

**João Flesch Fortes**

**Avaliação do potencial de energias marinhas  
na região de São Sebastião**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física

Orientador: Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho

São Paulo

2018



**Universidade de São Paulo**  
**Instituto Oceanográfico**

**Avaliação do potencial de energias marinhas**  
**na região de São Sebastião**

João Flesch Fortes

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física

Julgada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

_____ Prof(a). Dr(a).	_____ Conceito
_____ Prof(a). Dr(a).	_____ Conceito
_____ Prof(a). Dr(a).	_____ Conceito



# Sumário

1. Introdução . . . . .	21
1.1 Organização da Dissertação . . . . .	21
1.2 Energias Marinhas Renováveis . . . . .	21
1.2.1 Energia das Ondas . . . . .	24
1.2.2 Energia das Correntes . . . . .	27
1.3 Área de Estudo . . . . .	31
1.3.1 Geografia/Batimetria . . . . .	32
1.3.2 Massas de Água . . . . .	34
1.3.3 Hidrodinâmica . . . . .	34
1.3.4 Forçantes . . . . .	35
1.3.4.1 Ventos . . . . .	36
1.3.4.2 Marés . . . . .	37
1.3.4.3 Gradiente de Densidade . . . . .	37
1.4 Período de Estudo . . . . .	38
2. Hipótese e Objetivos . . . . .	39
3. Correntes . . . . .	41
3.1 Materiais e Métodos . . . . .	41
3.1.1 Estimativa da Densidade de Potência . . . . .	41
3.1.2 sECOM - <i>Stevens Estuarine and Coastal Model</i> . . . . .	43
3.1.2.1 Grade Modelada . . . . .	44
3.1.2.2 Configurações e Características de Entradas e Saídas . . . . .	45
3.1.3 Dados Coletados no Canal de São Sebastião . . . . .	45

3.2	Resultados . . . . .	46
3.2.1	Comparação com Dados Coletados no Canal de São Sebastião . . . . .	47
3.2.2	Densidade de Potência . . . . .	49
3.2.3	Variabilidade Temporal . . . . .	54
3.2.3.1	Variabilidade Sazonal . . . . .	57
3.2.4	Intensidades das Correntes . . . . .	60
3.2.5	Direc�es Predominantes . . . . .	61
3.3	Discussão . . . . .	65
4.	<i>Ondas</i> . . . . .	67
4.1	Materiais e Métodos . . . . .	67
4.1.1	Estimativa do Fluxo de Energia . . . . .	67
4.1.2	Modelo de Ondas da Universidade de Miami . . . . .	70
4.1.2.1	Grades Modeladas . . . . .	71
4.1.2.2	Características de Entradas e Saídas . . . . .	74
4.2	Resultados . . . . .	76
4.2.1	Comparação com Dados do Rede Ondas e Wavewatch III . . . . .	76
4.2.2	Fluxo de Energia . . . . .	78
4.2.2.1	Comparação entre C�culo com Velocidade de Grupo e Período de Pico . . . . .	81
4.2.3	Variabilidade Temporal . . . . .	83
4.2.3.1	Variabilidade Sazonal . . . . .	85
4.2.4	Histogramas de Fluxo de Energia . . . . .	88
4.2.5	Direc�es Predominantes . . . . .	90
4.3	Discussão . . . . .	93
5.	<i>Conclusões</i> . . . . .	95
5.1	Conclusões . . . . .	95
5.2	Limita�es do Trabalho . . . . .	96
5.3	Sugestões de Trabalhos Futuros . . . . .	97
5.3.1	Correntes . . . . .	97
5.3.2	Ondas . . . . .	98
5.3.3	Energias Marinhas Renováveis . . . . .	98

*Referências* . . . . . 101



# Agradecimentos

Ao meu orientador pela paciência e confiança.

Ao Laboratório de Hidrodinâmica Costeira e todos seus membros pela ótima recepção e companheirismo ao longo desses dois anos. Em especial, a Carine Costa, Dalton Sasaki e José Roberto Leite pelas incontáveis ajudas na parte de modelagem sem as quais esta dissertação não seria possível.

Ao Laboratório de Instrumentação Oceanográfica e todos seus membros pelos embarques, conversas e diversos ensinamentos práticos que enriqueceram minha formação.

Aos professores que tive no período, Alexander Turra, Belmiro Castro, Ilson Silveira, Olga Sato, Paulo Polito e Ricardo de Camargo, pelas ótimas aulas.

Às tripulações do Veliger II e do Alpha Crucis pelas mais de duzentas agradáveis horas embarcado.

Ao Instituto Oceanográfico e ao Programa de Pós-Graduação e todos seus funcionários pela ajuda diária nos mais diversos assuntos.

À Rede Ondas - Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas pela disponibilização de dados.

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



## Resumo

Este trabalho quantifica o potencial de extração de energias marinhas associadas a ondas e correntes na região de São Sebastião, identificando locais mais adequados para tal extração. Para isso, se utiliza o modelo *University of Miami Wave Model*(UMWM) para simulação de ondas e o *Stevens Estuarine and Coastal Ocean Model* (sECOM) para simulação de correntes, analisando o período de julho de 2016 a junho de 2017. A região imediatamente ao largo da Ilha de São Sebastião apresenta um dos maiores potenciais do Estado de São Paulo para extração de energia marinha, com intensidade média anual do fluxo de energia de ondas de  $22,3 \text{ kW/m}$  e de densidade de potência de correntes de até  $473,2 \text{ W/m}^2$ . Outro ponto com potencial de extração de energia das correntes está situado no interior do Canal de São Sebastião, com valor médio de  $370,0 \text{ W/m}^2$ .

Palavras-chave: energias marinhas renováveis, energia das ondas, energia das correntes, sECOM, UMWM



# Abstract

This research quantifies the potential of marine energy due to wave and currents in the Sao Sebastiao region, identifying the most suitable sites for such extraction. For this purpose, it is used the *University of Miami Wave Model* (UMWM) for wave simulation and the *Stevens Estuarine and Coastal Ocean Model* (sECOM) for current simulation, analyzing the period from July 2016 to June 2017. The region near the offshore side of the Sao Sebastiao Island shows one of the greatest potential in the State of Sao Paulo for marine energy extraction, with the average annual wave energy flux of  $22.3 \text{ kW/m}$  and mean current power density of up to  $473.2 \text{ W/m}^2$ . Another point with potential of energy extraction from currents is located within the Sao Sebastiao Channel with the average value of  $370.0 \text{ W/m}^2$ .

Keywords: marine renewable energy, wave power, marine current power, sECOM, UMWM



## Lista de Figuras

1.1	Oferta interna de eletricidade por fonte, no Brasil para o ano de 2016. Fonte: EPE (2017) . . . . .	22
1.2	Distribuição da população absoluta do Brasil segundo o Censo Demográfico de 2010. Fonte: IBGE (2010) . . . . .	23
1.3	Mapa global de distribuição de fluxo de energia de ondas em $kW/m$ . Fonte: NREL - <a href="https://maps.nrel.gov/mhk-atlas">https://maps.nrel.gov/mhk-atlas</a> . . . . .	25
1.4	Média anual do fluxo de energia das ondas em $kW/m$ para a costa brasileira. Fonte: Carvalho (2010) . . . . .	26
1.5	Média anual da densidade de potência de correntes em oito localidades ao redor do globo identificadas por resultados do modelo HYCOM. Fonte: Vanzwieten et al. (2014) . . . . .	28
1.6	Imagem da plataforma sul-sudeste com detalhe em três localidades identificadas por Kirinus (2017) como propícias à instalação de turbinas. Fonte: Kirinus (2017) . . . . .	30
1.7	Plataforma Continental Sudeste (PCSE). Isóbatas em metros. Fonte: Moraes (2016) . . . . .	31
1.8	Região de São Sebastião escolhida como área de estudo. Isóbata em metros.	33

3.1	Grade curvilínea utilizada no modelo sECOM com batimetria e isóbatas em metros. Fonte: LHiCo. . . . .	44
3.2	Canal de São Sebastião e identificação de locais de estudo. Local do fundeio dos correntógrafos identificado pelo círculo amarelo (C2). Fonte: LHiCo. . . . .	46
3.3	Séries de tempo da intensidade da corrente (em $m/s$ ) no Canal de São Sebastião no ponto C2, obtidos com o modelo sECOM (gráfico superior: média vertical na coluna; segundo gráfico de cima para baixo: média vertical nos primeiros cinco níveis sigma) e com observações de correntógrafos (terceiro gráfico: nível aproximado de 5 $m$ abaixo da superfície; quarto gráfico: nível aproximado de 15 $m$ abaixo da superfície. . . . .	47
3.4	Séries de tempo de densidades de potência (em $W/m^2$ ) no Canal de São Sebastião no ponto C2, obtidos com o modelo sECOM (gráfico superior: média vertical na coluna; segundo gráfico de cima para baixo: média vertical nos primeiros cinco níveis sigma) e com observações de correntógrafos (terceiro gráfico: nível aproximado de 5 $m$ abaixo da superfície; quarto gráfico: nível aproximado de 15 $m$ abaixo da superfície. . . . .	48
3.5	Média vertical na coluna de água da densidade de potência na Plataforma Continental do Estado de São Paulo, em $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM.	50
3.6	Média vertical na coluna de água da densidade de potência na região de São Sebastião, em $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM. . . . .	51
3.7	Média vertical na superfície da densidade de potência na Plataforma Continental do Estado de São Paulo, em $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM.	52
3.8	Média vertical na superfície da densidade de potência na região de São Sebastião, em $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM. . . . .	53
3.9	Séries temporais da média vertical da coluna da densidade de potência ao longo do período estudado, em $W/m^2$ , para os pontos Ilha (verde) e Canal (azul), obtidos com o sECOM. . . . .	54

3.10	Médias mensais e anuais da densidade de potência vertical média em toda coluna de água em $W/m^2$ para os pontos Ilha (verde) e Canal (azul), obtidos com o modelo sECOM. . . . .	55
3.11	Médias mensais e anuais da densidade de potência vertical média na superfície em $W/m^2$ para os pontos Ilha (verde) e Canal (azul), obtidos com o modelo sECOM. . . . .	55
3.12	Médias verticais na coluna de água da densidade de potência na região de São Sebastião, em $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM para as diferentes estações do ano. . . . .	58
3.13	Médias verticais na superfície da densidade de potência na região de São Sebastião, em $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM para as diferentes estações do ano. . . . .	59
3.14	Histogramas de correntes em número de ocorrências, por $m/s$ , para o ponto Canal. À esquerda a média vertical na coluna e à direita a média vertical na superfície. . . . .	60
3.15	Histogramas de correntes em número de ocorrências, por $m/s$ , para o ponto Ilha. À esquerda a média vertical na coluna e à direita a média vertical na superfície. . . . .	61
3.16	Histogramas polares de densidade de potência em $W/m^2$ e frequência de ocorrência da média vertical na superfície para os pontos Canal (esquerda) e Ilha (direita). . . . .	62
3.17	Histogramas polares sazonais da média vertical na superfície da densidade de potência, em $W/m^2$ , para o ponto Canal em frequência de ocorrência. . . . .	63
3.18	Histogramas polares sazonais da média vertical na superfície da densidade de potência, em $W/m^2$ , para o ponto Ilha em frequência de ocorrência. . . . .	64
4.1	Batimetria em metros da grade do Atlântico Sul. Em vermelho o detalhe do contorno da grade da plataforma continental sudeste. . . . .	73

4.2	Batimetria em metros da grade da plataforma continental sudeste. Em vermelho o detalhe dos pontos onde são forçadas condições de contorno da grade do Atlântico Sul. . . . .	74
4.3	Séries de tempo de alturas significativas, em $m$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de dezembro de 2016. . . . .	77
4.4	Séries de tempo de alturas significativas, em $m$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de março de 2017. . . . .	78
4.5	Média do fluxo de energia em $kW/m$ na Plataforma Continental do Estado de São Paulo no período de julho de 2016 a junho de 2017. . . . .	79
4.6	Média do fluxo de energia em $kW/m$ na região de São Sebastião no período de julho de 2016 a junho de 2017. O círculo vermelho indica a posição do ponto Ilha . . . . .	80
4.7	Série temporal do fluxo de energia em $kW/m$ no ponto Ilha, ao largo da Ilha de São Sebastião, ao longo do período de julho de 2016 a junho de 2017. . . . .	81
4.8	Comparação entre dois métodos de cálculo da FE para o ponto Ilha; a linha azul indica o cálculo utilizando a velocidade de grupo (equação 4.6) e os pontos vermelhos indicam os cálculos feitos com a simplificação de água profundas que utiliza apenas o período de pico (equação 4.11). . . . .	82
4.9	Relação entre os dois métodos de cálculo ao longo do tempo isto é, valor da razão entre os fluxos de energia estimados pelas equações 4.11 e 4.6. A linha laranja indica o valor médio. . . . .	83
4.10	Série de tempo do fluxo de energia, em $kW/m$ , no ponto Ilha e médias mensais ao longo do período de julho de 2016 a junho de 2017. . . . .	84

4.11 Médias semanais, mensais e anual do fluxo de energia em $kW/m$ para o ponto Ilha ao longo do período de julho de 2016 a junho de 2017. . . . .	85
4.12 Mapas da média sazonal do fluxo de energia em $kW/m$ para a Plataforma Continental do Estado de São Paulo. . . . .	86
4.13 Mapas da média sazonal do fluxo de energia em $kW/m$ para a região de São Sebastião. . . . .	87
4.14 Histograma do fluxo de energia em $kW/m$ no período estudado para o ponto Ilha em número de ocorrências. . . . .	89
4.15 Histogramas sazonais do fluxo de energia em $kW/m$ para o ponto Ilha em número de ocorrências. . . . .	90
4.16 Histograma polar do fluxo de energia, em $kW/m$ , no período estudado para o ponto Ilha em frequência de ocorrência. . . . .	91
4.17 Histogramas polares sazonais do fluxo de energia, em $kW/m$ , para o ponto Ilha em frequência de ocorrência. . . . .	93



## Lista de Tabelas

3.1	Valores médios, desvios padrão e máximos para as correntes e densidades de potências para o ponto C2 no Canal de São Sebastião para correntógrafos a 5 m e 15 m abaixo da superfície livre e resultados do modelo sECOM para o mesmo ponto (média vertical da coluna e média vertical da superfície). . . . .	49
3.2	Médias mensais e desvios padrão ( $\sigma$ ) da densidade de potência, em $W/m^2$ , para os pontos Ilha e Canal para a média vertical em toda coluna de água e a média vertical na camada superficial, obtidos com o sECOM. . . . .	56
3.3	Médias e desvios padrão ( $\sigma$ ) por estação do ano da densidade de potência, em $W/m^2$ , para pontos Ilha e Canal para a média vertical em toda coluna de água e a média vertical na superfície, obtidos com o sECOM. . . . .	60
4.1	Comparação entre médias das alturas significativas ao quadrado, em $m^2$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de dezembro de 2016. . . . .	77
4.2	Comparação entre médias das alturas significativas ao quadrado, em $m^2$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de março de 2017. . . . .	78
4.3	Médias mensais do fluxo de energia, em $kW/m$ , para o ponto Ilha. . . . .	84

4.4	Médias por estação do ano do fluxo de energia, em $kW/m$ , para o ponto Ilha	88
4.5	Médias por estação do ano do fluxo de energia, em $kW/m$ na literatura para pontos ao largo da Plataforma Continental do Estado de São Paulo . . . .	88

## Introdução

### *1.1 Organização da Dissertação*

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro, Introdução, são apresentados panoramas gerais das Energias Marinhas Renováveis, da área de estudo e de características do trabalho. Este é seguido pelo capítulo Hipótese e Objetivos, onde são explicitadas as questões científicas motivadoras da pesquisa.

Os capítulos Ondas e Correntes trazem, separadamente, suas metodologias, resultados e uma breve discussão da avaliação de cada um desses recursos. Finalmente, o capítulo Conclusões encerra o trabalho fazendo uma avaliação dos resultados e sugestões de trabalhos futuros.

### *1.2 Energias Marinhas Renováveis*

Atualmente, a energia consumida no mundo é mais de 70% proveniente de fontes fósseis, especialmente o petróleo, o carvão e o metano. Nesse número, estão incluídos todos os recursos energéticos utilizados, ou seja, da geração de eletricidade, do transporte, em processos industriais e do aquecimento, entre outros. Face à crescente preocupação com as mudanças climáticas e seus impactos, um grande esforço para aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética está sendo feito como forma de diminuir os gases de efeito estufa antrópicos liberados para atmosfera. Nesse cenário, as Energias Marinhas

Renováveis (EMR) vem ganhando cada vez mais atenção e espaço. Diversos centros de pesquisa espalhados pelo mundo buscam aproveitar os diversos recursos energéticos do mar, como as correntes, ondas, marés, gradientes térmicos e gradientes de salinidade.

No Brasil, o panorama geral é diferente. Cerca de 45% da matriz energética já é composta de fontes renováveis, grande parte devido às hidrelétricas, à biomassa e, mais atualmente, às eólicas (EPE, 2017). Apesar disso, o petróleo ainda tem participação de cerca de 35%, similar ao resto do mundo e com grande atenção das políticas públicas por conta do pré-sal. Se o foco for apenas na geração de eletricidade, os rios fornecem dois terços do consumo. E outras fontes renováveis ainda são significativas, como o bagaço de cana e os ventos, que têm crescido em importância nos últimos anos, como pode ser observado na Figura 1.1. Com isso, no país o mar ainda não é visto como um fornecedor de recursos energéticos não fósseis (Castro et al., 2017), e as EMR não são nem citadas no Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2017).

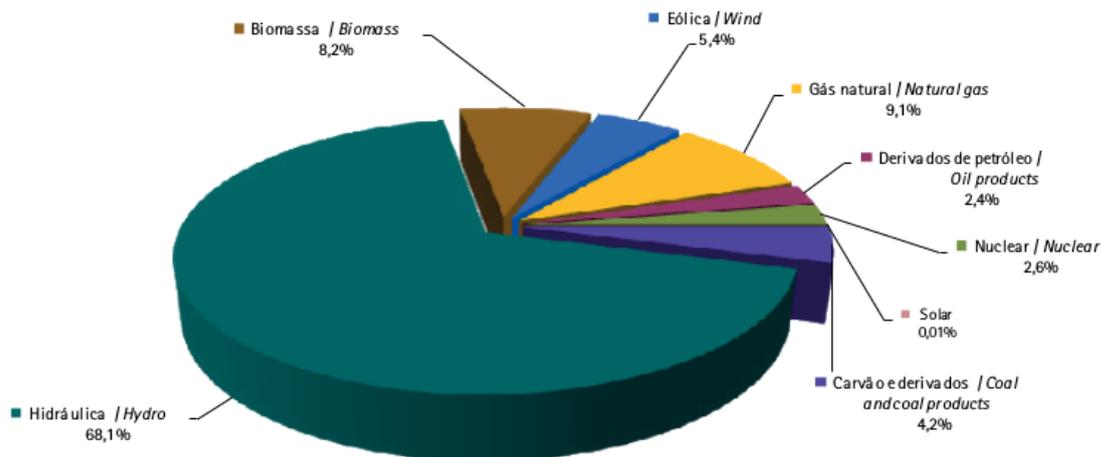


Figura 1.1: Oferta interna de eletricidade por fonte, no Brasil para o ano de 2016. Fonte: EPE (2017)

Entretanto, as energias que podem ser extraídas do mar já chamam a atenção dos pesquisadores do País e, aos poucos, vêm aumentando os estudos nessa área. A justificativa para tais pesquisas é a necessidade da existência de uma matriz diversificada de fontes renováveis, já que essas são em sua maioria intermitentes, ou seja, não estão sempre disponíveis. Dessa forma, o sistema elétrico nacional deve conter uma grande diversidade de recursos para garantir a oferta e a robustez da rede. Somado a isso, deve-se ressaltar que grande parte da população e, conseqüentemente, dos centros consumidores de energia

se encontram próximo à costa conforme se observa na Figura 1.2 (IBGE, 2010). Isso faz com que o transporte de eletricidade gerada no mar até o uso final seja muitas vezes mais barato e seguro do que a da eletricidade gerada em terra.

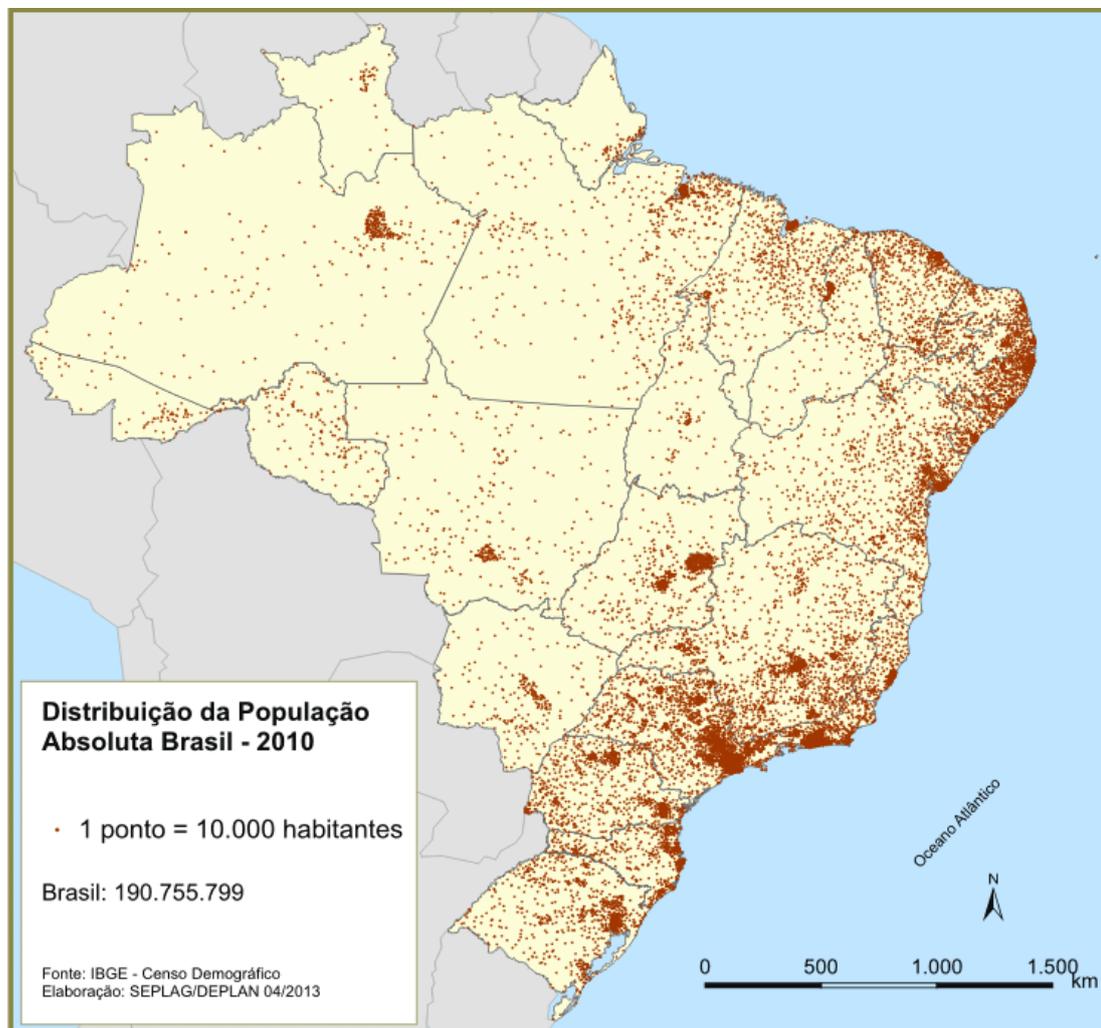


Figura 1.2: Distribuição da população absoluta do Brasil segundo o Censo Demográfico de 2010. Fonte: IBGE (2010)

A energia que pode ser extraída do gradiente térmico que existe entre a água da superfície e a que se encontra a grandes profundidades é ainda internacionalmente muito pouco explorada. Pesquisas indicam que com diferenças a partir de cerca de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  já é possível se desenhar um ciclo termodinâmico para a utilização na geração de eletricidade. Assim, tradicionalmente, os lugares mais apropriados para esse tipo de dispositivo são as regiões equatoriais. Um estudo indica que a costa da região nordeste brasileira apresenta um bom potencial para OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*) (Etemadi et al., 2011; Neves, 2015). No cenário nacional existem pesquisas sendo realizadas por um grupo da

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) sobre essa modalidade, com foco na avaliação do recurso (Souza, 2014; Souza e Marques, 2016). Conforme o trabalho de Silva et al. (2001), a diferença de temperatura entre a água superficial e de fundo é sempre menor que  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  em toda região adjacente à Ilha de São Sebastião. Optou-se, então, por não estudar o potencial do gradiente térmico para a região. Assim como, também não se analisou o potencial de gradiente halino por ser uma tecnologia ainda muito incipiente e de difícil exploração, além de não existirem gradientes halinos quase-horizontais significativos na região.

### 1.2.1 Energia das Ondas

Inicialmente, é importante notar que existe grande variedade de fenômenos de natureza ondulatória no mar, todos dotados de energia e características próprias. Ao longo deste trabalho, se abordará exclusivamente as ondas de gravidade de superfície geradas pelo vento com período da  $O(10\text{ s})$ . Assim, o termo *ondas* e todas inferências e conclusões serão exclusivamente sobre esse tipo de movimento ondulatório marinho.

Mundialmente, a geração de eletricidade a partir das ondas, por vezes chamada de energia ondomotriz, já apresenta algumas décadas de pesquisa. Existe uma grande diversidade de tecnologias de extração, algumas já instaladas e em fase pré-comercial de desenvolvimento (Thorpe, 1999; Falcão, 2010; Vakis et al., 2014; Uihlein e Magagna, 2016). O site do *European Marine Energy Centre* (EMEC - [www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk)) lista mais de duzentos projetos diferentes de mais de uma centena de desenvolvedores, de pequenas a grande empresas, passando por centros de ensino e pesquisa.

