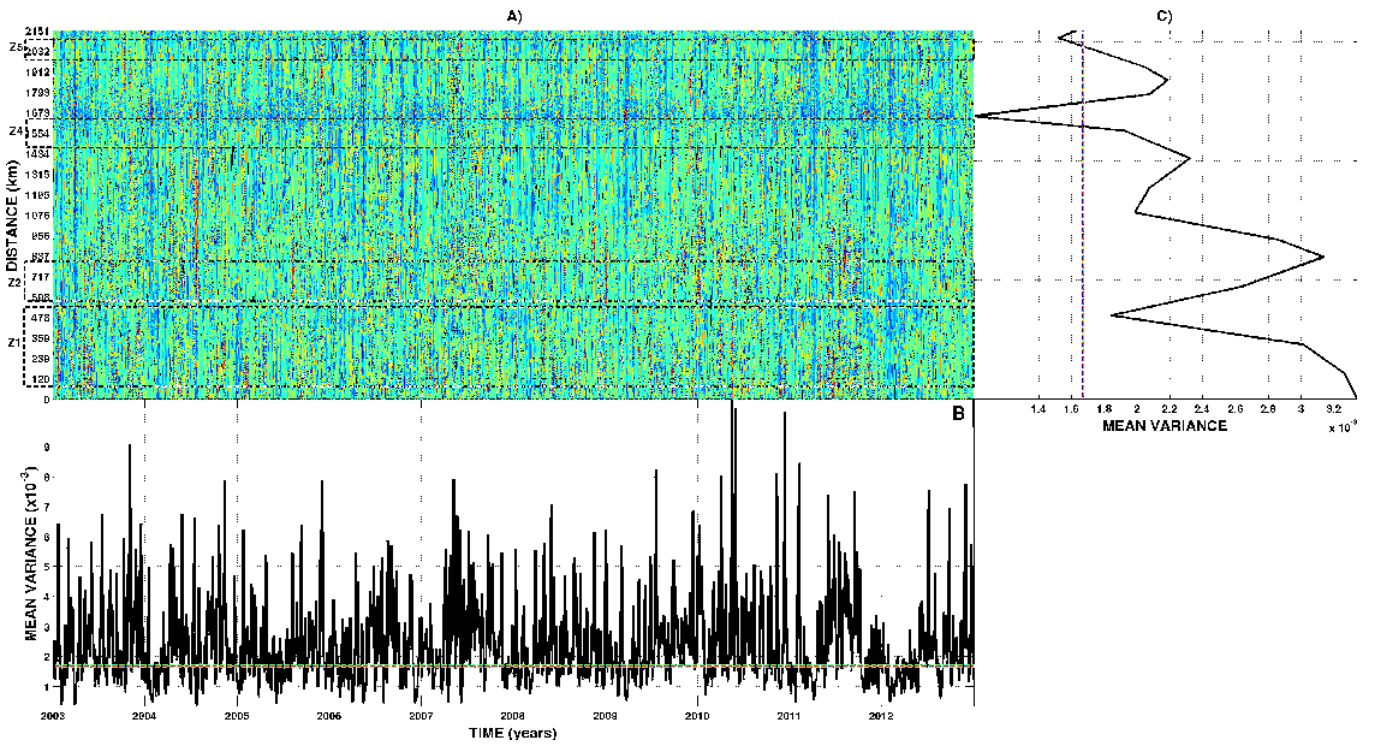


Figure 5.12: (A) Two-dimensional local (2 - 30 days averaged) wavelet power spectrum for the spectral significant wave height at the 50 m isobath. (B) Mean variance of the studied period, where values beneath the red tendency dashed line represents 95% of confidence level. (C) Temporal series of the spacial mean variance of each location. Dashed rectangles represent the zones mentioned in the previous section and dashed red lines. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

exactly the same patterns in all points despite wave height or current velocity being analyzed. Due to these similarities, only the point in Zone 1 for current velocity was selected to represent the analysis.

Time series (figure 5.13a.) for current velocity intensity and wind intensity are presented and the positive correlation (yellow-colored contours) among each other is observed. The highest wind intensity results in high current intensity consequently impacting the local power spectrum of the cross-wavelet analysis (figure 5.13b.) with 95% confidence for cycles occurring from 0 to 16 days.

This pattern is similar to the verified by Toldo et al. (1993); Soares et al. (2007a,b); Marques et al. (2009); Parise et al. (2009); Marques et al. (2010a,b); Costa e Moller (2011); Marques et al. (2012); Marques (2012); Kirinus et al. (2015); Kirinus e Marques (2015b); Andrade et al. (2016) with respect to the occurrence of the processes, indicating the dominance of the wind-driven coastal circulation over the SBS. This regions is strongly influenced by the passage of frontal meteorological systems generating further changes in wind direction and intensity of currents. Also, temporal scales of occurrence shorter than 8 days dominates the period, forced mostly by the cyclic changes of the wind direction.

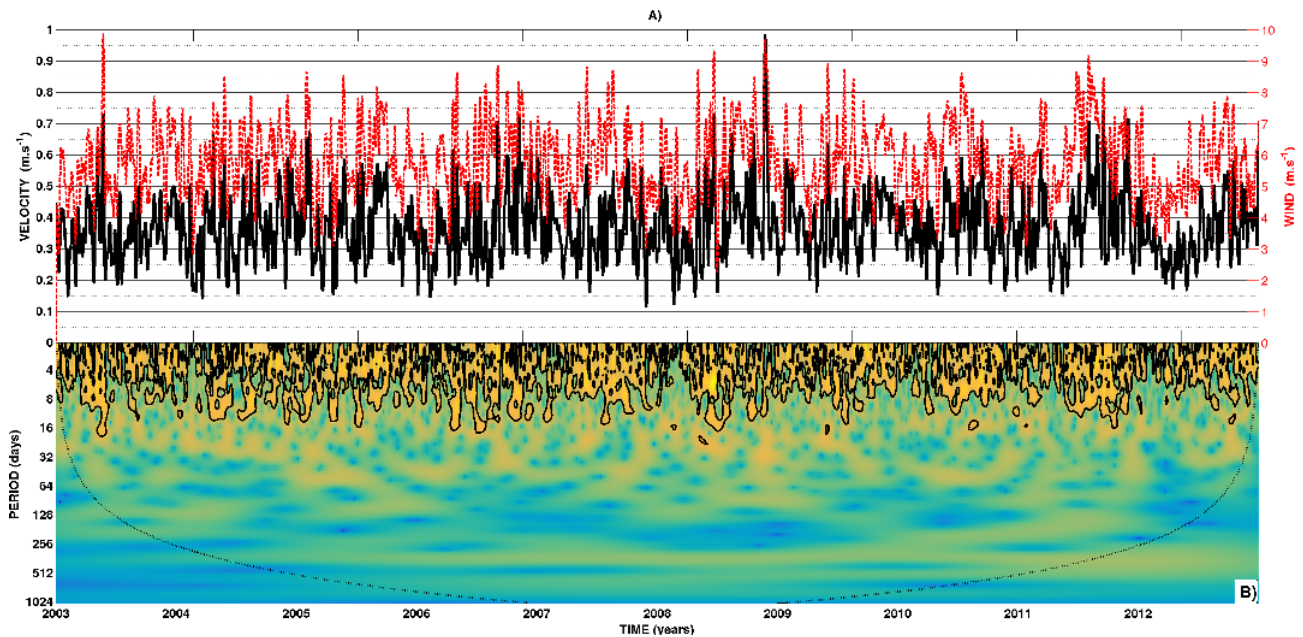


Figure 5.13: *Integrated current velocity ($m.s^{-1}$) and wind velocity ($m.s^{-1}$) at ZI over the point P1 (A), used for the cross-wavelet analysis, as well as, the local (B) wavelet power spectrum of the time series using Morlet wavelet. Thick contour lines enclose regions of greater than 95% confidence for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.90. Cross-hatched regions indicate the cone of influence where edge effects become important. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)*

In the other three points of interest (figure 5.8), despite their differing latitude, de temporal variability behaves the same according to Pereira et al. (2009b); Truccolo (2011) for the Santa Catarina State, Silva et al. (2005); Dottori e Castro (2009a) for São Sebastião Island. In addition, wind-driven currents have been vastly studied in the SBS, corroborating the major cycles of hydrodynamic patterns correlated with winds and also with the passage of meteorological fronts Stech e Lorenzetti (1992); Castro e Lee (1995); Campos et al. (2000b); Castelao e Barth (2006); Castro et al. (2006); Palma e Matano (2009); Matano et al. (2010); Cerda e Castro (2014).

In these points, there are strong meteorological dynamic changes which enhance/decrease the currents and waves. These spots presents high possibility to have its energy harvested due to the smoothness of energy transfer from winds to the ocean surface due to its high correlation.

5.5 Conclusions

Current and wave availability for usage as energy resource has been assessed on the basis of numerical simulations for a period of 10 years (2003 - 2012) with daily resolution in time for the entire SBS and SBB with a finite element numerical model. A new way to perform site assessment is proposed in order to find suitable places aiming for high supply with stable dynamics in long

period. Significant information on the temporal and spatial variability of waves and currents have been analyzed because of the good numerical confidence and high temporal and spatial resolution.

The waves and currents evaluated in this work were cut-off, to increase the efforts in finding viable spots, in a range of values higher than 1.5 m and $0.30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. In addition, a mask containing high frequency appearance of those selected values were performed and used for all upcoming treatments, allowing that dynamic processes approached afterwards related only to those cut-off values. This means that the entire seasonality and wavelet results corroborate regions with high intensity in waves and currents.

These regions were then assessed for their dynamic patterns as for spatial variability in order to narrow down even further interest zones with remarkable low spatial variability being found at several spots along the 50 m isobath. The stability of these spots were determined with scale periods lower than 30 days, proving that the dominant forcing is wind-driven mechanisms. Further temporal analysis concluded this finding indicates that the wind is highly correlated with currents and waves in order to promote their strength dynamics smoothly.

The principal outcomes of the present work can be summarized as follows:

- Long simulations (more than 10 years) are needed for ocean energy conversion assessment, because lower periods could jeopardize any conclusions regarding the topic. The importance of long-term simulations is offer high confidence of results for decision makers enclosing major dynamic cycles of the environment.
- Accordingly to the designer/engineering interest in the project, decisions regarding energy conversion device should be taken upfront. Studies like this one should provide a better knowledge regarding areas of interest and possible changes in the device selection.
- Large monthly and seasonal variability is observed in the south-east coast of Brazil, with different processes controlling waves and currents. The method of availability analysis applied in this work proved to be a reliable way to understand the complexity of the periodic cycles in the whole data.
- The monthly and seasonal variability of the currents are generally influenced by local winds that promote wind-driven circulation. Despite few spots were local water divergence plays a

major role, wind is the main force behind current variability. Spring season is able to provide 0.14~0.24 times more current intensity than Autumn season.

- Waves, on the other hand, have its variability highly correlated with atmospheric, such as fronts and the passage of cyclones, that promote or decrease wave height regionally. This pattern promotes a widely range of temporal dominance towards season and months. September and May represent the most strong months, with 0.21~0.36 times more wave height than February, the weakest month.
- Wavelets proves to be a reliable analysis for energy locational assessment once the spatial wavelet provides a plain information in all the interesting regions (at 50 *m* isobath). The comparison entwine the energy power spectrum in all regions making possible to conclude that harvesting energy from currents are more viable in the SBS, while from the waves the viability is in the SBB.
- Waves and currents present a quite opposite behave regarding stability or constancy in source availability.
 - Thus is determined mostly by the wave generating forcing in the SBB being highly correlated with atmospheric dynamics (SASA) while in the SBS the atmospheric conditions is promoted by the subsequently passage of frontal systems/cold fronts causing a more irregular sea state, not ideal for energy conversion.
 - Not withstanding, the currents in the SBB are highly influenced by the Brazil Current. Although, the widening of the continental shelf in Arraial do Cabo (-23°S) force the BC to stretch, allied with the narrow continental shelf bathymetry southwards result in a highly inertial flow that can easily be modulated by local wind setup inshore. In opposition from this scenario, in the SBS the confluence of currents in association with the almost linear coastline exerts high current stability in the face of local winds.

For future works will aim to investigate how power levels vary with differing wave direction around the coastline, therefore, search for viable spots regarding minor wave conversion devices in enclosed/safe spots in the Brazilian coast, as well as focus on in-spot sea state and wave climate analysis according to (Vanem, 2013; Pelinovsky e Kharif, 2016). For currents, farm assessment regarding

design with Constructal Theory shall be applied to the spots defined in this work.

5.6 Acknowledgements

The authors are grateful to the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) under contract 304227/2016-1 and to the Agência Nacional do Petróleo (ANP) regarding the Programa de Recursos Humanos (PRH-27) for the fellowships. Further acknowledgements go to the Brazilian Navy for providing detailed bathymetric data for the coastal area; the Brazilian National Water Agency, the PNBOIA project, NOAA and HYCOM for supplying the validation and boundary conditions data sets, respectively; and the Open Telemac-Mascaret Consortium for freely distribution of the TELEMAC system making viable this research and finally a special thanks to the Supercomputing Center of the Federal University of Rio Grande do Sul (CESUP-UFRGS) where most of the computational work was carried out. Although some data were taken from governmental databases, this paper is not necessarily representative of the views of the government.

5.7 References

Artigo II:

***First insight into hydrodynamic and
morphodynamic of ocean current energy
conversion sites in South-Southeastern
Brazilian Inner Shelf***

Authores: Kirinus, E. P.; Marques, W. C.

CAPÍTULO 6

First insight into hydrodynamic and morphodynamic of ocean current energy conversion sites in South-Southeastern Brazilian Inner Shelf

Kirinus, E. P.; Marques, W. C.

Abstract: As marine renewable resources starts to represent a feasible exploration potential, the investigation of impacts regarding hydrodynamic and morphodynamic processes becomes crucial. Towards the implementation of turbines in the numerical modeling environment of Telemac-3D and Sisyphe modules, from the open-TELEMAC-MASCARET consortium, a 10 years long run was performed aiming to evaluate near shore impacts of turbine implementation in the flow. The viable spots in the South-Southeastern Brazilian Inner Shelf were defined trough five criteria such as bathymetry, coastal proximity, frequency of high intensity velocity, seasonal and monthly variability. Turbines sites were added to a conversion energy module coupled into the hydrodynamic model in order to develop properly the flow changes towards the energy conversion process. Results reveals that in the three chosen spots, turbines were not equally converting the currents energy, in fact, the ones located on the outer side of the farm developed greater conversion rates. Regarding impacts, decrease of the surface current occurs generating strong adjustments in the water column breaking the natural pattern of vertical circulation developing lateral flows that in time affects the bottom dynamics leading to changes in sediment deposition besides bedload transport rates swift as well. Concerning energy output, the idealized turbines sites produced 900 GWh in 10 years time providing electricity to 27,470 residences.

Keywords: Marine Renewable Energy; Hydrodynamic; Morphodynamic; Bedload; Currents Turbines Farm; Telemac-3D, Sisyphe

6.1 Introduction

As fossil fuels sources tend to depletion while their environmental effects become prominent on ecosystems, the world searches renewable sources of energy. Interest in renewable and green energy around the world is boosting, especially in countries that have very limited natural resources, while concerns about retreat environmental pollution and climate changes are primary to set the new frontiers towards renewable (Copping et al., 2016).

Renewable marine energy technology has undergone tremendous development over the last two decades and has found great commercial success as several companies are developing their prototypes Ng et al. (2013). Marine current energy is an emerging and promising renewable energy resource for electricity production, since it is highly reliable and abundant in many regions making turbines driven by marine currents an attractive form of electricity generation (Finkl e Charlier, 2009; Marques et al., 2012; Kirinus et al., 2013; Akimoto et al., 2013; Yang et al., 2014a; Goundar e Ahmed, 2014b; Kirinus et al., 2015; Kirinus e Marques, 2015b; Shirasawa et al., 2016; Kirinus et al., 2017; Tseng et al., 2017; Lowcher et al., 2017).

Tseng et al. (2017) point out that western boundary currents in major ocean basins features maximum currents speed up to 0.6 m.s^{-1} , such as the Brazil Current (BC). Despite BC being the less intense western boundary current (Bane et al., 2017) while compared against Agulhas Current (Bryden et al., 2005), Gulf Stream (Cape Hatteras and Florida Straits, (Halkin e Rossby, 1985; Leaman et al., 1987)) and Kuroshio (Zhu et al., 2001). VanZwieten et al. (2013) consider all those currents with flow velocity sufficiently fast for commercial installation of electricity-generating turbines.

Although, for a successfully development to generate the quantity of electricity for which it is designed, it is important to identify the availability of marine current energy resources at potential sites. Several authors ((Ponta e Jacovkis, 2008; Li e Calisal, 2010; Bahaj e Myers, 2003; Khan et al., 2009; Myers e Bahaj, 2005; Gorlov, 2010, 2001; Hammons, 1993; Li e Çalisal, 2009; Defne, 2010; Defne et al., 2011a, 2012; Cornett, 2006; EPRI, 2006; Hall, 2006; Hardisty, 2009; Douglas et al., 2008; Fraenkel, 2007; Maticena, 2002), among others) published their work emphasizing in tidal turbines, regarding power outputs, impacts, viability and assessment.

The study area comprises the South-Southeastern Brazilian Shelf (between -21°S to -38°S , figure

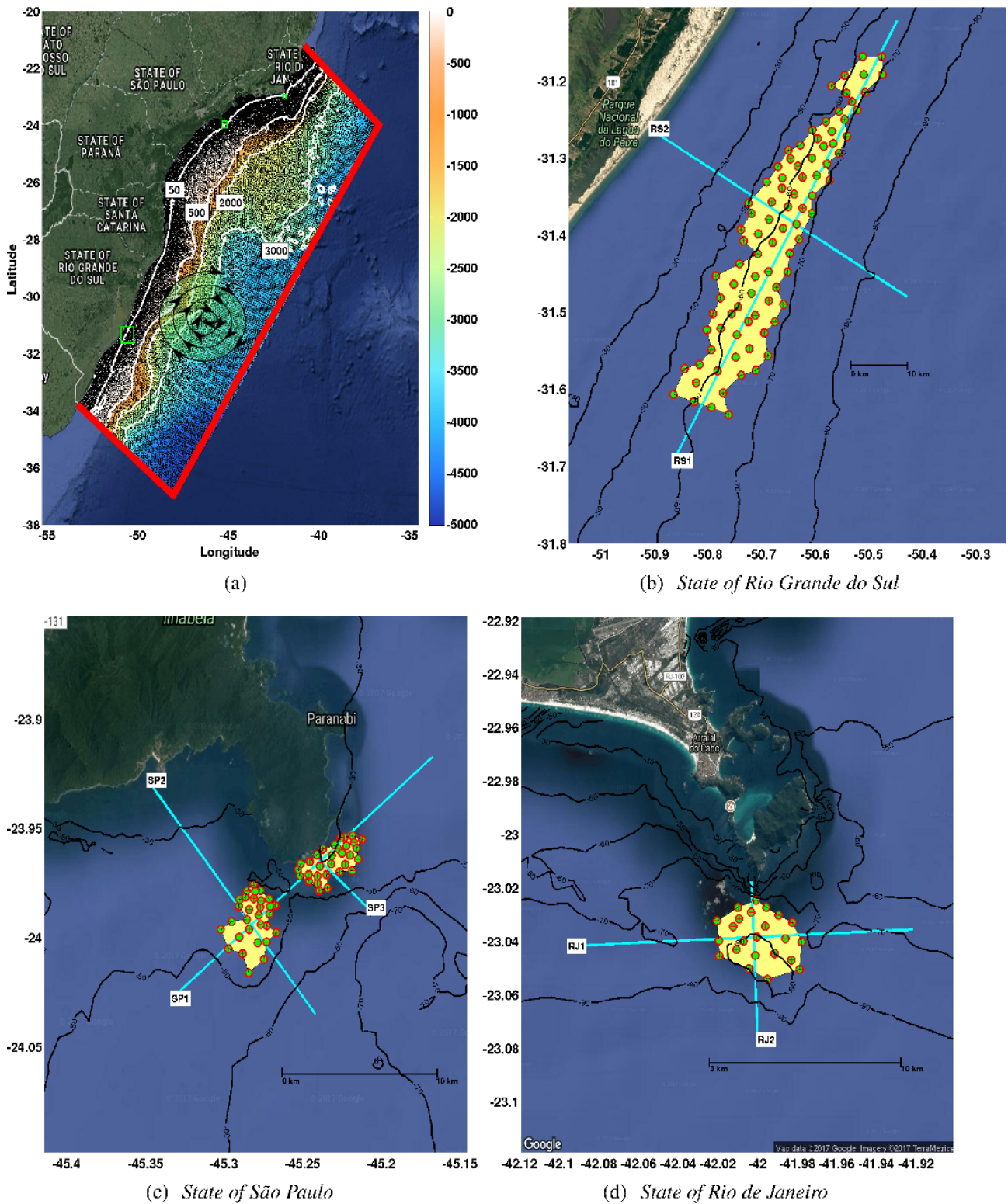


Figure 6.1: (a) Study area located in the South-Southeastern Brazilian Shelf. In addition, the numerical grid used in this work with 205,617 nodes disposed in 20 vertical sigma levels. The red lines represent the oceanic liquid boundaries and the spiral represents the atmospheric surface conditions. Bathymetry is shown in the colorbar and also using the isolines for 50, 500, 2,000 and 3,000 m. The turbines farm are set in three regions marked with green rectangles with 171 turbines, (b) where the southern farm (State of Rio Grande do Sul) have 87 turbines, (c) the center farm (State of São Paulo) have 61 turbines while (d) the northern (State of Rio de Janeiro) have 23. At each region vertical cross sections (cyan lines) were taken for further analysis. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

6.1) which is sub-divided into Southern Brazilian Shelf (SBS) and Southeast Brazil Bight (SBB) due to diverging dynamic pattern behavior. Several authors have extensively described both regions. This entire region is characterized by high seasonality of the wind fields (Piola et al., 1999; Dottori e Castro, 2009a) with the dominance of Northeast (NE) winds, in addition to the constant influence of the BC (Castro, 2014).

The circulation in the continental shelf is dominated by the BC, which flows southward and meanders around the 200 m isobaths (de Souza e Robinson, 2004). While the inner shelf is mainly influenced by the northward flow of the Brazil Coastal Current (BCC) which transports low-salinity waters derived from the SBS (de Souza e Robinson, 2004; Möller et al., 2008).

In this work, an entire environment were numerically simulated in order to predict the power output for the whole water column minimizing the assumptions and the extrapolations regularly used (i.e. integrate one tidal gauge of power production for an whole year period). In this way, the main objective of this paper is to simulate turbines near shore in the SBS and SBB among the influence of the marine currents evaluating hydrodynamic and morphodynamic impacts concerning the presence of them in the flow.

6.2 Methodology

6.2.1 TELEMAC System

This work was developed towards three-dimensional numerical modeling and direct result analysis obtained from the usage of the numerical modeling system open TELEMAC-MASCARET¹, in the version v6p3. This system uses a modular approach with the TELEMAC-3D being hydrodynamic module and SISYPHE the morphodynamic module, besides the energy conversion module developed at the *Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos* (LANSD²).

All equations from the modules TELEMAC-3D and SISYPHE as well as different parametrization can be found in details in Hervouet (2007), and in the following user manuals Pham e Joly (2016) and Tassi e Villaret (2014).

¹www.opentelemac.org

²www.lansd.furg.br

6.2.1.1. TELEMAC-3D

The TELEMAC-3D model solves the Navier-Stokes equations, continuity and hydrostatic pressure (eq. 6.1 to 6.4) by considering local variations in the free surface of the fluid, neglecting specific mass variations in the mass conservation equation, and considering the hydrostatic pressure and Boussinesq approximations to solve the motion equations (Hervouet, 2007).

The model uses unstructured meshes obtained by a super-imposition of 2D meshes of triangles. The movement of the mesh is taken into account in the advection step by a sigma transformation. The superimposed layers may not be evenly spaced allowing accurate representation of the flow field by a refinement near the bed and/or surface, enabling better accuracy of the turbulence models, and leading to a better estimate of the bed shear stress (Villaret et al., 2013).

The model is based on finite element techniques to solve the hydrodynamic equations and relies on the sigma coordinate system for the vertical discretization in order to follow the surface and bottom boundaries (Hervouet e Van Haren, 1996). The model also applies the Multidimensional Upwind Residual Distribution (MURD) for the advection of three-dimensional variables (Hervouet, 2007). The vertical discretization consists of 20 sigma levels distributed equally top to bottom. In order to solve the horizontal and vertical turbulence, the k- ϵ model was applied once the numerical mesh is highly refined supporting such method.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \nu \nabla^2 (U) + F_x \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \nu \nabla^2 (V) + F_y \quad (6.3)$$

$$p = p_{atm} + \rho_o g (Z_s - z) + \rho_o g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta p}{\rho_o} dz + p_d \quad (6.4)$$

where, U , V and W represent the velocity components, t is time, g the gravity acceleration, Z_s is the elevation of the surface, z is a depth in any layer, ν is the kinematic viscosity coefficient, F_x and

F_y are the moment source terms, p is the pressure while p_{atm} is the atmospheric pressure, ρ_0 is the reference specific mass, $\Delta\rho$ represents the specific mass variation, while ∇^2 is the Laplacian operator for Cartesian coordinates.

In the bottom and near bottom layers, TELEMAC-3D applies a shear stress ($\vec{\tau}$) acting against the current velocity (\vec{u}). Allied to the near bottom velocity, the shear stress can be determined according to equation 6.5.

$$v \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = \frac{1}{2} C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (6.5)$$

The tension $v \frac{\partial \vec{u}}{\partial n}$ is obtained through Variational formulation in terms of diffusion in finite elements method. However, any turbulence model is able to provide a formula to estimate this tension based on the knowledge of bottom roughness and nearby bottom velocity. C_f in this case is associated with the Manning formula, $C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}}$, where m is the Manning coefficient and h the water depth.

6.2.1.2. SISYPHE

Sediment transport rates are calculated with classical semi-empirical concepts which involve the decomposition of sediment transport rates into bed-load and suspended load. The resulting bed evolution is then computed by solving the Exner equation (equation 6.6). The model is mainly applicable to non-cohesive sediment, composed of either uniform grains or multi-grains, characterized by their mean size and density. Although the model solves both bed-load and suspended load, in this work only the bed-load transport was considered.

$$(1 - n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \nabla \cdot Q_b = 0, \quad (6.6)$$

where, n is the non-cohesive bed porosity ($n \approx 0.4$), Z_f is the bottom elevation, and Q_b ($m^2 \cdot s^{-1}$) is the solid volume transport rate (bedload) per unit width, computed with the Meyer-Peter and Müller (equation 6.8), where $\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho}$ is the relative specific mass. Φ_s is the non-dimensional sand transport rate and, in general, is expressed as a function of the non-dimensional skin friction or Shields

parameter θ' .

$$\frac{Q_b}{\sqrt{g(\rho_r - 1)d_{50}^3}} = \Phi_s = \frac{\mu\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (6.7)$$

where, μ is a correction factor for skin friction, τ_0 is the bottom shear stress, ρ_s is specific mass of sediment. Bed slopes cause the increase (decrease) of bed-load transport rate in the downslope (upslope) direction. In this work, bed slope effects are accounted using the Koch e Flokstra (Koch e Flokstra, 1981) correction factor multiplied by the intensity of the bottom transport rates, according to equation 6.8. In this equation, φ is the coordinate in the current direction and β is an empirical factor. This effect tends to reduce instabilities in regions with high bathymetric variations.

$$Q_b = Q_{b0} \left(1 - \beta \frac{\partial Z_f}{\partial \varphi} \right), \quad (6.8)$$

6.2.1.3. Energy Conversion Module

The hydrodynamic simulations used in this study were carried out by the TELEMAC-3D model. The investigations involving energy conversion from the currents into electrical power were performed with the energy module (Marques et al., 2012). This module uses the turbine standard equation to calculate the electric power from the incident flow velocity.

A representation of the processes involving the usage of the energy conversion module is presented in figure 6.2. As the flow passes trough the turbine, a reduction in velocity happens between Z1 and Z3 due to momentum loss into energy conversion. The water current immediately afterwards the turbine (between Z3 and Z4) presents lower velocity and must expand to satisfy the momentum conservation.

This action generates a turbulent zone behind the turbine (with cone shape) which also contains turbulent mixture. Another process involving the presence of a turbine, is the increase of velocity in the zones ZDS and ZDI, enhancing, for instance, the erosion in the bottom.

In a far distance from the turbine, turbulence ceases and dissipates entirely turning the current back to its previous undisturbed state prior the turbine (Z1). In addition to the velocity reduction afterwards the turbine, energy extraction also impacts the water level, generating a decrease ($\Delta\eta$)

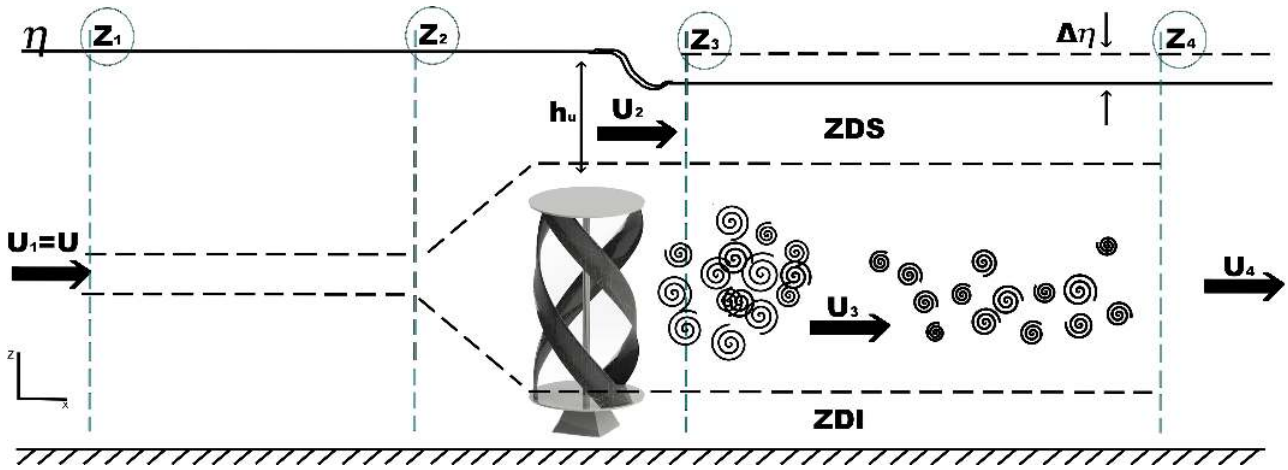


Figure 6.2: Longitudinal representation (axis x - z) of the influence of a turbine. Relation among the velocities are: $U_2 \geq U \geq U_1 \geq U_4 \geq U_3$. ZDI means Inferior Diverging Zone, while, ZDS is the Superior Diverging Zone. Adapted from Kolekar e Banerjee (2015) e Vogel et al. (2016).

between Z1 and Z5 (Fallon et al., 2014).

According to the energy conversion module developed by Marques et al. (2012), the undisturbed flow (Z1) move towards the turbine (Z2 and Z3) applying force on the rotors, in response to the third Newton Law, the turbine applies an equal and opposite force, which means, impulse on the flow. The power associated to this force can be expressed according to the equation 6.9.

$$P = \frac{1}{2} \zeta \rho A v^3 \quad (6.9)$$

where, P is the power converted in *Watts* (W), ζ is the efficiency coefficient, A is the rotor area (m^2), v is the inflow velocity ($m.s^{-1}$) and ρ is the specific mass of the water ($kg.m^{-3}$). The parametrization used in the simulations is presented in table 6.1.

6.2.1.4. Internal Coupling

The internal coupling method was applied, where SISYPHE can be automatically coupled to the hydrodynamic model TELEMAC-3D. In the bottom of the mesh, the last hydrodynamic layer encounter the sediment top layer. Between both layers, there is an interface layer in which energy transfer occurs from bottom currents and generate changes in bedload or sediment suspension processes. These processes result in the bathymetric evolution.

The coupling works at all time steps, where the hydrodynamic variables (velocity field, sea surface height, bottom shear stress) are transferred to the morphodynamic model, which returns the

updated bottom elevation to the hydrodynamic model (figure 6.3). In order to maintain the principle of energy conservation, during each time step of the hydrodynamic model, the current velocity is calculated and transferred to the energy conversion module. The module converts a portion of the energy from the currents into power, updating the current to maintain the energy balance of the TELEMAC-3D model.

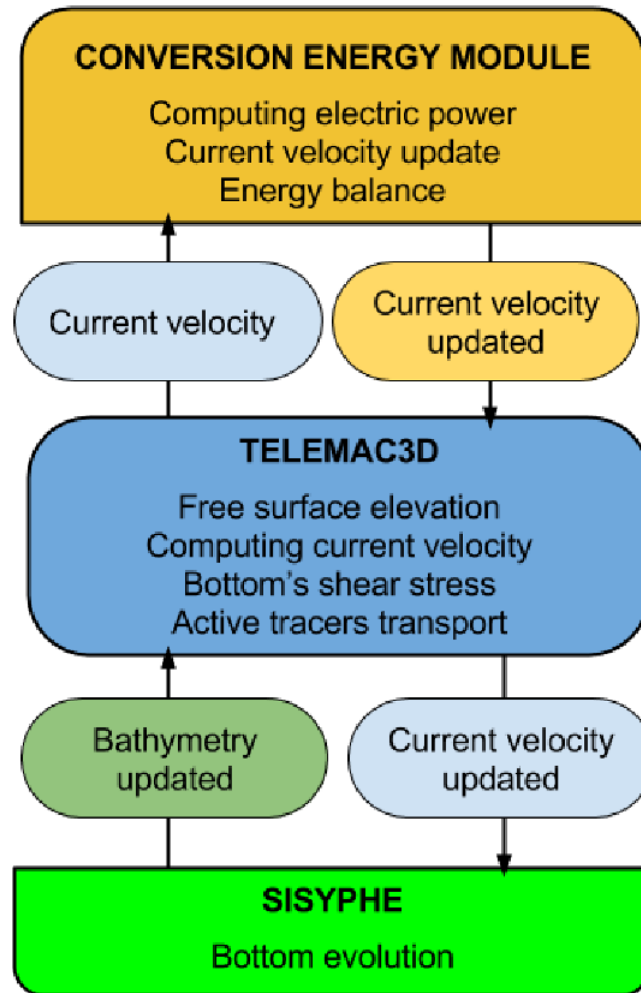


Figure 6.3: Diagram with the interaction of the modules used in this work.

6.2.1.5. Simulation Setup

In order to investigate the potential for energy conversion and the influence of the installation of energy converters in the natural hydrodynamic processes of the study region, two simulations (*A* and *B*) were carried out over 10 years. (*A*) first applying the double coupling (hydrodynamic-morphodynamic) and the other (*B*) using the full coupling counting with the energy conversion module.

Study case *A* was conducted using only the hydrodynamic and morphodynamic processes in order

to detail the area of study as undisturbed, while in the other simulation (*B*), turbines were imposed in the most viable spots according to Kirinus et al. (2017) (in prep.) to evaluate the influence of turbines in the flow and sediments.

6.2.2 Initial and Boundary Conditions

All data used to prepare initial or boundary conditions were obtained from open access global source data, such as HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model³), NCEP/NCAR Reanalysis from NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*⁴), WW3 (WAVEWATCH III⁵) and OTPS (*Oregon State University Tidal Prediction Software*) Global Tidal Solutions⁶.

TELEMAC-3D is the central module of the coupling where the atmospheric superficial conditions were imposed in all the mesh (figure 6.1, black arrows), with NCEP/NCAR Reanalysis from NOAA winds, air temperature and atmospheric pressure. This data were imposed 6 hourly in order to promote better weather influence in the study area.

HYCOM results from NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*) offers great horizontal resolution (0.083° in mid latitudes) and also reliable data since its products are assimilated with observational data (Cummings e Carroll, 2006). Data sets from salinity, temperature and velocity were interpolated in the oceanic boundary conditions (figure 6.1, red lines) during the entire period of simulation.

Furthermore, the tides were imposed directly on TELEMAC-3D (Pham e Lyard, 2012; Pham et al., 2013), with the results from the OTPS Global Tidal Solutions (Egbert e Erofeeva, 2002) developed by the Oregon State University.

In the SISYPHE module none external conditions were applied, only regular parametrization. A homogeneous sediment distribution was imposed in the whole numerical domain with 2 mm in grain size. This approach was adopted due to the lack of sediment data among the large extension of study area.

A full calibration and validation was thoroughly performed for the study area in previous study

³<http://hycom.org/>

⁴<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

⁵<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>

⁶<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

and can be found in Kirinus et al. (2017) (in prep.). This model evaluation resulted in the following parameter table 6.1.

Table 6.1: Parametrization of the models setup.

	Case	A	B
TELEMAC-3D	Simulation Period	2003 a 2012	
	Saving Step	Daily	
	Parallelism	120 cores	
	Time Step	90 s	
	Horizontal/Vertical Turbulence Model	k- ϵ	
	Bottom/Lateral Friction Law	Manning	
	<i>Tidal Flats</i>	On	
	Sigma Levels	20	
	Wind Influence Coefficient	1.10^{-5}	
SISYPHE	Saving Step	Daily	
	Bedload Transport	On	
	Sediment Class	1 - Sand	
	Grain Diameter	2 mm	
	Sediment Density	2650 kg/m^3	
	Bottom Transport Formulae	Meyer-Peter-Müller	
	Bottom Evolution Formulae	Exner	
	Sediment Angle of Friction	40°	
ENERGY MODULE	Energy conversion module	Off	On
	Start-in speed	—	0.2 m.s^{-1}
	Cut-off speed	—	1.5 m.s^{-1}
	Nominal Power	—	242 kW
	Turbine Height	—	20 m
	Turbine Ray	—	10 m
	Efficiency Coefficient (η)	—	0.35

6.3 Defining the Energy Conversion Sites

The positioning of the turbines in order to create a farm of turbines was defined through five criteria: (1) Bathymetry; (2) Coastal proximity; (3) Frequency of high velocity; (4) Seasonal and monthly variability and (5) Distance from each turbine.

1. Bathymetry ranging from 30 to 90 m;
2. The distance from the coast is imperative to reduce cabling costs turning the project feasible;
3. A frequency analysis was performed in order to select zones with current velocity up to 0.30 m.s^{-1} ;

4. Seasonal and monthly variability according to Cornett (2008) index of variability, performed for the study region for Kirinus et al. (2017), where the lower variability the better stability of the selected spot;
5. Respecting the frontal and lateral distance among turbines is important to increase the farm power conversion. These distances varies according to the incident flow, accordingly to Myers e Bahaj (2005), the lateral turbulent effect is able to reach 3 diameters of distance from the turbine, while the frontal turbulence varies from 6 to 10 times the diameter (Giles et al., 2011).

Applying these criteria in the study area, 171 turbines were disposed among three regions and selected as most viable for current energy conversion (figure 6.1). The positioning was chosen regarding the residual average flow of each region in terms of first generation arrays, followed by offset dual-row and second generation of turbines (Myers e Bahaj, 2012). The southern turbines site is placed 20 *km* off the coast of Rio Grande do Sul State (RS), it contains 87 turbines in a 440 *km*² area, mainly disposed among the 50 and 70 *m* isobath. The average distance from each turbines is 1.5 *km* lateral with 3.0 *km* frontal distance.

The center farm have 61 turbines in an area of 13.78 *km*², with mean lateral and frontal distance near 0.5 *km*, enclosed with the 40 and 50 *m* isobath, 500 *m* apart from the São Sebastião Island in São Paulo State (SP). In addition, the northern site farm situated 1 *km* towards the south shore of Arraial do Cabo city in Rio de Janeiro State (RJ) was defined with 23 turbines between de 70 and 90 *m* isobath, comprehending a total area of 10 *km*² with the turbines spaced laterally with 600 *m* and 800 *m* frontally.

6.4 Results and Discussions

6.4.1 Turbine farm performance

Considering the selected points, an estimation of power can be performed during 10 years simulation period. Analyzing the mean power converted for each turbine along the entire simulation (figure 6.4), it is clear that despite each site belongs to different location, a pattern in the energy converted from the currents is observed.

The most energetic turbines are the ones positioned among the boundary of the sites, which receive directly influence of the main stream flow from the currents, while the inner turbines receive a depleted velocity due to loss for energy conversion in the outer turbines.

Regarding the RS site (figure 6.4a.), only few boundary turbines achieve high mean energy conversion of 2 kW.day^{-1} , with the southwestern inner turbines ($31.5^{\circ}\text{S} \sim 31.6^{\circ}\text{S}$) reaching values up to 1 kW.day^{-1} . The SP turbines site (figure 6.4b.) presents a varying pattern in energy conversion, while the southern deliver more power, the northern site shows poor mean performance, the same low average power output is observed in the RJ turbine farm (figure 6.4c.). In all turbine sites (figure 6.4), the average current direction is southward, due to overall dominance of Northerly winds associated with the presence of the Brazil Current (BC).

Evaluating the turbines as a bundle of offers the possibility to comprehend better the energy conversion of each site. As show in table (6.2), values for mean, standard deviation, maximum and integrated power are presented. The RS site delivers high mean power daily ($45.30 \text{ kW.day}^{-1}$) in compari-

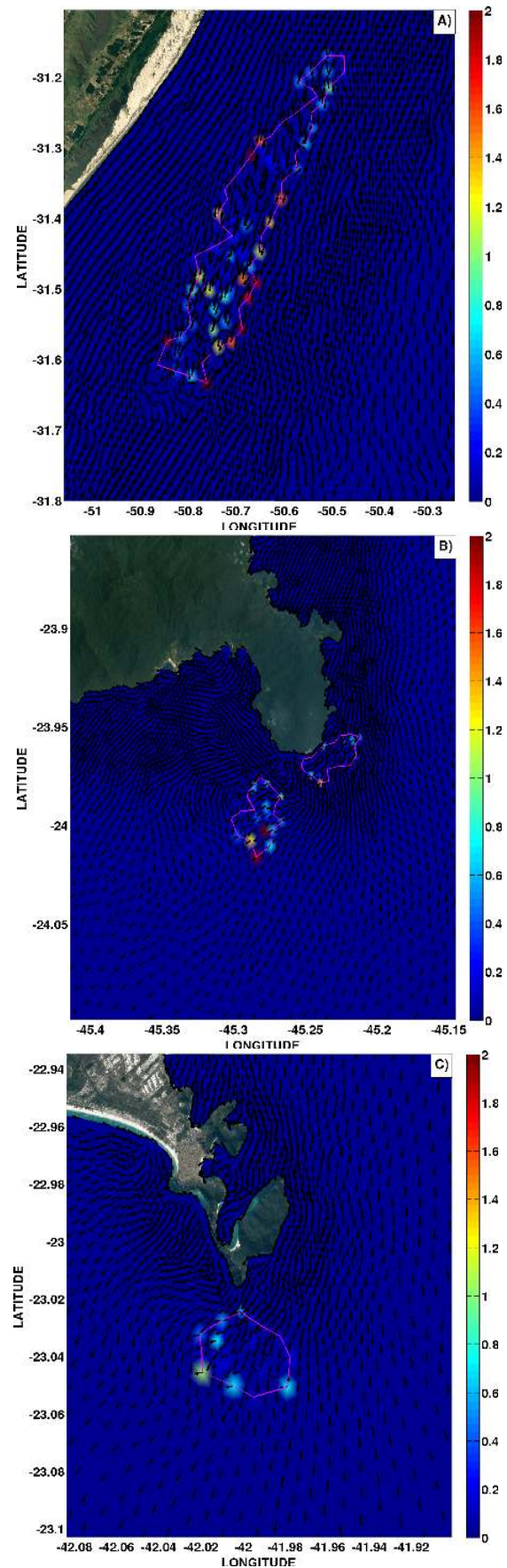


Figure 6.4: Mean power (kW.day^{-1}) of turbines at each site, (A) RS, (B) SP and (C) RJ. Magenta lines represents the boundary contour of the turbine farm.

Table 6.2: Sites power analysis. Mean, standard deviation (*Std*), maximum (*Max*) and integrated (*Int*) power were compared against each site.

	RS	SP	RJ	
POWER	Mean (kW.day ⁻¹)	45.30	22.94	6.75
	Std (kW.day ⁻¹)	61.37	29.89	13.57
	Max (kW.day ⁻¹)	538.71	237.47	258.09
	Int (MW)	16.55	8.38	2.47

son to the other sites where SP and RJ output

are 49% and 85% lower than RS. The standard deviation (*Std*) associated with the maximum (*Max*) values registered give a different view of the sites, since the *Std* shows huge range of variation meaning that despite the low average, in time, the sites can present periods of higher energy conversion.

In addition, the *Max* values of SP and RJ sites are close attached (table 6.2), with RS site producing almost 539 kW.day⁻¹ in contrast with SP and RJ, 237 and 258 kW.day⁻¹ respectively. These low difference in maximum power output might infer that the sites design may not be the best ones for each region, since SP site have 61 turbines while RJ have 23 and the difference maximum power produced among them is only 8.68%.

However, these minor range variation in maximum values exist in fact due to the BC velocity mildly changing towards latitude. According to da Silveira et al. (2000), where at 29~31°S (RS), the maximum BC velocity varies from 0.70~0.80 m.s⁻¹, while in ~24°S (SP), the maximum velocity fluctuates around 0.25~0.75 m.s⁻¹, and finally at RJ site (~23°S), the maximum varies from 0.50~0.70 m.s⁻¹.

Concerning the cumulative power during the 10 years period produced by each site, the RS site reached 16.55 MW over 10 years (table 6.2), while the SP site achieved 8.38 MW and RJ delivered 2.47 MW of integrated power. The relation among the sites can be observed in the temporal series of integrated power (figure 6.5), as the RS and SP sites behave almost with the same conversion tendency, in opposition to the RJ site delivering low mean values during the entire simulation.