Igualmente importante, o esforço de caracterização do recurso energético vem acompanhando com diversos artigos e teses publicadas. Na Europa é onde existe o maior número de centros de pesquisa e trabalhos, como Iglesias et al. (2009); Iglesias e Carballo (2009); Rusu e Guedes Soares (2009); Boudière et al. (2013); Cahill e Lewis (2013), impulsionados pelo forte potencial que pode ser observado na Figura 1.3 que apresenta resultados do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), que é um órgão ligado ao Departamento de Energia dos Estados Unidos. Em outras regiões também há esforços para quantificar o potencial das ondas, como na América do Norte (Cornett, 2006; Lenee-Bluhm et al., 2011;

Robertson et al., 2014), no Oriente Médio (Saket e Etemad-Shahidi, 2012) e na Austrália (Hemer e Griffin, 2010).



Figura 1.3: Mapa global de distribuição de fluxo de energia de ondas em  $kW/m$ . Fonte: NREL - <https://maps.nrel.gov/mhk-atlas>

O potencial de aproveitamento de energia das ondas no Brasil já foi estudado, sobretudo com o auxílio de modelos como Wavewatch III (Carvalho, 2010; Pianca et al., 2010; Ostritz, 2012; Silva, 2012; Gomes, 2014) e também o TOMAWAC (Oleinik et al., 2016a,b). Esses trabalhos sugerem que o litoral paulista tem um fluxo de energia médio da ordem de  $15 kW/m$ , variando de cerca de  $10 kW/m$  nos meses de verão até cerca de  $20 kW/m$  no inverno (Gomes, 2014). A distribuição do potencial ao longo da costa brasileira pode ser vista na Figura 1.4 de Carvalho (2010). Apesar desse conhecimento superficial do potencial energético das ondas, os diversos trabalhos não levam em conta as especificidades dos locais de instalação, especialmente a batimetria, concentrando-se em quantificar o potencial fora da plataforma continental, em regiões oceânicas. Considerando que a plataforma continental brasileira é em geral larga, com  $O(100 km)$ , coloca-se a dificuldade de aproveitamento da energia das ondas em regiões *off-shore* e a necessidade de transporte dessa energia por longas distâncias até as regiões costeiras.

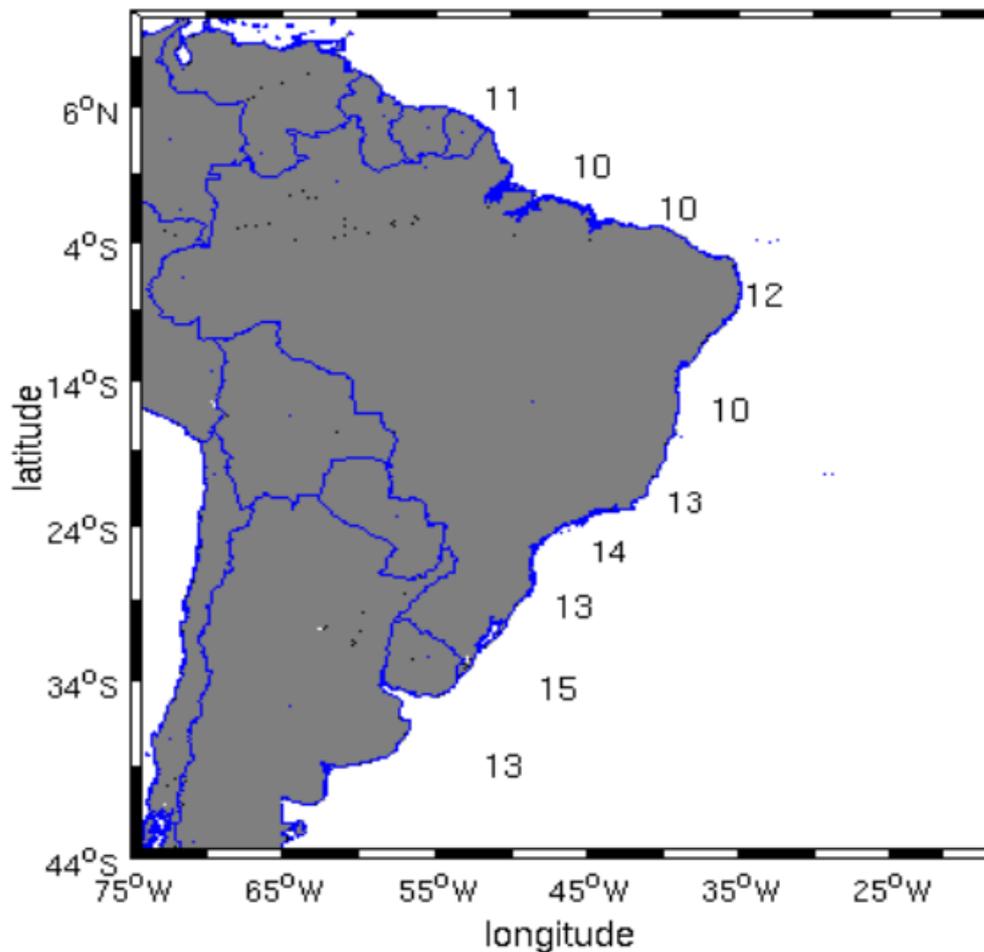


Figura 1.4: Média anual do fluxo de energia das ondas em kW/m para a costa brasileira. Fonte: Carvalho (2010)

Dentro do aproveitamento de energia das ondas em regiões costeiras encontra-se o projeto mais significativo no cenário nacional das EMR: A Usina de Ondas do Porto de Pecém – CE. Esse projeto é fruto de um projeto de P&D do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) com a empresa Tractebel. Ele deu origem a grande quantidade de literatura para a área, donde pode-se destacar os trabalhos de pós-graduação: Beserra (2007) que enumera as diversas características que devem ser observadas na escolha de local apropriado para a instalação de sistemas para aproveitamento oceânico; Siffert (2010), que focou no estudo da legislação vigente alertando para a necessidade de aproximação da comunidade científica com os formadores de políticas para crescimento da área; e Martín (2012), que estudou os aspectos econômicos, com sugestões de incentivos e legislações

adequadas.

Vale notar que na Universidade de São Paulo (USP) também existem trabalhos e pesquisadores atuando na área. Nesse sentido, a criação do Núcleo de Apoio à Pesquisa Oceano Sustentável (NAP-OceanoS), liderado pelo Instituto Oceanográfico e pela Escola Politécnica, foi um catalizador que possibilitou o desenvolvimento de pesquisas na área como Gomes (2014), Fortes e Ferraz (2014) e Cordeiro (2015).

### 1.2.2 Energia das Correntes

Inicialmente, é importante ressaltar que neste trabalho corrente refere-se ao deslocamento do fluido, seja ele forçado por ventos, marés ou gradientes de densidade. Na literatura há referências à energia maremotriz (cinética), *tidal energy*, *tidal power* e *tidal current energy*, que focam na energia de fluxos exclusivamente gerados por marés. Do ponto de vista energético, a análise é similar em todos os casos, mas do ponto de vista de caracterização do recurso é bem diferente, pois as marés são determinísticas, muito bem conhecidas e previsíveis para um determinado local. Já nos locais onde a maré não é a forçante principal, geralmente há uma série de fatores que influenciam na corrente, fazendo com que a mesma seja aleatória, mais variável e menos previsível.

O aproveitamento das correntes se dá de forma similar ao das usinas hidrelétricas, onde há uma turbina que gira retirando a energia cinética do fluido que passa por ela. Entretanto, no mar os fluxos não são confinados, o que faz com que os modos de extração se assemelhem mais com os dos ventos, como nas usinas eólicas, que com os dos rios, nas usinas hidrelétricas. Pelo mundo já existem diversas plantas em funcionamento como o Seagen na Inglaterra e Verdant Power nos Estados Unidos, geralmente instalados em estuários com intensas correntes de maré (Laws e Epps, 2016). Assim como em aproveitamento de ondas, existe uma grande quantidade de diferentes tecnologias que vêm sendo pesquisadas ao redor do mundo para extração da energia das correntes (Taylor et al., 2001; Khan et al., 2009; Rourke et al., 2010; Liu et al., 2011; Zhou et al., 2014; Laws e Epps, 2016).

O recurso correntes de maré é bastante estudado sobretudo na Europa (Grabbe et al., 2009; Rourke et al., 2010; Borthwick et al., 2013), pois há um grande potencial devido

a países que já têm indústria naval desenvolvida e, também, experiência com geração de energia no mar com eólicas *offshore*. Na América do Norte há também muitos estudos, destacando-se o Canadá que tem um Inventário de Energias Marinhas Renováveis de sua costa (Cornett, 2006) e o trabalho *Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices* de Hagerman et al. (2006) que apresenta uma metodologia extensa para o cálculo da energia das correntes de maré.

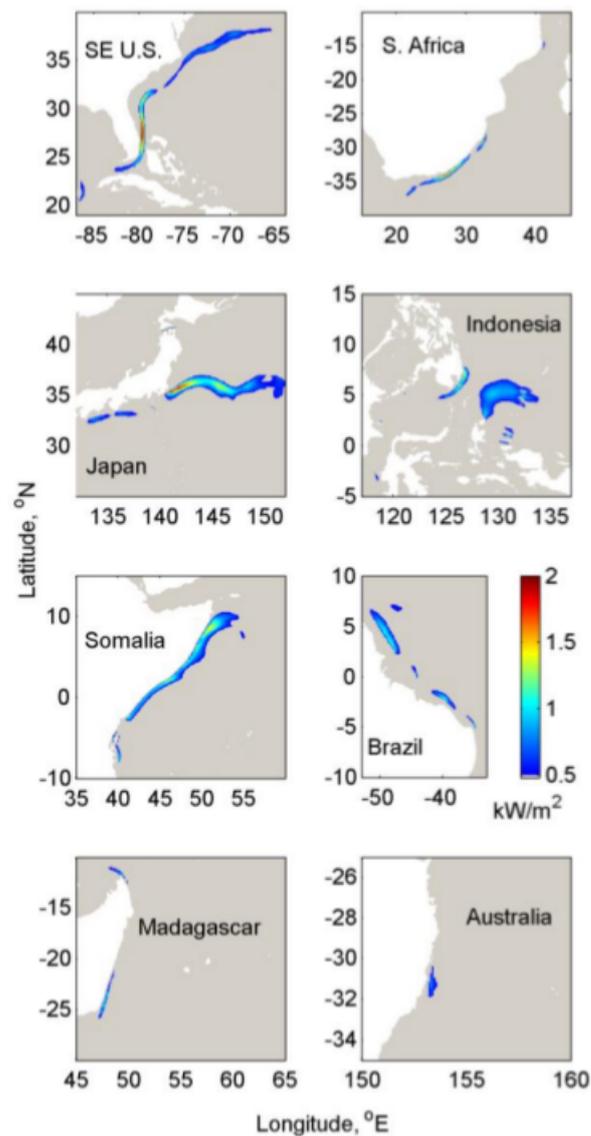


Figura 1.5: Média anual da densidade de potência de correntes em oito localidades ao redor do globo identificadas por resultados do modelo HYCOM. Fonte: Vanzwieten et al. (2014)

Modelos hidrodinâmicos tridimensionais têm sido utilizados para avaliar o potencial de energia de correntes não geradas por marés. O trabalho de Vanzwieten et al. (2014), por

exemplo, utiliza resultados de quatro anos do modelo global HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*) para identificar locais que tenham altas densidades de potência (maior que  $0,5 \text{ kW/m}^2$ ) e em seguida compara, para duas localidades, com dados *in situ* (Figura 1.5). A pesquisa de Liu et al. (2017) identifica locais próximos à costa do Japão influenciados pela Corrente do Kuroshio, apropriados para a extração de eletricidade, com valores que ultrapassam  $1 \text{ kW/m}^2$ .

No Brasil, já há trabalhos na área como os de Kirinus et al. (2012), Fischer (2014), Fischer et al. (2015), Kirinus e Marques (2015a,b) e Kirinus (2017) indicando que existem locais com potencial para tais empreendimentos. Desses ressalta-se a tese *Estudo da Viabilidade de Conversão da Energia das Correntes em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira* de Kirinus (2017) que utiliza o modelo hidrodinâmico tridimensional TELEMAC-3D para avaliar o potencial de geração ao largo da costa. Nela, o autor identifica alguns locais mais propícios para instalação de turbinas e entre eles está a região de São Sebastião, como observado na Figura 1.6.

Vale apontar que, apesar de não serem intensas em grande parte do País, as correntes de maré apresentam potencial em algumas localidades, como na baía de São Marcos no Maranhão, como demonstrado na tese de Ferreira (2011) e no artigo de González-Gorbeña et al. (2015). Na década de 1980 houve uma tentativa por parte da Eletrobrás de construir a primeira usina maremotriz do País, no estuário de Rio Bacanga - MA, que já contava com uma barragem construída na década anterior. Apesar dos esforços, o projeto não progrediu por dificuldades técnicas e grandes impactos sociais. (Lima et al., 2003).

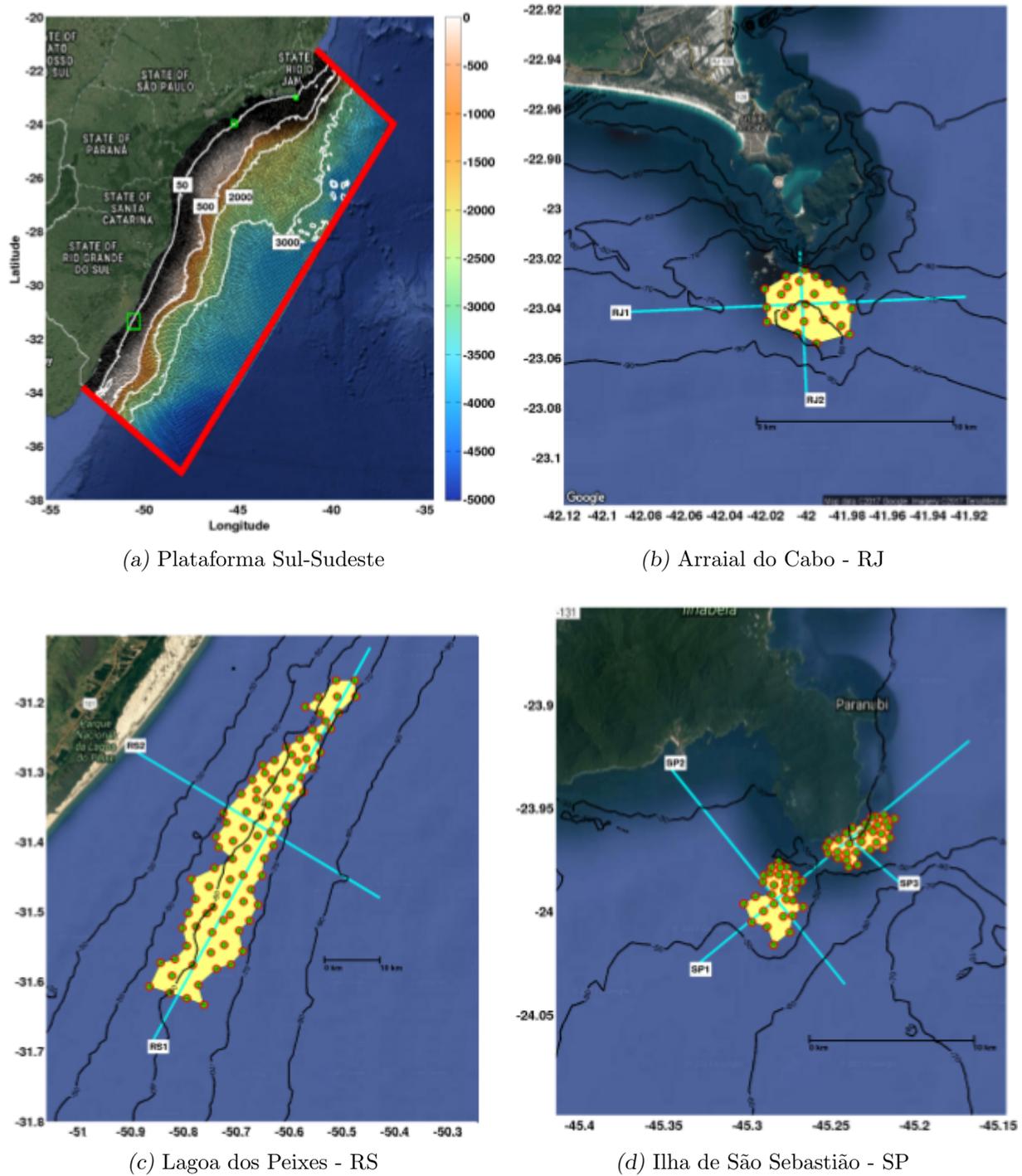


Figura 1.6: Imagem da plataforma sul-sudeste com detalhe em três localidades identificadas por Kirinus (2017) como propícias à instalação de turbinas. Fonte: Kirinus (2017)

### 1.3 Área de Estudo

A área escolhida como foco deste estudo foi a da região de São Sebastião, situada na parte central da Plataforma Continental Sudeste (PCSE) (Figura 1.7), por ser conhecida por fortes correntes e incidência de ondas de gravidade com grande energia. Como será demonstrado ao longo do trabalho, esse local apresenta um dos maiores potenciais de extração de eletricidade a partir do oceano do Estado de São Paulo. Ele está compreendido entre as latitudes de  $23,6^{\circ}$  S e  $24,1^{\circ}$  S e as longitudes de  $45,1^{\circ}$  W e  $45,6^{\circ}$  W conforme indicado na Figura 1.8.

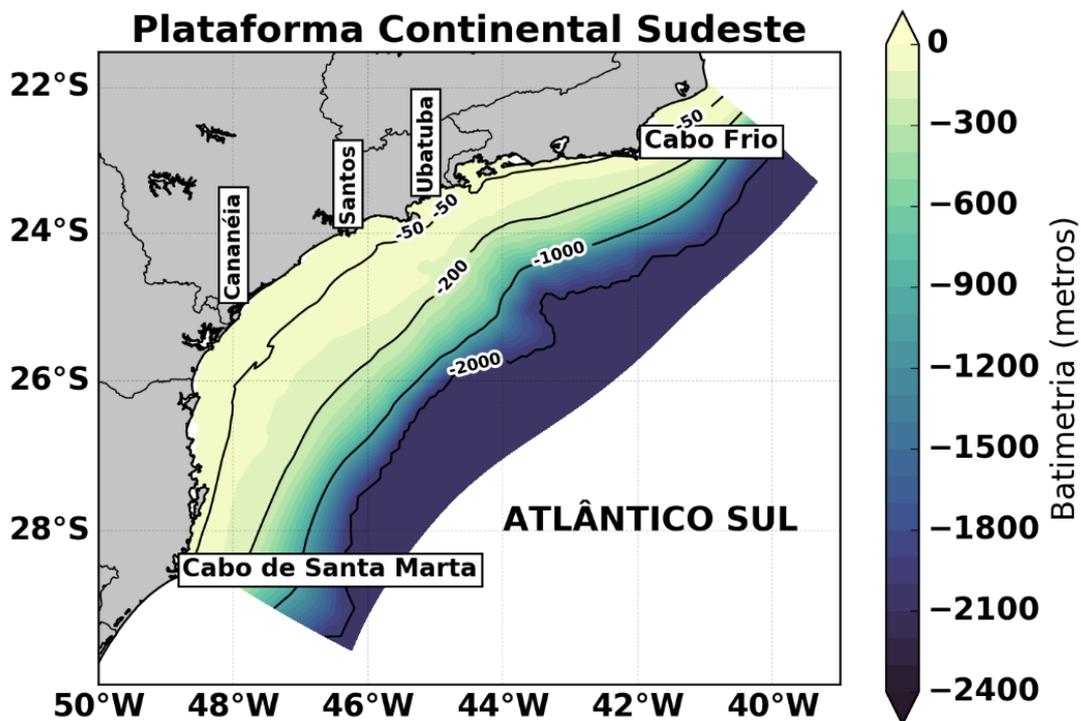


Figura 1.7: Plataforma Continental Sudeste (PCSE). Isóbatas em metros. Fonte: Morais (2016)

Aspectos das características hidrodinâmicas e termohalinas do Canal de São Sebastião (CSS) foram apresentados pioneiramente por Emilsson (1962) e Kvinge (1967). Esses autores verificaram que as correntes no canal são geradas essencialmente pelo vento, sendo as correntes de maré relativamente pequenas. No fim da década de 70, cientistas do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) realizaram alguns levantamentos no CSS, observando a variabilidade sazonal da estrutura termohalina e que a resposta das águas ao vento inclui uma componente resultante do vento remoto (Castro, 1990; Miranda

e Castro, 1995). Desde 1991 o CSS tem sido extensivamente estudado por pesquisadores do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira (LHiCo) do IOUSP em diversos projetos, tais como Hidrodinâmica do Canal de São Sebastião (HIDROCASS), Transporte e Dispersão no Canal de São Sebastião (TRADICASS) e Oceanografia da Plataforma Interna da região de São Sebastião (OPISS), os quais contaram com suporte financeiro de diversas agências, como FAPESP e CNPq. Além de fundeios e instalação de estações autônomas para medições de ventos, correntes e marés, realiza-se, a cada 2 meses, uma rede de estações hidrográficas e correntométricas .

### 1.3.1 Geografia/Batimetria

O CSS é um canal costeiro situado na parte norte da Plataforma Continental de São Paulo (PCSP), entre a planície costeira e a Ilha de São Sebastião (ISS) (Figura 1.8). A configuração do canal é curva, estando o eixo orientado para NE, na parte sul, e para N na parte norte. O comprimento é de aproximadamente 22 *km* e a largura varia entre 7,2 *km* na entrada sul, 1,9 *km* na região central e 5,6 *km* no extremo norte. Existe um canal batimétrico com profundidades maiores do que 20 *m*, iniciando-se com profundidades da ordem de 25 *m* no lado insular da entrada sul, atingindo profundidades máximas de cerca de 45 *m* na parte central e fechando-se na parte norte. Conseqüentemente, a plataforma continental adjacente é mais rasa ao norte do que ao sul. Esse canal batimétrico é caracterizado por inclinações acentuadas do fundo em suas margens (Castro e Miranda, 1998).

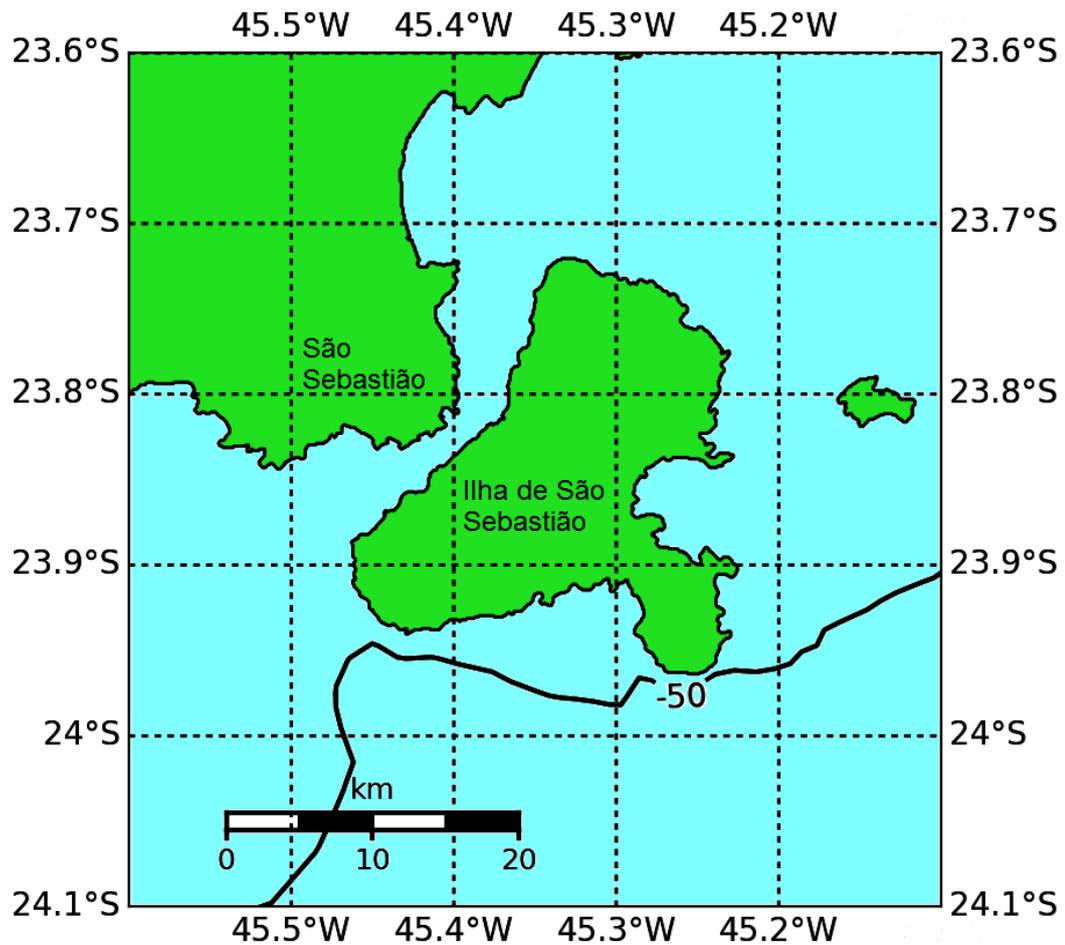


Figura 1.8: Região de São Sebastião escolhida como área de estudo. Isóbata em metros.

A região adjacente à ISS é caracterizada por uma inclinação acentuada do fundo, com a isóbata de 50 *m* chegando a menos de 5 *km* da costa. Dos lados sul e leste da ISS, a isóbata de 20 *m* se aproxima a menos de 1 *km* da costa em quase todo o perímetro. Como o CSS, a região apresenta massas de água distintas que alternam sua influência ao longo do ano. A ISS ainda apresenta faces sul e leste não abrigadas por massas de terra, o que a torna passível de receber grande parte das ondas geradas por tempestades no Atlântico Sul.