Even tough, in terms of energy production this turbines setup delivers equivalent energy to 1451 GWh for the RS site, while for SP and RJ the output is 735 and 246 GWh, respectively. According to the Brazilian energy balance report (EPE, 2017), the average energetic residential consumption is around 273 kWh.month⁻¹, meaning that in total 74,000 residences could be maintained with this

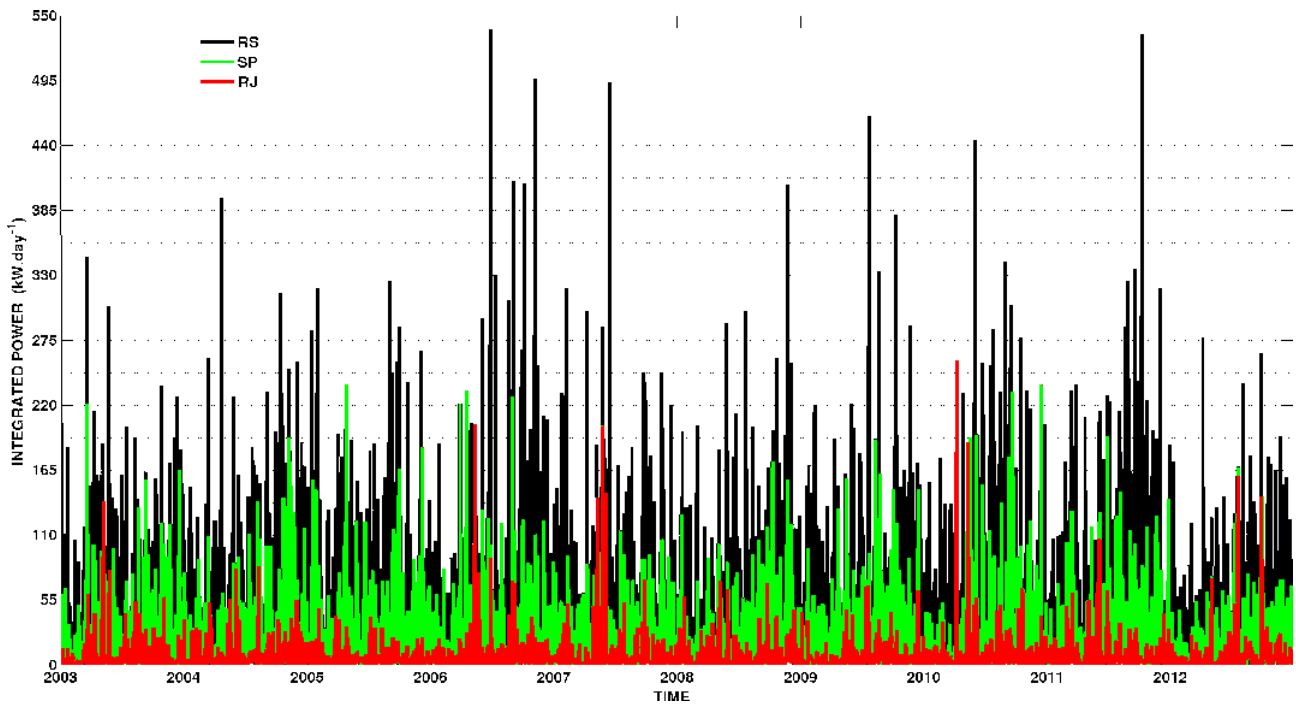


Figure 6.5: Time series of integrated power ($\text{kW}\cdot\text{day}^{-1}$) considering the entire sites. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

energy over ten years. In these calculations, no losses were taken into account.

Not all extracted power will be converted into electrical output from the turbine, however, Hagerman et al. (2006) (apud. Bane et al. (2017)) estimated losses percentages such as, mechanical losses in the drive train that connects the rotor blades to the generator ($\sim 5\%$), electrical and mechanical losses in the generator ($\sim 10\%$) and losses within the power conditioning equipment that connects the generator to the cabling reaching to the onshore power grid ($\sim 10\%$), also Ortega-Achury et al. (2010) estimated addition loss for transmission of 2% .

Thus in total will account for a delivered electrical power loss of approximately 27% of the output turbine power (Bane et al., 2017). Accordingly, the total available energy production can be assumed around 1840 GWh during the entire period, which relates to 56,166 residences receiving this electricity during 10 years time.

Temporal variability analysis was carried out in the RS, SP and RJ sites in order to unravel the power spectra of the dynamic patterns involved in these areas. The wavelet analysis is useful to demonstrate the occurrence of most important events of energy conversion regarding time scales through local and global power spectrum (Torrence e Compo, 1998; Morettin, 2004; Liu et al., 2007).

The integrated wavelet analysis was performed in the three selected selected accordingly. The

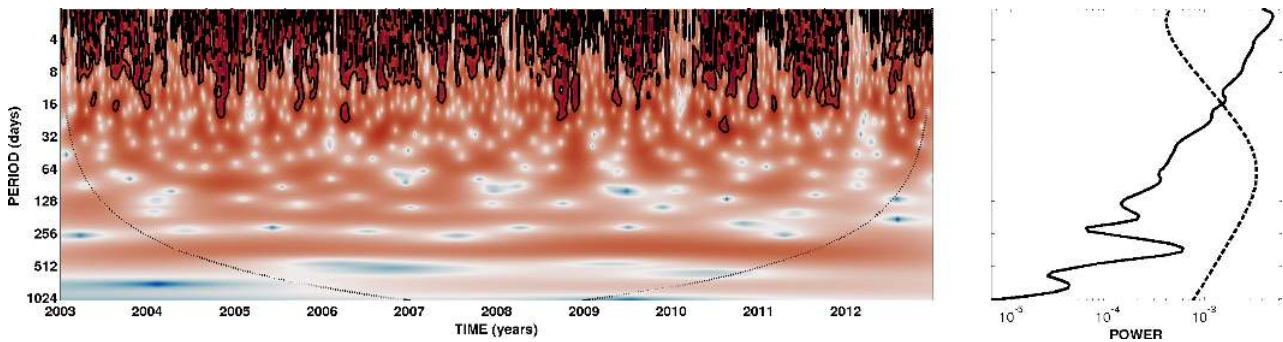


Figure 6.6: (Left panel) Local wavelet power spectrum for the time series of power converted at SP site using Morlet wavelet. Thick contour lines enclose regions of greater than 95% confidence for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.90. Cross-hatched regions indicate the cone of influence where edge effects become important. (Right Panel) Global wavelet power spectrum where values above tendency dashed line represents 95% of confidence. (For interpretation of color in this figure, the reader is referred to the web version of the article.)

local and global wavelet power for integrated power converted resulted in similar patterns. In this way, only the time series of SP site was selected to represent the analysis. The highest power conversion resulted by the high current intensity consequently impacting the local power spectrum of the wavelet analysis (figure 6.6) with 95% confidence for cycles occurring from 0 to 16 days. Also, temporal scales of occurrence shorter than 8 days dominates the period, forced mostly by the cyclic changes of the wind direction.

This pattern of time variability is similar to the verified by Toldo et al. (1993); Soares et al. (2007a,b); Marques et al. (2009); Parise et al. (2009); Marques et al. (2010a,b); Costa e Moller (2011); Marques et al. (2012); Marques (2012); Kirinus et al. (2015); Kirinus e Marques (2015b); Andrade et al. (2016) for the the wind-driven coastal circulation over the SBS. This regions is strongly influenced by the passage of frontal meteorological systems generating further changes in wind direction and intensity of currents. On the other hand, despite the differing latitude, de temporal variability behaves the same according to Pereira et al. (2009b); Truccolo (2011) for the Santa Catarina State, and according to Silva et al. (2005); Dottori e Castro (2009a) for São Sebastião Island.

Additionally, wind-driven coastal currents have been vastly studied in the SBS, corroborating the major cycles of hydrodynamic patterns correlated with winds and also with the passage of meteorological fronts Stech e Lorenzetti (1992); Castro e Lee (1995); Campos et al. (2000b); Castelao e Barth (2006); Castro et al. (2006); Palma e Matano (2009); Matano et al. (2010); Cerda e Castro (2014).

In order to determine if either sites are appropriate for further developments, physical and morphody-

namical environmental assessments should be performed as pointed out by several concerned authors (Swisher et al., 1997; EMEC, 2005; Finkl e Charlier, 2009; Dolman e Simmonds, 2010; Shields et al., 2011; Vennell, 2011a; Marques et al., 2012; Fallon et al., 2014) about the indiscriminate propositions of renewable energy exploitation.

6.4.2 Environmental Impacts

The positioning of a marine renewable energy technology, such as a current turbine, will change the circulation of the undisturbed flow. Once the kinetic energy is removed to generate electricity, circulation, sediment transport and mixing processes will be altered accordingly to the specific location and the amount of energy removed, these changes can affect drastically the marine environment (Copping et al., 2016).

To investigate the naturally occurring sediment transport regime inside the proposed sites a coupled hydrodynamic and morphodynamic model was set up with and without the turbines (case A and B, table 6.1). The complex patterns of sediment evolution are treated in both cases as only driven by currents and tides, disregarding wave effects. In these cases the environmental impacts are going to be addressed towards morphodynamic changes before and after turbine implementation.

The RS region (figures 6.7) presents a regular seawards increasing mean surface intensity with average values around $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the turbines area (magenta boundary line). The mean current direction is predominantly southward (figure 6.7a.). This velocity arrangement produces a deposition pattern towards the coast as show by the bedload integrated transport (figure 6.7b. isolines), which increases near-shore to values greater than $5 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, being this sediment transported by the strong mean bed shear stress (closer to $0.6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$) in the turbines area caused by the intense current velocity. Sediment transport is also corroborated by the bed evolution (figure 6.7c.) associated with the mean direction of the bottom flow which promotes the residual transport towards the coast. In this site, the erosion and deposition range from -0.01 to 0.01 m .

As the turbines are added, the surface velocity is depleted (figure 6.7d.), although inside the site a several gyre-like structures appears. Thus can be correlated with the residual flow patterns from the upstream conversion displaying wake zones. In the near-field of the site ($31.6^\circ\text{S}\sim 31.7^\circ\text{S}$), a shadowing effect is observed with almost 10 km^2 as consequence of the turbines presence. In addition,

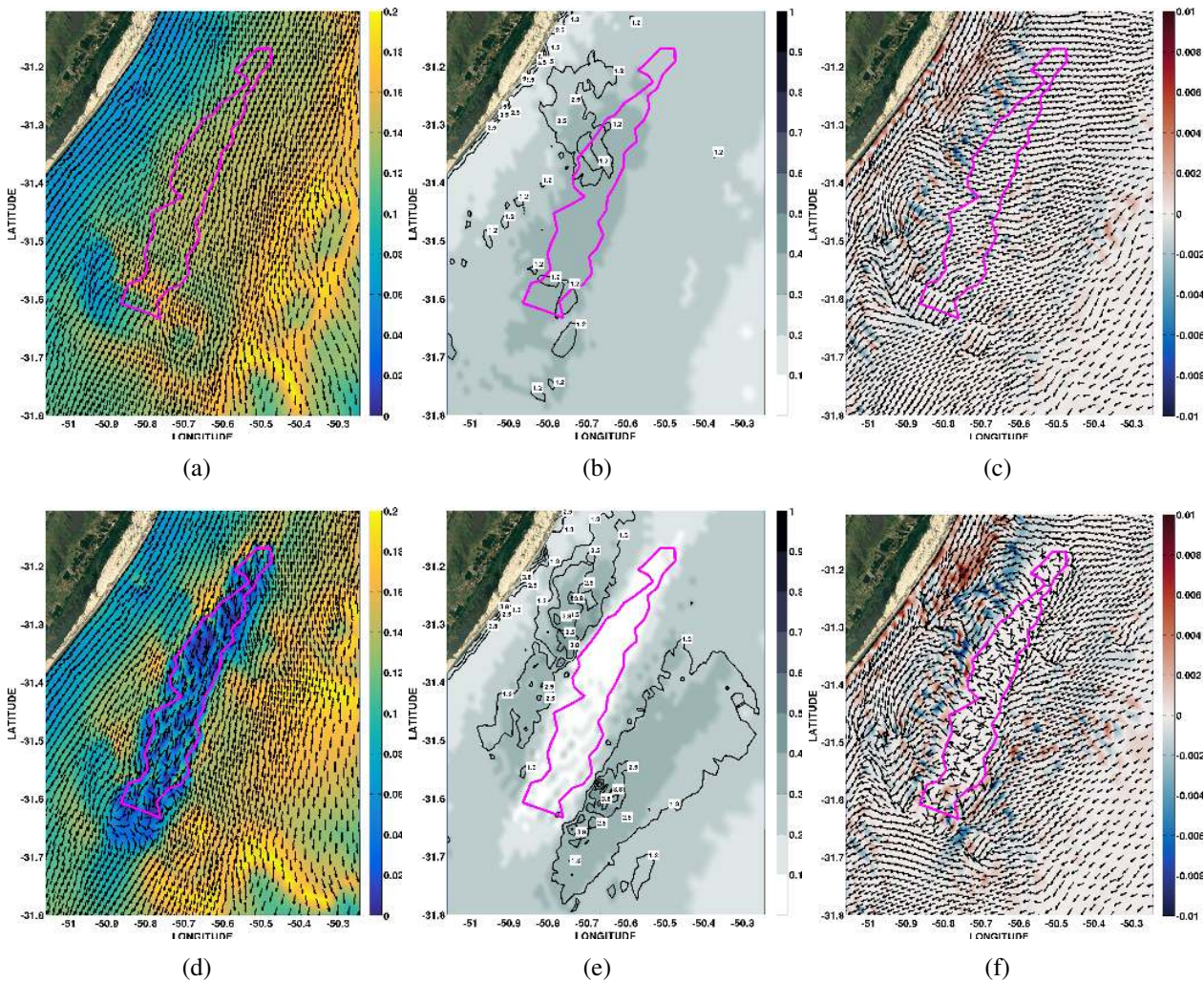


Figure 6.7: Rio Grande do Sul turbines site. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel), as the sites are represented by the magenta boundary line. (A and D) Mean superficial velocity ($m.s^{-1}$) with mean direction in vectors; (B and E) Bed shear stress ($N.m^{-2}$) and integrated bedload transport ($cm^2.s^{-1}$) in black isolines; (C and F) Evolution of the bottom (m) with mean bottom current direction in vectors.

as current core diverges from the turbine conversion its perceivable the grow in surface velocity in the west flank of the site.

The morphodynamic changes are noteworthy as the bed shear stress is reduced to almost zero in the entire site, while in the west and east of the site an increase in the parameter is noticeable with values changing from 0.2 to 0.5 $N.m^{-2}$ (figure 6.7e.). These switch in the velocity allied with the bed shear stress, impacts the bedload transport creating two zones of deposition across the borders of the site. Notwithstanding, the sediment flow towards the coast is drastically increased. The evolution (figure 6.7f.) of the bottom is intensified guided by the water column velocity depletion in association with the sediment transport changes. In this sense, the erosion increased at the east side of the site,

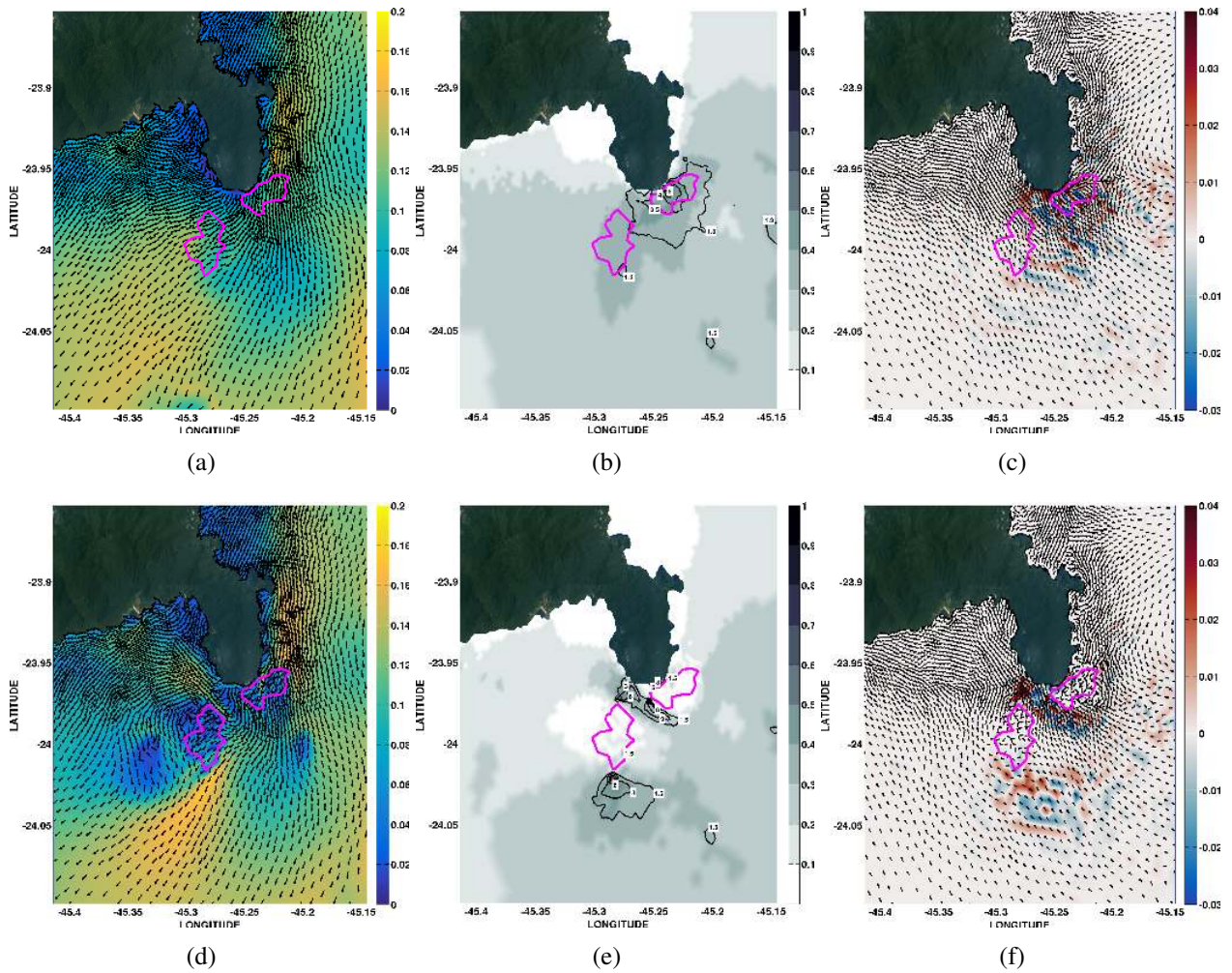


Figure 6.8: São Paulo turbines site. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel), as the sites are represented by the magenta boundary line. (A and D) Mean superficial velocity ($m.s^{-1}$) with mean direction in vectors; (B and E) Bed shear stress ($N.m^{-2}$) and integrated bedload transport ($cm^2.s^{-1}$) in black isolines; (C and F) Evolution of the bottom (m) with mean bottom current direction in vectors.

while deposition increase near shore.

For the SP site, the undisturbed simulation (figures 6.8 upper panel) presents a strong coastal current (up to $0.16 m.s^{-1}$) closed attached to the São Sebastião island shoreline which regulates the current direction around it. Similarly, the bed shear stress follows the surface current pattern with low values inside island protected areas. In the tip of the headland, values up to $0.5 N.m^{-2}$ are displayed in the same spot as high bedload transport of $5 cm^2.s^{-1}$ occurs, due to the high dynamic associated with this spot. The bottom evolution (figure 6.8c.) associated with this crest is also highly active with consecutive lines of erosion and deposition ranging from -0.04 to $0.04 m$.

Turbines inclusion in these minor regions (two magenta polygons) caused drastically changes

in the mean surface hydrodynamics, not only regarding intensity but also in direction (figure 6.8d.). Within the turbines sites a intensity depletion is seen due to loss for conversion, although, other spots of decreased intensity are observed nearby the sites. In addition, a fast jet-like structure (0.15 m.s^{-1}) is developed among the two minor sites directing the flow northwest towards the island, likewise, another intensified flow is observed southeast-side ($24^{\circ}\sim 24.05^{\circ}\text{S}$) of the southern turbine site with velocities around 0.18 m.s^{-1} .

The morphodynamical changes from the inclusion of turbines are considerable. The bedload transport rates (figure 6.8e., isolines) raised at the tip of the headland to $6 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$, while in between and also southwards of the sites, a large amount of transport is seen to happen. Bed shear stress changes were developed due to the velocity changes as high values of bed shear stress (0.6 N.m^{-2}) are now presented beneath those jet-like flows, while quasi-null values appears inside the turbines sites. The evolution of the bottom (figure 6.8f) is also impacted with the development of two major zones of sediment accretion and loss, one between the sites and other further apart with a concave shape shifting from erosion to deposition.

The RJ site (figures 6.9) is marked by strong surface mean velocity (0.20 m.s^{-1}) with predominantly southward direction only weaker at the inner bays and at the southwest side of Arraial do Cabo peninsula. The morphodynamic arrangement follows the intensity of the flow with high bed shear stress (0.4 N.m^{-2}) across and after the site zone, and low values in the bays, with predictions of bedload flow spreading towards the beaches (figures 6.9b.). However, high load of sediments are transported in the near-field turbines site due to high surrounding velocities. Subsequently, the bottom evolution follows the pattern of bedload isolines with erosion and deposition ranging from -0.02 to 0.02 m .

Approaching the turbines scenario (figures 6.9, lower panel) it becomes clear the disturbance promoted by the turbines in the mean surface velocity (figures 6.9d.) producing a wake street downstream and also a bifurcation in the current core direction leading to divergence of flow with intensified jets west and east of the site. The bottom behavior changes as well, with a major decrease of bed shear stress closer to the southern Arraial do Cabo coastline and also eastward from the site, with 0.4 N.m^{-2} southwards. This decrease promoted an accumulation of bedload in the south ($1 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$) and north ($3 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$) of the site near the coastline. The bottom evolution guided by the hydrodynamic changes corroborated the bedload transport with most of erosion and deposition situated nearshore.

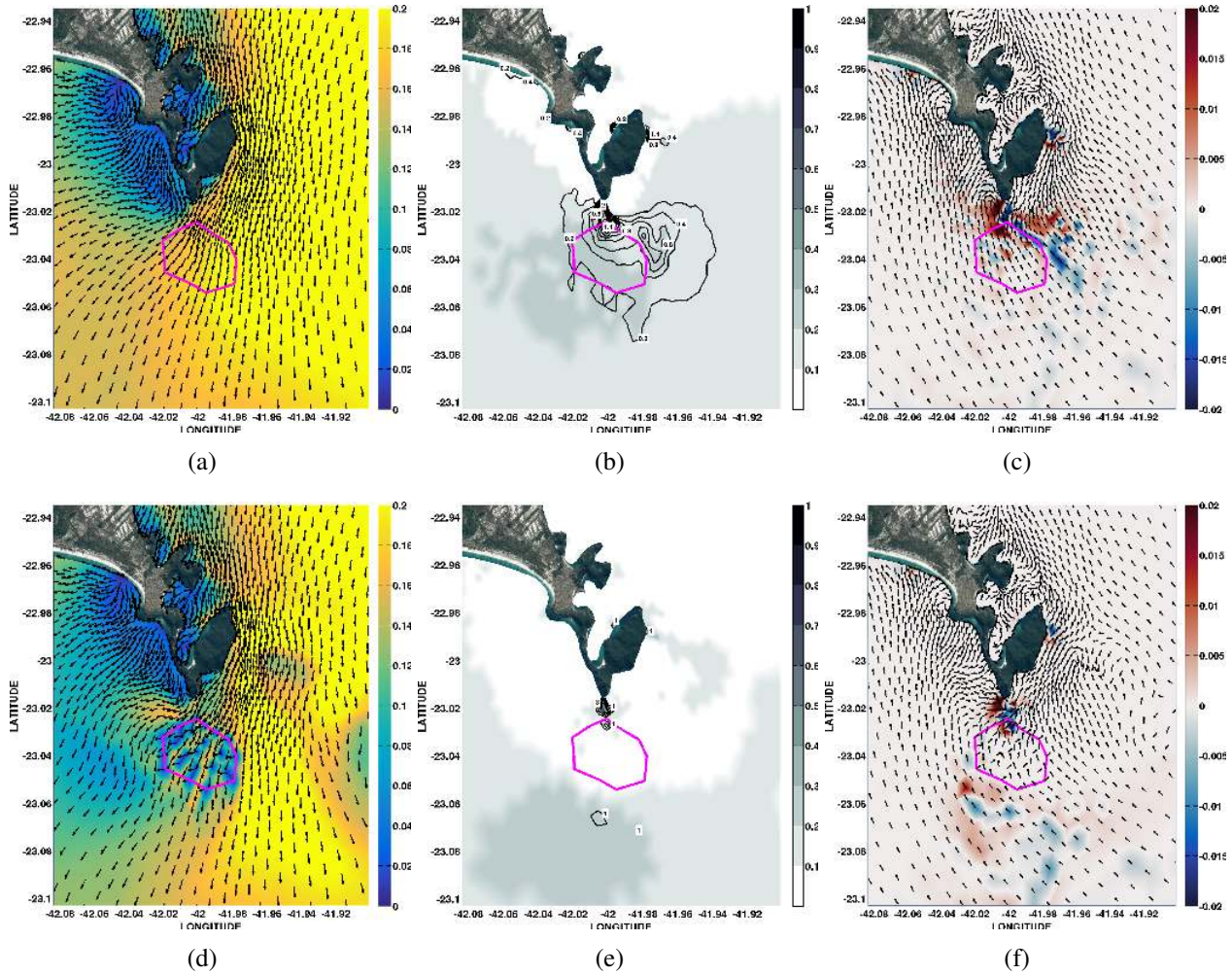


Figure 6.9: Rio de Janeiro turbines site. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel), as the sites are represented by the magenta boundary line. (A and D) Mean superficial velocity ($m.s^{-1}$) with mean direction in vectors; (B and E) Bed shear stress ($N.m^{-2}$) and integrated bedload transport ($cm^2.s^{-1}$) in black isolines; (C and F) Evolution of the bottom (m) with mean bottom current direction in vectors.

These comparisons demonstrate that the sediment transport patterns simulated in this study are in reasonable agreement with the hydrodynamic predictions performed by the model. In all cases the bedload transport is well correlated with the surface currents relying on the surface momentum transfer. Sediment transport tends to increase generally northeast or southeast of the selected zones due to depletion of velocity due to energy conversion. Thus influences the whole water column, consequently affecting the bottom sedimentary layer.

Several spatial patterns of net transport direction can be recognized with the turbines presence. Firstly, the net sediment transport is dominantly coastwards (in RS, figure 6.7), retained in the middle of the sites or offshore (at SP, figure 6.8), or at last, retained at coast with mild transport offshore (at RJ, figure 6.9). Secondly, the losses of velocity for energy conversion affects drastically the bed

shear stress, which changes entirely the bottom dynamics, generating a well-developed new pattern of transport unseen on the undisturbed simulation (case A, 6.1).

In this scenario the combined effects of astronomical and meteorological forces were considered, with wind induced currents being extremely significant in shallow waters, therefore influencing the bottom morphodynamic evolution. Regarding the results for bottom evolution, with the increase/decrease of currents velocity, as a turbine consequence, higher erosion/deposition regions are observed.

The influences toward the water columns are focused on a transect approach (figure 6.1 b., c. and d.) where vertical sections were taken from the sites along shore and cross shore. Upcoming figures (6.10, 6.11 and 6.12) comprises colored surfaces representing the intensity and the vectors indicating the direction of the current velocity

Analyzing the RS vertical cross sections considering the case without the turbines (figures 6.10 a. and b.). In the along shore transect (RS1), the entire water column current direction is southwards, with high velocities (0.30 m.s^{-1}) in the surface decaying in intensity towards the bottom. The cross section (RS2, figure 6.10b.), shows a typical behavior of a western shoreline in the south hemisphere under continued period of influence by northern winds, the vertical circulation pattern results in an upwelling condition with a surface transport offshore.

The vertical hydrodynamic effects of adding turbines breaks down the normal current direction and intensity developing, along shore (RS1, figure 6.10c.), strong vertical gradients which will later on influence the bed shear stress as the velocity is depleted afterwards energy conversion. Regarding the cross shore vertical section (RS2, figure 6.10d.), the regular transport balance is interrupted with the turbines presence compromising the vertical circulation. This leads to bottom current intensification towards the coast which in time increases bedload transportation.

Due to SP site being separated into two turbines farm, three transects were analyzed. Firstly, for the non-disturbed simulation shows a dominant southward current allied with high intensity in the surface layer (0.2 m.s^{-1} , SP1 at figure 6.11 a.). In addition, an interestingly feature is observed at the middle of the cross section. A crest slope at 12,569 m (with 30m depth, due to shoreline steeping bathymetry) followed by a wide 2 km gap (with 50m depth) creates strong vertical circulation, within this gap, fast bottom current intensity flows towards the São Sebastião island developing high bedload and bed elevation rates (figure 6.8).

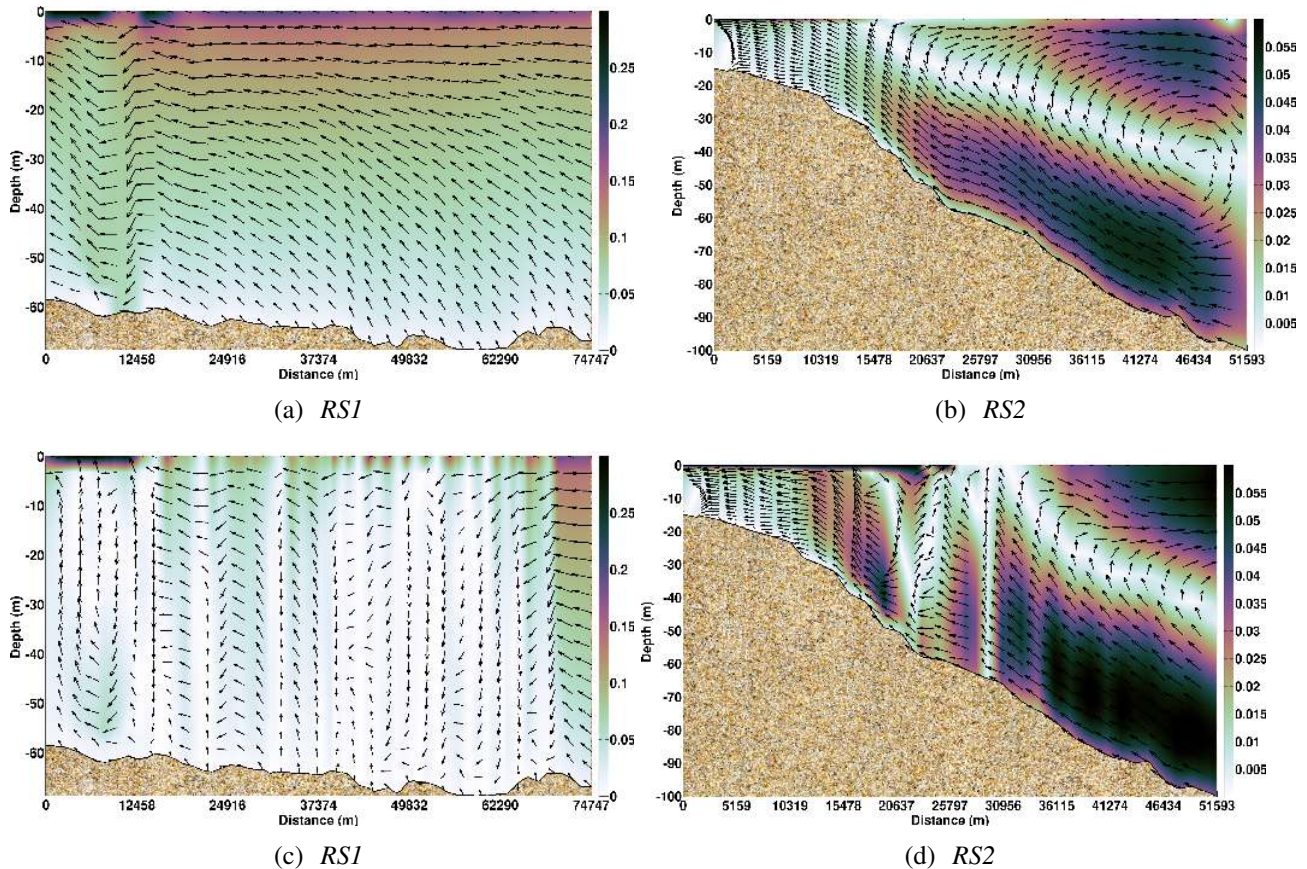


Figure 6.10: Vertical cross sections for the Rio Grande do Sul turbines site; colored surface shows mean transversal velocity ($m.s^{-1}$) while vectors show direction of resultant between vertical and transversal velocities. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel). (A and C) Refers to RSI transect; (B and D) Refers to RS2 transect. See figure 6.1 b. for better locating the transects

Furthermore, the vertical cross section SP2 (figure 6.11b.) shows dynamic bottom circulation, due to above mentioned topography, with velocity around $0.12 m.s^{-1}$ with main direction headed for the island shore. In addition, the northern site cross section SP3 (figure 6.11c.), presents a regular wind dominated upwelling pattern with residual surface currents offshore, while the bottom currents flows against the coastline.

The hydrodynamic aspect of the flow changes widely with the turbines presence (figures 6.11, lower panel). The south directed current (figures 6.11d.) is abruptly interrupted by the turbines velocity sink from conversion developing vertical low velocity structures. Thus, promotes unbalanced flows trough the bottom gap leading to increase bottom velocity which, in time intensify the sediment transport in this channel (as seen in figures 6.8e. and f.).

For SP2 transect, the high lateral velocity observed priorly is absent due to the turbines presence, consequently reducing the flow input towards the coast. As for the SP3 transect (figure 6.11f.), the flow is partially divided for the turbines developing a discontinuity in the water column residual flow

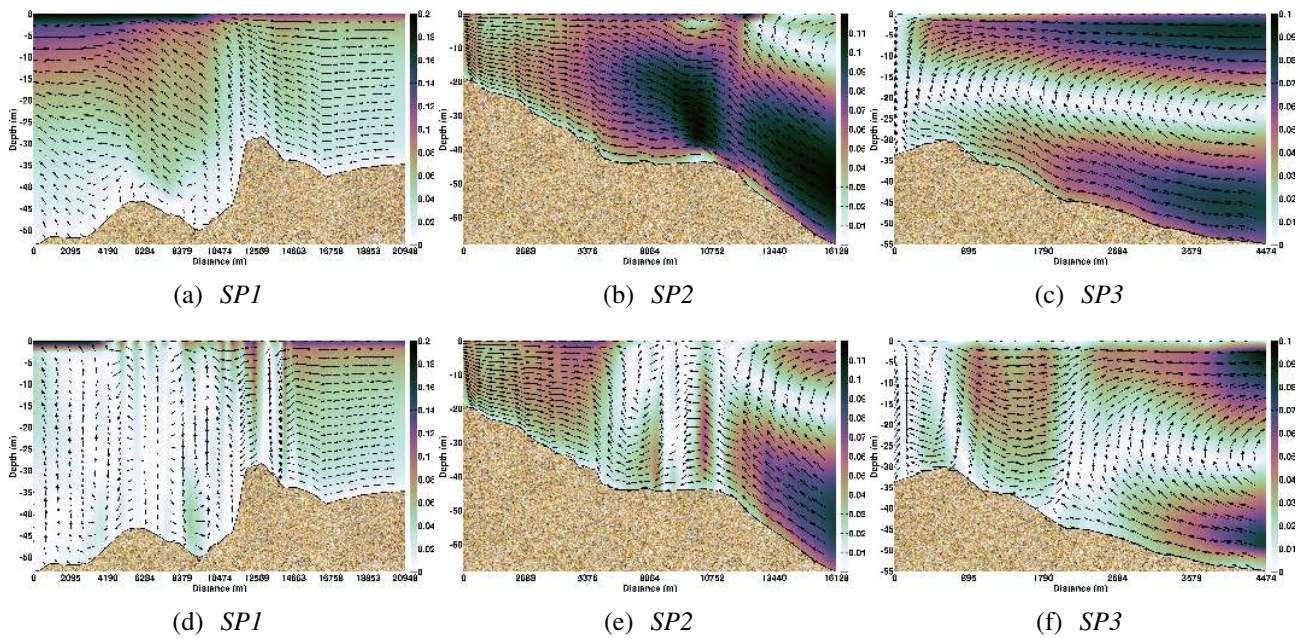


Figure 6.11: Vertical cross sections for the São Paulo turbines site; colored surface shows mean transversal velocity ($m.s^{-1}$) while vectors show direction of resultant between vertical and transversal velocities. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel). (A and D) Refers to SP1 transect; (B and E) Refers to SP2 transect; (C and F) Refers to SP3 transect. See figure 6.1 c. for better locating the transects

towards the ocean. This division in two recirculation cells develop a sedimentation setup within the shoreline island with $6 \text{ cm}^2.s^{-1}$ bedload rates (figure 6.8e.) and also promotes a widening spam of sediment offshore (figure 6.8d.).

The RJ site (figures 6.12) have a distinct feature, since the turbines were settled in a dome shape topography limited among the 70 m isobath deepened until 90 m. Surface stream flows usually loss velocity as the bottom slopes developing vertical circulation, as seen in figure 6.12a. (at 12,000 m). This strong bottom circulation influences high bed shear stress in this transect (figure 6.9b.). The vertical cross section (RJ2, figure 6.12b.) presents strong surface velocity gradients due to the conformation of Arraial do Cabo east shoreline, in addition to the intense bottom circulation as this region is known for severe upwelling events (Castro, 2014).

As expected, the energy conversion extracts great amount of momentum from the water column impacting greatly the vertical circulation in the region (figure 6.12c.), as the flow developed by the by bottom topography is lost due to energy conversion. Vertical circulation is increased, while in the bottom is depleted reducing the bed shear stress (figure 6.9e.). Finally, the RJ2 transect, shows an attenuated bottom and surface circulation which may leads to upwelling breakage in the region.

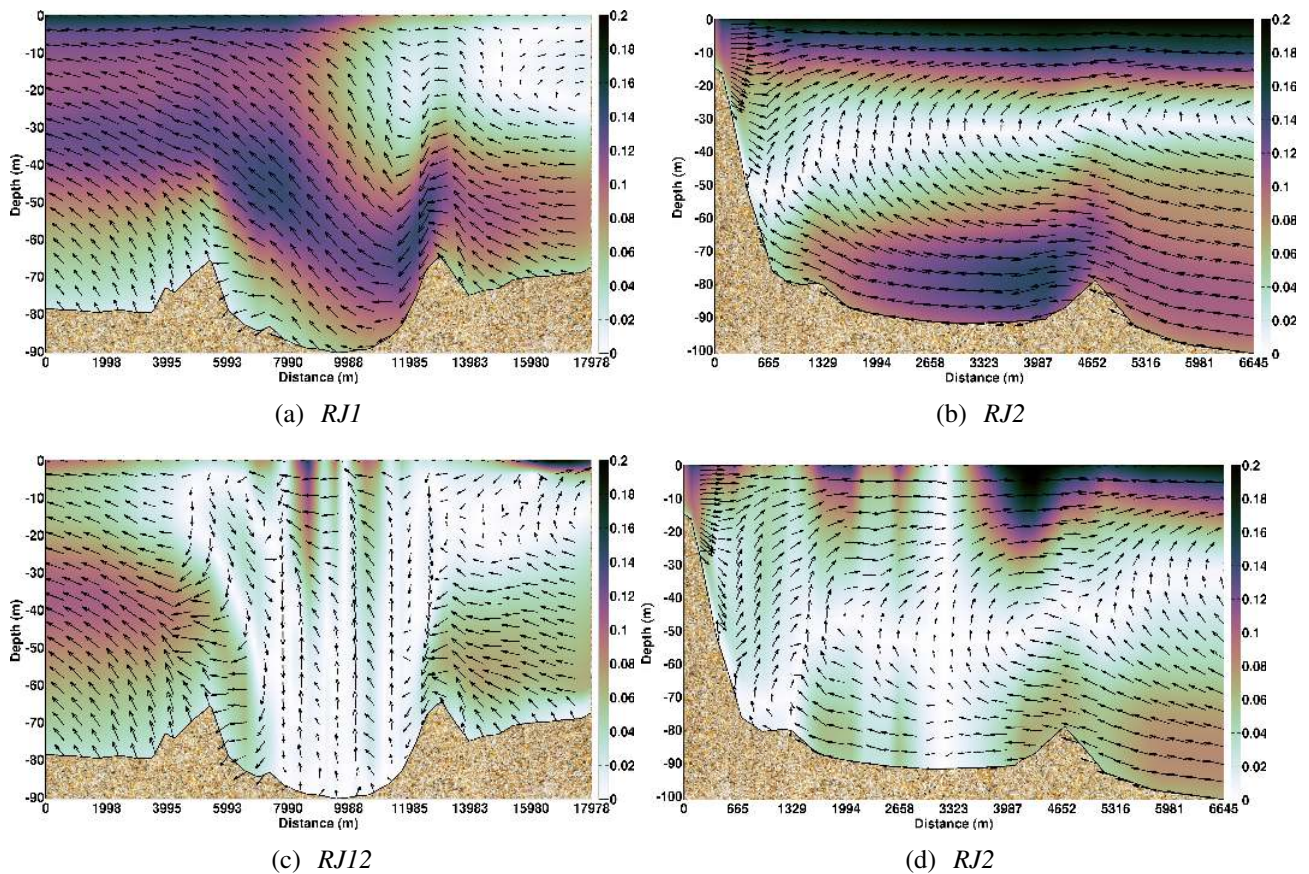


Figure 6.12: Vertical cross sections for the Rio de Janeiro turbines site; colored surface shows mean transversal velocity ($m.s^{-1}$) while vectors show direction of resultant between vertical and transversal velocities. Simulation without the presence of turbines (Upper panel), and with the turbines (Lower panel). (A and C) Refers to RJ1 transect; (B and D) Refers to RJ2 transect. See figure 6.1 d. for better locating the transects

The South-Southeastern Brazilian Continental Shelf has been described from the geomorphological point of view by Zemruscki (1979) who divided the area into four sectors: the Cabo Frio-Cabo de São Tomé Sector, the SBB, the Florianópolis-Mostardas Sector and the Rio Grande Cone. The turbines sites studied in this article occur in two of these sectors which differentiate themselves regarding geomorphological, hydrodynamic and sedimentological characteristics.

The SBB corresponds to the arc-shaped sector, ranging from latitude $22^{\circ}S$ to $28^{\circ}S$, comprehending the SP and RJ turbines site. The shelf width varies between 70 and 230 km with shelf break located between 120 and 180 m. In terms of local features this sector is characterized by the presence of channels, which may or may not be related to deeper canyons present on the continental slope, and they represent the main drainage systems developed during low sea level periods (de Mahiques et al., 2010).

According to Nagai et al. (2014), the hydrodynamic processes in the SBB, oceanic water mass

dynamics and shelf circulation, are the main controlling factors for sediment distribution in the upper continental margin leading to the establishment of differences in sedimentation rates. Also, Michaelovitch de Mahiques et al. (2002) states that sedimentation rates are greater near Arraial do Cabo and southeast of São Sebastião Island, despite these, the SP and RJ sites presents also differing characteristics.

The hydrodynamic dominant conditions in the inner shelf of São Sebastião Island is the offshore flow of the BC meanders which is enhanced by the Coastal Waters motion northwards, also, the inner shelf flow is strongly dominated by wind-driven and wave-driven currents (Michaelovitch de Mahiques et al., 2002). In addition, the combination of dynamic processes and complex bottom and coastline morphologies yields the transport of suspended terrigenous material to deeper areas of the shelf (de Mahiques et al., 1999).

While in the RJ site sedimentary processes seem to be influenced by the Brazil Current (BC) flow along the south-western Atlantic continental margin Stramma e England (1999); Campos et al. (2000a). So the interaction between coastline change southwards and wind direction enhance the upwelling of the South Atlantic Central Water and, consequently, increases deposition.

The other sector defined in the aforementioned work by Zemruscki (1979) is the Rio Grande Cone sector which is the southernmost and most irregular region of the Southern Brazilian shelf, situated at 28°S to 35°S, containing the RS turbines farm. Its width varies from 100 to 200 km with shelf break lying at between 100 and 160 m and is characterized by the presence of elongated sand banks.

In the SBS, due to the presence of Patos Lagoon, there is a great amount of terrigenous sediment from riverine discharge being advected towards Patos Lagoon Plume into the inner continental shelf (Möller Jr. e Castaing, 1999; Marques et al., 2009). Apart from this process, the bottom dynamics and sediment transport is mainly promoted by wind driven currents and waves (Marques, 2005; Marques et al., 2010a, 2014).

The residual currents in RS cases showed that the currents were strongly influenced by the wind direction. Marques et al. (2010a) showed that the wind setup was the primary mechanism that controlled the mesoscale dynamics of the SBS. As the wind changed direction and increased in intensity, coastal currents are usually driven in the same direction as the wind, the fluid motion followed the

dominant wind setup.

Notwithstanding, the remobilization of sediments is favored by the generally turbulent bottom-currents, which are locally enhanced along a steep slope (such as SBB). Accordingly, lower flow velocities are related to smoother slopes (such as SBS) (McCave (1982), apud Franco-Fraguas et al. (2014)).

Regarding the presence of turbines, one turbine impact will be localized (<1 km), while arranging devices in arrays or farms increase significantly the potential impact to regional (1–10 km) or far-field scale (>10 km) (Neill et al., 2017), where sediment dynamics could become important (Ahmadian e Falconer, 2012).