A ISS e a região de São Sebastião formam um estreitamento na PCSE, o que faz com que fluxos paralelos à costa sejam intensificados na região por conta da continuidade. Isso a torna interessante do ponto de vista do aproveitamento energético das correntes. Ela também apresenta vantagens para energia das ondas, já que a região ao largo da ISS

apresenta uma menor distância até a quebra da plataforma. Assim, ondas propagando de águas profundas dissipam menos energia por percorrerem menores distâncias em águas rasas até se aproximarem da costa.

### 1.3.2 *Massas de Água*

Durante todo o ano, as águas da região ao largo de São Sebastião, da mesma forma que as demais da PCSE, são resultantes da mistura entre a Água Costeira (AC), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a Água Tropical (AT) (Coelho, 1997; Cerda e Castro, 2014). Durante o inverno, o CSS está totalmente inserido na Plataforma Continental Interna (PCI), sendo preenchido pela AC. Durante o final da primavera e o verão, ocorre a mistura entre duas massas de água: AC e ACAS. Como a Frente Térmica Profunda (FTP) (Castro, 1996) oscila durante o verão entre as isóbatas de 20-40 *m*, e as isóbatas maiores do que 20-25 *m* entram no CSS a partir da entrada sul, verifica-se que, muitas vezes, a FTP penetra no CSS pela margem insular dessa entrada. Quando isso acontece, a ACAS faz-se presente nos níveis mais profundos do CSS, particularmente nas vizinhanças da margem insular sul. Durante o outono, o canal fica preenchido preponderantemente pela AC, com pequenas contribuições eventuais da AT (Leandro, 1999).

### 1.3.3 *Hidrodinâmica*

Sob o ponto de vista hidrodinâmico, a região de estudo situa-se ora na PCI, principalmente durante o inverno, ora na Plataforma Continental Média (PCM), como ocorre no verão, utilizando a regionalização da Plataforma Continental Norte de São Paulo (PCNSP) estabelecida por Castro (1996) e estendida em Castro (2014).

O CSS é uma região onde ocorrem processos físicos complexos, incluindo fortes correntes geradas pelo vento, mistura de massas de água de origens diferentes, e uma termoclina sazonal bem definida que é acompanhada por uma estrutura baroclínica em duas camadas durante o verão. Essa última característica é recorrente da circulação de verão no CSS com correntes fluindo num sentido na camada superficial e no sentido oposto na camada inferior (Miranda e Castro, 1995; Fontes, 1995; Coelho, 1997). Essa estruturação ocorre

principalmente durante intrusões bem desenvolvidas, sendo a camada superficial dominada pela AC e, a profunda, pela ACAS.

Em situações de fluxo normal, a corrente superficial tende a ser mais intensa na região central do CSS, onde ocorre uma diminuição da seção transversal. Intensidades superiores a  $1,0\text{ m/s}$  foram observadas algumas vezes entre a Ponta do Araçá e a Ilha das Cabras (Fontes, 1995).

#### 1.3.4 Forçantes

As correntes no CSS são devidas fundamentalmente ao vento, sendo as correntes de maré comparativamente desprezíveis em termos energéticos (Kvinge, 1967; Castro, 1990; Fontes, 1995; Dottori et al., 2015; Morais, 2016). As variações sazonais no campo de corrente são marcantes, embora em qualquer época do ano as correntes apresentem um histograma bimodal. Durante o verão, as correntes na camada situada acima da pycnoclina fluem predominantemente para SW, sob influência direta do vento. Fontes (1995), analisando dados correntográficos da camada superficial num ponto próximo à região central do canal verificou que no verão, durante 46% do tempo, as correntes fluíram para SW, com intensidade média de  $0,30\text{ m/s}$ . Os eventos apresentando correntes para NE ocorreram durante 39% do tempo, tendo intensidade média de  $0,24\text{ m/s}$ . Durante o inverno, por outro lado, os eventos com sentido NE ocorreram em 76% do tempo, tendo velocidade média de  $0,40\text{ m/s}$ , enquanto que aqueles com sentido SW ocuparam 12% do tempo e tiveram velocidade média de  $0,24\text{ m/s}$ . Assim, durante o inverno os eventos que apresentam correntes fluindo para NE são mais frequentes e mais intensos do que no verão; os eventos com correntes fluindo para SW, por outro lado, são mais frequentes e mais intensos durante o verão.

O trabalho de Morais (2016), *Hidrodinâmica da Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo*, utilizando dados coletados próximos à ISS de três projetos diferentes, mostrou um comportamento bimodal das corrente, similar ao do CSS. Na maior parte do tempo o fluxo era para NE ou SW. Além disso, com a utilização do modelo sECOM, corroborou as hipóteses dos ventos serem a principal forçante e as marés serem menos significantes para a circulação na região. De seus resultados ainda se comenta a relevância

do gradiente de densidade no transporte da PCI, sobretudo no verão, período de maior estratificação.

A Corrente do Brasil (CB) é a corrente de contorno que fecha a borda oeste do Giro Subtropical do Atlântico Sul e é presente ao largo da PCSE fluindo predominantemente para SW (Silveira et al., 2000). Ela pode influenciar na intrusão da ACAS e proporcionar a formação de vórtices e meandros que podem afetar a PCSE, sobretudo a sua porção externa. De uma maneira geral, a CB não tem contribuição significativa para a circulação na PCI.

#### 1.3.4.1 Ventos

A região da PCSE está predominantemente sobre a influência de dois sistemas atmosféricos: a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e Sistemas Frontais (frentes frias). A ASAS se caracteriza por uma circulação anti-horária que impulsiona ventos provenientes entre leste e norte na PCSE. Já os sistemas frontais, geralmente associados a centros de baixas pressões em latitudes mais altas às da região, gera ventos intensos proveniente do quadrante sul (Stech e Lorenzetti, 1992). Assim, os ventos dominantes na região, provenientes de NE, impulsionam correntes longitudinais ao canal com sentido SW. Os ventos oriundos de SW, geralmente associados à passagem dos sistemas meteorológicos frontais, forçam correntes longitudinais com sentido NE. De uma maneira geral, na Plataforma Continental Interna, ventos da ASAS tendem a gerar correntes paralelas deixando a costa à direita e ventos de frentes frias geram movimentos que deixam a costa à esquerda.

A alternância do campo de ventos, com períodos sinóticos representativos compreendidos entre quatro e dez dias, causa alta variabilidade na mesma faixa de períodos (subinercial) no campo de correntes. Conseqüentemente, as oscilações de corrente mais energéticas no CSS, com 80% do total da variância, são as subinerciais. A forçante dominante é o vento, remoto ou local. Fontes (1995) mostrou que, nas oscilações com períodos menores do que nove a dez dias, a dominância é do vento, isto é, os eventos no campo de ventos ocorrem antes dos eventos associados no campo de correntes. Esse fato ressalta a importância da forçante local, caracterizada por uma resposta altamente friccional. Para períodos maiores do que dez dias, por outro lado, foi observada a dominância da corrente.

Isso só é possível caso ocorram forçantes remotas. De fato, Castro e Lee (1995) verificaram que, nessa faixa de período, ocorre a propagação de ondas de plataforma continental ao longo de toda PCSE. Essas ondas são forçadas ao sul de São Paulo, dali propagando-se em direção a menores latitudes.

Do ponto de vista de ondas de gravidade de superfície forçadas pelo vento na região, a ASAS e as frentes frias são os principais geradores, sobretudo este segundo por apresentar altas intensidades (Pianca et al., 2010). Assim, a frequência e ocorrência das ondas está diretamente relacionada aos ciclones subtropicais no Atlântico Sul. Esses sistemas têm sua formação sobretudo na região próximo à costa da América do Sul entre as latitudes de 25° S e 55° S (Reboita et al., 2010).

#### 1.3.4.2 *Marés*

Segundo Pereira et al. (2007), as correntes de maré apresentam magnitude da ordem de 5 *cm/s* na Plataforma Continental Interna com intensidade predominantemente perpendicular à costa. Assim, elas são uma ordem de grandeza menor que às correlacionadas com os ventos (Morais, 2016). As correntes de maré no CSS têm pouca energia relativa, representando menos de 15% do total. A explicação para isso, conforme Fontes (1995), é a formação de ondas estacionárias no canal, devido à diminuta diferença de fase com que a onda de maré atinge as duas entradas do CSS.

#### 1.3.4.3 *Gradiente de Densidade*

Durante o verão, as águas do CSS apresentam forte estratificação térmica e também alto desvio padrão da média, este último maior próximo ao fundo na região insular da entrada sul (Leandro, 1999). Nessa época do ano observam-se, com frequência, intrusões de águas relativamente frias (menores que 20 °C) pelo lado insular sul do canal. Em contraste, durante o inverno, as águas do CSS são quase isotérmicas, com baixo gradiente térmico vertical. As condições de primavera são semelhantes às de verão, enquanto as de outono parecem-se mais com aquelas do inverno.

As intrusões da ACAS no CSS ocorrem no verão, ou final da primavera, pela entrada sul insular. As intrusões estão intimamente relacionadas às inversões do campo de correntes: correntes predominantes para SW acompanham a aproximação da FTP da costa, enquanto que as correntes para NE conjugam-se com a recessão da FTP em direção à quebra da PC. Na circulação em duas camadas, enquanto as correntes superficiais são diretamente forçadas pelo vento, as correntes profundas não apresentam correlação significativa com a forçante meteorológica em qualquer faixa de frequência. Isto é, na camada inferior, as correntes estão desacopladas do vento. Uma explicação plausível para esse fluxo contrário ao vento é a presença da componente baroclínica da força de gradiente de pressão longitudinal (Miranda e Castro, 1995; Castro e Lee, 1995; Morais, 2016). Essa força, gerada por diferenças horizontais no campo de densidade, aponta do sul para o norte ao longo do CSS, associada às intrusões de ACAS que ocorrem durante a estação quente através da margem insular da entrada sul do canal. A circulação em duas camadas apresenta, tipicamente, correntes fluindo para SW na camada acima da termoclina e para NE na camada abaixo da termoclina (Fontes, 1995). Evidentemente, as correntes profundas para NE são as que transportam a ACAS para as regiões central e norte do CSS, principalmente ao longo do canal de navegação.

#### 1.4 *Período de Estudo*

Por se tratar de um primeiro estudo focado no potencial da região, optou-se por limitar a análise ao período de um ano. Foi escolhido o intervalo entre primeiro de julho de 2016 e 30 junho de 2017, de forma a contemplar períodos em que houvesse dados coletados no local e que permitissem a avaliação dentro do prazo do próprio mestrado. Essa janela de tempo foi utilizada para a avaliação do potencial tanto de correntes quanto de ondas para permitir uma avaliação conjunta dos resultados e para uma homogeneidade dos conjuntos de informações trabalhadas.

## Hipótese e Objetivos

A hipótese deste trabalho é que existe a disponibilidade de energia oceânica na região de São Sebastião que permita a extração futura.

Para comprovar a hipótese, esta Dissertação tem como objetivo geral quantificar a variabilidade espacial e temporal das correntes e ondas que ocorrem tanto no Canal quanto nas imediações da Ilha de São Sebastião. Os objetivos específicos são:

1. Caracterizar as correntes ao longo do Canal de São Sebastião e ao largo da Ilha de São Sebastião e calcular o potencial energético associado.
2. Caracterizar o regime de ondas incidentes na Ilha de São Sebastião e calcular o potencial energético associado.
3. Estimar a viabilidade de geração de eletricidade e identificar locais apropriados para a extração de energia a partir dos potenciais obtidos.



## Correntes

Neste capítulo será apresentada a avaliação do potencial de energia de correntes marinhas. Primeiro se abordará as bases teóricas para o estudo, seguidas dos resultados e de uma breve discussão.

Quando se referindo às correntes, neste trabalho, se adota a convenção oceanográfica, indicando o sentido do fluxo. Ou seja, uma corrente para norte é aquela que flui de sul para norte. Entretanto, para os ventos é utilizada a convenção meteorológica, ou seja, se indica da onde vem. Por exemplo, um vento sul é aquele que se propaga de sul para norte.

Vale notar também que neste capítulo o vetor velocidade de corrente é sempre caracterizado por sua magnitude e direção. Em nenhum momento ele é o decomposto nas direções zonal e meridional ou perpendicular e paralela à costa.

### 3.1 *Materiais e Métodos*

Para a avaliação do potencial energético das correntes é utilizado o cálculo da densidade de potência,  $DP$ , de um fluido a partir da velocidade do mesmo. A seguir é apresentado como se calcula a  $DP$  e, em seguida, como foram obtidas as velocidades para o cálculo.

#### 3.1.1 *Estimativa da Densidade de Potência*

Para se obter a  $DP$ , parte-se da equação da energia cinética:

$$E_c = \frac{m \times v^2}{2}, \quad (3.1)$$

onde a  $m$  é a massa e  $v$  é o módulo da velocidade, geralmente horizontal no mar, do fluido. Supondo um fluido de densidade constante  $\rho$  em um volume de controle  $V$ , obtém-se:

$$E_c = \frac{\rho \times V \times v^2}{2}. \quad (3.2)$$

Supondo uma área  $A$  perpendicular ao fluxo, geralmente vertical no mar, e um comprimento  $l$  paralelo ao escoamento, o volume de controle pode ser substituído e chega-se em:

$$E_c = \frac{\rho \times A \times l \times v^2}{2}. \quad (3.3)$$

O valor de  $l$  para um pequeno intervalo de tempo  $\Delta t$  pode ser estimado por:

$$l = v \times \Delta t. \quad (3.4)$$

Substituindo então 3.4 em 3.3 chega-se a:

$$E_c = \frac{\rho \times A \times \Delta t \times v^3}{2}. \quad (3.5)$$

Definindo densidade de potência,  $DP$ , como a potência por unidade de área perpendicular ao fluxo, pode-se obter de 3.5:

$$DP = \frac{\rho \times v^3}{2}. \quad (3.6)$$

Essa forma da equação 3.6 é amplamente conhecida e utilizada na literatura para avaliar o potencial eólico e de correntes. Como exemplos, podem ser citados os trabalhos de Cornett (2006); Hagerman et al. (2006); Rourke et al. (2010); Vanzwieten et al. (2014); Fischer et al. (2015); Kirinus e Marques (2015a) e Kirinus (2017).

Neste trabalho foi utilizado o valor constante de  $1025 \text{ kg/m}^3$  para  $\rho$  pois esse é o valor típico para  $\rho$  superficial na região. O valor de  $v$  foi explicitado em  $m/s$ , o que implica que a  $DP$  tem unidade de  $W/m^2$ .

### 3.1.2 sECOM - Stevens Estuarine and Coastal Model

Esta pesquisa foi realizada com o suporte do modelo matemático numérico sECOM (*Stevens Estuarine and Coastal Ocean Model*), implementado no LHiCo em cooperação com o Prof. Alan Blumberg, dentro do projeto SPOOPS (*Sao Paulo Ocean Observation and Prediction System*). O sECOM é a última versão da família de modelos *Princeton Ocean Model* (POM). O POM foi originalmente elaborado por Blumberg e Mellor (1987) e posteriormente modificado por Oey (2006) para incluir a capacidade de uma célula de grade ser seca ou molhada. O sECOM é o sucessor do *Estuarine and Coastal Ocean Model/Princeton Ocean Model* (ECOM/POM) desenvolvido em consecutivas versões por Blumberg et al. (1999), Georgas et al. (2007), Georgas et al. (2009), Georgas e Blumberg (2010) e Georgas et al. (2016). Com esse sistema é possível monitorar as condições ambientais, fazer previsões de correntes marinhas e de ondas e auxiliar na construção de diversos cenários ambientais para estudar, por exemplo, o derramamento de óleo e alertas de inundação (Georgas, 2010; Georgas et al., 2016).

O sECOM é um modelo de circulação costeira e estuarina, tridimensional e hidrostático. É baseado em equações primitivas que fornecem o prognóstico de nível do mar, período e altura significativa de ondas e de campos tri-dimensionais de correntes, temperatura, salinidade, densidade, viscosidade e difusividade. O modelo é discretizado por diferenças finitas numa grade C de Arakawa (Arakawa e Lamb, 1977) curvilínea e utiliza coordenadas sigma na direção vertical.

O modelo sECOM está rodando de forma operacional no LHiCo, fornecendo o campo de correntes, de temperatura e de salinidade em toda Plataforma Continental do Estado de São Paulo (PCSP), forçado por ventos, marés, descargas fluviais e Corrente do Brasil. Ele já foi utilizado em diversos trabalhos de membros do laboratório como Morais (2016) para estudar a PCI do Estado de São Paulo, Parente (2016) para investigar a hidrodinâmica da PC da bacia Sergipe-Alagoas e Silva (2016) na análise da dispersão de materiais radioativos

na Baía de Ilha Grande - RJ.

### 3.1.2.1 Grade Modelada

A grade utilizada foi desenvolvida por Roberto F. C. Fontes no LHiCo e empregada no trabalho de Pereira et al. (2007), apresentando 110 divisões na direção  $x$  (quase perpendicular à costa) e 137 na  $y$  (quase paralelo à costa). A resolução espacial é variada com adensamento de células na região de interesse, com distâncias horizontais de 200  $m$  dentro do CSS até 35  $km$  na borda da plataforma continental, como pode ser visto na Figura 3.1.

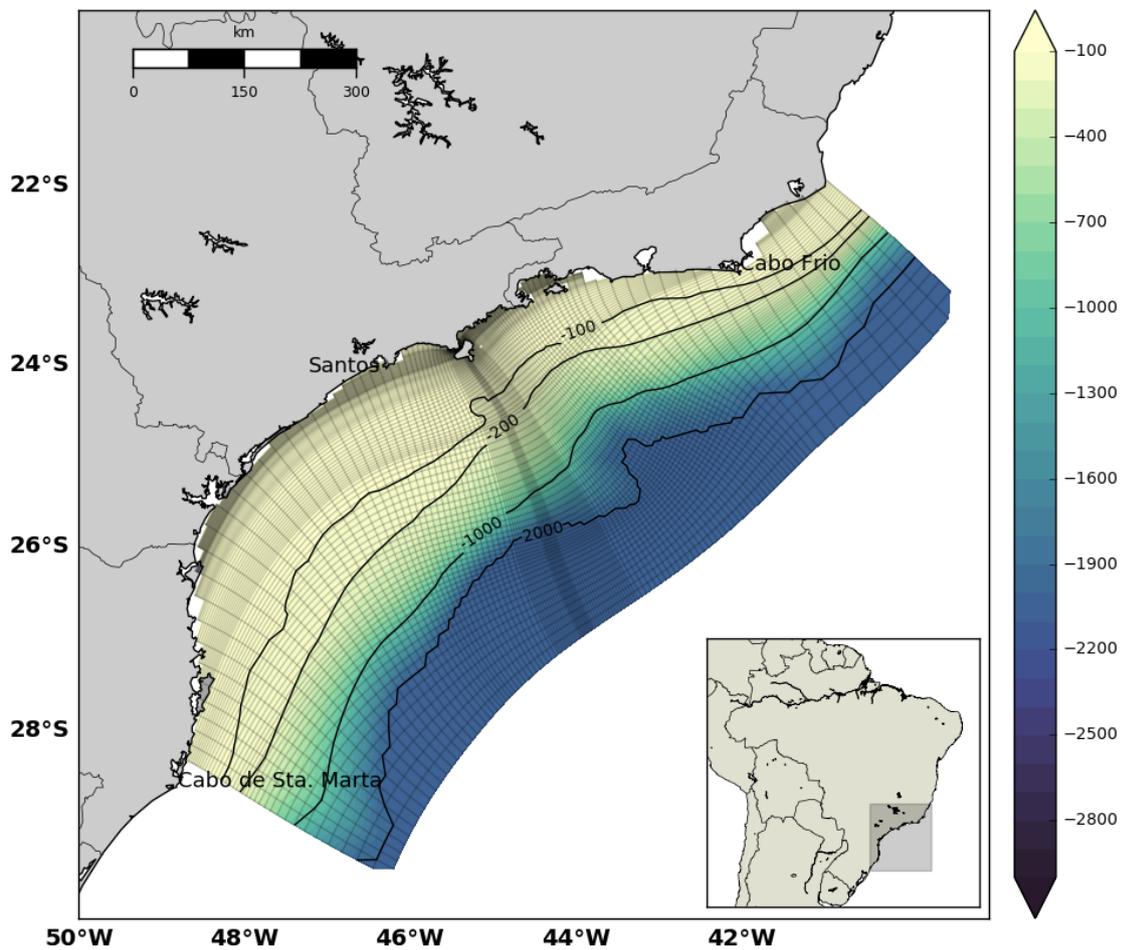


Figura 3.1: Grade curvilínea utilizada no modelo sECOM com batimetria e isóbatas em metros. Fonte: LHiCo.

Verticalmente o modelo trabalha com níveis sigma, sendo escolhido para este trabalho 21 divisões igualmente espaçadas. Como as velocidades horizontais predominam, os cálculos então foram feitos com a média vertical dessa velocidade em cada ponto  $(x, y)$ .

Para estudo da DP próximo à superfície, e comparação com dados coletados, foi utilizada a média vertical dos primeiros cinco níveis sigma, o que corresponde à parte 25% superior da coluna d'água.

### 3.1.2.2 Configurações e Características de Entradas e Saídas

Os ventos utilizados para forçar o sECOM são do modelo BRAMS (Freitas et al., 2009), operacional do CPTEC-INPE, com resolução espacial de 5 km, que foram interpolados para a grade utilizada. Os resultados do BRAMS são disponibilizados a cada doze horas. A maré é introduzida nos contornos abertos da grade por componentes harmônicas obtidas do TPXO 7.2 (Egbert e Erofeeva, 2002). As climatologias sazonais de temperatura e salinidade utilizadas são baseadas no trabalho de Rezende (2003) e em dados do LHiCo, inseridas em 37 níveis padrão, para cada uma das quatro estações do ano. As condições de contorno são do tipo radiativa, desenvolvida por Reid e Bodine (1968).

O modelo é inicializado pelo menos dez dias antes da estação sazonal a ser simulada, para aquecimento, e após esse período ele roda em modo diagnóstico, ou seja, os campos de temperatura e salinidade não evoluem no tempo. Os resultados são salvos com resolução temporal de dez minutos para todo o período em arquivos de saída que contêm doze horas simuladas.

### 3.1.3 Dados Coletados no Canal de São Sebastião

Pesquisadores do LHiCo tem estudado extensivamente o CSS, o que permitiu que um grande conjunto de dados da região fosse armazenado. Desses, se escolheu para trabalhar os dados de dois correntógrafos localizados próximos ao centro do canal, identificado pelo círculo amarelo na Figura 3.2. Esses equipamentos estão instalados nos níveis de cerca de cinco e quinze metros abaixo da superfície livre, respectivamente, num ponto onde a profundidade local é de cerca de vinte metros. A localização exata dos correntógrafos na coluna d'água pode variar alguns poucos metros dependendo das condições do local, especialmente a intensidade da corrente e altura da maré.

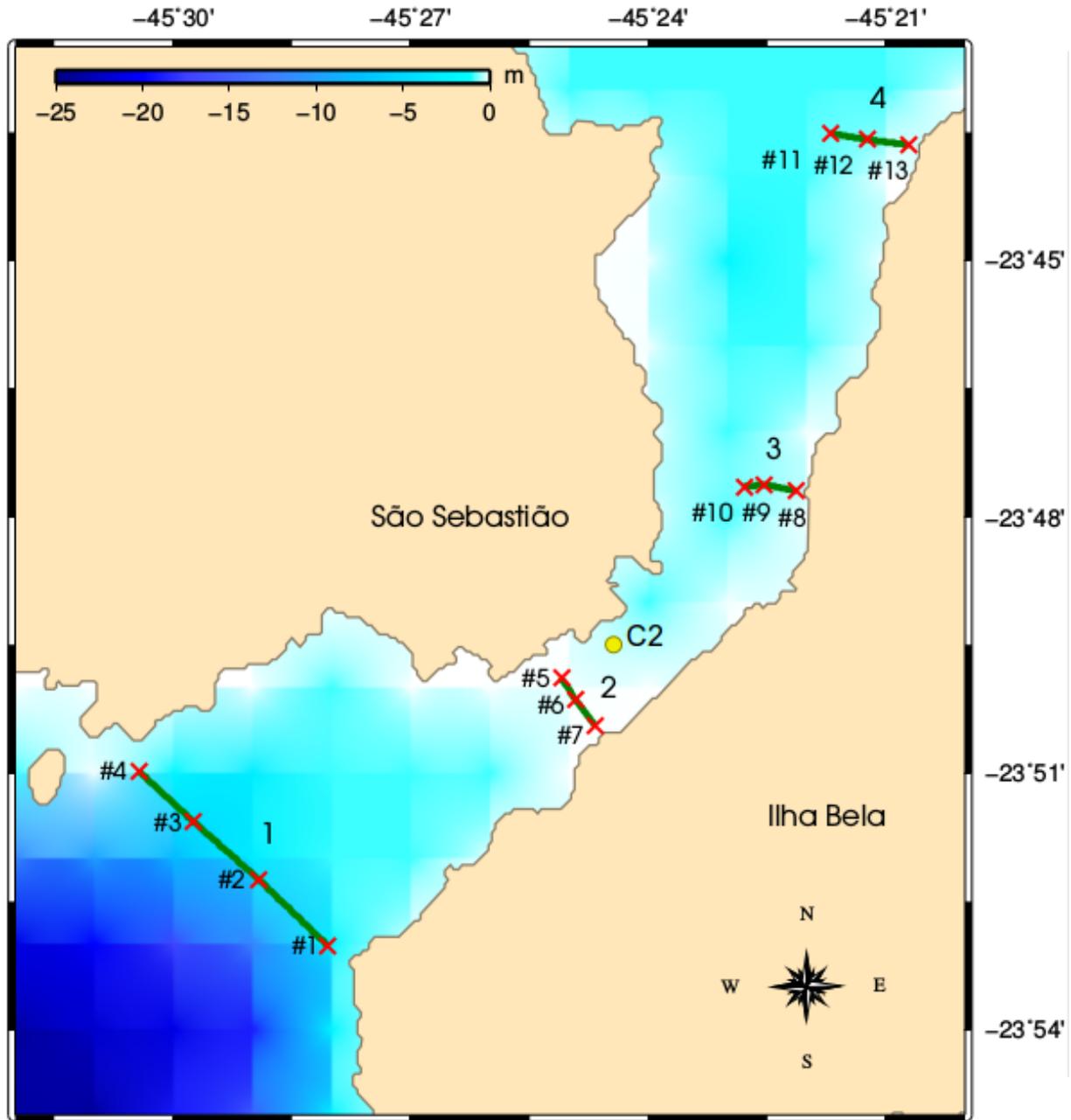


Figura 3.2: Canal de São Sebastião e identificação de locais de estudo. Local do fundeio dos correntógrafos identificado pelo círculo amarelo (C2). Fonte: LHiCo.