Turbines in marine environment are expected to increase erosion near the rotor, suspend sediments, and transport those sediments downstream, a turbine array may further transport sediments (Copping et al., 2016). In a series of experiments in a long flume with turbines (Ramírez-Mendoza et al., 2015), the velocity was decreased in the entire water column - as seen in the cross section analysis that the velocity is severely depleted by the turbines in the whole water columns, despite their location -, and no flow recovery was recorded after 12.5 diameters downstream from the turbine. In addition an erosion area with a horseshoe shape (scour) was generated near the turbine.

When the morphodynamic change as a result of an object or structure, the process is referred to as scour (Neill et al., 2017). For the marine renewable energy industry, morphodynamics and scour are important for determining scales and rates of accretion and erosion as a direct result of any device, array, or tidal range scheme development (Whitehouse et al., 2006).

Extracting energy from the marine environment will clearly alter local, and possibly regional, hydrodynamics and morphodynamics. Although, for most extraction scenarios, the influence on currents is likely to be very small towards time, the influence on bed shear stress will be greater (Neill et al., 2017). Despite, even a farm with 100 turbines or less presents very little system-wide effects making changes to the physical system less of a concern for decision makers (Yang et al., 2014b; Yang e Wang, 2015).

6.5 Conclusions

In this article, a first overview is proposed towards usage and impacts of marine current renewable turbines in South-Southeastern Brazilian Inner Shelf. Proceeding with 10 years of simulation using reliable data, we were able to simulate the coastal currents affecting the studied region and asset the real output that the current offer for energy production. Three regions were considered viable for the application of marine current turbines, as follows:

I. Rio Grande do Sul turbines farm: The greatest site studied with 440 km^2 of area, accounting for 87 turbines.

- The extracted power from this site in average was $45.30 \text{ kW.day}^{-1}$ reaching maximum power output of 539 kW.day^{-1} , producing during the entire period 16.55 MW.
- The RS site presented noteworthy morphodynamical changes whilst the turbine are included as the bed shear stress is reduced to almost zero in the entire site due to the surface velocity depletion. Allied with the bed shear stress reduction, two zones of deposition across the borders of the site appears.

II. São Paulo turbines farm: Within an area of 13.78 km^2 , 61 turbines were defined.

- The mean power obtained from this site was $22.94 \text{ kW.day}^{-1}$ reaching maximum power output of $237.47 \text{ kW.day}^{-1}$, generating 8.38 MW over 10 years.
- Approaching the effects of turbines presence, drastically changes in the mean surface hydrodynamics is perceived affecting considerably the morphodynamic processes such as increase in bedload rates in southeast of São Sebastião Island. Bed shear stress changes to almost zero values inside the turbines sites.

III. Rio de Janeiro turbines farm: 23 marine turbines were set inside a 10 km^2 region.

- For this farm the average power was 6.75 kW.day^{-1} reaching maximum power output of $258.09 \text{ kW.day}^{-1}$, producing almost 2.47 MW during the entire simulation.

- Disturbance promoted by the turbines in the mean surface velocity generated wake street patterns downstream and also a bifurcation/divergence in the current core direction impacting the bottom behaviour as well. Major decrease of bed shear stress promoted an accumulation of bedload in the south and north of the site near the coastline.

The power analysis demonstrated that the total energy output is outstanding (approximately 1840 GWh), capable to supply 56,166 residences. The average surface current direction corroborates with the literature as a mean flow southwards, while the bottom evolution was also impacted with the development new zones of sediment erosion and deposition nearshore, guided by the hydrodynamic changes.

Three-dimensionally speaking, towards the vertical cross sections, the flow behaviour presented disturbances as expected, with the entire water columns highly affected by the energy conversion from the turbines, creating vertical circulation which increase lateral flow consequently affecting sediment transport towards the bottom.

In summary the dynamic forcing affecting RS and SP sites were the wind-driven circulation acting on the inner portions of the shelf, while in the RJ site, the Brazil Current meandering is the most important hydrodynamic factors that determine the sedimentation in the area.

A consensus exists among researchers that physical oceanographic processes play a critical role in structuring the flow pattern towards turbines in the extraction of kinetic energy, perhaps, a more systemic overview is needed. Oceanographic, sedimentological, and biological processes are indubitably intertwined and must be considered together for a proper understanding of the physical processes and ecosystem dynamics leading to a resolution towards fully understanding of marine turbines impact.

In future studies we will aim some differing approaches, such as (1) compile data from sediment grain size in all Brazilian Continental Shelf, while adding the influence of waves into the model towards the usage of TOMAWAC module in order to improve the bottom transport. (2) Include the suspended load in the total sediment transport to accurately account with the suspended matter around turbines and its vicinity impacts regarding a wider range of grain sizes. (3) An impact absent in this work is the influence in biological processes, which will be drastically affected. (4) Increase the mesh definitions around the sites in order to study scour and in-site (5) A cost/material assessment must be performed ensuing liability. Following these paths, efforts to improve locational positioning towards

the main stream incident flow shall be increased for future works.

6.6 Acknowledgements

The authors are grateful to the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) under contract 304227/2016-1 and to the Agência Nacional do Petróleo (ANP) regarding the Programa de Recursos Humanos (PRH-27) for the fellowships. Further acknowledgements go to the Brazilian Navy for providing detailed bathymetric data for the coastal area; the Brazilian National Water Agency, the PNBOIA project, NOAA and HYCOM for supplying the validation and boundary conditions data sets, respectively; and the Open Telemac-Mascaret Consortium for freely distribution of the TELEMAC system making viable this research and finally a special thanks to the Supercomputing Center of the Federal University of Rio Grande do Sul (CESUP-UFRGS) where most of the computational work was carried out. Although some data were taken from governmental databases, this paper is not necessarily representative of the views of the government.

6.7 References

Parte I

Conclusões

CAPÍTULO 7

Conclusões

A Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira (PCSSB) é uma região altamente dinâmica por possuir grandes interações hidrodinâmicas, como ao sul na confluência Brasil-Malvinas e ao norte na separação costeira da corrente do Brasil. Devido a estas características distintas de padrões de circulação, esta região foi subsequentemente dividida em Plataforma Continental Sul do Brasil e Plataforma Continental Sudeste do Brasil.

Através do uso de simulações com 10 anos de duração, entre os anos de 2003 e 2012, foi possível analisar as propriedades hidro-oceanográficas da região de estudo como, o predomínio do padrão de ventos, que apresenta dominância de ventos de nordeste influenciando fortemente a dinâmica da circulação oceânica superficial de forma residual direcionada para sul. Esta análise permitiu encontrar locais com apropriada viabilidade apresentando significativo potencial para conversores de energia das correntes marinhas em energia elétrica.

Além disso, foram comprovados os impactos na estrutura de circulação superficial e de fundo, além da influência no transporte sedimentar pela utilização de turbinas hidrocínéticas nestes locais. Pode ser ainda indicado como principais conclusões deste trabalho:

Simulações longas, maiores de 10 anos de duração, são necessárias para avaliar a viabilidade para

a conversão de energia dos oceanos, pois o oposto pode prejudicar quaisquer conclusões referente ao tópico. A principal importância em simulações longas está em oferecer resultados de alta confiança sobre a dinâmica de ciclos mais longos que ocorrem no ambiente.

Sendo assim, partes interessadas em projetos desta natureza, necessitam de informações antecipadas sobre eventos de longo período que possam por em risco o projeto, da mesma forma, estudos como este oferecem um melhor conhecimento sobre as áreas de interesse e as possibilidades para que tomadores de decisão possam assegurar medidas de redução de impactos e/ou melhoria na definição locacional das turbinas.

De forma específica, e de acordo com os objetivos específicos definidos, podem ser destacadas como conclusões:

A) Investigar o potencial energético da PCSSB identificando sua variabilidade temporal e espacial, assim como, as regiões com os maiores e menores potenciais energéticos;

- O potencial energético da PCSSB foi avaliado em relação a energia das correntes oceânicas e energia das ondas, através de uma nova metodologia proposta visando definir localidades com fontes energéticas contendo alta estabilidade durante longos períodos que consiste em: (1) Análise mensal e sazonal dos dados em busca de variações de padrão e zonas de máxima velocidade de corrente ou altura de onda; (2) Avaliar a intensidade e frequência das ondas e correntes, e então, selecionadas as regiões com valores em média superiores 1,5 m and $0,30 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente, durante todo o período estudado, através de distribuição de frequência. (3) Investigar estas regiões selecionadas ao longo da isóbata de 50 m de forma a compreender os padrões dinâmicos que promovem a alta viabilidade energética nestes locais.

- Grande variabilidade mensal e sazonal foi observada, com diferentes processos controlando ondas e correntes. O método para a análise de variabilidade demonstrou ser confiável e capaz de conter a complexidade dos períodos cíclicos durante todo o tempo do estudo.

- * Para as correntes, a variabilidade foi influenciada por ação local dos ventos que promovem a manutenção dos padrões de circulação. Apesar de, em alguns locais, a divergência de fluxo demonstrar maior importância, o vento é a forçante dominante

para a variabilidade nas correntes. A estação da primavera é capaz de fornecer de 0,14 a 0,24 vezes mais intensidade de correntes do que a estação do outono.

- * As ondas, em contrapartida, apresentam sua variabilidade altamente correlacionada com processos atmosféricos, como frentes e a passagem de ciclones, que por sua vez, promovem o aumento ou decréscimo da altura de onda regionalmente. Este padrão gera uma grande gama de dominância temporal entre estações e meses, refletidas na variação da dominância de estações, sendo os meses de setembro e maio os mais intensos, com 0,21 a 0,36 vezes mais ondas de maiores alturas significativas do que fevereiro, que é o mês mais fraco.
- As ondaletas se demonstraram uma análise confiável para definir e avaliar locais destinados para implantação de projetos de energias marinhas. Um dos resultados provenientes desta análise é justamente o quão estável/instável são os parâmetros analisados, sendo assim, utilizando ondaletas do espectro global, ondaletas bidimensionais além do espectro cruzado de ondaleta foi possível concluir que:
 - * Através da análise de ondaletas de espectro global aplicadas em todo o domínio, seguindo a isóbata de 50 m, foi possível identificar os locais exatos, dentro das zonas pré-definidas, em que os parâmetros (velocidade da corrente ou altura de onda) apresentam maior estabilidade, além da relação com os fenômenos que interferem neste processo e suas escalas de tempo.
 - * Para as correntes, a maior correlação do espectro de energia se encontra dentro dos períodos de 4 a 16 dias, além de ter média energia localizada entre os períodos de 32-64 dias (a partir do norte do estado de Santa Catarina), indicando correlação forçada por inter sazonalidade. Além disso, o espectro global demonstrou baixo nível de confiança para a região sul (Z1 e Z2), enquanto que para o norte (Z4 e Z5) demonstrou alto nível de confiança. Este resultado define a estabilidade da corrente, sendo mais estável no sul e menos estável ao norte.
 - * Um período menor de processos se torna importante no caso das ondas. A ocorrência de processos de 8 a 32 dias está presente em quase a totalidade da PCSSB, entretanto existe uma oposição ao cenário visto com a corrente. No caso das ondas, existe grande instabilidade na região sul (Z1 e Z2), enquanto que regiões de alta estabilidade podem

ser encontradas em Z4 e Z5.

- * Com a aplicação das ondaletas bidimensionais filtradas de 2 a 30 dias foi possível pontuar exatamente os locais de excelente estabilidade para cada tipo de parâmetro abordado. Desta forma, as zonas Z1 e Z2 foram comprovadas como estáveis para a corrente enquanto que para as ondas foram as zonas Z4 e Z5. De acordo com as ondaletas de espectro global, aliada a análise de ondaletas bidimensional, foi possível concluir que as regiões Z1 e Z2 (Plataforma Continental Sul do Brasil) são mais indicadas para o uso de energia das correntes marinhas, enquanto que as zonas Z4 e Z5 (Plataforma Continental Sudeste do Brasil) apresentam grande variabilidade para as correntes podendo prejudicar a inclusão de turbinas, enquanto que para as ondas, essas zonas são mais indicadas devido as altas frequências de grandes alturas de ondas, apesar de pequenas flutuações no espectro global.
 - * As ondaletas bidimensionais das ondas ainda demonstraram um local dentro da zona Z4 (ao norte da Ilha de São Sebastião) com baixa variabilidade de altura de ondas, em adição a presença de alta frequência de altura de ondas superior a 1.5 m.
 - * A aplicação do espectro cruzado de ondaletas nos pontos mais estáveis dentro das zonas comprovou o mesmo padrão dinâmico entre ondas/correntes quando relacionados ao vento. As maiores correlações estão diretamente associadas às altas correntes/ondas dentro de ciclos de 2 a 16 dias, corroborando a dominância do vento como principal promotor de alta energia associado a alta estabilidade.
 - * A alta estabilidade nestas regiões é determinada por processos em escalas de tempo inferiores a 30 dias, sendo os mecanismos atuantes através dos ventos a forçante dominante nestas escalas. Foi comprovado que o vento está altamente correlacionado aos aumentos gradativos na dinâmica da velocidade de correntes e altura das ondas.
- Ondas e correntes provaram possuir comportamento oposto/bipolar em relação a estabilidade energética e disponibilidade de recursos, da seguinte forma:
- * A forçante das ondas na Plataforma Continental Sudeste do Brasil demonstrou estar altamente correlacionada com a dinâmica atmosférica do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, enquanto que na Plataforma Continental Sul do Brasil as condições atmosféricas estão relacionadas a passagem de sistemas frontais ou frentes frias,

gerando um estado de mar irregular o que não é ideal para conversão de energia.

- * Para as correntes, a Plataforma Continental Sudeste do Brasil está altamente influenciada pela Corrente do Brasil, apesar desta corrente perder contato com a costa na altura de Arraial do Cabo, RJ, e posteriormente sofrer processos de alargamento e aprofundamento, a baixa profundidade da Plataforma Continental Sudeste resulta em fluxos inerciais elevados que podem ser facilmente modulados por ventos locais na costa. Em oposição, na Plataforma Continental Sul do Brasil, o encontro de várias correntes em associação com a linha de costa quase linear exercem alta estabilidade para a dominância dos ventos locais sobre o fluxo superficial.

B) Estimar as taxas de conversão de energia elétrica nas regiões escolhidas considerando parques de conversores hidrocínéticos de forma a estimar as taxas de conversão de energia integradas;

- No total, 171 turbinas foram numericamente instaladas em três regiões definidas anteriormente consideradas como estáveis para a conversão da energia das correntes marinhas. Cada sítio apresentou características únicas em relação as taxas de conversão, entretanto, as turbinas localizadas na borda dos sítios apresentaram maior média de conversão de energia. Em relação aos sítios, também foram analisadas taxas de conversão para verificar a eficiência de cada sítio.
- O sítio localizado no estado do Rio Grande do Sul (RS) apresentou a maior taxa de geração de potência média $45,30 \text{ kW.dia}^{-1}$, com desvio padrão de $61,37 \text{ kW.dia}^{-1}$ e máximo energético de 539 kW.dia^{-1} . No período de 10 anos, 16,55 MW foram produzidos pelas 87 turbinas. Em termos de energia, este valor é igual a 1451 GWh. Entretanto, se forem consideradas perdas mecânicas no rotor, perdas mecânicas e elétricas no gerador e ainda as perdas referentes a transmissão e cabeamento, a energia resultante deste sítio totaliza 537 GWh, podendo suprir 16.400 residências.
- Para a fazenda de turbinas situada no estado de São Paulo (SP), os valores de potência convertida foram de $23\sim 30 \text{ kW.dia}^{-1}$ com máximo em torno de 240 kW.dia^{-1} . Em toda a simulação, este sítio foi capaz de converter 8,38 MW, através das 61 turbinas definidas, equivalente a 735 GWh. Por outro lado, ao adicionar as perdas, a energia efetiva deste sítio se reduz para 272 GWh, o suficiente para energizar 8.300 residências durante este

período.

- As turbinas posicionadas no estado do Rio de Janeiro (RJ) demonstraram a menor taxa de conversão de energia das correntes como já era esperado pelas análises de variabilidade espacial e temporal da velocidade da corrente. Em termos de média e desvio padrão ($6,75 \sim 13,57 \text{ kW.dia}^{-1}$) os valores foram 85% inferiores aos do sítio do RS, apesar do máximo de potência convertida ter sido superior ao sítio de SP, com 258 kW.dia^{-1} e cerca de 2,47 MW em um total de 10 anos. Em relação à energia gerada, esta potência representa 246 GWh, que reduzidos das perdas, totaliza 180 GWh em suas 23 turbinas.
- A energia total produzida pelos sítios, considerando as perdas, foi de 1840 GWh, o suficiente para sustentar 56.166 domicílios com energia durante o período de 10 anos.

C) Analisar as alterações ambientais na hidrodinâmica e na morfodinâmica, com relação à presença da turbina nas regiões de maior potencial energético.

- A presença das turbinas causa grandes perturbações em toda coluna de água, com maior impacto hidrodinâmico na região interior do sítio e na região posterior ao sítio em relação ao fluxo incidente. Morfodinamicamente, o assoalho marinho sofre drásticas mudanças com a permanência das turbinas.
- Sítio de turbinas do Rio Grande do Sul:
 - * A circulação superficial é drasticamente reduzida devido à presença das turbinas. Estruturas semelhantes a vórtices são desenvolvidas dentro do sítio, principalmente por causa de fluxos de divergência devido à conversão de energia. Este padrão de vorticidade se assemelha ao de fluxos turbulentos. Além disso, uma zona de sombra com quase 10 km^2 se desenvolveu ao sul do sítio, devido ao escoamento residual incidente ser direcionado para o sul. Esta região de sombra se refere ao espaço necessário para o fluxo recobrar sua condição pretérita a perturbação causada pela adição das turbinas. Além disso, é possível perceber um incremento na intensidade da velocidade superficial à oeste do sítio causado pela divergência superficial do fluxo.
 - * As mudanças morfodinâmicas são nítidas com a inclusão das turbinas, primeiramente, a tensão de atrito cisalhante é reduzida a quase zero no interior do sítio. Esta

redução se deve a diminuição da velocidade nas camadas superiores devido a conversão de energia, gerando ainda consequências sobre os fluxos de deposição do material transportado junto ao fundo. Duas zonas de alta remobilização e deposição foram desenvolvidas ao redor do sítio chegando a $3,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ de material transportado pelo fundo. A taxa de evolução do fundo marinho sofreu modificações já que a corrente de fundo também foi modificada, gerando divergência sobre material transportado tanto em direção da costa quando em direção ao mar aberto.

– Sítio de turbinas de São Paulo:

- * Superficialmente, este sítio apresenta grandes mudanças em relação aos outros cenários estudados. Primeiramente, por possuir duas sub-regiões contendo turbinas, as influências no fluxo superficial demonstram ter sido mais impactadas. Zonas de baixa intensidade de velocidade são observadas à sudeste da ilha de São Sebastião, e a oeste dos sítios, sendo este último referente a uma zona de sombra causada pela recuperação do fluxo convertido pela corrente incidente. Dois fluxos intensos são facilmente notados, um direcionado para a ilha ($0,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) e outro à leste do sítio inferior ($0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), ambos gerados pela presença das turbinas como consequência do fluxo incidente dinamicamente acelerar seu escoamento ao redor dos conversores.
- * Influências no fundo marinho são perceptíveis, principalmente pela dupla escolha locacional, que intensificou o fluxo de transporte pelo fundo entre os dois sítios, além de se elevar ao sul do sítio inferior. A tensão cisalhante de fundo teve redução próxima a zero dentro dos sítios, e atenuação próximo a ilha. As taxas da evolução do fundo aumentaram nos locais em concordância com a tensão cisalhante de fundo.

– Sítio de turbinas o Rio de Janeiro:

- * O decréscimo da velocidade superficial dentro do sítio e a divergência do fluxo principal da corrente ao redor do sítio são nítidos no sítio do RJ. O fluxo atravessa a fazenda de turbinas gerando uma esteira turbulenta abaixo do sítio. Zonas de baixa velocidade são observadas próximas de Arraial do Cabo e à oeste do sítio.
- * A tensão cisalhante de fundo sofreu redução próximo a Arraial do Cabo e à leste do sítio promovendo aumento do transporte pelo fundo ao sul e norte do sítio. A evolução do fundo corrobora as alterações no fluxo das camadas superiores, intercalando

entre faixas de sedimentação e erosão.

- Em relação ao fluxo vertical nos sítios, o comportamento do fluxo apresentou perturbações dentro do esperado, com toda a coluna de água sendo altamente afetada pela conversão de energia. Houve também o desenvolvimento de circulação vertical, que conseqüentemente contribuiu para conduzir o fluxo lateralmente, afetando assim o transporte sedimentar pelo fundo.

Parte II

Limitações do estudo e proposta para trabalhos futuros

CAPÍTULO 8

Limitações do estudo e proposta para trabalhos futuros

8.1 Limitações deste estudo

No decorrer da elaboração deste trabalho, algumas limitações foram encontradas:

- No início deste trabalho foram encontradas limitações devido a estrutura computacional para simular ambientes extensos e com alta resolução vertical (2000 km x 600 km x 20 níveis σ) como os propostos neste trabalho. Esta limitação foi resolvida ao ingressar o projeto no Centro de Super Programação da UFRGS (CESUP). Contando com este recurso, novos desafios podem ser adicionados nos tópicos referentes a energias renováveis.
- O estudo do modelo de ondas com o morfodinâmico não pode ser realizado. Isso se deve ao fato de não existir até o momento o acoplamento interno entre o modelo morfodinâmico SISYPHE e o ondulatório TOMAWAC. Este efeito traria resultados de correntes induzidas por ondas além de influências costeiras nos transportes sedimentares.
- O modelo morfodinâmico foi utilizado com uma única condição de contorno de fundo, ou seja, um único grão em todo o fundo marinho. Esta limitação foi aplicada devido a falta de dados sedimentares em toda a extensão do domínio até o início deste trabalho.

- O modelo morfodinâmico foi utilizado considerando apenas o módulo de transporte de fundo e sem considerar as contribuições do módulo de transporte de sedimentos em suspensão. Além disso, o modelo de transporte de sedimentos foi considerado utilizando sedimentos não coesivos.
- Os resultados do modelo morfodinâmico não foram verificados, calibrados ou validados por conta das simplificações empregadas no estudo e pelo fato de não haverem extensas campanhas de observação de dados ao longo de toda a região de estudo durante o período de execução deste trabalho.

8.2 Trabalhos Futuros

A conclusão deste trabalho possibilitou indicar tópicos para colaborações futuras, além de melhorias para estudos relacionados à área de energias renováveis oceânicas.

A determinação de como a potência é alterada de acordo com a variação da direção de corrente em torno da linha de costa, deve ser investigada em estudos futuros. Desta forma, estudos visando locais viáveis para conversores pequenos em regiões fechadas/seguras como baías devem ser realizados. Fatores que possam modular a energia de onda devem ser analisados como o estado do mar dentro do sítio pré-definido, além de análises climáticas de acordo com Vanem (2013); Pelinovsky e Kharif (2016). Para os sítios de correntes, avaliações estruturais devem ser realizadas através da aplicação de metodologias provindas da Teoria Constructal (Bejan e Lorente, 2004, 2008) para melhor definição locacional de cada turbina individualmente.