### 3.2 Resultados

Nesta seção será apresentada inicialmente uma comparação dos resultados de um ponto de grade com dados coletados pelo LHiCo no CSS. Em seguida, serão mostrados os resultados obtidos organizados em tópicos.

### 3.2.1 Comparação com Dados Coletados no Canal de São Sebastião

Analisando os dados coletados no CSS, observou-se que o período entre 1° de julho de 2016 e 30 de setembro de 2016 era o que continha a maior série contínua e coerente do período de estudo. Assim, a comparação entre os correntógrafos e o ponto do modelo que mais se aproximava do local indicado foram feitas para esse intervalo de tempo. Na Figura 3.3 são apresentadas as séries temporais de corrente para a média vertical na coluna e a média vertical na superfície do modelo e para as observações dos correntógrafos de fundo e de superfície.

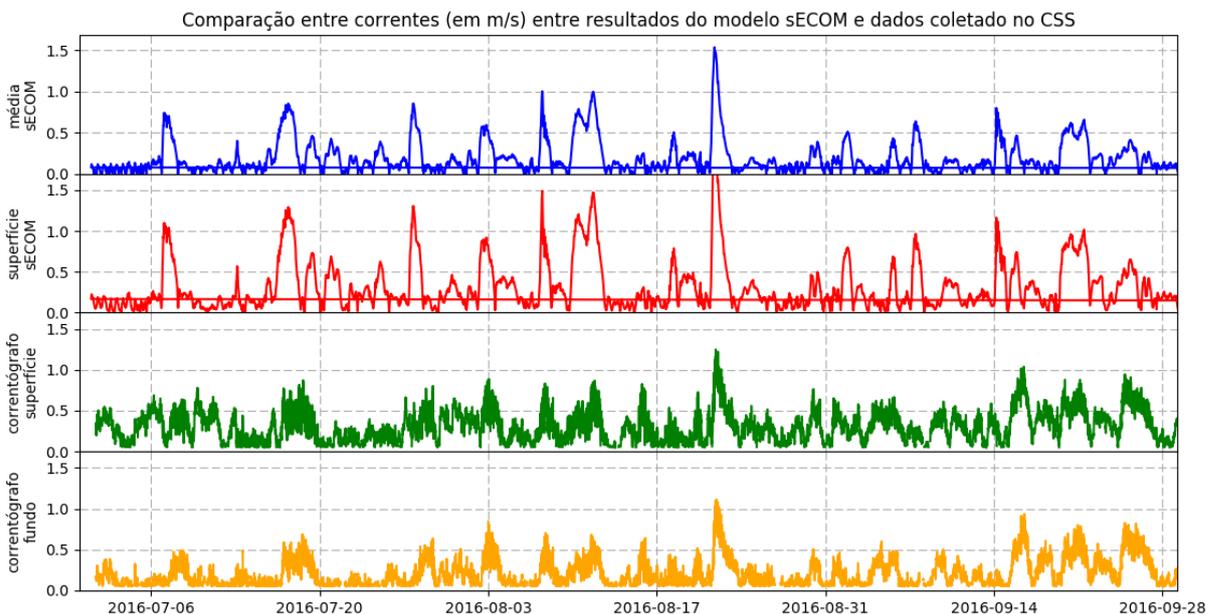


Figura 3.3: Séries de tempo da intensidade da corrente (em  $m/s$ ) no Canal de São Sebastião no ponto C2, obtidos com o modelo sECOM (gráfico superior: média vertical na coluna; segundo gráfico de cima para baixo: média vertical nos primeiros cinco níveis sigma) e com observações de correntógrafos (terceiro gráfico: nível aproximado de 5 m abaixo da superfície; quarto gráfico: nível aproximado de 15 m abaixo da superfície).

Apesar de apresentar valores superiores, há concordância visual entre os resultados modelados e observados para eventos com maior energia cinética. O parâmetro *skill* é uma forma de avaliar quantitativamente a calibração de dados simulados e foi apresentado por Willmott (1981). O valor de *skill* entre o correntógrafo superficial e a média vertical na coluna modelada foi de 0,427 e para o valor do correntógrafo de superfície e a média vertical na superfície modelada foi de 0,377. Vale ressaltar para o fato que foram utilizados

os dados brutos do correntógrafo, sem qualquer filtragem ou tratamento. Na Figura 3.4 que mostra a densidade de potência ao longo do tempo para os mesmos quatro casos da Figura 3.3.

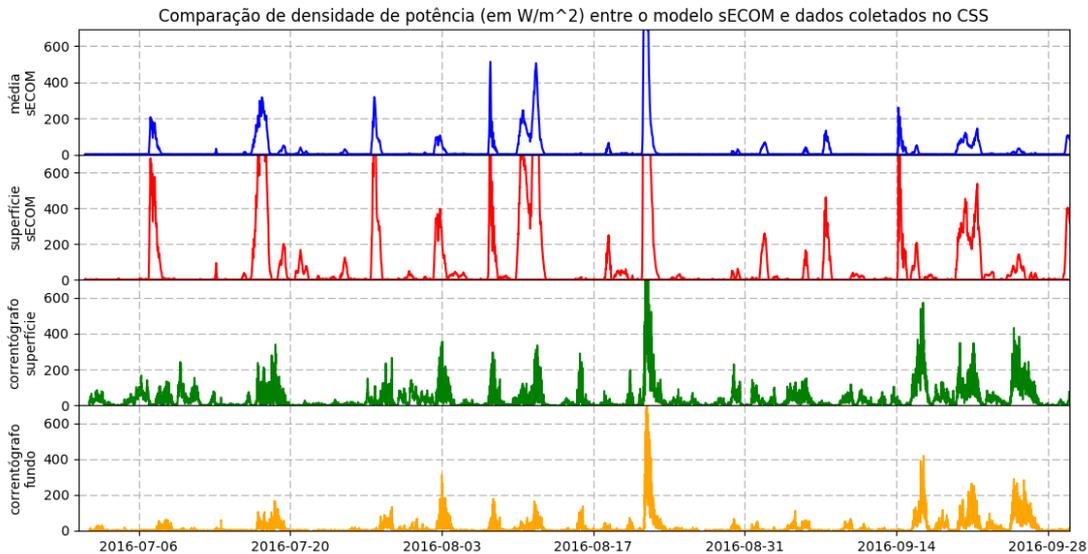


Figura 3.4: Séries de tempo de densidades de potência (em  $W/m^2$ ) no Canal de São Sebastião no ponto C2, obtidos com o modelo sECOM (gráfico superior: média vertical na coluna; segundo gráfico de cima para baixo: média vertical nos primeiros cinco níveis sigma) e com observações de correntógrafos (terceiro gráfico: nível aproximado de 5 m abaixo da superfície; quarto gráfico: nível aproximado de 15 m abaixo da superfície).

As séries temporais de DP não apresentam uma concordância visual tão alta quanto as séries de correntes, apesar de ser possível identificar a maioria dos eventos de grandes intensidades em todas elas. Calculando o *skill* entre o correntógrafo de superfície e a média vertical da coluna modelada se obtém 0,138 e para o correntógrafo de superfície e a média vertical na superfície é de apenas 0,043.

As informações das Figuras 3.3 e 3.4 foram quantificadas e resumidas na Tabela 3.1, que apresenta os valores máximos e médios (com seus desvios padrão) para as correntes e densidades de potência para as quatro séries de tempo.

	Corrente ( $m/s$ )			Densidade de potência ( $W/m^2$ )		
	média	desvio padrão	máxima	média	desvio padrão	máxima
sECOM - média coluna	0,20	0,21	1,53	26,3	108,6	1853,3
sECOM - média superfície	0,32	0,31	2,23	93,8	344,8	5693,0
Correntógrafo superfície	0,32	0,18	1,25	36,2	63,0	994,7
Correntógrafo fundo	0,23	0,17	1,11	19,4	46,3	700,2

Tabela 3.1 - Valores médios, desvios padrão e máximos para as correntes e densidades de potências para o ponto C2 no Canal de São Sebastião para correntógrafos a 5 m e 15 m abaixo da superfície livre e resultados do modelo sECOM para o mesmo ponto (média vertical da coluna e média vertical da superfície).

Os valores apresentados na Tabela 3.1 evidenciam que não é possível calcular a DP média apenas pela média das correntes já que ela é proporcional ao cubo.

Para o período estudado, os dados direcionais dos correntógrafos apresentavam inconsistências devido a problemas no sistemas de detecção de orientação e sentido dos equipamentos. Assim, não foi possível fazer uma validação dessa característica.

### 3.2.2 Densidade de Potência

Com o objetivo de avaliar o potencial energético das correntes na região, foram criados mapas de densidade de potência média modelada no período, tanto para PCSP, quanto para a área de estudo. Inicialmente se observou a média na coluna d'água, dando origem à Figura 3.5 que apresenta também um ponto batizado de Ilha ao largo da ISS. Nessa figura é possível observar que a área próxima à ISS apresenta os maiores valores de DP de toda a PCSP.

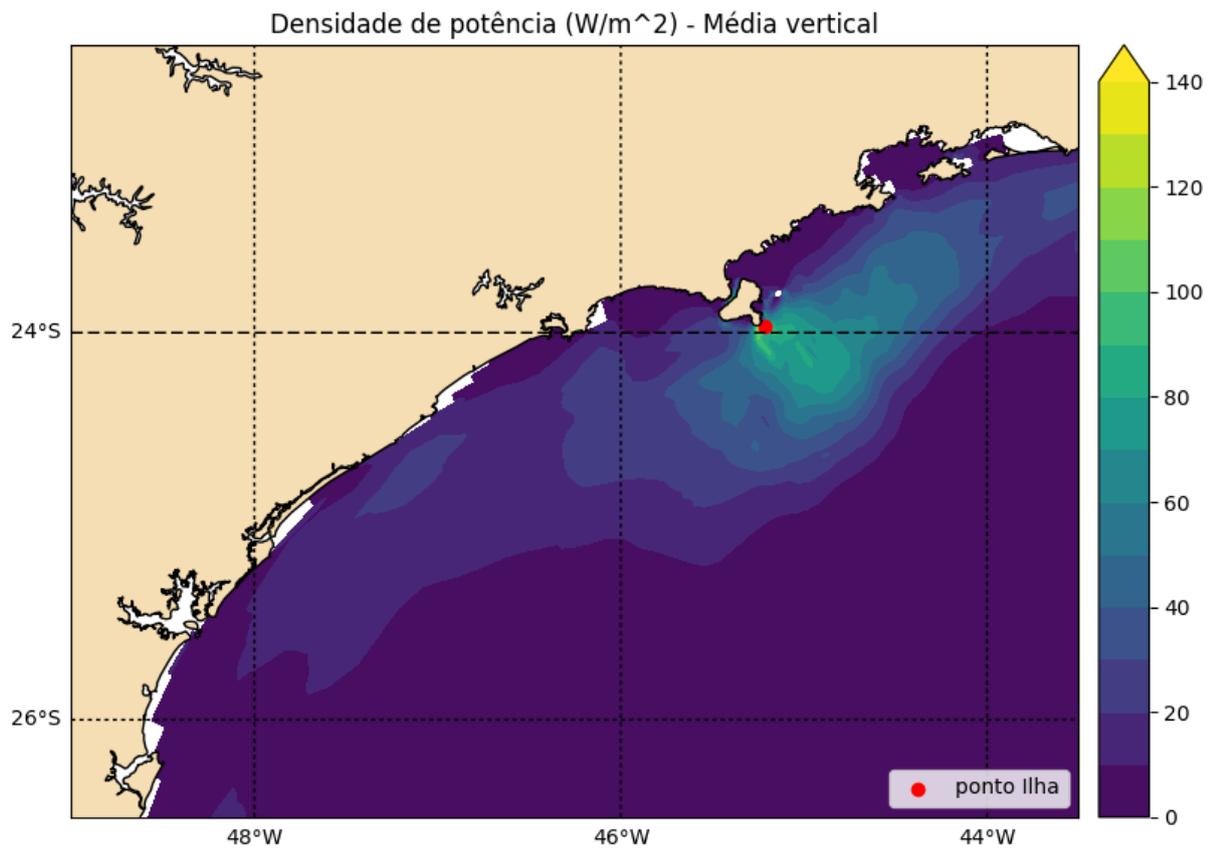


Figura 3.5: Média vertical na coluna de água da densidade de potência na Plataforma Continental do Estado de São Paulo, em  $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM.

A Figura 3.6 foca a região próxima à ISS e apresenta dois máximos locais de DP, um no CSS e outro a sudeste da ISS. Nela também são indicados os dois pontos de estudo, Ilha e Canal, explicados a seguir.

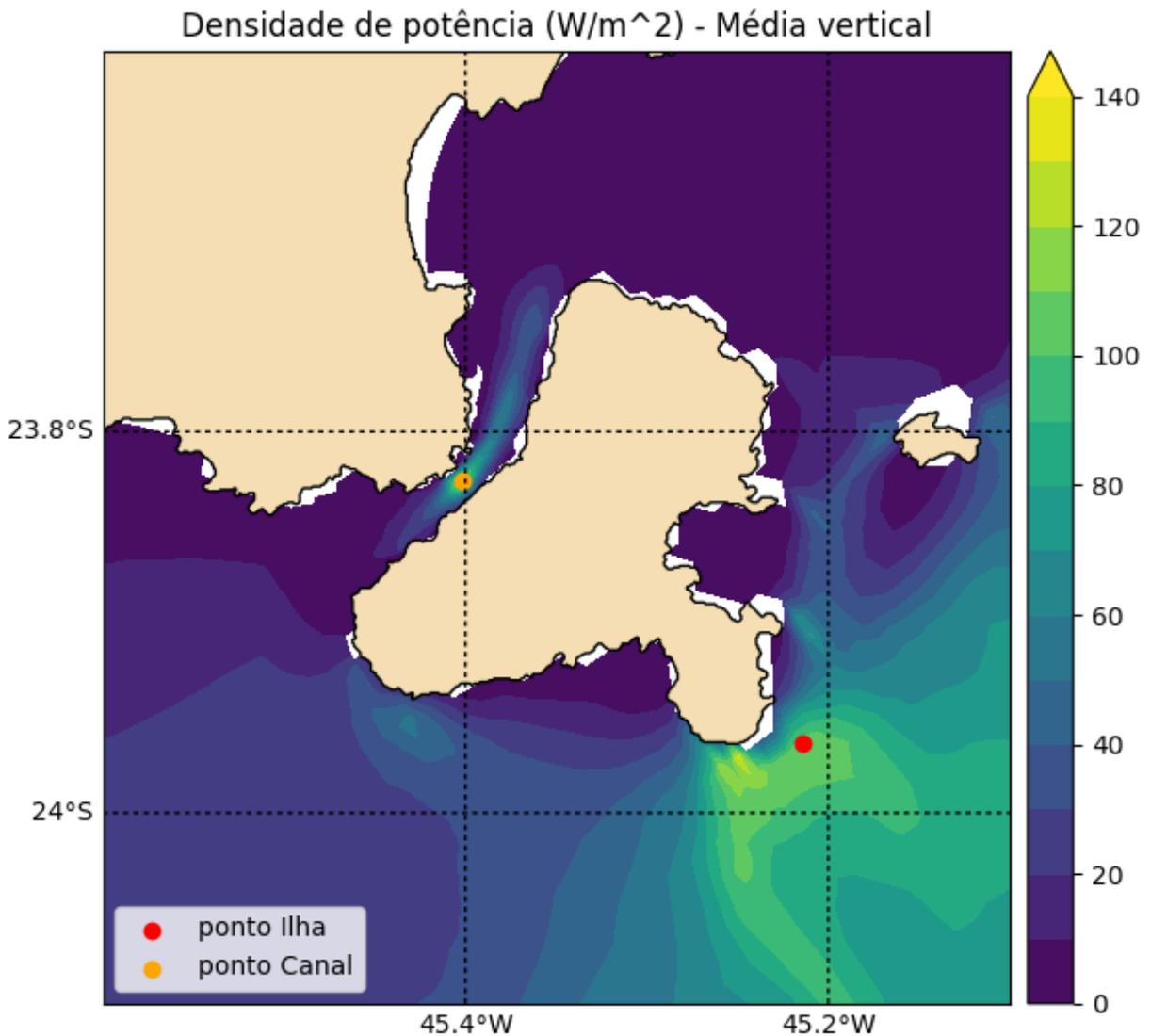


Figura 3.6: Média vertical na coluna de água da densidade de potência na região de São Sebastião, em  $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM.

Conforme apresentado na equação 3.6, a DP é proporcional ao cubo da intensidade da corrente. Assim, um pequeno aumento na segunda pode implicar num crescimento significativo da primeira. Outro fato conhecido é que as correntes superficiais são mais intensas, assim optou-se por estudar o potencial dessa camada.

Como explicado anteriormente, o modelo trabalha na vertical com coordenadas sigma e se chamou de superfície os cinco primeiros níveis. Como os valores dessas coordenada são igualmente espaçados, isso implica que serão observados o 25% mais ao topo da coluna d'água. Por exemplo: para a região do CSS, com profundidade média de cerca de 20 m,

a superfície nesse trabalho se refere à média vertical de valores entre 0 m e 5 m. Para a região ao largo da ISS, com profundidade média de 50 m, a superfície será entre 0 m e 12,5 m.

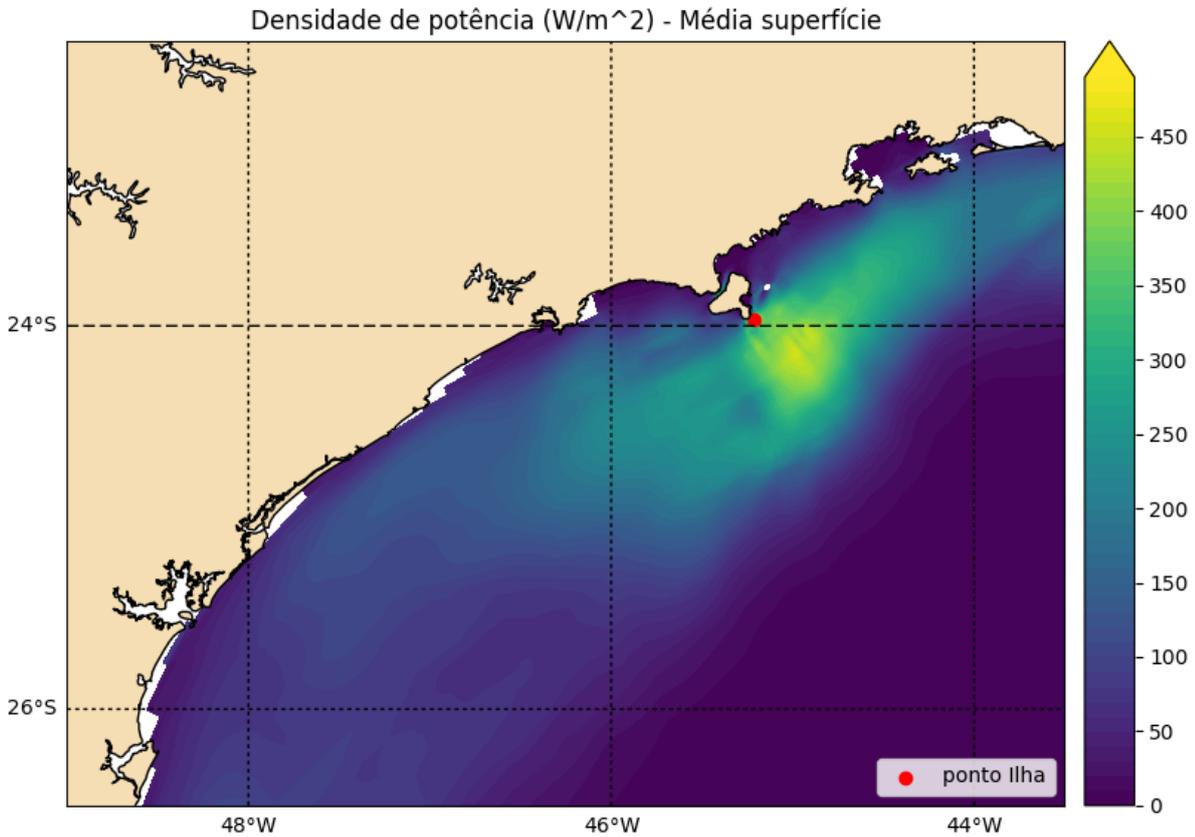


Figura 3.7: Média vertical na superfície da densidade de potência na Plataforma Continental do Estado de São Paulo, em  $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM.

Na Figura 3.7 é apresentado o resultado da DP superficial para a PCSP. Importante ressaltar que a escala é três vezes maior que as utilizadas nas Figuras 3.5 e 3.6. Nesse caso, o potencial energético da região de São Sebastião continua sendo o maior da PCSP.

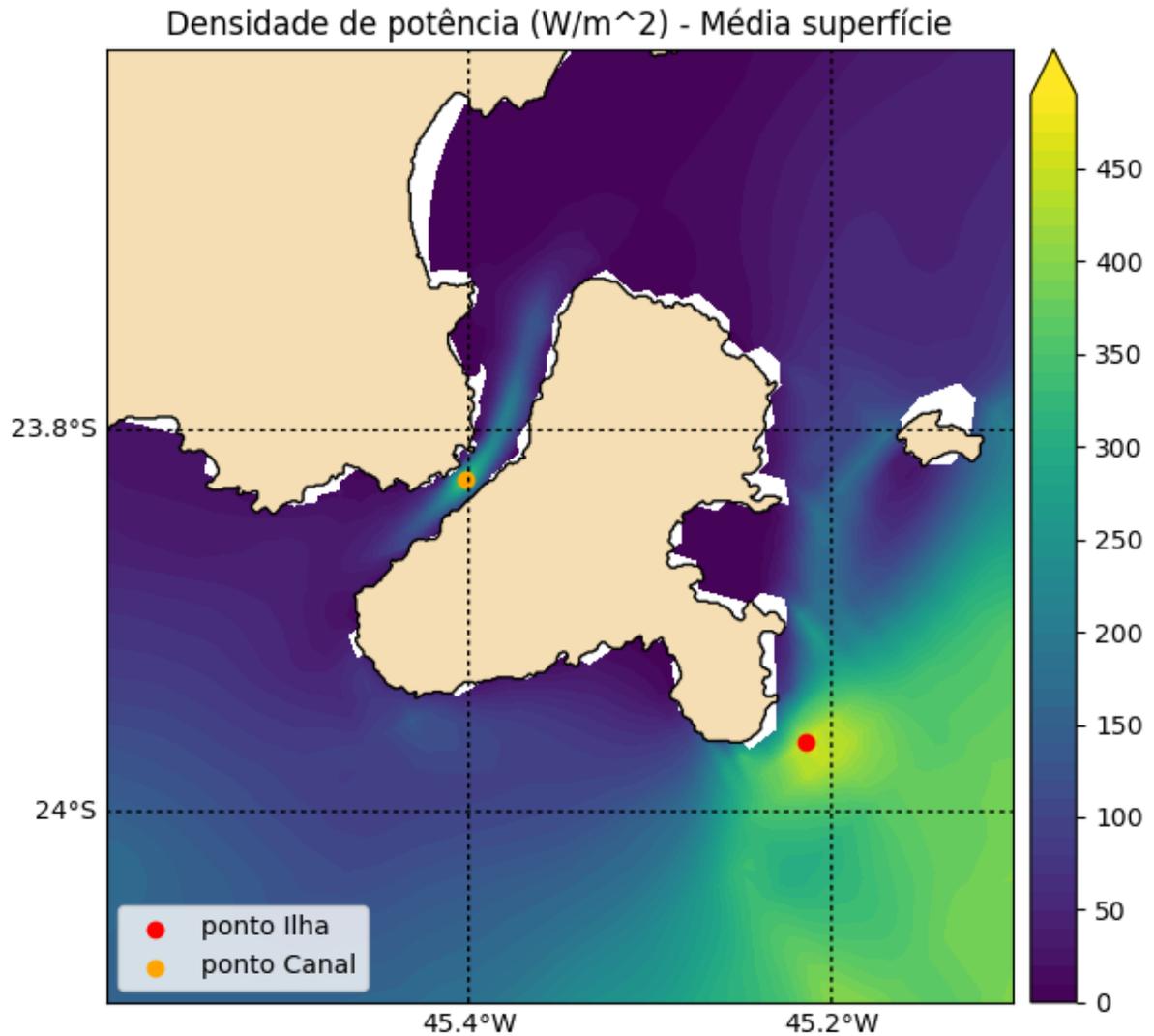


Figura 3.8: Média vertical na superfície da densidade de potência na região de São Sebastião, em  $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM.

A Figura 3.8 apresenta a média anual para o período de estudo da média vertical na superfície da DP para a área de estudo, também com escala três vezes maior que as Figuras 3.5 e 3.6 que apresentavam as médias na coluna, desde a superfície até o fundo. Nela é possível observar o motivo da escolha dos pontos batizados de Canal e Ilha: neles se encontram os máximos locais. Essas duas localidades serão estudadas com mais detalhe a seguir.

### 3.2.3 Variabilidade Temporal

A densidade de potência varia muito ao longo do período anual estudado e, em todas as séries temporais, ela fica abaixo de  $100 \text{ W/m}^2$  na maior parte do tempo. Entretanto, em diversos momentos ela tem picos que são uma ordem de grandeza maior do que a média. Na Figura 3.9 são apresentadas as evoluções de DP média na coluna para os dois pontos de estudo.

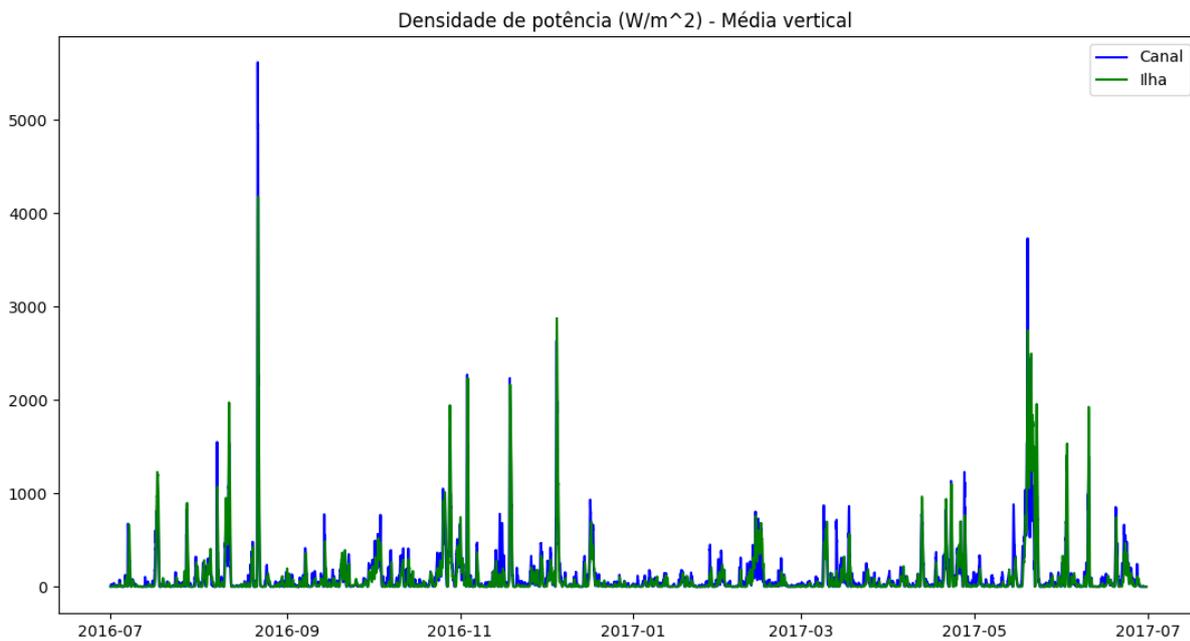


Figura 3.9: Séries temporais da média vertical da coluna da densidade de potência ao longo do período estudado, em  $\text{W/m}^2$ , para os pontos Ilha (verde) e Canal (azul), obtidos com o sECOM.

Não se nota um grande sinal na faixa de frequência diurna e semidiurna,  $12 \text{ h}$  e  $24 \text{ h}$ , respectivamente, o que corrobora o fato de que a maré não é a forçante principal para as correntes na região próxima à ISS. Também não se nota grande variação sazonal, indicando que o gradiente de densidade (diferente em cada estação do ano) não é a forçante mais significativa para a densidade de potência.

Para avaliar melhor a variação temporal, foram feitos gráficos das médias mensais para as quatro situações. Elas são apresentadas nas Figuras 3.10 (valores médios verticais na coluna) e 3.11 (valores médios verticais na superfície).

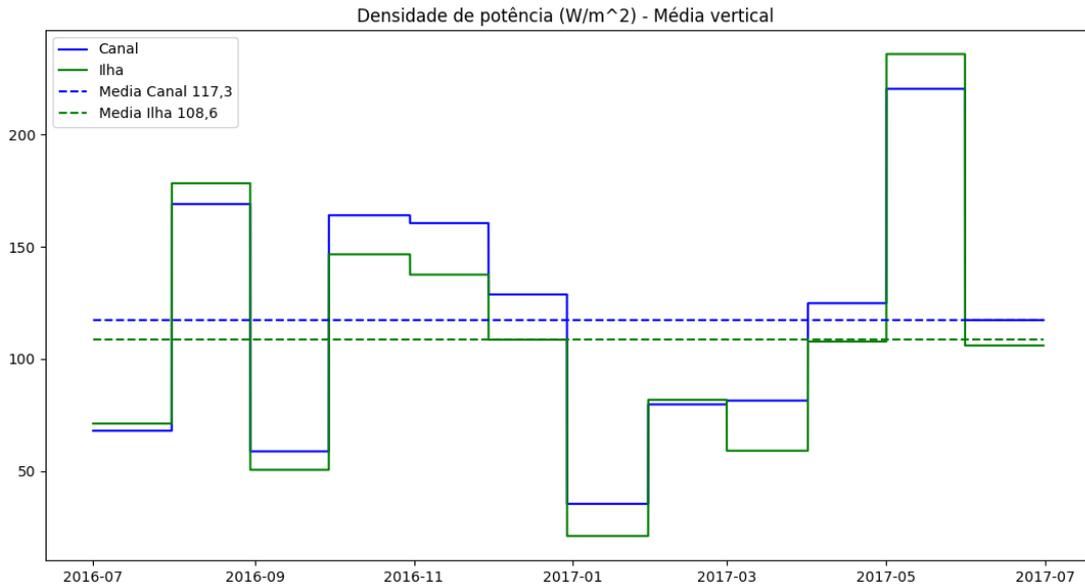


Figura 3.10: Médias mensais e anuais da densidade de potência vertical média em toda coluna de água em  $W/m^2$  para os pontos Ilha (verde) e Canal (azul), obtidos com o modelo sECOM.

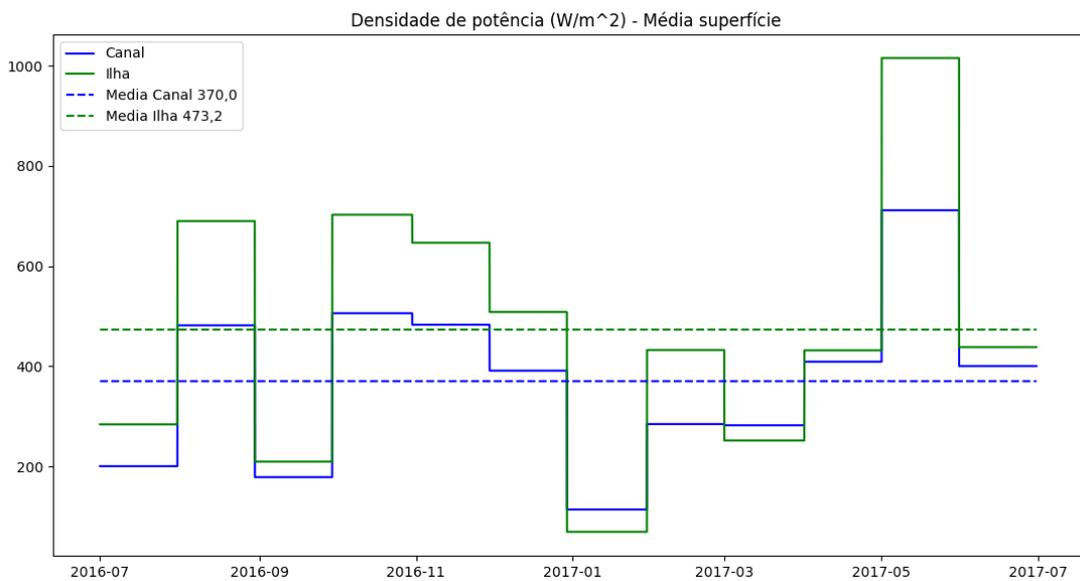


Figura 3.11: Médias mensais e anuais da densidade de potência vertical média na superfície em  $W/m^2$  para os pontos Ilha (verde) e Canal (azul), obtidos com o modelo sECOM.

É possível observar a concordância entre o potencial energético nos dois pontos, o que indica que as forçantes devem ter a mesma influência em ambos. A correlação entre as médias mensais nos dois pontos é 0,978 para a DP média vertical em toda coluna de água e 0,972 para a DP média vertical na camada superficial. Em outras palavras, as características hidrodinâmica das duas localidades são similares. Os dados das Figuras

3.10 e 3.11 são resumidos na Tabela 3.2.

As médias anuais, variando entre extremos de  $108,6 W/m^2$  a  $473,2 W/m^2$ , são consideradas baixas quando comparadas a outros locais bastante energéticos, sobretudo com fortes correntes maré, que apresentam valores da ordem de  $1 kW/m^2$  (Cornett, 2006; Ferreira, 2011; Borthwick et al., 2013; Vanzwieten et al., 2014; Laws e Epps, 2016; Liu et al., 2017). Em alguns locais ela pode passar de  $10 kW/m^2$ , como na baía de Fundy - Canadá (Cornett, 2006) ou em locais da China (Liu et al., 2011). Entretanto esses valores são superiores a outros encontrados em pesquisas focadas na Região Sul do País, como em Fischer et al. (2015) que encontrou máximo de  $9 W/m^2$  de DP em dados de correntógrafos pra região de Rio Grande - RS e em Kirinus e Marques (2015a) que encontraram cerca de  $35 W/m^2$  na região ao largo da Lagoa dos Patos.

	Densidades de potência em $W/m^2$							
	Média vertical na coluna				Média vertical na superfície			
	Ponto Canal		Ponto Ilha		Ponto Canal		Ponto Ilha	
	média	$\sigma$	média	$\sigma$	média	$\sigma$	média	$\sigma$
jul 2016	67.9	153.1	71.1	201.9	200.3	439.2	283.9	786.4
ago 2016	169.0	535.2	178.3	491.0	481.6	1441.4	690.0	1598.6
set 2016	58.7	82.8	50.5	80.6	178.4	243.9	209.4	339.0
out 2016	164.0	236.0	146.6	267.5	505.8	696.4	702.7	1192.6
nov 2016	160.5	295.1	137.5	337.5	482.8	840.3	646.7	1407.8
dez 2016	128.7	285.9	108.5	322.0	391.1	811.2	508.3	1292.9
jan 2017	35.4	53.1	21.0	32.7	113.7	165.2	69.1	110.4
fev 2017	79.7	121.2	81.7	152.0	284.5	451.8	432.2	830.6
mar 2017	81.4	145.9	59.0	114.9	282.0	503.0	251.6	510.3
abr 2017	124.8	198.0	107.7	204.2	409.0	643.0	431.7	843.0
mai 2017	220.4	455.1	235.8	533.2	711.6	1400.2	1015.7	2240.5
jun 2017	117.3	199.5	105.9	261.1	400.2	662.1	438.0	1121.8

Tabela 3.2 - Médias mensais e desvios padrão ( $\sigma$ ) da densidade de potência, em  $W/m^2$ , para os pontos Ilha e Canal para a média vertical em toda coluna de água e a média vertical na camada superficial, obtidos com o sECOM.

Na Tabela 3.2 é possível ver que os valores médios superficiais são cerca de três a quatro vezes maiores que os valores médios para toda a coluna vertical. Isso ocorre porque valores de correntes que sejam 45% maiores vão implicar em valores de DP 205% superiores.

---

Nas quatro séries, a diferença entre as médias máximas (maio de 2017) e mínimas (janeiro de 2017) é de uma ordem de grandeza. Isso mostra que a energia cinética varia bastante temporalmente na região e que uma climatologia mensal por um período de integração maior, provavelmente, indicará grandes desvios padrão.

### 3.2.3.1 Variabilidade Sazonal

Com o intuito de verificar o comportamento ao longo das estações do ano, foram feitos mapas de DP na área de estudo para cada um desses períodos. Na Figura 3.12 são apresentados os resultados para a média vertical da coluna.

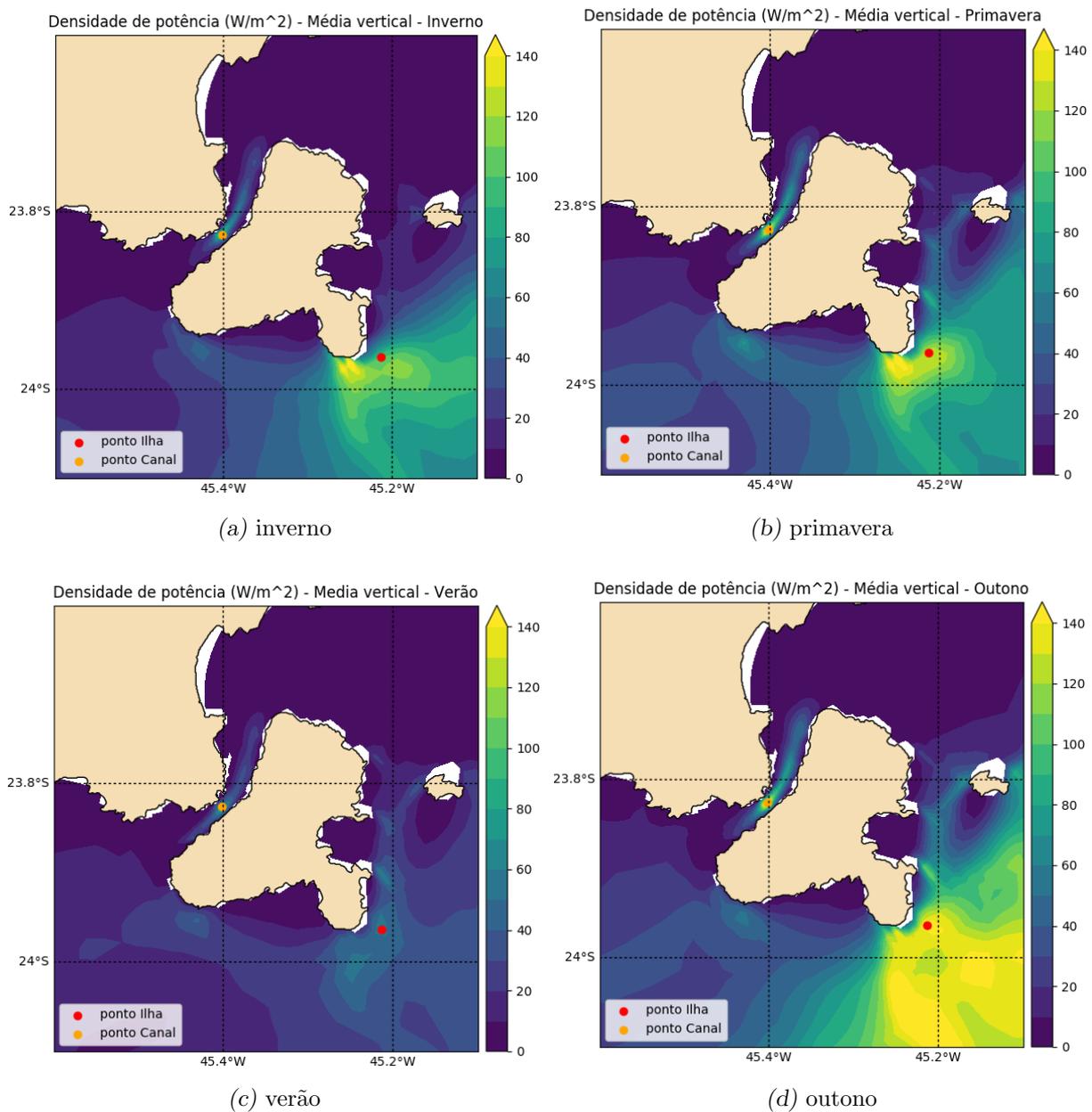


Figura 3.12: Médias verticais na coluna de água da densidade de potência na região de São Sebastião, em  $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM para as diferentes estações do ano.

Na Figura 3.13 são apresentadas as médias sazonais da densidade de potência superficial, assim como a indicação dos pontos de estudo. Vale ressaltar que a escala é três vezes maior que a da Figura 3.12.

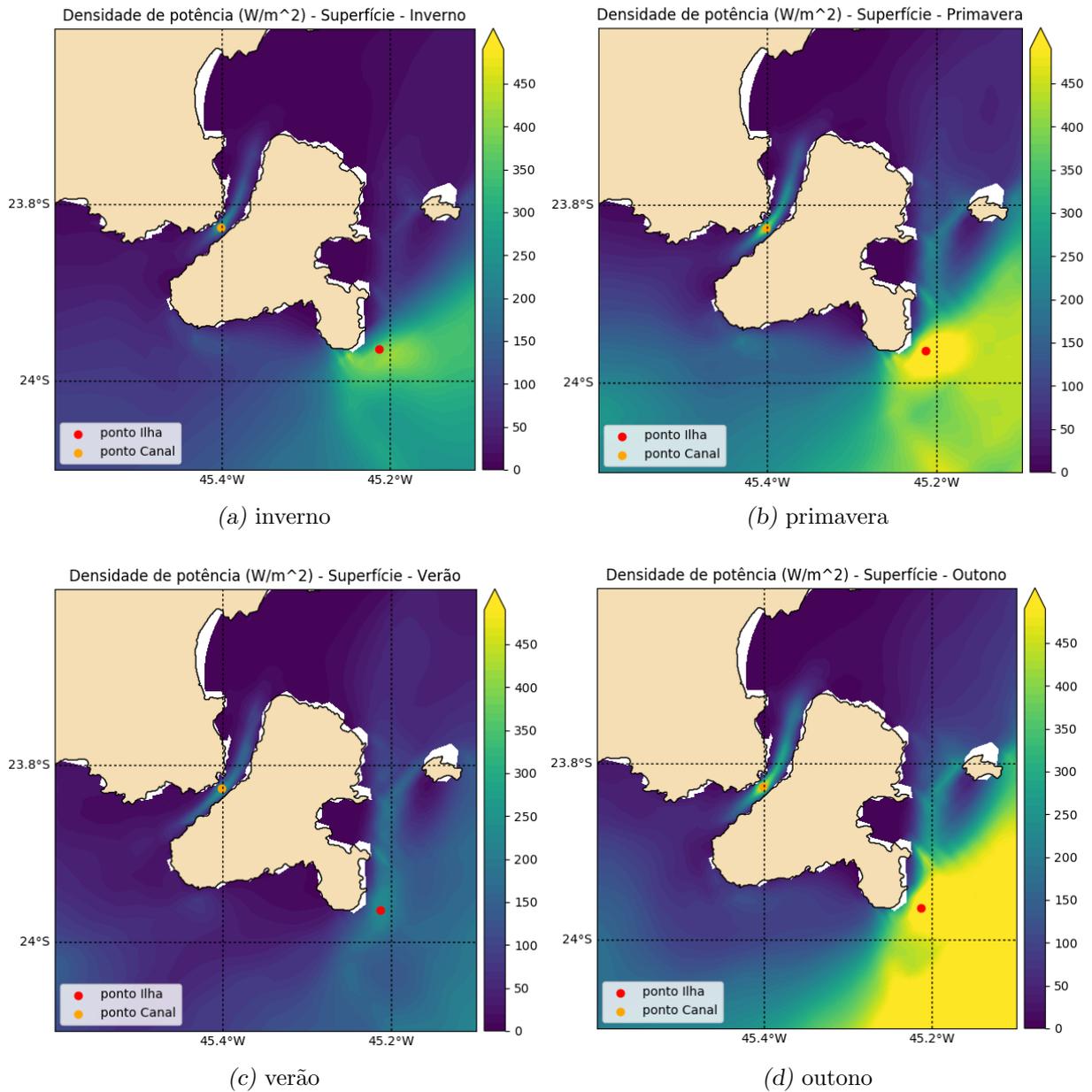


Figura 3.13: Médias verticais na superfície da densidade de potência na região de São Sebastião, em  $W/m^2$ , obtida com o modelo sECOM para as diferentes estações do ano.

A Tabela 3.3 resume os valores apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13 para os pontos de interesse. É pertinente notar que a estação menos energética foi o verão, com intensidades menores do que a aquelas do outono, período com maiores DP. Isso reforça a ideia de grande variabilidade temporal da DP, o que não permite uma extrapolação direta desses resultados para outros anos sem um estudo de mais longa duração.

	Densidades de potência em $W/m^2$							
	Média vertical na coluna				Média vertical na superfície			
	Ponto Canal		Ponto Ilha		Ponto Canal		Ponto Ilha	
	média	$\sigma$	média	$\sigma$	média	$\sigma$	média	$\sigma$
inverno 2016	98,5	328,7	100,0	315,0	286,7	892,0	394,3	1068,1
primavera 2016	151,0	274,0	130,9	310,9	459,9	786,6	619,1	1303,2
verão 2017	65,5	115,7	54,0	114,4	226,9	409,7	251,1	585,4
outono 2017	154,0	312,4	149,8	367,5	506,6	979,0	628,2	1550,6

Tabela 3.3 - Médias e desvios padrão ( $\sigma$ ) por estação do ano da densidade de potência, em  $W/m^2$ , para pontos Ilha e Canal para a média vertical em toda coluna de água e a média vertical na superfície, obtidos com o sECOM.

### 3.2.4 Intensidades das Correntes

No desenvolvimento um projeto de extração de energia, é bastante importante quantificar não só a energia gerada mas, também, os esforços aos quais o dispositivo para extração será submetido. Para auxiliar nessa análise, foram feitos histogramas dos valores de correntes para ambos os pontos de estudo tanto para a média vertical na coluna quanto para a média vertical na superfície.

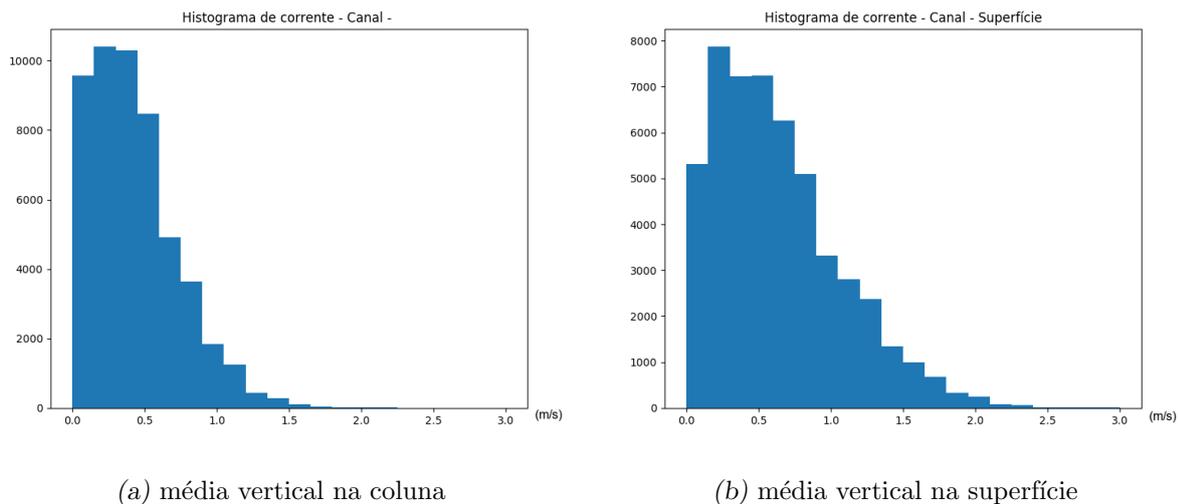


Figura 3.14: Histogramas de correntes em número de ocorrências, por  $m/s$ , para o ponto Canal. À esquerda a média vertical na coluna e à direita a média vertical na superfície.

A Figura 3.14 apresenta os resultados para o CSS. Como esperado, as médias verticais

de correntes na superfície são mais intensas e apresentam média de  $0,64 \text{ m/s}$  contra  $0,43 \text{ m/s}$  da média vertical na coluna. Segundo os resultados do modelo, a magnitude na superfície pode chegar até  $3 \text{ m/s}$ , valor superior aos máximos observados.

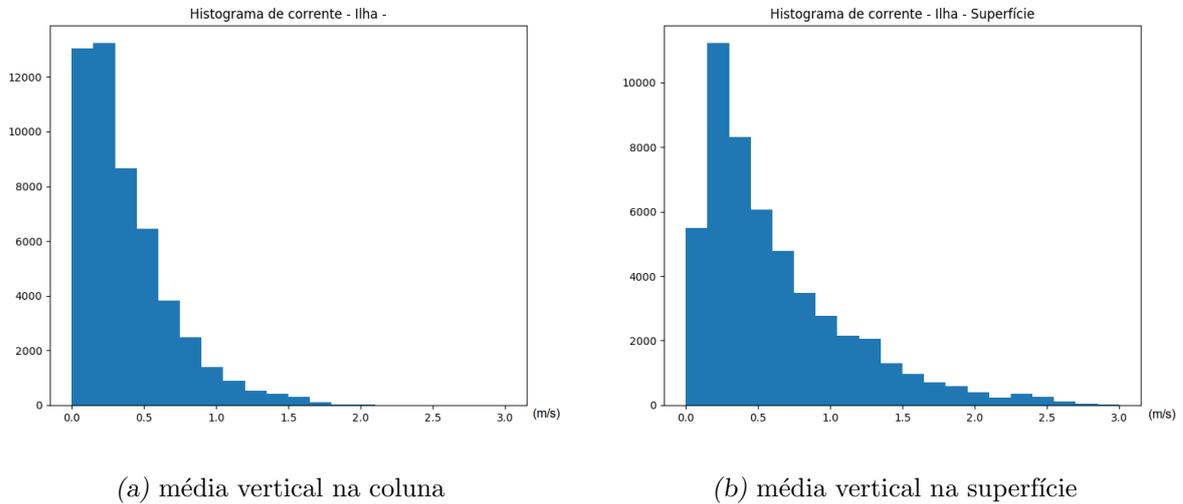


Figura 3.15: Histogramas de correntes em número de ocorrências, por  $m/s$ , para o ponto Ilha. À esquerda a média vertical na coluna e à direita a média vertical na superfície.