Diferentes abordagens das seguidas neste trabalho poderão ser aplicadas para ampliar o conhecimento sobre as tecnologias emergentes no certame energético marinho, assim como elevar a discussão sobre as possibilidades inovatórias da implementação de turbinas hidrocínéticas na costa brasileira.

1. Primeiramente, a fim de suprir uma das limitações deste trabalho, deverá ser realizada uma compilação dos bancos de dados sedimentológicos na costa brasileira. No caso do modelo SISYPHE, uma grande gama de grãos de diferentes granulometrias podem ser adicionados em multi-camadas abaixo do assoalho marinho. Quanto mais completo este banco de dados, mais confiável serão as análises e resultados morfodinâmicos.

2. Realizar um estudo de cenário consistindo em: Aplicação dos modelos TELEMAC-3D , SISYPHE aliados ao acoplamento externo com o modelo ondulatório TOMAWAC . Este cenário possibilitará a percepção de fenômenos erosivos e deposicionais com maior confiabilidade, já que o modelo ondulatório irá influenciar diferentemente as taxas de transporte sedimentar.
3. Adicionar o material em suspensão à carga total de sedimentos transportados. Este processo aumentará a credibilidade dos resultados referentes ao transporte sedimentar de matéria em suspensão ao redor das turbinas e nas regiões adjacentes aos sítios relacionando seus impactos com diferentes granulometrias.
4. Um impacto ausente neste trabalho se refere aos processos biológicos, que serão drasticamente afetados. Relatórios da Agência Energética Internacional, aliada a Iniciativa dos Sistemas Energéticos Oceânicos (International Energy Agency (IEA) and Ocean Energy Systems Initiative (OES), (Copping et al., 2016)) estão liderando estudos de ponta em áreas referentes a impactos sonoros, colisão, influência de efeitos eletromagnéticos, além de efeitos hidro-morfo-oceanográficos. Esta vertente de estudos deve ser incentivada através da introdução de novos módulos ao sistema open-TELEMAC MASCARET capazes de suprir esta demanda.
5. Estudos devem focar também em aumentar os critérios das malhas numéricas de elementos finitos elevando as definições pontuais ao redor dos sítios, permitindo desta forma, a realização de pesquisas aprofundadas sobre transporte sedimentar causado por estruturas rígidas no oceano, além de permitir a correta visualização e análise do fenômeno de *scour* ao redor da turbina.
6. Análises de custo ambiental associado à créditos de carbono (Parkinson e Djilali, 2015) estão sendo realizados amplamente em países como Inglaterra e Irlanda. Viabilidade energética é importante para garantir a existência de um projeto renovável, entretanto, oferecer retorno em escala global relacionado ao custo ambiental do material utilizado na construção torna o projeto factível.

Seguindo estas propostas, esforços serão tomados para aprimorar alternativas locais e o posicionamento de conversores de energias renováveis nos oceanos, de forma eficiente e ambientalmente amigável.

CAPÍTULO 9

Referências

Referências Bibliográficas

- ABP (2004). Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources: Technical Report, Report No. R.1106 prepared for the UK Department of Trade and Industry. Technical report, ABP Marine Environmental Research Ltd.
- Ahmadian, R. e Falconer, R. A. (2012). Assessment of array shape of tidal stream turbines on hydro-environmental impacts and power output. *Renewable Energy*, 44:318–327.
- Ahmed, S., Islam, M. T., Karim, M. A., e Karim, N. M. (2014). Exploitation of renewable energy for sustainable development and overcoming power crisis in Bangladesh. *Renewable Energy*, 72:223–235.
- Akimoto, H., Tanaka, K., e Uzawa, K. (2013). A conceptual study of floating axis water current turbine for low-cost energy capturing from river, tide and ocean currents. *Renewable Energy*, 57:283–288.
- Allen, S. R., Hammond, G. P., e McManus, M. C. (2008). Prospects for and barriers to domestic micro-generation: A United Kingdom perspective. *Applied Energy*, 85(6):528–544.
- Alnaser, W. E. (1995). Renewable energy resources in the state of Bahrain. *Applied Energy*, 50(1):23–30.

- Alves, F. N. A. (2006). *Estudo do transporte de manchas de óleo por um modelo lagrangeano de partículas na Baía de Pelotas*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande.
- Amelio, M., Barbarelli, S., Florio, G., Scornaienchi, N. M., Minniti, G., Cutrupi, A., e Sánchez-Blanco, M. (2012). Innovative tidal turbine with central deflector for the exploitation of river and sea currents in on-shore installations. *Applied Energy*, 97:944–955.
- Andrade, K. M. (2007). *Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul*. Master thesis, São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Andrade, M., Toldo, E. J., e Nunes, J. C. (2016). Variabilidade das correntes na plataforma interna ao largo de Tramandaí, RS durante o verão de 2014. *Pesquisas em Geociências*, 43(3):289–298.
- Aquamarine (2008). Aquamarine power announces contract with ABB for Neptune. Available from: <http://www.aquamarinepower.com/newsand-events/news/latest-news/view/51/aquamarine-power-announces-contract-with-abb-for-neptune/>.
- Arinaga, R. A. e Cheung, K. F. (2012). Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, 39(1):49–64.
- AS., H. S. (2007). World leading technology developed by Hammerfest Strom. Available from: <http://www.hammerfeststrom.com/content/view/58/86/lang,en/>.
- Atan, R., Goggins, J., e Nash, S. (2016). A Detailed Assessment of the Wave Energy Resource at the Atlantic Marine Energy Test Site. *Energies*, 9(11):967.
- Atlantis (2008). Nereus and Solon Tidal Turbines. Available from: <http://www.atlantisresourcescorporation.com/technology/>.
- Baek, S., Park, E., Kim, M.-G., Kwon, S. J., Kim, K. J., Ohm, J. Y., e del Pobil, A. P. (2016). Optimal renewable power generation systems for Busan metropolitan city in South Korea. *Renewable Energy*, 88:517–525.
- Bahaj, A. e Myers, L. (2004). Analytical estimates of the energy yield potential from the Alderney Race (Channel Islands) using marine current energy converters. *Renewable Energy*, 29(12):1931–1945.

- Bahaj, A. S. e Myers, L. E. (2003). Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production. *Renewable Energy*, 28(14):2205–2211.
- Bai, X., Avital, E., Munjiza, A., e Williams, J. (2014). Numerical simulation of a marine current turbine in free surface flow. *Renewable Energy*, 63:715–723.
- Bane, J. M., He, R., Muglia, M., Lowcher, C. F., Gong, Y., e Haines, S. M. (2017). Marine Hydrokinetic Energy from Western Boundary Currents. *Annual Review of Marine Science*, 9(1):105–123.
- Barros G. P. e Marques, W. C. (2012). Long-term temporal variability of the freshwater discharge and water levels at Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Geophysics*.
- Barstow, S., Haug, O., e Krogstad, H. (1998). Satellite Altimeter Data in Wave Energy Studies. In *Waves 1997, ASCE, Vol2.*, pages 339–354.
- Batista, D., Gonçalves, J., Messano, H., Altvater, L., Candella, R., Elias, L., De Messano, L., Apolinário, M., e Coutinho, R. (2017). Distribution of the invasive orange cup coral *Tubastraea coccinea* Lesson, 1829 in an upwelling area in the South Atlantic Ocean fifteen years after its first record. *Aquatic Invasions*, 12(1):23–32.
- Bedard, R. (2005). Survey and Characterization: Tidal in stream energy conversion (TISEC) devices. Technical report, Electric Power Research Institute - EPRI, Palo Alto, CA.
- Bedard, R., Jacobson, P., Previsic, M., Musial, W., e Varley, R. (2010). An Overview of Ocean Renewable Energy Technologies. *Oceanography*, 23(2):22–31.
- Bejan, A. e Lorente, S. (2004). The constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(14-16):3203–3214.
- Bejan, A. e Lorente, S. (2008). *Design with constructal theory*. Hoboken, NJ, 1 edition.
- Benli, H. (2013). Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies. *Renewable Energy*, 50:33–46.
- Benoit, M. (2003). Logiciel TOMAWAC de modélisation des états de mer em éléments finis. Notice théorique de La version 5.5. Technical report, DEPARTEMENT LABORATOIRE NATIONAL D’HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT (EDF).

- Bertrand, O., Rebai, A., Girard, C., Zanette, J., e Dominguez, F. (2015). Development of a three-dimensional model of a vertical-axis and transverse-flow hydrokinetic turbine. In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXII TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 208–212, Warrington, UK. Science and Technology Facilities Council.
- Besio, G., Mentaschi, L., e Mazzino, A. (2016). Wave energy resource assessment in the Mediterranean Sea on the basis of a 35-year hindcast. *Energy*, 94:50–63.
- Bidlot, J.-R., Holmes, D. J., Whittmann, P. A., Lalbeharry, R., e Chen, H. S. (2002). Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data. *American Meteorological Society*, 17(287-310).
- Bitew, M. M. e Gebremichael, M. (2011). Are Satellite-Gauge Rainfall Products Better than Satellite-Only Products for Nile Hydrology? In *Nile River Basin*, pages 129–141. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Bleck, R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 4(1):55–88.
- Bollmann, M., Bosch, T., Colijn, F., Ebinghaus, R., Froese, R., Güssow, K., Khalilian, S., Krastel, S., Körtzinger, A., Langenbuch, M., Latif, M., Matthiessen, B., Melzner, F., Oschlies, A., Petersen, S., Proelß, A., Quaas, M., Reichenbach, J., Requate, T., Reusch, T., Rosenstiel, P., Schmidt, J. O., Schrottke, K., Sichelschmidt, H., Siebert, U., Soltwedel, R., Sommer, U., Stattegger, K., Sterr, H., Sturm, R., Treude, T., Vafeidis, A., van Bernem, C., van Beusekom, J., Voss, R., Visbeck, M., Wahl, M., Wallmann, K., e Weinberger, F. (2010). *World Ocean Review*. maribus, Hamburg, 1 edition.
- Bourban, S., Durand, N., Turnbull, M., Wilson, S., e Cheeseman, S. (2012). Coastal Shelf Model of Northern European waters to inform tidal power industry decisions. In Bourban, S., Durand, N., e Hervouet, J.-M., editors, *XIX TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 143–150, Oxford, Inglaterra. HR Wallingford.
- Braga, M. F. e Krusche, N. (2000). Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995. *Atlântica*, 22:27–40.

- Brown, M. A., Antes, M., e Laboratory, O. R. N. (2006). Results of a Technical Review of the U.S. Climate Change Technology Program's R&D Portfolio . Technical report, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Bryden, H. L., Beal, L. M., e Duncan, L. M. (2005). Structure and Transport of the Agulhas Current and Its Temporal Variability. *Journal of Oceanography*, 61:479–492.
- Burrage, D., Wesson, J., Martinez, C., Perez, T., Mollerjr, O., e Piola, A. (2008). Patos Lagoon outflow within the Río de la Plata plume using an airborne salinity mapper: Observing an embedded plume. *Continental Shelf Research*, 28(13):1625–1638.
- Business, I. H. C. E. (2008). Stingray tidal stream generator. Available from: http://www.engb.com/services_09a.php.
- Campos, E. J. D., Velhote, D., e Da Silveira, I. C. A. (2000a). Shelf break upwelling driven by Brazil current cyclonic meanders. *Geophysical Research Letters*, 27(6):751–754.
- Campos, E. J. D., Velhote, D., e da Silveira, I. C. A. (2000b). Shelf break upwelling driven by Brazil Current Cyclonic Meanders. *Geophysical Research Letters*, 27(6):751–754.
- Campos, R. M., de Camargo, R., e Harari, J. (2010). Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no Sudoeste do Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2):175–184.
- Cardoso, S. D., Marques, W. C., Kirinus, E. D. P., e Stringari, C. E. (2014). Levantamento batimétrico usando cartas náuticas. In *13º Mostra de Produção Universitária*, Rio Grande. Universidade Federal do Rio Grande.
- Carvalho, J. T. (2010). *Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro*. Master, INPE.
- Castelao, R. M. e Barth, J. A. (2006). Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophysical Research Letters*, 33(3):L03602.
- Castro, B. M. (2014). Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research*, 89:15–23.

- Castro, B. M. e Lee, T. N. (1995). Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research*, 100(C8):16045.
- Castro, B. M., Lorenzetti, J. A., da Silveira, I. C. A., e de Miranda, L. B. (2006). Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In ROSSI e WONGTSCHOWSKY, C. L. D. B., editors, *O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil*, chapter 1, pages 11–120. Edusp, São Paulo.
- Cera, J. C. e Ferraz, S. E. T. (2015). Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(1):81–88.
- Cerda, C. e Castro, B. M. (2014). Hydrographic climatology of South Brazil Bight shelf waters between Sao Sebastiao (24°S) and Cabo Sao Tome (22°S). *Continental Shelf Research*, 89:5–14.
- Cezana, F. C. (2007). *Simulação numérica da dispersão de poluentes ao redor de um obstáculo isolado sob diferentes condições de estabilidade*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Do Espírito Santo.
- Chapalain, G. e Guillou, N. (2011). Effects of the coupling between TELEMAC 2D and TOMAWAC on SISYPHE modelling in the outer Seine estuary. In Violeau, D., Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., e Denis, C., editors, *XVIIIth Telemac and Mascaret User Club*, pages 51–58, Chateau, France. EDF Corporate University.
- Chassignet, E., Hurlburt, H., Metzger, E. J., Smedstad, O., Cummings, J., Halliwell, G., Bleck, R., Baraille, R., Wallcraft, A., Lozano, C., Tolman, H., Srinivasan, A., Hankin, S., Cornillon, P., Weisberg, R., Barth, A., He, R., Werner, F., e Wilkin, J. (2009). US GODAE: Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Oceanography*, 22(2):64–75.
- Chawla, A., Spindler, D. M., e Tolman, H. L. (2013). Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*, 70:189–206.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Witter, D. L., e Richman, J. G. (1990). Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 95(C10):17877.
- Chen, L. e Lam, W.-H. (2014). Slipstream between marine current turbine and seabed. *Energy*, 68:801–810.

- Ciotti, Á. M., Odebrecht, C., Fillmann, G., e Moller, O. O. (1995). Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. *Continental Shelf Research*, 15:1737–1756.
- Cirano, M., Mata, M. M., Campos, E. J., e Deiró, N. F. (2006). A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação Global OCCAM. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(2):209–230.
- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M. T., Schild, P., Sjöström, B. O., Sørensen, H. C., e Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: Current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(5):405–431.
- Coelho-Souza, S. A., López, M. S., Guimarães, J. R. D., Coutinho, R., e Candella, R. N. (2012). Biophysical interactions in the Cabo Frio upwelling system, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 60(3):353–365.
- Conner, A. M., Francfort, J. E., e Rinehart, B. N. (1998). U.S. Hydropower Resource Assessment Final Report. Technical report, Prepared for the U.S. Department of Energy Under DOE Idaho Operations Office Contract DE-AC07-94ID13223, Idaho Falls.
- Contestabile, P., Ferrante, V., e Vicinanza, D. (2015). Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina (Brazil). *Energies*, 8(12):14219–14243.
- Cooper, A. J. e Day, K. (2015). TELEMAC-3D and Hydrostatic Inconsistency. In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXII TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 65–69, Warrington, UK. Science and Technology Facilities Council.
- Copping, A., Sather, N., Hanna, L., Whiting, J., Zydlewski, G., Staines, G., Gill, A., Hutchison, I., O'hagan, A. M., Simas, T., Bald, J., Sparling, C., Wood, J., e Masden, E. (2016). Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. Technical report, Implementing Agreement on Ocean Energy Systems.
- Cordier, F., Tassi, P., Jodeau, M., e Camenen, B. (2015). Large-scale morphodynamics structures in the Arc en Maurienne River (France). In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXII TELEMAC-*

- MASCARET User Conference*, pages 9–17, Warrington, UK. Science and Technology Facilities Council.
- Cornett, A. (2006). Inventory of Canada's Marine Renewable Energy Resources. Technical report, CHC, Ottawa.
- Cornett, A. M. (2008). A Global Wave Energy Resource Assessment. In *Proceedings of ISOPE*, volume 8, page 9.
- Costa, R. L. e Moller, O. O. (2011). Study of the structure and variability of currents in the area of the inner shelf off Rio Grande (RS, Brazil), southwest of the South Atlantic during spring-summer 2006-2007. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 11(3):273–281.
- Costi, J., Marques, W., Kirinus, E., Duarte, R., e Arigony-Neto, J. (2017). Water level variability of the Mirim - São Gonçalo, a large subtropical semi-enclosed coastal system. *Journal of hydrology*, in press:1–16.
- Cox, A., Cardone, V., e Swail, V. (1999). On the use of in-situ and satellite wave measurements for evaluation of wave hindcasts. In *Preprints, WMO Workshop on Advances in Marine Climatology - CLIMAR 99*, pages 130–138, Vancouver, Canada. Atmospheric Environment Service.
- Cummings, J. e Carroll, S. (2006). Software User's Manual for the Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) System. Technical report, Naval Research Laboratory, Monterey, CA.
- da Silva, D. V. (2018). *em preparação*. PhD thesis.
- da Silva, M. (2003). *A Frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: climatologia e previsibilidade*. Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- da Silveira, I. C. A., Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., de Godoi, S. S., e Ikeda, Y. (2000). A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48(2):171–183.
- Dabernig, M., Mayr, G. J., e Messner, J. W. (2015). Predicting Wind Power with Reforecasts. *Weather and Forecasting*, 30(6):1655–1662.

- de Mahiques, M. M., Mishima, Y., e Rodrigues, M. (1999). Characteristics of the sedimentary organic matter on the inner and middle continental shelf between Guanabara Bay and São Francisco do Sul, southeastern Brazilian margin. *Continental Shelf Research*, 19(6):775–798.
- de Mahiques, M. M., Sousa, S. H. d. M. e., Furtado, V. V., Tessler, M. G., Toledo, F. A. d. L., Burone, L., Figueira, R. C. L., Klein, D. A., Martins, C. C., e Alves, D. P. V. (2010). The Southern Brazilian shelf: general characteristics, quaternary evolution and sediment distribution. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(spe2):25–34.
- de Souza, R. B. e Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. *Continental Shelf Research*, 24(2):241–262.
- Defne, Z. (2010). *Multi-Criteria assessment of wave and tidal power along the Atlantic coast of the southeastern USA*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology.
- Defne, Z., Haas, K. A., e Fritz, H. M. (2009). Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. *Renewable Energy*, 34(10):2197–2205.
- Defne, Z., Haas, K. A., e Fritz, H. M. (2011a). GIS based multi-criteria assessment of tidal stream power potential: A case study for Georgia, USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5):2310–2321.
- Defne, Z., Haas, K. A., e Fritz, H. M. (2011b). Numerical modeling of tidal currents and the effects of power extraction on estuarine hydrodynamics along the Georgia coast, USA. *Renewable Energy*, 36(12):3461–3471.
- Defne, Z., Haas, K. A., Fritz, H. M., Jiang, L., French, S. P., Shi, X., Smith, B. T., Neary, V. S., e Stewart, K. M. (2012). National geodatabase of tidal stream power resource in USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5):3326–3338.
- Delle Monache, L., Nipen, T., Liu, Y., Roux, G., e Stull, R. (2011). Kalman Filter and Analog Schemes to Postprocess Numerical Weather Predictions. *Monthly Weather Review*, 139(11):3554–3570.
- Dereczynski, C. P. e Menezes, W. F. (2015). Meteorologia da Bacia de Campos. In Martins, R. P. e Grossman-Matheson, G. S., editors, *Caracterização ambiental regional da Bacia de Campos*,

Atlântico Sudoeste: Meteorologia e Oceanografia. Habitats, chapter 1, pages 1–54. Elsevier Ltd, Rio de Janeiro, Brazil, v.2 edition.

Divett, T., Vennell, R., e Stevens, C. (2013). Optimization of multiple turbine arrays in a channel with tidally reversing flow by numerical modelling with adaptive mesh. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1985):20120251–20120251.

Dolman, S. e Simmonds, M. (2010). Towards best environmental practice for cetacean conservation in developing Scotland's marine renewable energy. *Marine Policy*, 34(5):1021–1027.

Dorfmann, C., Harb, G., e Zenz, G. (2012). Simulation of hydrodynamic and sediment transport processes – Two Austrian case studies. In Bourban, S., Durand, N., e Hervouet, J.-M., editors, *XIX TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 45–50, Oxford, Inglaterra. HR Wallingford.

dos Santos, E. D. (2011). *Análise numérica de escoamentos turbulentos não reativos com transferência de calor por convecção e radiação térmica em meios participantes*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

dos Santos, R. B. (2009). *Estudo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para a plataforma continental sul do Brasil*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande.

Dottori, M. e Castro, B. M. (2009a). The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics*, 59(4):603–614.

Dottori, M. e Castro, B. M. (2009b). The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics*, 59(4):603–614.

Douglas, C. A., Harrison, G. P., e Chick, J. P. (2008). Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, volume 222, pages 1–12. v. 222.

Edwards, E., Cradden, L., Ingram, D., e Kalogeri, C. (2014a). Verification within wave resource assessments. Part 1: Statistical analysis. *International Journal of Marine Energy*, 8:50–69.

Edwards, E., Cradden, L., Ingram, D., e Kalogeri, C. (2014b). Verification within wave resource assessments. Part 1: Statistical analysis. *International Journal of Marine Energy*, 8:50–69.

- Egbert, G. D. e Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *American Meteorological Society*, 19:183–204.
- Elias, L. M. C. (2009). *Variabilidade interanual da ressurgência de cabo frio - RJ*. Master, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- EMEC (2005). Environmental impact assessment (EIA) guidance for developers at the European Marine Energy Centre. page 22.
- Energy, B. (2008a). Tidal power. Available from: www.bluenergy.com.
- Energy, L. (2008b). Renewables boost as Lunar Energy seals £500 m deal. Available from: <http://www.lunarenergy.co.uk/News.php>.
- Energy, O. F. (2008c). Development status. Available from: <http://www.oceanflowenergy.com/development-status.htm>.
- Energy, T. (2008d). DeltaStream concept. Available from: <http://www.tidalenergyltd.com/technology.htm>.
- EPA (2005). State CO₂ Emissions from Fossil Fuel Combustion. Technical report, Environmental Protection Agency.
- EPE (2017). Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro.
- EPRI (2006). Tidal power in North America Environmental and Permitting Issues. Technical report, Devine Tarbell & Associates Inc., Electric Power Research Institute's . EPRI-TP-007-NA.
- Espindola, R. L. e Araújo, A. M. (2017). Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. *PLOS ONE*, 12(8):e0183501.
- Esteban, M. e Leary, D. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*, 90(1):128–136.
- Fairley, I., Smith, H., Robertson, B., Abusara, M., e Masters, I. (2017). Spatio-temporal variation in wave power and implications for electricity supply. *Renewable Energy*.