A Figura 3.15 apresenta as correntes para o ponto Ilha, ao largo da ISS. Novamente, as médias verticais de correntes na superfície podem chegar a  $3 \text{ m/s}$  e têm média maior de  $0,63 \text{ m/s}$  contra  $0,38 \text{ m/s}$  da média das correntes médias na coluna.

### 3.2.5 Direções Predominantes

Para analisar a direcionalidade da densidade de potência nos pontos escolhidos, foram feitos histogramas polares. Os resultados para a média vertical da superfície e para a média vertical da coluna foram bastante similares. Então, optou-se por apresentar apenas os primeiros, mais energéticos, por simplicidade.

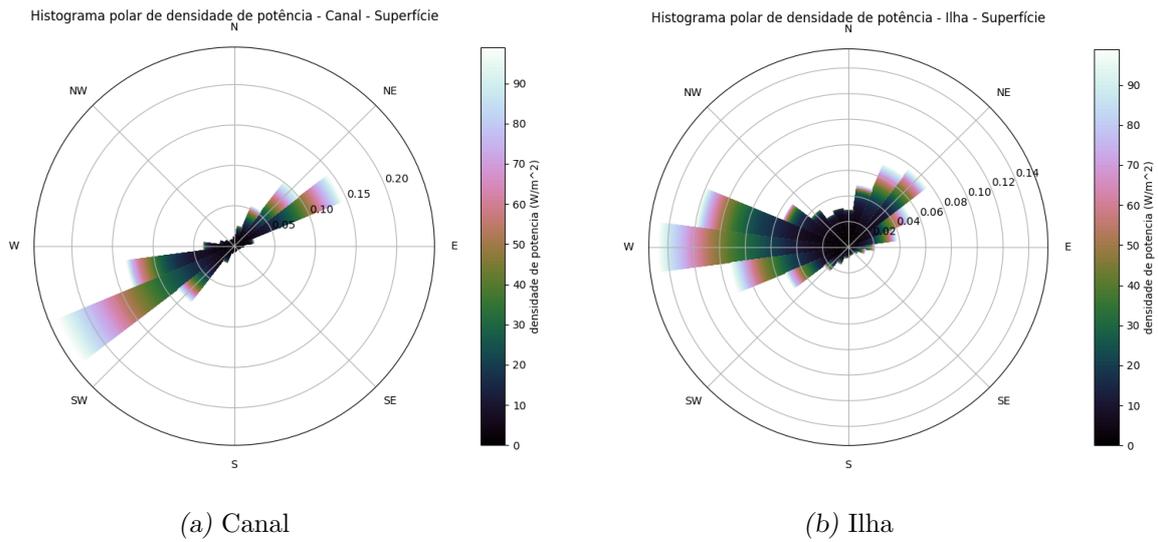


Figura 3.16: Histogramas polares de densidade de potência em  $W/m^2$  e frequência de ocorrência da média vertical na superfície para os pontos Canal (esquerda) e Ilha (direita).

A Figura 3.16 apresenta o resultado anual para a DP superficial para os dois pontos de interesse. O gráfico para o CSS é predominantemente bimodal com as correntes para SW sendo mais frequentes e intensas do que as que fluem para NE, o que corrobora as informações de Fontes (1995). Já para o ponto Ilha, as correntes ficam aproximadamente paralelas à linha de costa da ISS, resultando num gráfico razoavelmente bimodal, com um polo W mais intenso e um NE mais ameno.

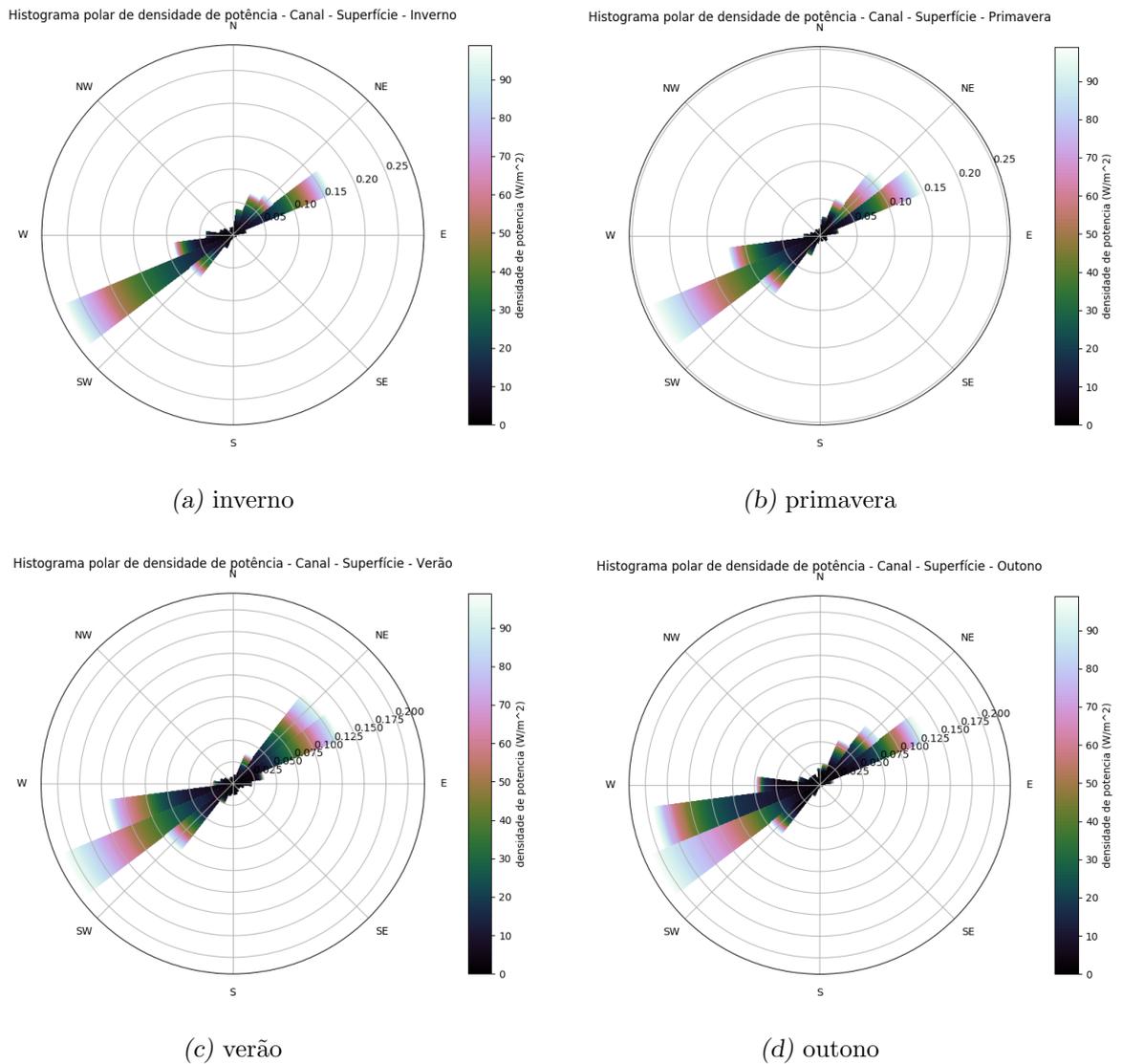


Figura 3.17: Histogramas polares sazonais da média vertical na superfície da densidade de potência, em  $W/m^2$ , para o ponto Canal em frequência de ocorrência.

Na Figura 3.17 são apresentados os diagramas polares para as várias estações do ano para o ponto Canal. Não se nota uma grande diferença sazonal na distribuição do sentido da DP. A característica bimodal se mantém, com as correntes para SW ocorrendo em dois terços do período e, para NE, no outro terço.

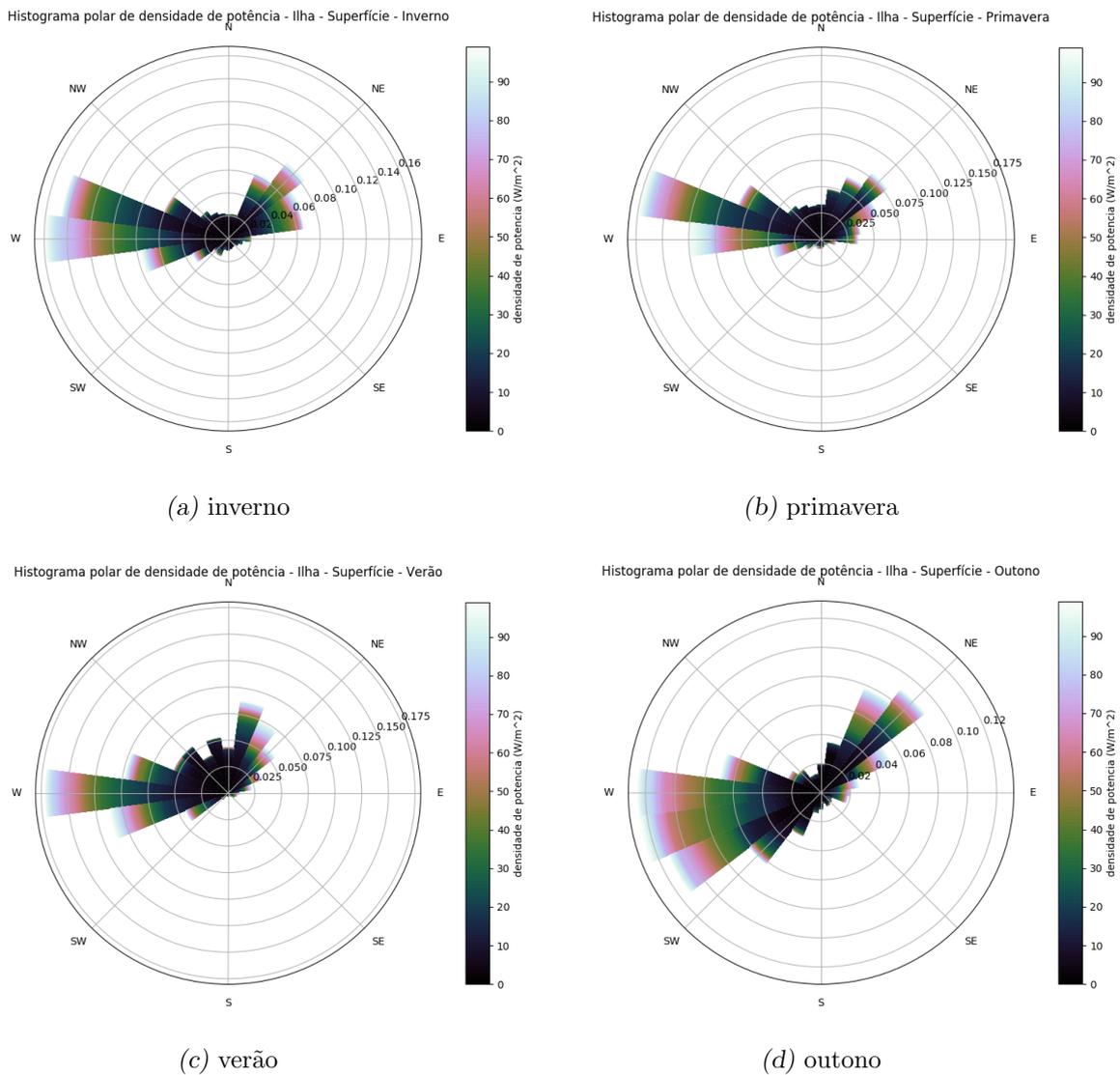


Figura 3.18: Histogramas polares sazonais da média vertical na superfície da densidade de potência, em  $W/m^2$ , para o ponto Ilha em frequência de ocorrência.

Na Figura 3.18 é mostrada a variação sazonal do histograma polar para o ponto Ilha. Ao longo das estações do ano há ligeira variação dos sentidos dominantes, mas a distribuição fica bastante concentrada em um polo para oeste mais energético e outro para nordeste menos energético.

Em ambos os casos, os resultados corroboram a tese da DP na região ser bastante regida pelo vento. A ASAS e seu ventos de nordeste são mais frequentes e dominam na parte da PCSE ao norte da ISS, forçando correntes que deixam a costa à direita. Assim como os sistemas frontais que impulsionam ventos de sul, menos frequentes mas intensos,

que são capazes de inverter o sentido do fluxo em determinados momentos.

### 3.3 Discussão

Neste capítulo foi estimada a densidade de potência para a região de São Sebastião para o período de 1° de julho de 2016 a 30 de junho de 2017. Foram identificados dois pontos de estudo com grande potencial para extração de energia. Um deles, ao largo da Ilha de São Sebastião, com média de  $473,2 \text{ W/m}^2$ , em águas relativamente profundas (50 m) que permitem a instalação de grandes turbinas. Outro, dentro do Canal de São Sebastião, um pouco menos energético, mas que apresenta grande proteção contra intempéries e facilidade de instalação, operação e manutenção.

Os resultados indicam que a principal forçante, do ponto de vista da DP, é a meteorológica, ou seja, os ventos. A maré e o gradiente de densidade apresentam pequenos sinais que não contribuem de forma significativa para a energia do recurso, apesar de serem importante para a circulação e outras características oceanográficas.

Curioso notar que, caso fosse tentado utilizar apenas o cubo da corrente média para inferir a densidade de potência média, o valor seria aproximadamente quatro vezes menor que o real em todos os casos. Isso indica que deve ser utilizado um intervalo de tempo adequado para o cálculo da DP, como o de dez minutos empregado neste trabalho. Caso fossem utilizados valores de corrente média a cada seis horas, por exemplo, a DP seria subdimensionada.

Os resultados apresentam grande variabilidade temporal, inclusive sazonal, indicando a grande dependência da DP dos ventos: os de nordeste da ASAS e de sul dos sistemas frontais. Quando comparados com dados e com a literatura, há indicações que os valores de DP encontrados devem estar superestimados, sobretudo por conta de uma pequena variação nas correntes causar uma grande variação na densidade de potência.

Finalmente, é importante ressaltar que os pontos encontrados são dos mais energéticos da Plataforma Continental do Estado de São Paulo. Entretanto, outras localidades não resolvidas pelo modelo, como canais e sistemas estuarinos, podem apresentar DP similares

ou até maiores. Há indícios de que o canal do Porto de Santos (Harari e Camargo, 1998) e a região de Ilha Comprida (Miranda et al., 1995) também tenham correntes intensas, que justificaria estudos similares nessas regiões.

## Ondas

Este capítulo é dedicado a avaliar o potencial energético das ondas de gravidades de superfície geradas por ventos. Primeiro é apresentada uma base teórica, em seguida os resultados obtidos e, finalmente, uma breve discussão.

Vale reforçar que neste trabalho serão abordadas exclusivamente as ondas de gravidade de superfície geradas pelo vento e o termo *ondas* e todas inferências e conclusões serão exclusivamente sobre elas. Adicionalmente, para elas e para os ventos é utilizada convenção meteorológica para direção, ou seja, se indica da onde vêm. Por exemplo, uma onda de sul é aquela que se propaga de sul para norte.

### 4.1 *Materiais e Métodos*

O cálculo do potencial energético das ondas é baseado no fluxo de energia (FE) do movimento oscilatório, o qual pode ser inferido pela altura significativa e pela velocidade de grupo.

#### 4.1.1 *Estimativa do Fluxo de Energia*

Para estimar o FE utiliza-se teoria linear de ondas que descreve a energia mecânica total por unidade de área,  $E_{mec}$ , particionada como a soma da energia cinética das partículas,  $E_c$ , e da energia potencial do deslocamento da superfície livre,  $E_p$ , ambas também por

unidade de área. Para os valores médios sobre um comprimento de onda, ou um período (representados pela barra superior):

$$\overline{E}_{mec} = \overline{E}_c + \overline{E}_p, \quad (4.1)$$

há equipartição de energia (Kundu e Cohen, 2008), e:

$$\overline{E}_c = \overline{E}_p = \frac{1}{16}g \times \rho \times H^2 \quad (4.2)$$

sendo  $g$  a aceleração gravidade,  $\rho$  a densidade da água e  $H$  a altura da onda. Portanto, a energia mecânica média por unidade de área é:

$$\overline{E}_{mec} = \frac{1}{8}g \times \rho \times H^2 \quad (4.3)$$

Kundu e Cohen (2008) demonstra que a energia da onda é transportada pela velocidade de grupo,  $c_g$ . Pode-se então obter o fluxo de energia médio por unidade de área:

$$FE = \frac{1}{8}g \times \rho \times H^2 \times c_g \quad (4.4)$$

$FE$  é a potência média da onda, que mede a energia que passa por unidade de seu comprimento. A sua unidade é  $W/m$  mas, usualmente, se trabalha com o múltiplo  $kW/m$ , por facilidade.

Denomina-se altura significativa de onda ( $H_s$ ) a média da terça parte das maiores alturas observadas. Estatisticamente, é aproximado por quatro vezes o desvio padrão,  $H_s = 4\sqrt{\sigma^2}$ . Como  $\sigma$  se relaciona com a amplitude da onda,  $H/2$ , por  $\sigma^2 = \frac{1}{2}(\frac{H}{2})^2$  (Thorpe, 1999), então  $H^2 = \frac{H_s^2}{2}$  pode ser substituído na equação 4.4 para se obter:

$$FE = \frac{1}{16}g \times \rho \times H_s^2 \times c_g. \quad (4.5)$$

Neste trabalho se utilizou os valores constantes de  $9,8 \text{ m/s}^2$  para  $g$  e  $1025 \text{ Kg/m}^3$  para  $\rho$ , o que faz a equação 4.5 ser avaliada em  $kW/m$  por:

$$FE = 0,6278125 \times H_s^2 \times c_g. \quad (4.6)$$

A relação de dispersão na aproximação de ondas curtas de gravidade (Kundu e Cohen, 2008) é:

$$\omega^2 = g \times K \quad (4.7)$$

onde  $\omega$  é a frequência e  $K$  é o número de onda. Nessa aproximação, a velocidade de grupo é expressa por:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial K} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{K}}. \quad (4.8)$$

Lembrando a relação entre frequência e o período ( $T$ ) da onda:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.9)$$

pode-se escrever a velocidade de grupo em função do período:

$$c_g = \frac{gT}{4\pi}. \quad (4.10)$$

Assim, o FE da equação 4.5 para onda de gravidade curta (ou de águas profundas), pode ser expresso por:

$$FE = k \times H_s^2 \times T \quad (4.11)$$

onde:

$$k = \frac{\rho g^2}{64\pi}. \quad (4.12)$$

Na equação 4.11 o período  $T$  utilizado pode ser o período de pico do espectro ( $T_p$ ), o período médio do espectro ( $T_m$ ) ou o período energético ( $T_e$ ), que pode ser estimado por uma relação conservadora de valores de períodos espectrais (por exemplo  $T_e = 0,9T_p$  nos trabalhos de Cornett (2006) e Gomes (2014) ).

Na literatura, o valor da constante  $k$  (equação 4.12) varia entre  $0,4 \frac{kW}{m^3 s^2}$  e  $0,5 \frac{kW}{m^3 s^2}$ . Cahill e Lewis (2013) estimam o valor de  $k$  como  $0,4 \frac{kW}{m^3 s^2}$ ; Thorpe (1999), Costa (2004) e Beserra (2007) utilizam  $0,49 \frac{kW}{m^3 s^2}$ ; Silva (2012) faz contas com  $0,4906 \frac{kW}{m^3 s^2}$  e Carvalho (2010), Saket e Etemad-Shahidi (2012) e Ostritz (2012) adotam  $k = 0,5 \frac{kW}{m^3 s^2}$ .

Neste trabalho foi utilizada a equação 4.6 para estimar  $FE$  mas, para efeito de comparação, foi feito um cálculo do  $FE$  usando a equação 4.11 com  $k = 0.4896054 \frac{kW}{m^3 s^2}$  para respeitar os valores de  $9,8 m/s^2$  para  $g$  e  $1025 Kg/m^3$  para  $\rho$ . Esse resultado é apresentado na Seção 4.2.2.1.

Um outro ponto a ser ressaltado é que o passo de tempo e a forma de interpolação dos valores de altura significativa utilizados para o cálculo de FE podem alterar os resultados. Isso porque essa última é proporcional ao quadrado de  $H_s$ , e a média dos quadrados é sempre maior ou igual ao quadrado das médias. Ou seja, estimativas de  $H_s$  baseadas em dados horários provenientes de modelos numéricos conduzirão a estimativas de FE iguais ou maiores àquelas obtidas caso os valores de  $H_s$  fossem de seis e seis horas.

#### 4.1.2 Modelo de Ondas da Universidade de Miami

Para a simulação de ondas foi utilizado o *University of Miami Wave Model* (UMWM) apresentado inicialmente pelo trabalho de Donelan et al. (2012). É um modelo de previsão de ondas espectral, de terceira geração, que resolve a equação de balanço de energia definida em cinco variáveis (duas componentes espaciais horizontais, número de onda, direção de propagação de onda e tempo) com sete termos fontes (*sink and source functions*) referentes a:

- Forçante do vento,
- Dissipação por viscosidade,
- Dissipação por quebra de onda,
- Dissipação por turbulência,
- Interação não linear,
- Fricção de fundo,
- Percolação de fundo.

As equações do UMWM são discretizadas em uma grade A de Arakawa bidimensional (Arakawa e Lamb, 1977), com o passo de tempo ajustado internamente para sempre respeitar a condição CFL (Courant et al., 1967). Ele foi concebido como uma alternativa computacionalmente eficiente aos tradicionais modelos de ondas de terceira geração, podendo ser paralelizado. Já foi usado em diversos trabalhos como: em modelos acoplados para estudo de situações de ventos intensos como furacões (Donelan et al., 2012; Chen e Curcic, 2016; Curcic et al., 2016), no estudo da dispersão de micro plásticos (Iwasaki et al., 2017) e em simulações de ondas num antigo oceano marciano (Banfield et al., 2015).

O UMWM em utilização pelo LHiCo é baseado na versão 2.0 do modelo, com alterações feitas por membros do laboratório com a supervisão dos criadores que possibilitam a inclusão de espectros de energia nos contornos, permitindo o aninhamento unidirecional de grades.

#### 4.1.2.1 Grades Modeladas

As ondas de gravidade de superfície são geradas por ventos e podem viajar milhares de quilômetros até terem sua energia dissipada. Assim, para estudar as ondas na PCSE é necessário modelar não apenas a região adjacente, mas todas regiões de formação de ondas. Segundo o trabalho de Branco (2005) as regiões que mais contribuem com *swell* para o clima do local estudado são o Atlântico Sul Tropical e Extratropical. Já Reboita et al. (2010), entre outros autores, apontam que a região de maior ciclogênese do Atlântico Sul

é próximo à costa da América do Sul entre as latitudes de  $25^\circ$  S e  $55^\circ$  S. Dessa forma, foi criada uma grade que cobrisse essas áreas. Além disso, se verificou experimentalmente que essa escolha era capaz de resolver satisfatoriamente a altura significativa observada, não sendo necessário uma simulação de maior alcance, ou mesmo global.

Com isso, uma grade de 138 por 120 pontos foi criada com auxílio de uma ferramenta do próprio modelo UMWM que utiliza a batimetria do ETOPO1 (Amante e Eakins, 2009). A discretização é regular indo de latitudes de  $60^\circ$  S a  $0,5^\circ$  S e longitudes de  $69^\circ$  W a  $0,5^\circ$  W, com resolução de  $0,5^\circ$  em ambas direções. A Figura 4.1 mostra a batimetria em metros da matriz utilizada e em vermelho detalha a localização da segunda grade utilizada. Esta grade do Atlântico Sul também é chamada de *grossa* em partes do trabalho, por apresentar uma resolução espacial menor.

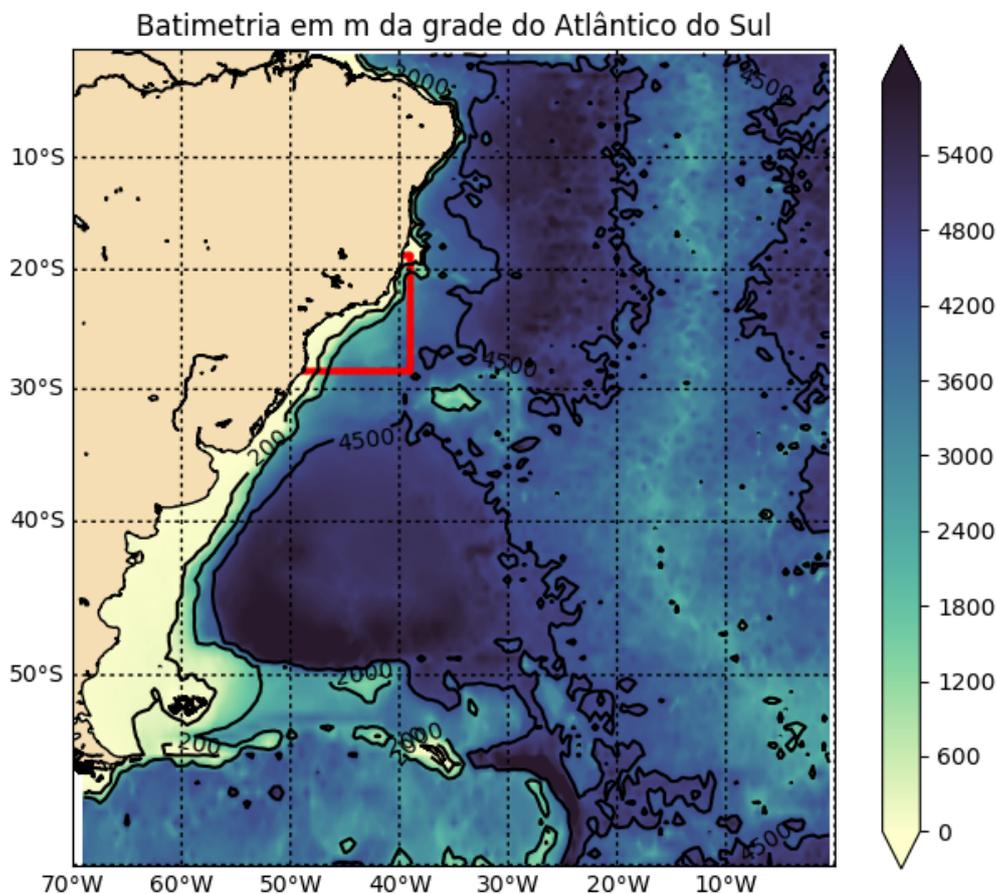


Figura 4.1: Batimetria em metros da grade do Atlântico Sul. Em vermelho o detalhe do contorno da grade da plataforma continental sudeste.