- Falcão, A. (2008). The development of wave energy utilisation. Technical report, IEA-OES Annual Report2008, Lisboa, Portugal.
- Fallon, D., Hartnett, M., Olbert, A., e Nash, S. (2014). The effects of array configuration on the hydro-environmental impacts of tidal turbines. *Renewable Energy*, 64:10–25.
- Feder, T. (2000). Argo Begins Systematic Global Probing of the Upper Oceans. *Physics Today*, 53(7):50–51.
- Fernandes, A. C. e Rostami, A. B. (2015). Hydrokinetic energy harvesting by an innovative vertical axis current turbine. *Renewable Energy*, 81:694–706.
- Fernandes, E., Dyer, K., Moller, O., e Niencheski, L. (2002). The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, 22(11-13):1699–1713.
- Fernandes, E. H. L., Dyer, K. R., e Möller Jr, O. O. (2001). On the hydrodynamics of the world's largest choked coastal lagoon: Patos Lagoon (Brazil). *Estuaries*.
- Finkl, C. W. e Charlier, R. (2009). Electrical power generation from ocean currents in the Straits of Florida: Some environmental considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9):2597–2604.
- Flather, R. A. (1976). Results from surge prediction model of the North-West European continental shelf for April, November and December 1973. Technical report, Institute of Oceanography (UK), Report n° 24.
- Folley, M., Babarit, A., Child, B., Forehand, D., Boyle, L., Silverthorne, K., Spinneken, J., Stratigaki, V., e Troch, P. (2012). A Review of Numerical Modelling of Wave Energy Converter Arrays. In *Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE)*, pages 535–545, Rio de Janeiro, Brazil.
- Fox, D. G. (1981). Judging Air Quality Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 62:599–609.
- Fraenkel, P. L. (2007). Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters. In *Proceedings of IMechE Part M A Journal of Power and Energy*, pages 159–169.

- Franco-Fraguas, P., Burone, L., Mahiques, M., Ortega, L., Urien, C., Muñoz, A., López, G., Marin, Y., Carranza, A., Lahuerta, N., e de Mello, C. (2014). Hydrodynamic and geomorphological controls on surface sedimentation at the Subtropical Shelf Front / Brazil–Malvinas Confluence transition off Uruguay (Southwestern Atlantic Continental Margin). *Marine Geology*, 349:24–36.
- Garret, C. J. R. e Bretherton, F. P. (1969). Wave trains in inhomogeneous moving media. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 302:529–554.
- Garrett, C. e Cummins, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 588:243–251.
- Generation, P. (2008). Hydrofoils or turbines. Available from: <http://www.pulsetidal.com/?q=node/25>.
- Giles, J., Myers, L., Bahaj, A., e Shelmerdine, B. (2011). The downstream wake response of marine current energy converters operating in shallow tidal flows. In *World Renewable Energy Congress*, pages 2270–2277, Linköping, Sweden. Marine and Ocean Technology.
- Goll, A., Brudy-Zippelius, T., e Kopmann, R. (2011). Numerical modelling of bed formes (dunes) with TELEMAC3D and SISYPHE. In Violeau, D., Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., e Denis, C., editors, *Proceedings of the XVIII Telemac and Mascaret User Club*, pages 16–21, Chateau, France.
- Goll, A. e Kopmann, R. (2012). Dune simulation with TELEMAC-3D and SISYPHE: A parameter study. In Bourban, S., Durand, N., e Hervouet, J.-M., editors, *XIX TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 19–25, Oxford, Inglaterra. HR Wallingford.
- Goll, A., Kopmann, R., e Villaret, C. (2013). Numerical Modelling of flumes with moving dunes – TELEMAC3D and Sisyphé. In *Marine and River Dune Dynamics – MARID IV*, pages 127–128, Bruges, Belgium.
- González-Gorbeña, E., Qassim, R. Y., e Rosman, P. C. (2016). Optimisation of hydrokinetic turbine array layouts via surrogate modelling. *Renewable Energy*, 93:45–57.
- Gordon, A. (1989). Brazil-Malvinas Confluence 1984. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research*, 36(3):359–361.

- Gorlov, A. (2001). Tidal Energy. *Elements of Physical Oceanography: A Derivative of the Encyclopedia of Ocean*, pages 2955–2960.
- Gorlov, B. A. (2010). Helical Turbine and Fish Safety. pages 1–14.
- Goundar, J. N. e Ahmed, M. R. (2014a). Marine current energy resource assessment and design of a marine current turbine for Fiji. *Renewable Energy*, 65:14–22.
- Goundar, J. N. e Ahmed, M. R. (2014b). Marine current energy resource assessment and design of a marine current turbine for Fiji. *Renewable Energy*, 65:14–22.
- Grabbe, M., Lalander, E., Lundin, S., e Leijon, M. (2009). A review of the tidal current energy resource in Norway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8):1898–1909.
- Gross, R. (2004). Technologies and innovation for system change in the UK: Status, prospects and system requirements of some leading renewable energy options. *Energy Policy*, 32(17):1905–1919.
- Guerrero, R. a., Acha, E. M., Framin~an, M. B., e Lasta, C. a. (1997). Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*, 17(7):727–742.
- Guimarães, P. V., Farina, L., e Toldo Jr., E. E. (2014). Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(12):3195–3205.
- Güney, M. S. e Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9):2996–3004.
- Hagerman, G., Polagye, B., Bedard, R., e Previsic, B. (2006). Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by tidal in-stream energy conversion (TISEC) devices. Technical report, Rep. EPRI-TP-001 NA Rev 2, Electr. Power Res. Inst., Palo Alto, CA.
- Haimovici, M., Castello, J., e Vooren, C. (1998). Pescarias. In Seeliger, U., Odebrecht, C., e Castelo, J. P., editors, *Os Ecossistemas Costeiro e Marinho do Extremo Sul do Brasil*, pages 205–218. Ecoscientia.
- Halkin, D. e Rossby, T. (1985). The Structure and Transport of the Gulf Stream at 73°W. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11):1439–1452.

- Hall, D. (2006). Feasibility Assessment of Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants. Technical Report January, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind and Hydropower Technologies Program, Idaho Operations Office.
- Hallak, R. e Filho, A. J. P. (2011). Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de são paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(4):591–608.
- Hammons, T. J. (1993). Tidal Power. In *Proceedings of the IEEE*, pages 419–433.
- Harari, J. e de Camargo, R. (1998). Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 46(2):135–156.
- Harari, J., de Camargo, R., e Cacciari, P. L. (2000). Resultados da modelagem numérica hidrodinâmica em simulações tridimensionais das correntes de maré na baixada santista. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 5(2):71–87.
- Hardisty, J. (2009). *The Analysis of Tidal Stream Power*. John Wiley & Sons, Ltd, The University of Hull, Kingston-upon-Hull, UK.
- Hervouet, J. M. (2007). Free surface flows: Modelling with the finite element methods.
- Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., e Villaret, C. (2011). Dealing with Dry Zones in Free Surface Flows: A New Class of Advection Schemes. In Valentine, E., Apelt, C., Ball, J., Chanson, H., Cox, R., Ettema, R., Kuczera, G., Lambert, M., Melville, B., e Sargison, J., editors, *34th World Congress of the International Association for Hydro- Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering*, pages 4103–4110. Barton, A.C.T.: Engineers Australia.
- Hervouet, J. M. e Van Haren, L. (1996). Recent advances in numerical methods for fluid flows. In Anderson, M. G., Walling, D. E., e Bates, P. D., editors, *Floodplain processes*, pages 183–214. Wiley, Chichester.

- Hobday, R. A. e Probert, D. (1990). The Need for Less Misleading Energy-Supply Accountancy. *Applied Energy*, 35:73–77.
- Hong, Y., Waters, R., Boström, C., Eriksson, M., Engström, J., e Leijon, M. (2014). Review on electrical control strategies for wave energy converting systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31:329–342.
- Huybrechts, N., Villaret, C., e Hervouet, J.-M. (2010). Comparison between 2D and 3D modelling of sediment transport: application to the dune evolution. In Dittrich, Koll, Aberle, e Geisenhainer, editors, *River Flow*, pages 887–893, Braunschweig, Germany. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Hydrovision, S. M. D. (2008). Tidel stream generator; 2008. Available from: <http://smd.co.uk/products/>.
- IBGE (2010). Censo 2010.
- Jacoub, G., Stansby, P., Hervouet, J.-M., Villaret, C., e Benoit, M. (2007). Offshore sandbank morphodynamics modelling with sea level rise. In *2nd IMA International Conference on Flood Risk Assessment*, pages 1–10, Plymouth. Eugene Kidwell.
- Jama, M. A., Noura, H., Wahyudie, A., e Assi, A. (2015). Enhancing the performance of heaving wave energy converters using model-free control approach. *Renewable Energy*, 83:931–941.
- Janssen, P. A. E. M., Hansen, B., e Bidlot, J.-R. (1997). Verification of the ECMWF Wave Forecasting System against Buoy and Altimeter Data. *American Meteorological Society*, 12:763–784.
- Jia, M., Tassi, P., e Huybrechts, N. (2015). Numerical study of the influence of waves and tidal currents on the sediment dynamics in the vicinity of the Somme Bay area (France). In Moulinet, C. e Emerson, D. R., editors, *XXIth TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 28–35, Warrington, UK. STFC Daresbury Laboratory.
- Julien, P. (2010). *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition.
- Kalnay, E. e Kanamitsu, M. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Technical report, Bulletin of the American Meteorological Society.
- Kepler (2017). Kepler Energy. <http://www.keplerenergy.co.uk/index.html>.

- Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M., e Quaicoe, J. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10):1823–1835.
- Khan, M. J. Ã., Iqbal, M. T., e Quaicoe, J. E. (2008). River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(8):2177–2193.
- Khan, M. N. I., Hijbeek, R., Berger, U., Koedam, N., Grueters, U., Islam, S. M. Z., Hasan, M. A., e Dahdouh-Guebas, F. (2016). An Evaluation of the Plant Density Estimator the Point-Centred Quarter Method (PCQM) Using Monte Carlo Simulation. *PLOS ONE*, 11(6):e0157985.
- Khandekar, M. (1989). *Operational Analysis and Prediction of Ocean Wind Waves*, volume 33 of *Coastal and Estuarine Studies*. American Geophysical Union, Washington, D. C., 1 edition.
- Khandekar, M. (1998). Operational Wave Models. In *Guide to wave analysis and forecasting*, chapter 6, pages 67–80. World Meteorological Association, Geneva, Switzerland, 2 edition.
- Kirinus, E. d. P. e Marques, W. C. (2015a). Viabilidade do uso de turbinas hidrocínéticas na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira. *Scientia Plena*, 11(8):1–10.
- Kirinus, E. d. P. e Marques, W. C. (2015b). Viability of the application of marine current power generators in the south Brazilian shelf. *Applied Energy*, 155:23–34.
- Kirinus, E. d. P., Marques, W. C., da Costa, J. C., e Fernandes, E. H. L. (2012). The Contribution of Waves in Mixing Processes of the Patos Lagoon Plume. *International Journal of Geosciences*, 03(05):1019–1026.
- Kirinus, E. d. P., Marques, W. C., Jung, B. M., Stringari, C. E., e Matzenauer, H. B. (2015). Evaluating current power availability for energy conversion along the Southern Brazilian Shelf. *International Journal of Marine Energy*, 10:97–112.
- Kirinus, E. d. P., Stringari, C. E., Marques, W. C., e Matzenauer, H. B. (2013). Harvesting the currents power on the Southern Brazilian Shelf. In Kopmann, R. e Goll, A., editors, *XX TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 71–76, Karlsruhe, Germany. BAW.
- Kirinus, E. P., Oleinik, P. H., e Marques, W. C. (2017). Into the long-term simulation for coastal ocean energy exploitation. *Applied Energy*, in prep.

- Koch, F. e Flokstra, C. (1981). Bed level computations for curved alluvial channels. In *XIXth Congress of the International Association for Hydraulic Research*, New Delhi, India.
- Kolekar, N. e Banerjee, A. (2015). Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. *Applied Energy*, 148:121–133.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., e Janssen, P. A. E. M. (1996). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, New York, 1 edition.
- Kopmann, R., Goll, A., e Tassi, P. (2013). Practice of sediment transport modelling: suspended sediment transport. In Kopmann, R. e Goll, A., editors, *XX TELEMAC-MASCARET User Conference*, page 56, Karlsruhe, Germany. BAW.
- Kopmann, R. e Markofsky, M. (2000). Three-dimensional water quality modelling with TELEMAC-3D. *Hydrological Processes*, 14:2279–2292.
- Kousky, V. E. (1988). Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 3:217–231.
- Lalbeharry, R. (2002). Evaluation of the CMC regional wave forecasting system against buoy data. *Atmosphere-Ocean*, 40(1):1–20.
- Lavidas, G., Venugopal, V., e Friedrich, D. (2017). Wave energy extraction in Scotland through an improved nearshore wave atlas. *International Journal of Marine Energy*, 17:64–83.
- Leaman, K. D., Molinari, R. L., e Vertes, P. S. (1987). Structure and Variability of the Florida Current at 27°N: April 1982–July 1984. *Journal of Physical Oceanography*, 17(5):565–583.
- Lee, J. H., Park, S., Kim, D. H., Rhee, S. H., e Kim, M. C. (2012). Computational methods for performance analysis of horizontal axis tidal stream turbines. *Applied Energy*, 98:512–523.
- Lefèvre, F., Lyard, F. H., Le Provost, C., e Schrama, E. J. O. (2002). FES99: A Global Tide Finite Element Solution Assimilating Tide Gauge and Altimetric Information. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(9):1345–1356.

- Legates, D. R. e McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1):233–241.
- Lemos, A. T. (2006). *Modelagem numérica da maré barotrópica na costa do Espírito Santo*. Monografia, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Lentini, C., Podestá, G., Campos, E., e Olson, D. (2001). Sea surface temperature anomalies on the Western South Atlantic from 1982 to 1994. *Continental Shelf Research*, 21(1):89–112.
- Lesser, G., Roelvink, J., van Kester, J., e Stelling, G. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9):883–915.
- Leupi, C., Altinakar, M. S., e Deville, M. (2008). Numerical modeling of cohesive sediments dynamics in estuaries: Part I—Description of the model and simulations in the Po River Estuary. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 57(3):237–263.
- Li, J. e Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3-4):228–241.
- Li, Y. e Çalısıl, S. M. (2009). Numerical analysis of the characteristics of vertical axis tidal current turbines. *Renewable Energy*, 35(2):435–442.
- Li, Y. e Calısıl, S. M. (2010). Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine. *Renewable Energy*, 35(10):2325–2334.
- Lisboa, R. C., Teixeira, P. R., e Fortes, C. J. (2017). Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. *Energy*, 121:176–184.
- Liu, Y., Liang, X. S., e Weisberg, R. H. (2007). Rectification of the bias in the wavelet power spectrum. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(12):2093–2102.
- Loder, J., Boicourt, W., e Simpson, J. (1998). Western ocean boundary shelves coastal segment (W). In Robinson, A. e Brink, K., editors, *The Sea*, pages 3–27. John Wiley & Sons, Inc, New York, volume 11 edition.
- Lopes, M. C. (2013). Eletroquímica computacional - princípios e diretrizes para utilização. *Química Nova*, 36(9):1423–1429.

- Lövstedt, C. B. e Almström, B. (2015). An End User Perspective on the Telemac Suite in Coastal Application. In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXII TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 2–7, Warrington, UK. Science and Technology Facilities Council.
- Lowcher, C. F., Muglia, M., Bane, J. M., He, R., Gong, Y., e Haines, S. M. (2017). Marine Hydrokinetic Energy in the Gulf Stream Off North Carolina: An Assessment Using Observations and Ocean Circulation Models. In Yang, Z. e Copping, A., editors, *Marine Energy Renewable: Resource Characterization and Physical Effects*, chapter 10, pages 237–258. Springer, Seattle, WA, 1 edition.
- Maciel, A. d. O. e Stella, N. A. M. (2012). *Estudos em CFD da reação de reforma para produção de hidrogênio*. Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Maerker, C., Malcherek, A., Riemann, J., e Brudy-Zippelius, T. (2011). Modelling and analysing dredging and disposing activities by use of Telemac, Sisyphé and DredgeSim. In Violeau, D., Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., e Denis, C., editors, *Telemac User Conference*, pages 92–98, Chateau, France. EDF.
- Malandrin, D. A., Vidal, F., Franco, G. M., Nocetti, M., Sizani, R., e de Quadro, M. F. L. (2007). *Climatologica Eólica de Santa Catarina*. PhD thesis.
- Malki, R., Masters, I., Williams, A. J., e Nick Croft, T. (2014). Planning tidal stream turbine array layouts using a coupled blade element momentum – computational fluid dynamics model. *Renewable Energy*, 63:46–54.
- Maniatis, G., Hoey, T. B., Hassan, M. A., Sventek, J., Hodge, R., Drysdale, T., e Valyrakis, M. (2017). Calculating the Explicit Probability of Entrainment Based on Inertial Acceleration Measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4):04016097.
- Marines, F. E. (2013). Guide to the environmental impact evaluation of tidal stream technologies at sea : GHYDRO. Technical report, EDF, IFREMER, DCNS.
- Marques, W., Stringari, C., Kirinus, E., Möller, O., Toldo, E., e Andrade, M. (2017). Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil—Case study for January 2012 event. *Applied Ocean Research*, 65:178–191.

- Marques, W. C. (2005). Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos , Rio Grande do Sul, Brasil. page 118.
- Marques, W. C. (2012). The temporal variability of the freshwater discharge and water levels at the Patos Lagoon, Brazil. *International Journal of Geosciences*.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H., Monteiro, I. O., e Möller, O. O. (2009). Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, 29(3):556–571.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., Malcherek, A., e Rocha, L. A. O. (2012). Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and morphodynamic processes. *Journal of Geophysical Research*, 1(3):61–85.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., e Moller, O. O. (2010a). Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 115(C6).
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., Moraes, B. C., Möller, O. O., e Malcherek, A. (2010b). Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(10):C10045.
- Marques, W. C., Stringari, C. E., e Eidt, R. T. (2014). The Exchange Processes of the Patos Lagoon Estuary – Brazil: A Typical El Niño Year versus a Normal Meteorological Conditions Year. *Advances in Water Resource and Protection*, 2:11–20.
- Mascarenhas Jr., A., Miranda, L., e Rock, N. (1971). A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. In Costlow, J., editor, *Fertility of the Sea*, pages 285–308. Gordon & Breach, New York.
- Matacena, E. (2002). Kobold. www.pontediarchimede.com.
- Matano, R. P., Palma, E. D., e Piola, A. R. (2010). The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. *Ocean Science*, 6(4):983–995.
- Maximova, T., Smolders, S., e Vanlede, J. (2015). Model calibration against different types of velocity data with a dimensionless cost function: application to the Scaldis model of the Scheldt estuary.

- In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXII TELEMAR-MASCARET User Conference*, pages 160–167, Warrington, UK. Science and Technology Facilities Council.
- McCave, I. (1982). Erosion and deposition by currents on submarine slopes. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, 31:47–55.
- MCT, M. C. T. (2008). SeaGen completed: World's First Megawatt scale tidal turbine installed. Available from: www.marineturbines.com.
- Mei, C. C. (1983). *The applied dynamics of ocean surface waves*. John Wiley & Sons, New York.
- Mellor, G. L. (2004). User's guide for a three dimensional, primitive equation numerical ocean model. Technical report, Princeton University, Princeton.
- Melo, E., Hammes, G. R., Franco, D., e Romeu, M. A. R. (2008). Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina. In *Anais do III SEMENGO: Seminário e Workshop em Engenharia Oceanica*, Rio Grande.
- Melo, E., Romeu, M., e Hammes, G. (2010). Condições extremas de agitação marítima ao largo de Rio Grande a partir do modelo WW3. In *IV Seminário e Workshop em Engenharia Oceanica*, pages 1–20.
- Mendes, J. C. (1994). *Elementos de estratigrafia*.
- Meyer-Peter, E. e Muller, R. (1948). Formulas for Bed-Load transport. In *International Association for Hydraulic Structures Research*, pages 39–64, Stockholm, Sweden.
- Michaelovitch de Mahiques, M., Almeida da Silveira, I. C., de Mello e Sousa, S. H., e Rodrigues, M. (2002). Post-LGM sedimentation on the outer shelf–upper slope of the northernmost part of the São Paulo Bight, southeastern Brazil. *Marine Geology*, 181(4):387–400.
- Mohamed, A. M. A., Al-Habaibeh, A., e Abdo, H. (2013). An investigation into the current utilisation and prospective of renewable energy resources and technologies in Libya. *Renewable Energy*, 50:732–740.
- Möller, O. O. J., Piola, A. R., Freitas, A. C., e Campos, E. J. D. (2008). The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental Shelf Research*.

- Möller Jr., O. e Castaing, P. (1999). Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil). In *Estuaries of South America-Their Geomorphology and Dynamics*, pages 83–100.
- Molyneaux, L., Froome, C., Wagner, L., e Foster, J. (2013). Australian power: Can renewable technologies change the dominant industry view? *Renewable Energy*, 60:215–221.
- Monteiro, C. B., Kirinus, E. d. P., Marques, W. C., Oleinik, P. H., e Costi, J. (2017). Analysis of Two Oil Spills in the Southern Brazilian Shelf, in the Years of 2012 and 2014. *Defect and Diffusion Forum*, 372:70–80.
- Morettin, P. A. (2004). *Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas*. Edusp, São Paulo.
- Myers, L. e Bahaj, A. S. (2005). Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race. *Renewable Energy*, 30(11):1713–1731.
- Myers, L. E. e Bahaj, A. S. (2012). An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays. *Renewable Energy*, 37(1):28–36.
- Nagai, R., Ferreira, P., Mulkherjee, S., Martins, M., Figueira, R., Sousa, S., e Mahiques, M. (2014). Hydrodynamic controls on the distribution of surface sediments from the southeast South American continental shelf between 23°S and 38°S. *Continental Shelf Research*, 89:51–60.
- Nagy, K. e Körmendi, K. (2012). Use of renewable energy sources in light of the New Energy Strategy for Europe 2011-2020. *Applied Energy*, 96:393–399.
- Neill, S. P., Lewis, M. J., Hashemi, M. R., Slater, E., Lawrence, J., e Spall, S. a. (2014). Inter-annual and inter-seasonal variability of the Orkney wave power resource. *Applied Energy*, 132:339–348.
- Neill, S. P., Robins, P. E., e Fairley, I. (2017). The Impact of Marine Renewable Energy Extraction on Sediment Dynamics. In Yang, Z. e Copping, A., editors, *Marine Energy Renewable: Resource Characterization and Physical Effects*², chapter 12, pages 279–304. Springer, Seattle, WA, 1 edition.