Para melhor resolver espacialmente os parâmetros de ondas estudados, foi utilizada uma segunda grade abrangendo a PCSE, com uma resolução espacial maior. Essa matriz também foi criada com a mesma ferramenta e a mesma base do ETOPO1 (Amante e Eakins, 2009), e pela maior resolução espacial ela também é chamada de *fin* em momentos desta pesquisa. Ela é regular e contém 80 por 80 pontos que vão de 49° W a 39,125° W de longitude e de 28,5° S a 18,625° S em intervalos simétricos de 0,125° em ambas direções. Na Figura 4.2 é mostrada a grade e sua batimetria em metros, e em vermelho são explicitados os pontos onde são forçados os espectros originários da grade grossa.

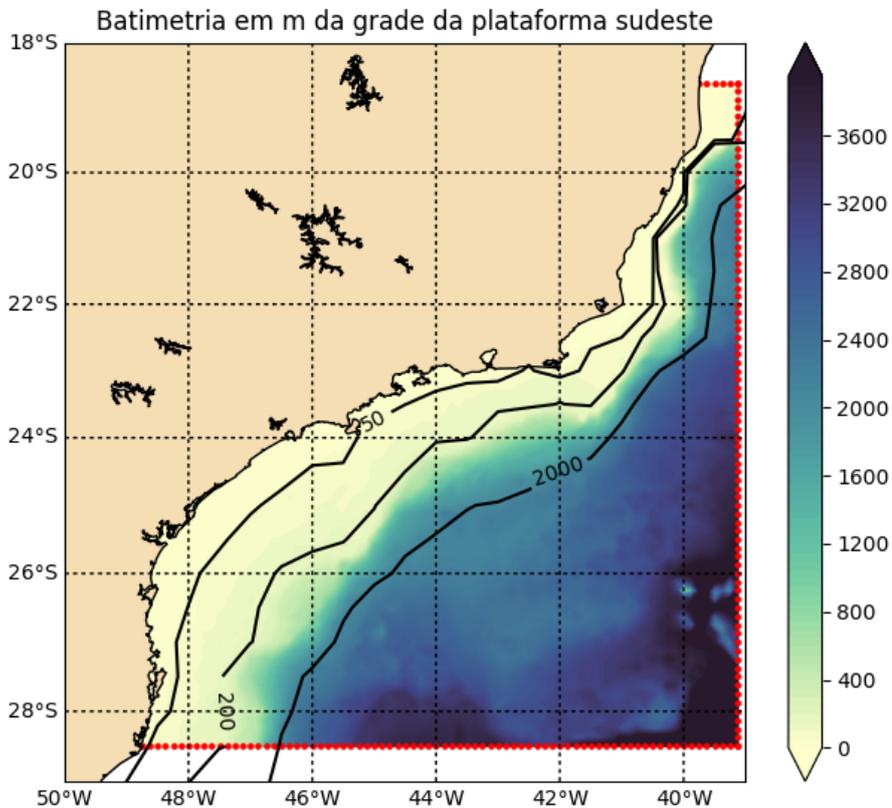


Figura 4.2: Batimetria em metros da grade da plataforma continental sudeste. Em vermelho o detalhe dos pontos onde são forçadas condições de contorno da grade do Atlântico Sul.

#### 4.1.2.2 Características de Entradas e Saídas

A grade do Atlântico Sul foi forçada com ventos horários interpolados dos resultados do *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) (Saha et al., 2014) do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Como saída, foram salvos a cada hora os parâmetros das ondas (altura significativa, período de pico e médio, direção dominante e média, velocidade de grupo) e os espectros de energia para alimentarem a grade fina.

O modelo foi iniciado com campos de ventos dez dias antes do início do período de estudo para aquecimento. Empiricamente, foi observado que eram necessários cerca de cinco dias de integração para que os campos de ondas se propagassem pela grade grossa.

A grade da PCSE também foi excitada por ventos horários do CFSv2 interpolados para seus pontos. Adicionalmente, as saídas de espectros direcionais de energia da grade do Atlântico Sul foram utilizadas como condições de contorno, assim inserindo também energia remota na grade fina. Os resultados de parâmetros de ondas foram também salvos de hora em hora.

Os resultados espectrais da grade fina não foram salvos por não serem utilizados pela metodologia proposta e por ocuparem muito espaço de armazenamento. Entretanto, essa possibilidade de armazenamento é interessante para trabalhos futuros, tanto para poder analisar com mais detalhes as características das ondas modeladas na região, como para se estudar com mais detalhe a distribuição espectral de energia. Isso poderia levar a uma melhor calibração e utilização do modelo, bem como a melhores estimativas do potencial energético.

Uma breve análise de uma saída de teste do espectro direcional revelou que em diversos períodos o mar apresenta características bimodais com dois núcleos bem definidos em direções e frequências distintas. Também é interessante notar que nesses resultados é possível diferenciar visualmente as ondas de sul com longos períodos bem definidos, que são advectadas para dentro da região de estudo vindas da grade grossa (*swell*), das ondas de sul geradas pelo vento de sul na região na grade fina.

As configurações do modelo para ambas as grades continham 24 direções ( $15^\circ$  de resolução direcional) e 37 frequências que variavam de forma logarítmica de  $0,5 \text{ Hz}$  a  $2 \text{ Hz}$ . Esse valor alto de fundo de escala, apesar de não ser típico de ondas de gravidade, é importante para o modelo gerar e crescer ondas por suas parametrizações internas, que levam energia dos baixo períodos para os maiores.

O comprimento no tempo das integrações foi mensal. Inicialmente, foi disparado o mês inicial (com o período de aquecimento) para a grade grossa e foram salvos os resultados espectrais. Esses foram então avaliados qualitativamente e, sendo coerentes, eram então usados para alimentar a grade fina que também foi iniciada com dez dias de aquecimento. Os meses seguintes foram executados do mesmo modo, excetuando o aquecimento que não era necessário já que os campos iniciais eram os campos finais do período anterior.

## 4.2 Resultados

Nesta seção, inicialmente se apresenta uma breve validação do modelo e, em seguida, os resultados mais relevantes da pesquisa referente à avaliação do potencial energético das ondas são mostrados e brevemente discutidos.

### 4.2.1 Comparação com Dados do Rede Ondas e Wavewatch III

Para validar e calibrar o modelo utilizado, a intenção deste trabalho era utilizar dados coletados na região de São Sebastião. Em abril de 2017, um ondógrafo foi fundeado próximo à Ilha de Toque-Toque, na entrada sul do CSS. Infelizmente, mesmo após três tentativas de resgate, o equipamento não foi recuperado. Dessa forma, buscaram-se outros dados que poderiam ser utilizados para calibração e validação.

Para o período e região estudada, o conjunto encontrado foi a boia de Santos do Rede Ondas - Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas, que é um programa que visa fornecer dados em tempo real das condições de mar e criar um banco de dados que possibilite caracterizar o clima de ondas ao longo do litoral brasileiro. Ele é coordenado pela Universidade Federal de Rio Grande (FURG) e é integrante do Programa de Observação Global dos Oceanos (GOOS). Para este ondógrafo localizado ao largo de Santos em  $24^{\circ}21'2''\text{S}$  e  $46^{\circ}10'3''\text{W}$  a uma profundidade de cerca de 50m próximo à Laje de Santos, estavam disponíveis quantidades significativas de dados apenas para os meses de dezembro de 2016 e março de 2017.

Adicionalmente foi feita uma comparação com resultados do modelo de ondas Wavewatch III (WW3) (Tolman et al., 2009) do modelo operacional da NOAA forçado pelo CFSv2 que é amplamente utilizado na literatura para avaliação do potencial energético (Pianca et al., 2010; Hemer e Griffin, 2010; Silva, 2012; Boudière et al., 2013; Gomes, 2014; Uihlein e Magagna, 2016). Os resultados utilizados foram obtidos do próprio site da NOAA.

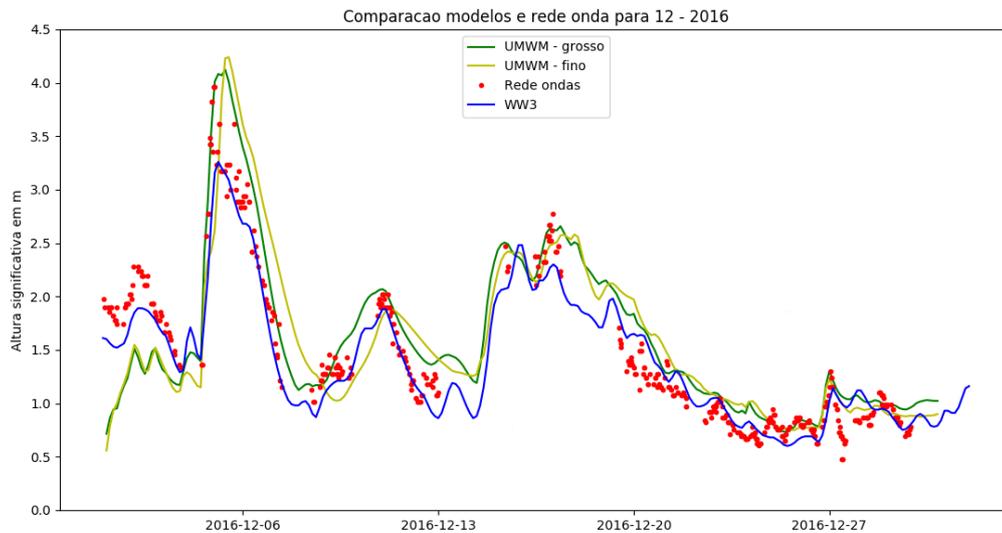


Figura 4.3: Séries de tempo de alturas significativas, em  $m$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de dezembro de 2016.

	Média da altura significativa ao quadrado	Porcentagem em relação ao dado
UMWM - grosso	$3,089355 m^2$	116,4%
UMWM - fino	$3,027645 m^2$	114,1%
Rede ondas	$2,653361 m^2$	100,0%
WW3	$2,311063 m^2$	87,1%

Tabela 4.1 - Comparação entre médias das alturas significativas ao quadrado, em  $m^2$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de dezembro de 2016.

Com base nos dois meses de dados disponíveis foram feitos então os gráficos apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4. Neles, pode-se comparar a altura significativa dos pontos de grade dos modelos mais próximo à localização do Rede Ondas. Para o período com disponibilidade de dados, comparou-se a média das alturas significativas, já que o fluxo de energia é proporcional a esse valor. As comparações são apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2 e mostram que a grade da PCSE superestima a altura ao quadrado em ambos os casos em cerca de 14%, e que o WW3 em ambos os casos subestima em torno de 12%.

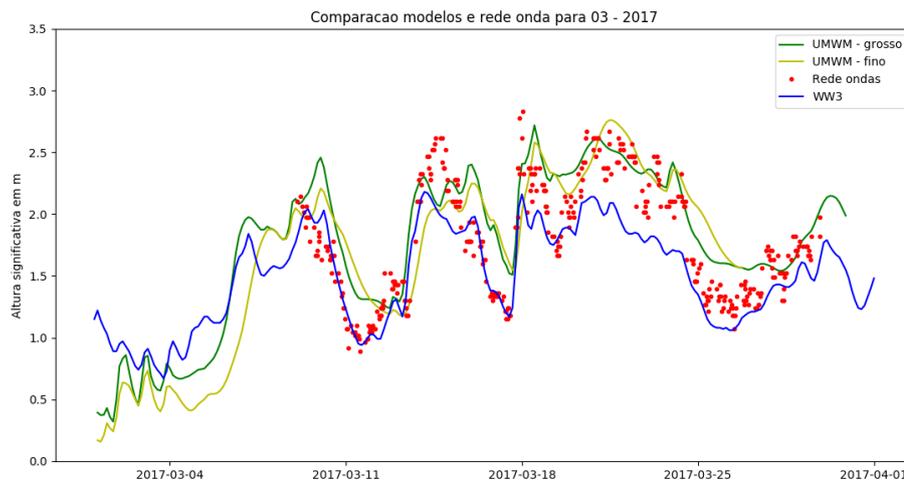


Figura 4.4: Séries de tempo de alturas significativas, em  $m$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de março de 2017.

	Média da altura significativa ao quadrado	Porcentagem em relação ao dado
UMWM - grosso	4,091888 $m^2$	119,5%
UMWM - fino	3,918345 $m^2$	114,5%
Rede ondas	3,422913 $m^2$	100,0%
WW3	2,655418 $m^2$	77,6%

Tabela 4.2 - Comparação entre médias das alturas significativas ao quadrado, em  $m^2$ , das grades do UMWM do Atlântico sul (grossa) e da plataforma continental sudeste (fina), dos dados do Rede Ondas e dos resultados do modelo Wavewatch III (WW3) para o mês de março de 2017.

Como os resultados da grade utilizada no trabalho apresentaram um desvio na mesma ordem de grandeza que o apresentado pelo WW3, considerou-se que ele é apto a gerar resultados confiáveis. É importante notar que, por apresentar a altura significativa superestimada em relação aos dados e ao WW3, é esperado que os valores de fluxo de energia calculados sejam superiores às referências.

#### 4.2.2 Fluxo de Energia

Com base na equação 4.6, o FE foi calculado para toda a grade e, na Figura 4.5, é apresentada a intensidade na PCSP e na Figura 4.6 é focada a região de São Sebastião.

Como era de se esperar, as intensidades são menores conforme as ondas se aproximam da costa. Com a redução da profundidade na plataforma continental existe maior dissipação de energia pelo atrito e pela proximidade da costa os ventos são menos intensos. Isso faz com a que a região ao largo da ISS tenha um potencial ligeiramente superior ao resto do Estado de São Paulo por ter uma plataforma menos larga.

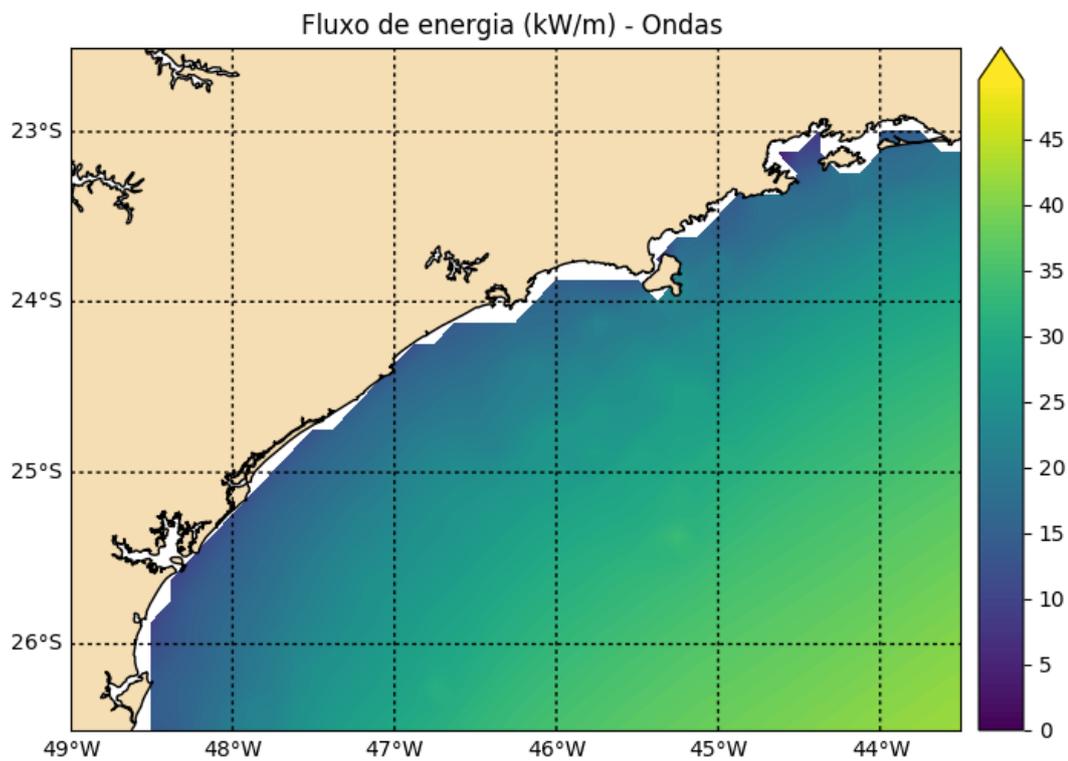


Figura 4.5: Média do fluxo de energia em  $kW/m$  na Plataforma Continental do Estado de São Paulo no período de julho de 2016 a junho de 2017.

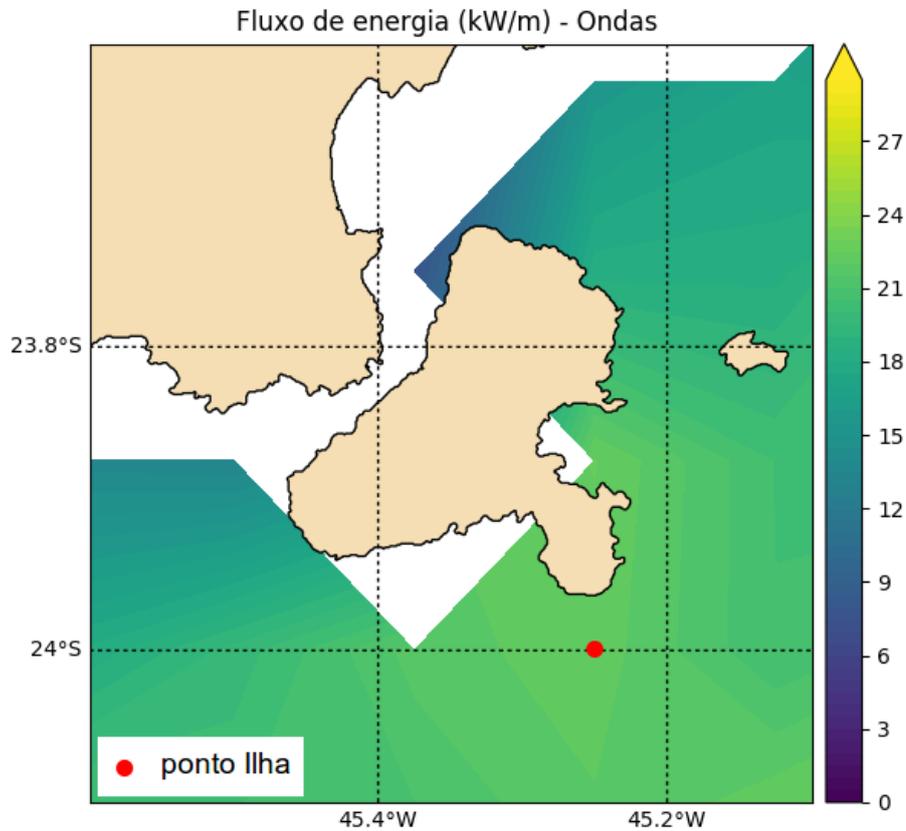


Figura 4.6: Média do fluxo de energia em  $kW/m$  na região de São Sebastião no período de julho de 2016 a junho de 2017. O círculo vermelho indica a posição do ponto Ilha

Com base nos resultados anuais, foi escolhido um ponto ao largo da ISS, nomeado *Ilha*, para se estudar mais profundamente a variabilidade temporal. Esta localização seria a mais adequada para a instalação de um dispositivo de geração de energia a partir das ondas por apresentar a maior média da região e do Estado de São Paulo, para a grade utilizada. As coordenadas do ponto do modelo são  $45,25^\circ$  W e  $24,0^\circ$  S (Figura 4.6), o que corresponde ao lado oceânico da ISS próximo à Ponta do Boi. O gráfico que mostra a variação na intensidade do FE entre julho de 2016 a junho de 2017 é apresentado na Figura 4.7.

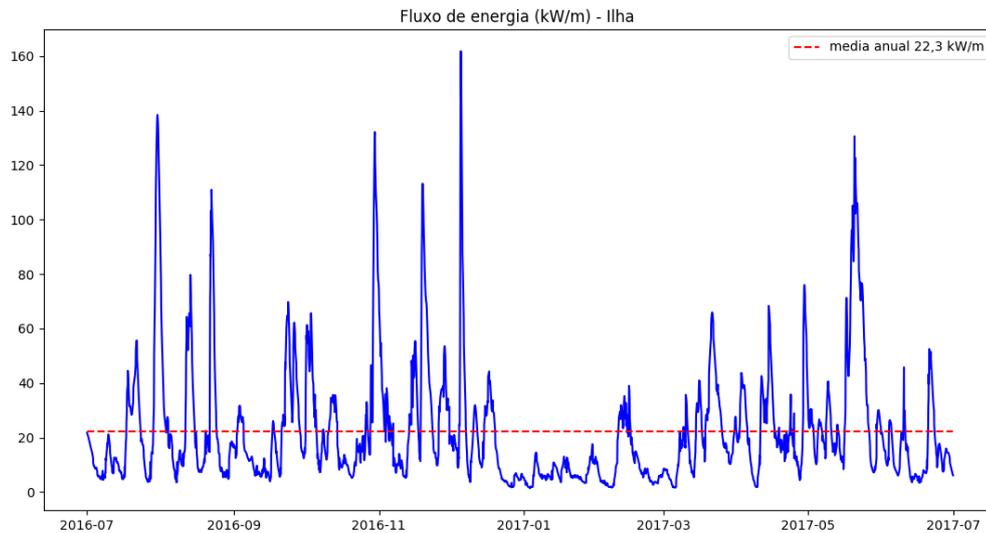


Figura 4.7: Série temporal do fluxo de energia em  $\text{kW/m}$  no ponto Ilha, ao largo da Ilha de São Sebastião, ao longo do período de julho de 2016 a junho de 2017.

Nesse período, a média do fluxo de energia foi de  $22,3 \text{ kW/m}$ , superior aos  $13 \text{ kW/m}$  encontrado por Carvalho (2010), aos  $15,08 \text{ kW/m}$  de Ostritz (2012), aos  $20,3 \text{ kW/m}$  do trabalho de Gomes (2014) e aos  $10 \text{ kW/m}$  calculados por Oleinik et al. (2016a); sendo que os três primeiros usaram o modelo WW3 e pontos de grades afastado da costa (águas profundas) e o último utilizou o modelo TOMAWAC e pontos próximos à costa. O máximo observado foi de  $161,8 \text{ kW/m}$ , abaixo do pico de  $178,5 \text{ kW/m}$  obtido por Gomes (2014) mas superior ao valor de  $27 \text{ kW/m}$  de Oleinik et al. (2016a).

#### 4.2.2.1 Comparação entre Cálculo com Velocidade de Grupo e Período de Pico

Esta pesquisa utiliza um método de cálculo do fluxo de energia que é função da altura significativa e da velocidade de grupo, conforme indicado na equação 4.6. Entretanto, os trabalhos encontrados na bibliografia utilizam uma metodologia diferente para o cálculo, que infere o FE pela altura significativa e o período (geralmente o período de pico), como indicado na equação 4.11. Assim, uma comparação entre os dois métodos foi feita para verificar a concordância entre eles. Na Figura 4.8 são apresentadas as séries temporais de FE com ambas abordagens, para o ponto Ilha.

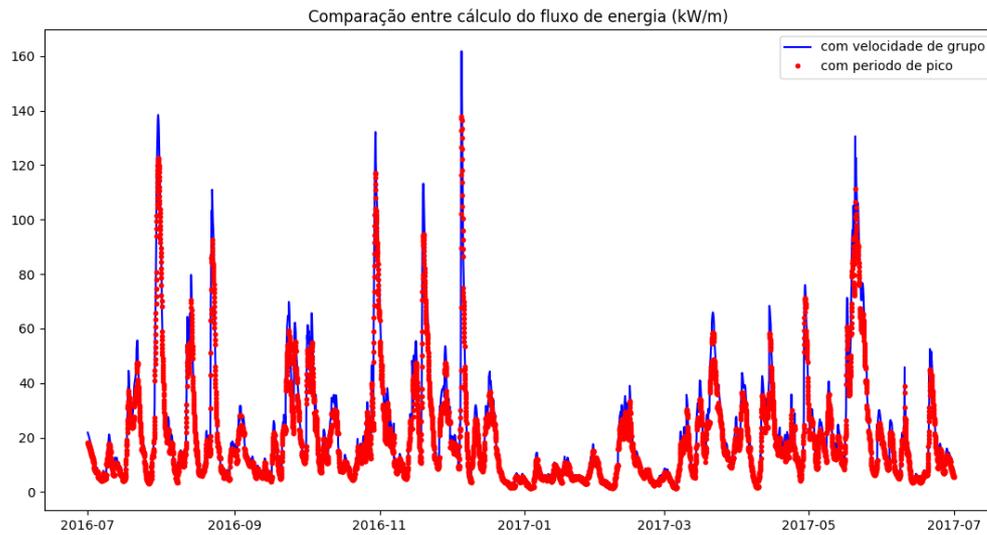


Figura 4.8: Comparação entre dois métodos de cálculo da FE para o ponto Ilha; a linha azul indica o cálculo utilizando a velocidade de grupo (equação 4.6) e os pontos vermelhos indicam os cálculos feitos com a simplificação de água profundas que utiliza apenas o período de pico (equação 4.11).

Os dois métodos guardam uma forte correlação, sendo que o cálculo não simplificado (equação 4.6) apresenta valores ligeiramente superiores. Para quantificar essa informação se criou a Figura 4.9, que é um gráfico que relaciona as duas abordagens mostrando o valor de  $\frac{FE_{cg}}{FE_{Tp}}$ . Com isso é possível observar que o valor utilizado neste trabalho é sempre superior ao calculado pela equação simplificada (4.11) em até 20%. Na média do período estudado há uma superestimativa de 14,2%.