- Newbery, D. M. (2016). Towards a green energy economy? The EU Energy Union 's transition to a low-carbon zero subsidy electricity system – Lessons from the UK's Electricity Market Reform. *Applied Energy*, 179:1321–1330.
- Ng, K.-W., Lam, W.-H., e Ng, K.-C. (2013). 2002–2012: 10 Years of Research Progress in Horizontal-Axis Marine Current Turbines. *Energies*, 6(3):1497–1526.
- Normant, C. L. (2000). Three-dimensional modelling of cohesive sediment transport in the Loire estuary. *Hydrological Processes*, 14(13):2231–2243.
- O'Rourke, F., Boyle, F., e Reynolds, A. (2010). Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2):398–409.
- Obara, S., Kawai, M., Kawae, O., e Morizane, Y. (2013). Operational planning of an independent microgrid containing tidal power generators, SOFCs, and photovoltaics. *Applied Energy*, 102:1343–1357.
- OES (2016). Annual Report: Ocean Energy Systems. Technical report, The Executive Committee of Ocean Energy Systems.
- Oleinik, P. H., Marques, W. C., e Kirinus, E. d. P. (2017). Evaluation of the Seasonal Pattern of Wind-Driven Waves on the South-Southeastern Brazilian Shelf. *Defect and Diffusion Forum*, 370:141–151.
- Oleinik, P. H., Marques, W. C., Kirinus, E. D. P., e Hodapp, M. J. (2018). Energetic potential assessment of wind-driven waves on the South-Southeastern Brazilian shelf. *Renewable Energy*, (in press):22.
- Oliveira, A. (1986). *Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia*. Master thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Oliveira, F. S. B. F. (2002). Wave climate modelling south of Rio de Janeiro in Brazil. *Continental Shelf Research*, 22(14):2021–2034.
- OpenHydro (2008). OpenHydro becomes first tidal energy company to generate electricity onto the UK National Grid. Available from: www.openHydro.com.

- Ortega-Achury, S. L., McAnally, W. H., Davis, T. E., e Martin, J. L. (2010). Hydrokinetic Power Review. Technical report.
- Palma, E. D. e Matano, R. P. (2009). Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research*, 29(11-12):1525–1534.
- Parise, C. K., Calliari, L. J., e Krusche, N. (2009). Extreme Storm Surges in the South of Brazil : Atmospheric Conditions and Shore Erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3):1–23.
- Parkinson, S. C. e Djilali, N. (2015). Long-term energy planning with uncertain environmental performance metrics. *Applied Energy*, 147:402–412.
- Pavanate, A. L. e Fleischfresser, L. (2016). Análise sazonal dos ventos de superfície utilizando estação meteorológica automática. *Revista Brasileira de Geomática*, 5(2):1–19.
- Pelinovsky, E. e Kharif, C. (2016). *Extreme Ocean Waves*. Springer International Publishing, Cham.
- Pereira, J. T. B., Kirinus, E. d. P., Marques, W. C., Gandra, T. B. R., de Barros, G. P., e Matzenauer, H. B. (2014). Exploring the Project Potential of Marine Current Turbines: A Case Study in the Southern Brazilian Shelf Region. *International Journal of Geosciences*, 05(13):1547–1560.
- Pereira, L. M. P., Caramori, P. H., Ricce, W. D. S., Silva, D. A. B., Ely, D. F., Galdino, J., e Costa, A. B. D. (2009a). Caracterização do regime de ventos no estado do Paraná. In *XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, pages 1–5, Belo Horizonte - Brazil.
- Pereira, M. D., Schettini, C. A. F., e Omachi, C. Y. (2009b). Caracterização de feições oceanográficas na plataforma de Santa Catarina através de imagens orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(1):81–93.
- Pereira, N. E. d. S. (2013). *Análise de parâmetros hidrodinâmicos e da clorofila a no Atlântico Sul e Tropical a partir de modelagem numérica e observações remotas*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.
- Pezza, A. B. e Ambrizzi, T. (2003). Variability of Southern Hemisphere Cyclone and Anticyclone Behavior: Further Analysis. *Journal of Climate*, 16(7):1075–1083.

- Pham, C.-t., Bourban, S., Durand, N., e Turnbull, M. (2013). *Méthodologie pour la simulation de la marée avec la version 6.2 de TELEMAC-2D et TELEMAC-3D*. Technical report, EDF, Chateau, France.
- Pham, C.-T. e Joly, A. (2016). *TELEMAC MODELLING SYSTEM: TELEMAC-3D Software - OPERATING MANUAL*. Technical report, EDF, Chateau, France.
- Pham, C.-T. e Lyard, F. (2012). Use of tidal harmonic constants databases to force open boundary conditions in TELEMAC. In Bourban, S., Durand, N., e Hervouet, J.-M., editors, *XIX TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 165–172, Oxford, Inglaterra. HR Wallingford.
- Phillips, O. M. (1977). *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press, Cambridge, second edi edition.
- Pianca, C., Mazzini, P. L. F., e Siegle, E. (2010). Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1):53–70.
- Piola, A. e Matano, R. (2001). Brazil and Falklands (Malvinas) currents.
- Piola, A. R., Campos, E. J. D., Möller Jr, O. O., Charo, M., e Martinez, M. (1999). Continental shelf water masses off eastern South America – 20° to 40°S. In *X SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGES STUDIES*, pages 446–449, Dallas.
- Piola, A. R., Matano, R. P., Palma, E. D., Moller, J. O. O., e Campos, E. J. D. (2005). The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32(1):1–4.
- Piola, A. R., Möller, O. O., Palma, E. D., e Grande, M. (2004). El impacto del Plata sobre el océano Atlántico. *Ciencia Hoy*, 82:28–39.
- Piola, A. R., Romero, S. I., e Zajackovski, U. (2008). Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color. *Continental Shelf Research*, 28(13):1556–1567.
- Plew, D. R. e Stevens, C. L. (2013). Numerical modelling of the effect of turbines on currents in a tidal channel - Tory Channel, New Zealand. *Renewable Energy*, 57:269–282.

- Podestá, G. (1997). Utilizacion de datos satelitarios en investigaciones oceanograficas y pesqueras en el oceano atlantico sudoccidental. In BOSCHI, E. E., editor, *El Mar Argentino y sus recursos pesqueros*, pages 195 – 222. Mar del Plata, Argentina.
- Policy, N. C. o. E. (2004). Ending the energy stalemate: A Bipartisan Strategy to Meet America's Energy Challenges. Technical report, Whashington D. C.
- Ponta, F. L. e Jacovkis, P. M. (2008). Marine-current power generation by diffuser-augmented floating hydro-turbines. *Renewable Energy*, 33(4):665–673.
- Pontes, M. T. (1998). Assessing the European Wave Energy Resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120(4):226.
- Pontes, M. T., Barstow, S., Bertotti, L., Cavaleri, L., e Oliveira-Pires, H. (1997). Use of Numerical Wind-Wave Models for Assessment of the Offshore Wave Energy Resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 119(3):184.
- Power, V. (2008). Verdant power's free flow turbines. Available from: <http://www.verdantpower.com/>.
- Price, T. e Probert, S. D. (1995). An Energy and Environmental Strategy for the Rhymney Valley , South Wales. *Applied Energy*, 51:139–195.
- Probert, D. (1975). Development of Small-Scale Benign Sources of Energy in France. Technical report, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology.
- Purwanto, W. W., Pratama, Y. W., Nugroho, Y. S., Warjito, Hertono, G. F., Hartono, D., Deendarlianto, e Tezuka, T. (2015). Multi-objective optimization model for sustainable Indonesian electricity system: Analysis of economic, environment, and adequacy of energy sources. *Renewable Energy*, 81:308–318.
- Ramírez-Mendoza, R., Amoudry, L., Thorne, P., Cooke, R., Simmons, S., McLelland, S., Murphey, B., Parsons, D., Jordan, L., e Vybulkova, L. (2015). Impact of Scaled Tidal Stream Turbine over Mobile Sediment Beds. In *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference*, pages 1–6, Nates, France.
- Reeve, S. G., Babus'Haq, R. F., e Probert, S. D. (1991). Electric-power generation in the UK. *Applied Energy*, 39(1):1–19.

- Refocus, R. E. (2008). Tidal power: an update.
- Reguero, B., Menéndez, M., Méndez, F., Mínguez, R., e Losada, I. (2012a). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65:38–55.
- Reguero, B., Menéndez, M., Méndez, F., Mínguez, R., e Losada, I. (2012b). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65:38–55.
- Reguero, B. G., Losada, I. J., e Méndez, F. J. (2015). A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability. *Applied Energy*, 148:366–380.
- Roberts, F. (1982). Energy accounting of river severn tidal power schemes. *Applied Energy*, 11(3):197–213.
- Robins, P. E., Neill, S. P., Lewis, M. J., e Ward, S. L. (2015). Characterising the spatial and temporal variability of the tidal-stream energy resource over the northwest European shelf seas. *Applied Energy*, 147:510–522.
- Rosana de Castro, C. (2009). *Estudo da variação sazonal na composição físico-química das massas de água da Plataforma Continental do Atlântico Sudoeste (PCASO) entre Mar del Plata (Argentina , 38° S) e Itajaí (SC , 26° S)*. Master thesis, Universidade Federal do Rio Grande.
- Rourke, F. O., Boyle, F., e Reynolds, A. (2010). Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3):1026–1036.
- Rüncos, F., Carlson, R., Kuo-Peng, P., Voltolini, H., e Batistela, N. J. (2005). Geração de energia eólica – tecnologias atuais e futuras. *Revista Eletricidade Moderna*, (figura 1):1–15.
- Ruopp, A., Daus, P., Biskup, F., e Riedelbauch, S. (2015). Performance prediction of a tidal in-stream current energy converter and site assessment next to Jindo, South Korea. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(6):061707.
- Sánchez, M., Carballo, R., Ramos, V., e Iglesias, G. (2014). Tidal stream energy impact on the transient and residual flow in an estuary: A 3D analysis. *Applied Energy*, 116:167–177.

- Santoro, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I., Tassi, P., Benoit, M., Huybrechts, N., e Bang, D. P. V. (2015). Hydrodynamic and fine sediment transport numerical modelling, application to the Rio de la Plata and Montevideo Bay. In Moulinec, C. e Emerson, D. R., editors, *XXII TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 119–126, Warrington, UK. Science and Technology Facilities Council.
- Sathiamoorthy, M. e Probert, S. D. (1994). The integrated Severn barrage complex: Harnessing tidal, wave and wind power. *Applied Energy*, 49(1):17–46.
- Schiller, R. V. e Kourafalou, V. H. (2010). Modeling river plume dynamics with the HYbrid Coordinate Ocean Model. *Ocean Modelling*, 33(1-2):101–117.
- Shields, M. A., Woolf, D. K., Grist, E. P. M., Kerr, S. A., Jackson, A. C., Harris, R. E., Bell, M. C., Beharie, R., Want, A., Osalusi, E., Gibb, S. W., e Side, J. (2011). Marine renewable energy: The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment. *Ocean and Coastal Management*, 54(1):2–9.
- Shirasawa, K., Tokunaga, K., Iwashita, H., e Shintake, T. (2016). Experimental verification of a floating ocean-current turbine with a single rotor for use in Kuroshio currents. *Renewable Energy*, 91:189–195.
- Silva, L. d. S., de Miranda, L. B., e de Castro Filho, B. M. (2005). Numerical study of circulation and thermohaline structure in the São Sebastião channel. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4).
- Silva, P. D., Marques, W. C., Leao, E. H. F., e Bizutti, R. D. S. (2012). Wave-Current Interaction in the Southern Brazilian Continental Shelf. *Continental Shelf Research*, (in press).
- Silveira, R. B., Alves, M. P. A., e Murara, P. (2012). Estudo de caracterização da direção predominante dos ventos no litoral de Santa Catarina. In *Anais do X Simpósio Brasileiros de Climatologia Geográfica*, pages 380–392.
- Singh, P. M. e Choi, Y.-D. (2014). Shape design and numerical analysis on a 1 MW tidal current turbine for the south-western coast of Korea. *Renewable Energy*, 68:485–493.
- Soares, I. e Jr, O. O. M. (2001). Low frequency currents and water mass spatial distribution on the Southern Brazilian shelf. *Continental Shelf Res.*, 21(16-17):1785–1814.

- Soares, I. D., Kourafalou, V., e Lee, T. N. (2007a). Circulation on the western South Atlantic continental shelf: 1. Numerical process studies on buoyancy. *Journal of Geophysical Research*, 112(C4):C04002.
- Soares, I. D., Kourafalou, V., e Lee, T. N. (2007b). Circulation on the western South Atlantic continental shelf: 2. Spring and autumn realistic simulations. *Journal of Geophysical Research*, 112(C4):C04003.
- Soomere, T. (2016). Extremes and Decadal Variations in the Baltic Sea Wave Conditions. In *Extreme Ocean Waves*, pages 107–140. Springer International Publishing, Cham.
- Souza, R. B. e Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. *Continental Shelf Research*, 24:241–262.
- Stech, J. L. e Lorenzzetti, J. A. (1992). The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research*, 97(C6):9507.
- Stramma, L. e England, M. (1999). On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9):20863–20883.
- Sufian, S. F., Li, M., e O'Connor, B. A. (2017). 3D modelling of impacts from waves on tidal turbine wake characteristics and energy output. *Renewable Energy*.
- Sweers, U. (1976). Monograms to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*, 30:375–401.
- Swisher, J. N., Jannuzz, G. S. D. M., e Redlinger, R. Y. (1997). Tools and methods for integrated resource planning: improving energy efficiency and protecting the environment.
- Taljaard, J. J. (1967). Development, Distribution and Movement of Cyclones and Anticyclones in the Southern Hemisphere During the IGY. *Journal of Applied Meteorology*, 6(6):973–987.
- Tassi, P. (2007). *Numerical modelling of river processes: Flow and river bed deformation*. Phd thesis, University of Twente.
- Tassi, P. e Villaret, C. (2014). Sisyphe v6.3 User's Manual. Technical report, EDF, Chateau, France.

- Technology, G. C. K. (2008). The Gorlov Helical Turbine. Available from: <http://www.gcktechnology.com/GCK/pg2.html>.
- Teegavarapu, R. S. V. (2013). *Floods in a Changing Climate. Extreme Precipitation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Thiébot, J., Bailly du Bois, P., e Guillou, S. (2015). Numerical modeling of the effect of tidal stream turbines on the hydrodynamics and the sediment transport – Application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France. *Renewable Energy*, 75:356–365.
- Thomson, R. E. e Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier, third edit edition.
- Timm, R. L. (2017). *Aplicação de Design Construtal para Avaliação Geométrica de Sítios de Conversão de Energia na Plataforma Continental Sul do Brasil*. Master thesis, Universidade Federal do Rio Grande.
- Toldo, E. J., Almeida, L., Dillenburg, S., Tabajara, L., e Borghetti, C. (1993). Parâmetros morfodinâmicos e deriva litorânea da praia de tramandaí - RS. In *GEOSUL 15*, pages 75–88.
- Tolman, H. L. (1991). A Third-Generation Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady, and Inhomogeneous Depths and Currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21(6):782–797.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D.C.
- TOMAWAC (2017). TOMAWAC: User manual. Technical report, EDF, Chateau, France.
- Torrence, C. e Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79(1):61–78.
- Truccolo, E. C. (2011). Assessment of the wind behavior in the northern coast of Santa Catarina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3):451–460.
- Tseng, R.-S., Chang, Y.-C., e Chu, P. C. (2017). Use of Global Satellite Altimeter and Drifter Data for Ocean Current Resource Characterization. In Yang, Z. e Copping, A., editors, *Marine Energy Renewable: Resource Characterization and Physical Effects*, chapter 7, pages 159–177. Springer, Seattle, WA, 1 edition.

- Tuomi, L., Pettersson, H., Fortelius, C., Tikka, K., Björkqvist, J.-V., e Kahma, K. K. (2014). Wave modelling in archipelagos. *Coastal Engineering*, 83:205–220.
- Turkenburg, W. C., Arent, D. J., Bertani, R., Faaij, A., Hand, M., Krewit, W., Larson, E. D., Lund, J., Mehos, M., Merrigan, T., Mitchell, C., Moreira, J. R., Sinke, W., Sonntag-O'Brien, V., Thresher, B., van Sark, W., Usher, E., e Usher, E. (2012). Renewable Energy. In Johansson, T. B., Patwardhan, A., Nakicenovic, N., e Gomez-Echeverri, L., editors, *The Global Energy Assessment: Toward a More Sustainable Future.*, chapter 12, pages 761–900. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1 edition.
- Valente de Souza, R. e Marques, W. C. (2016). Energy budget of the thermal gradient in the Southern Brazilian continental shelf. *Renewable Energy*, 91:531–539.
- Van, L. A. (2012). *Numerical modelling of sand-mud mixtures settling and transport processes : application to morphodynamic of the Gironde estuary (France)*. Phd thesis, Universite Paris-Est.
- van Loon, H. (1965). A climatological Study of the Atmospheric Circulation in the Southern Hemisphere during the IGY, Part I: 1 July 1957–31 March 1958. *Journal of Applied Meteorology*, 4(4):479–491.
- Vanem, E. (2013). *Bayesian Hierarchical Space–Time Models with Application to Significant Wave Height*. Springer, Oslo, Norway, ocean engi edition.
- Vannucchi, V. e Cappiotti, L. (2016). Wave Energy Assessment and Performance Estimation of State of the Art Wave Energy Converters in Italian Hotspots. *Sustainability*, 8(12):1300.
- VanZwieten, J. H., Duerr, A. E. S., Alsenas, G. M., e Hanson, H. P. (2013). Global ocean current energy assessment: an initial look. In *Proceedings of the 1st Marine Energy Technology Symposium (METS13)*, Washington D.C. 6th annual Global Marine Renewable Energy Conference.
- Vaz, A. C., O., M. J. O., e L., A. T. (2006). Sobre a descarga dos rios afluentes à Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 28:13–23.
- Vennell, R. (2011a). Estimating the power potential of tidal currents and the impact of power extraction on flow speeds. *Renewable Energy*, 36(12):3558–3565.

- Vennell, R. (2011b). Tuning tidal turbines in-concert to maximise farm efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, 671:587–604.
- Villaret, C., Hervouet, J.-M., Kopmann, R., Merkel, U., e Davies, A. G. (2013). Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Computers & Geosciences*, 53:105–113.
- Villaret, C., Huybrechts, N., e Davies, A. (2012). A large scale morphodynamic process-based model of the Gironde estuary. In *NCK-days 2012 : Crossing borders in coastal research : jubilee conference proceedings*, pages 68–76, Enschede, the Netherlands. University of Twente, Department of Water Engineering & Management.
- Villaret, C., Huybrechts, N., e Van, L. A. (2011). Large scale morphodynamic modeling of the Gironde estuary. In *Violeau, D., Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., e Denis, C., editors, XVIIIth Telemac and Mascaret User Club*, pages 117–123, Chateau, France. EDF Corporate University.
- Vogel, C., Houlsby, G., e Willden, R. (2016). Effect of free surface deformation on the extractable power of a finite width turbine array. *Renewable Energy*, 88:317–324.
- Walters, R. A., Tarbotton, M. R., e Hiles, C. E. (2013). Estimation of tidal power potential. *Renewable Energy*, 51:255–262.
- Walther, R., Cayrol, C., e Hamm, L. (2014). Evaluation of an offshore disposal site in then Loire estuary through field monitoring and 3D numerical modelling. In *Bertrand, O. e Coulet, C., editors, XXI TELEMAC-MASCARET User Conference*, pages 141–151, Grenoble, France. Artelia.
- Wang, D., Tassi, P., El Kadi Abderrezzak, K., Mendoza, A., Abad, J., e Langendoen, E. (2014). 2D and 3D numerical simulations of morphodynamics structures in a large-amplitude meanders. In *Schleiss, A. J., Cesare, G. D., Franca, M. J., e Pfister, M., editors, Proceedings of River Flow 2014*, pages 1105–1111, Lausanne, Switzerland.
- WEC (2004). Survey of Energy Resources. Technical report, World Energy Council.
- WEC (2007). Survey of Energy Resources. Technical report, World Energy Council.
- Whitehouse, R., Sutherland, J., e O'Brien, D. (2006). Seabed scour assessment for offshore windfarm. In *Proceedings iof the Third International Conference on Scour and Erosion*, pages 1–22, Gouda, The Netherlands. CURNET.

- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Elsevier, London, UK, second edition.
- Willebrand, J. (1975). Energy transport in a non-linear and inhomogeneous random gravity wave field. *Journal of Fluid Mechanics*, 70:113–126.
- Williams, L. O. (1994). Alternative Energy Sources. *Appl. Energ.*, 47:123–146.
- Willmot, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63:1309–1313.
- Wilson, J. H. e Beyene, A. (2007). California Wave Energy Resource Evaluation. *Journal of Coastal Research*, 233:679–690.
- Wirba, A. V., Abubakar Mas'ud, A., Muhammad-Sukki, F., Ahmad, S., Mat Tahar, R., Abdul Rahim, R., Munir, A. B., e Karim, M. E. (2015). Renewable energy potentials in Cameroon: Prospects and challenges. *Renewable Energy*, 76:560–565.
- Work, P. A., Haas, K. A., Defne, Z., e Gay, T. (2013). Tidal stream energy site assessment via three-dimensional model and measurements. *Applied Energy*, 102:510–519.
- Xia, J., Falconer, R. A., e Lin, B. (2010). Impact of different operating modes for a Severn Barrage on the tidal power and flood inundation in the Severn Estuary, UK. *Applied Energy*, 87(7):2374–2391.
- Xin-gang, Z., Yi-sheng, Y., Tian-tian, F., e Yu-heng, Y. (2013). International cooperation on renewable energy electricity in China - A critical analysis. *Renewable Energy*, 55:410–416.
- Yang, X., Haas, K. A., e Fritz, H. M. (2014a). Evaluating the potential for energy extraction from turbines in the gulf stream system. *Renewable Energy*, 72:12–21.
- Yang, Z. e Hamrick, J. M. (2003). Variational inverse parameter estimation in a cohesive sediment transport model: An adjoint approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C2):1–10.
- Yang, Z. e Wang, T. (2015). Modeling the Effects of Tidal Energy Extraction on Estuarine Hydrodynamics in a Stratified Estuary. *Estuaries and Coasts*, 38(S1):187–202.

- Yang, Z., Wang, T., Copping, A., e Geerlofs, S. (2014b). Modeling of in-stream tidal energy development and its potential effects in Tacoma Narrows, Washington, USA. *Ocean & Coastal Management*, 99:52–62.
- Zambresky, L. (1989). A verification study of the global WAM model: December 1987 - November 1988. Technical report, European Centre for Medium-Range Weather Forecast, Germany.
- Zdravkovich, M. M. (1997). *Flow Around Circular Cylinders*. Oxford University Press, New York.
- Zembruski, S. G. (1979). Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In Chaves, H. A. F., editor, *Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes: Série Projeto Remac 7*, pages 129–177, Rio de Janeiro. Petrobrás, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES), Divisão de Informação Técnica e Propriedade Industrial (DINTEP).
- Zhao, Z. Y., Chen, Y. L., e Chang, R. D. (2016). How to stimulate renewable energy power generation effectively? - China's incentive approaches and lessons. *Renewable Energy*, 92:147–156.
- Zhu, X.-H., Kaneko, A., Saito, T., e Gohda, N. (2001). Kuroshio Stream path variation and its associated velocity structures south of Shikoku, Japan. *Geophysical Research Letters*, 28(24):4615–4618.