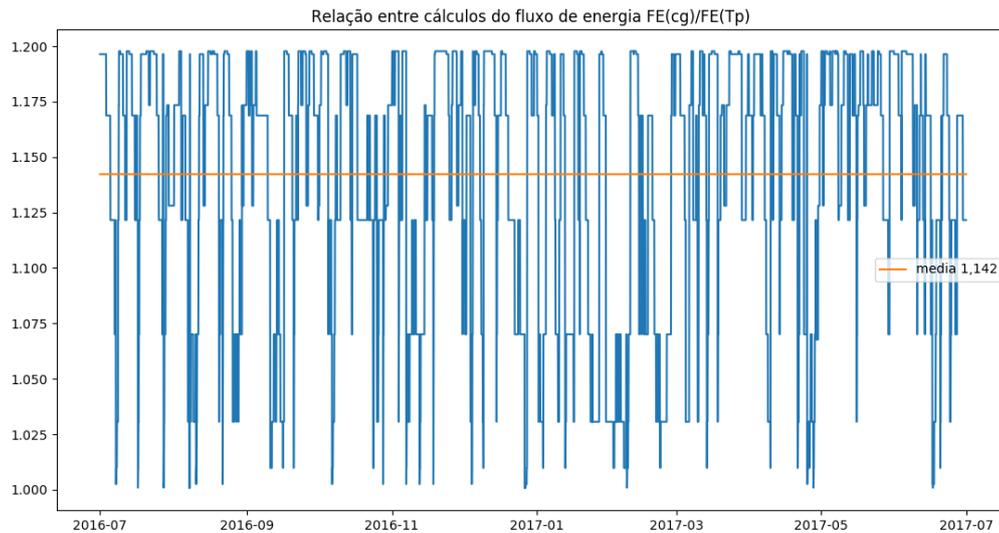


Figura 4.9: Relação entre os dois métodos de cálculo ao longo do tempo isto é, valor da razão entre os fluxos de energia estimados pelas equações 4.11 e 4.6. A linha laranja indica o valor médio.

#### 4.2.3 Variabilidade Temporal

Para projeto e operação de uma planta de aproveitamento de energia oceânica é importante estudar a variabilidade temporal do recurso. Entre os diversos motivos para isso estão: quantificar o quanto será gerado de eletricidade, avaliar quais os períodos mais críticos de operação, identificar os melhores momentos para manutenção programada ou mesmo para calcular os riscos financeiros associados. Assim, as variações temporais dos resultados de FE para o ponto Ilha foram estudados com mais detalhe. O gráfico da Figura 4.10 e a Tabela 4.3 apresentam as médias mensais do FE encontradas.

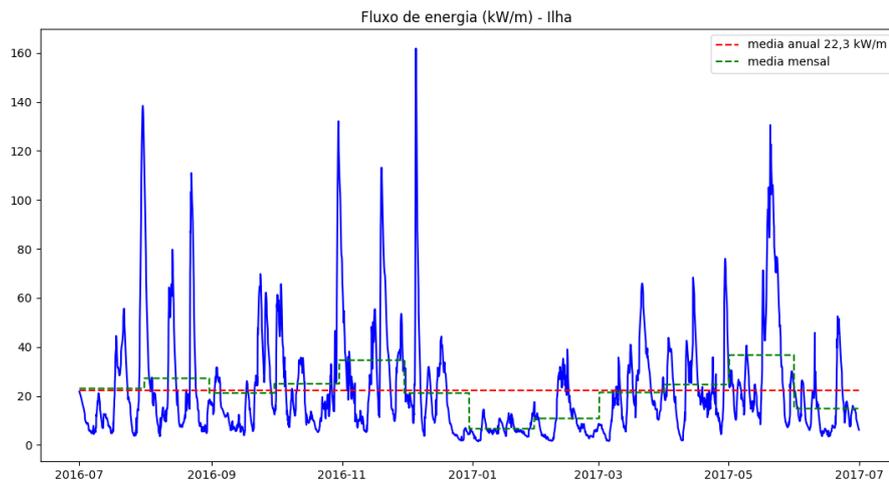


Figura 4.10: Série de tempo do fluxo de energia, em  $kW/m$ , no ponto Ilha e médias mensais ao longo do período de julho de 2016 a junho de 2017.

Mês	Média do fluxo de energia em $kW/m$
julho de 2016	23,1
agosto de 2016	27,2
setembro de 2016	21,2
outubro de 2016	25,0
novembro de 2016	34,6
dezembro de 2016	21,2
janeiro de 2017	6,67
fevereiro de 2017	10,9
março de 2017	21,5
abril de 2017	24,7
maio de 2017	36,7
junho de 2017	14,9

Tabela 4.3 - Médias mensais do fluxo de energia, em  $kW/m$ , para o ponto Ilha.

Para o período estudado, as médias mensais variam entre  $6,67 kW/m$  em janeiro e  $36,7 kW/m$  em maio. Como citado na literatura, os meses de verão são os menos energéticos. Carvalho (2010) obtém médias mensais entre  $8 kW/m$  e  $18 kW/m$ ; Ostritz (2012) cita valores entre  $11 kW/m$  e  $25 kW/m$  e Gomes (2014) identifica médias entre  $11 kW/m$  e  $28 kW/m$ . Para uma análise um pouco mais detalhada, se optou por observar também as médias semanais que são apresentadas na Figura 4.11.

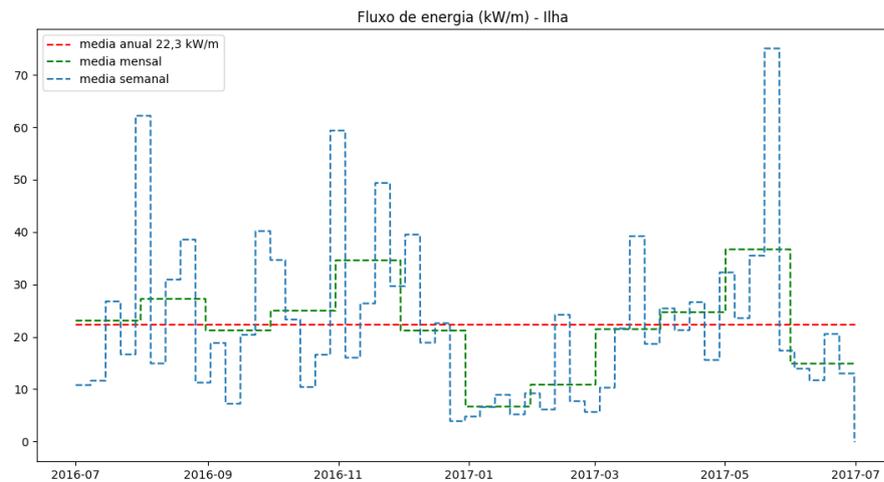


Figura 4.11: Médias semanais, mensais e anual do fluxo de energia em  $kW/m$  para o ponto Ilha ao longo do período de julho de 2016 a junho de 2017.

Dentro dos meses estudados, foi possível identificar uma forte variabilidade do fluxo de energia e em pelo menos dez vezes houve uma diferença maior de 50% entre as médias semanais consecutivas. Todas as estações apresentaram semanas com intensidades 50% acima e 40% abaixo da média anual. Isso mostra que existem grande oscilações dentro de um mês e que as magnitudes podem se manter altas pelo período de alguns dias.

#### 4.2.3.1 Variabilidade Sazonal

Uma forma de estudar a variabilidade temporal em maior escala é utilizando as médias por estação do ano. No caso desse trabalho foi considerado inverno de 2016 período de 1° de julho de 2016 a 30 de setembro de 2016; primavera de 2016, de 1° de outubro de 2016 a 31 de dezembro de 2016; verão de 2017, de 1° de janeiro de 2017 a 31 de março de 2017 e outono de 2017 foi calculado com os resultados de 1° de abril de 2017 a 30 de junho de 2017.

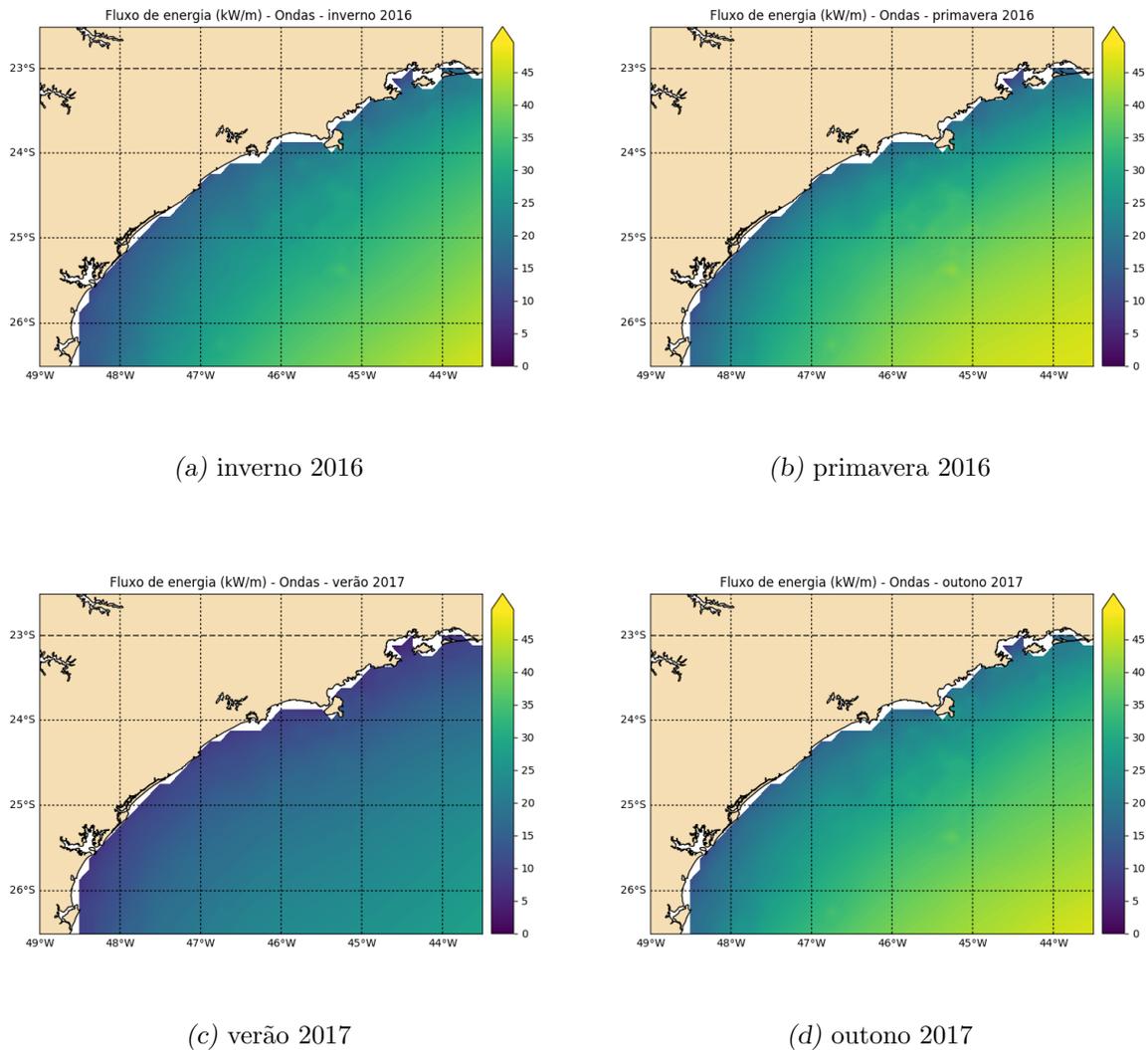


Figura 4.12: Mapas da média sazonal do fluxo de energia em  $kW/m$  para a Plataforma Continental do Estado de São Paulo.

Na Figura 4.12 são apresentados os mapas da média do fluxo de energia para a PCSP para cada estação do ano. Como na Figura 4.5, pode-se observar que a intensidade do FE diminui com a aproximação da costa, tendo valores similares para inverno, primavera e outono. O verão é menos intenso, com resultados que são aproximadamente a metade das outras estações. É interessante notar que o verão de 2017 apresentou ventos menos intensos que a média, com pequeno número de frentes frias atingindo a região.

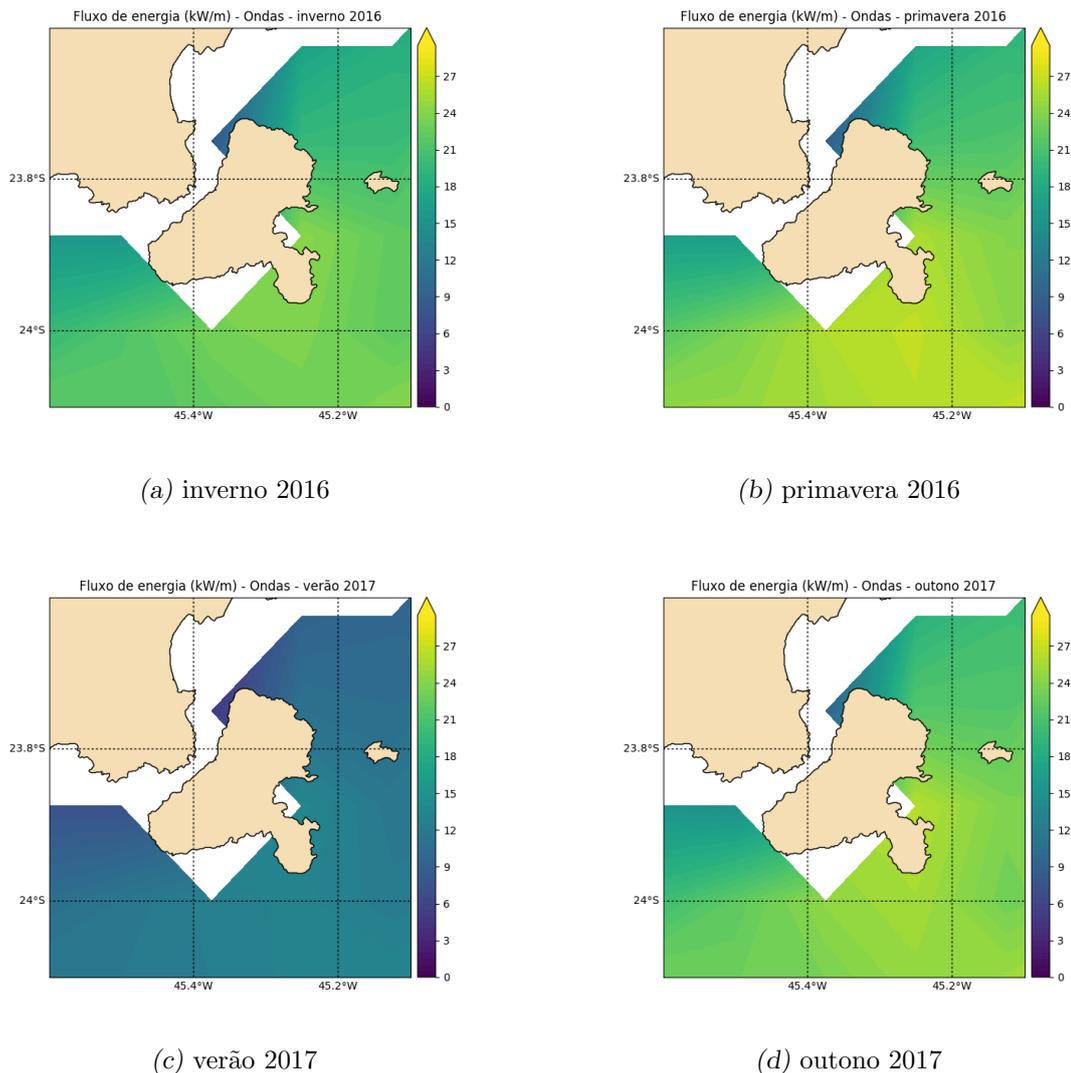


Figura 4.13: Mapas da média sazonal do fluxo de energia em  $kW/m$  para a região de São Sebastião.

Novamente, se foca a atenção na região de São Sebastião, obtendo assim os mapas da Figura 4.13 que apresentam as mesmas características da Figura 4.12, principalmente o verão com FE menor que as demais estações. Mas, com a escala mais apropriada da Figura 4.13, já é possível observar que a primavera apresentou valores maiores de média de FE, seguida pelo outono, inverno e verão nessa ordem.

Então, para o ponto Ilha foi montada a Tabela 4.4 que apresenta os valores médios de fluxo de energia por estação do ano. Os resultados são sempre maiores que os encontrados na literatura, indicados na Tabela 4.5. No período analisado, a estação da primavera foi a mais intensa com média aproximadamente igual ao o dobro dos trabalhos anteriores

(Carvalho, 2010; Ostritz, 2012; Gomes, 2014).

Período	Média do fluxo de energia em $kW/m$
inverno 2016	23,8
primavera 2016	26,9
verão 2017	13,0
outono 2017	25,4

Tabela 4.4 - Médias por estação do ano do fluxo de energia, em  $kW/m$ , para o ponto Ilha

Estação	Média do fluxo de energia em $kW/m$		
	Carvalho (2010)	Ostritz (2012)	Gomes (2014)
inverno	16,0	19,2	17,5
primavera	11,5	13,5	12,0
verão	8,5	10,3	8,5
outono	14,7	17,5	18,0

Tabela 4.5 - Médias por estação do ano do fluxo de energia, em  $kW/m$  na literatura para pontos ao largo da Plataforma Continental do Estado de São Paulo

#### 4.2.4 Histogramas de Fluxo de Energia

Outra forma de estudar as características energéticas de um local é através de histogramas do fluxo de energia, como o que é apresentado na Figura 4.14. Com essa informação é possível escolher a melhor tecnologia de extração e otimizar o custo de energia que relaciona os investimentos de instalação e manutenção com a energia gerada. O trabalho de Ostritz (2012) traça uma curva de excedência, que quantifica a mesma característica, e nela ele identifica que 90% das ocorrências são iguais ou inferiores a  $30,62 kW/m$ , algo ligeiramente inferior ao obtido nesta pesquisa.

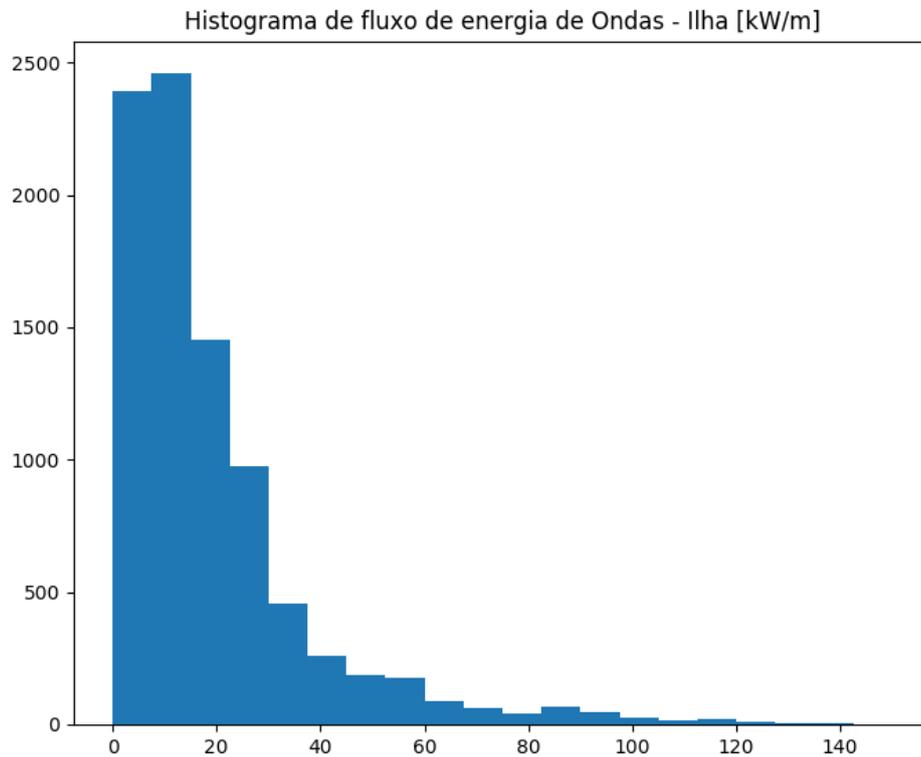


Figura 4.14: Histograma do fluxo de energia em  $kW/m$  no período estudado para o ponto Ilha em número de ocorrências.

Com foco de estudar com maior detalhe a variação temporal, foram feitos os histogramas para cada estação do ano. Esses resultados são apresentados na Figura 4.15. Nela fica evidenciado novamente que o período de verão é o menos energético, com o fluxo de energia ficando abaixo da média anual em 80% do tempo. Já para as outras estações a faixa de  $7,5 kW/m$  a  $15 kW/m$  é a que apresenta as maiores ocorrências, com o FE ficando sempre acima de 60% do tempo dentro da banda de até  $22,5 kW/m$  em todos intervalos de tempo.

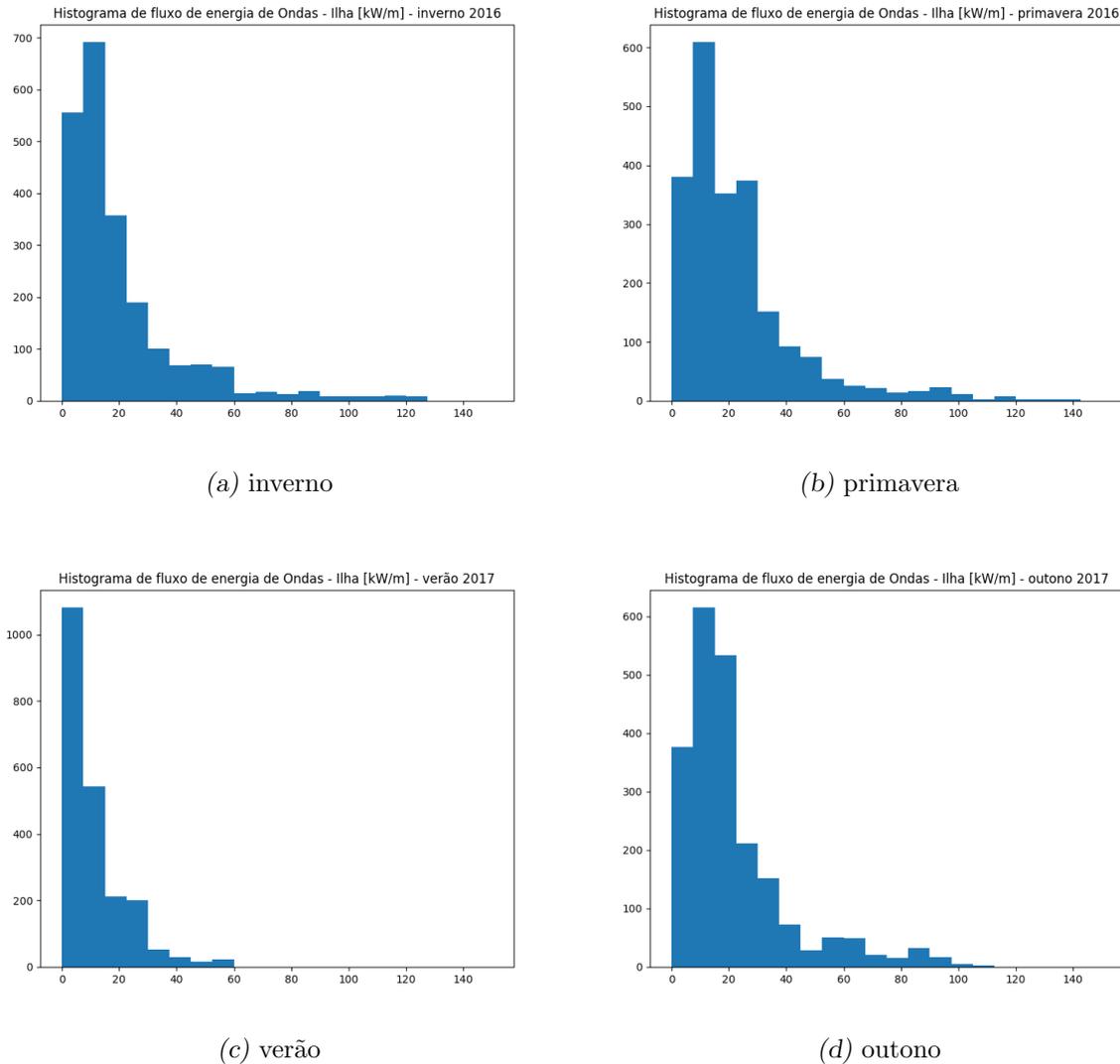


Figura 4.15: Histogramas sazonais do fluxo de energia em  $kW/m$  para o ponto Ilha em número de ocorrências.

#### 4.2.5 Direções Predominantes

Uma informação relevante para o projetos de extração, tanto para escolha da localização quanto para o desenvolvimento, é a direcionalidade. Neste trabalho, a forma escolhida de fazer essa visualização é com o uso de histogramas polares.

Na Figura 4.16 é apresentado o histograma polar do fluxo de energia para todo período analisado. Os círculos concêntricos a partir do centro indicam a frequência de ocorrência. É possível notar que quase a totalidade da energia provém da faixa entre sudeste e sudoeste.

Importante ressaltar que pela localização do ponto escolhido no modelo não aparece nenhuma contribuição de nordeste. Entretanto, essas contribuições são pouco energéticas como pode ser observado nos trabalhos de Pianca et al. (2010) e Carvalho (2010). Essas pesquisas também analisam o clima próximo à isóbata de 200 m, ou seja, a uma grande distância da costa. Assim, é possível que realmente não chegue à região uma quantidade significativa de energia de nordeste já que essas ondas teriam que ser formadas sobre águas rasas da plataforma continental e com uma pequena pista de vento.

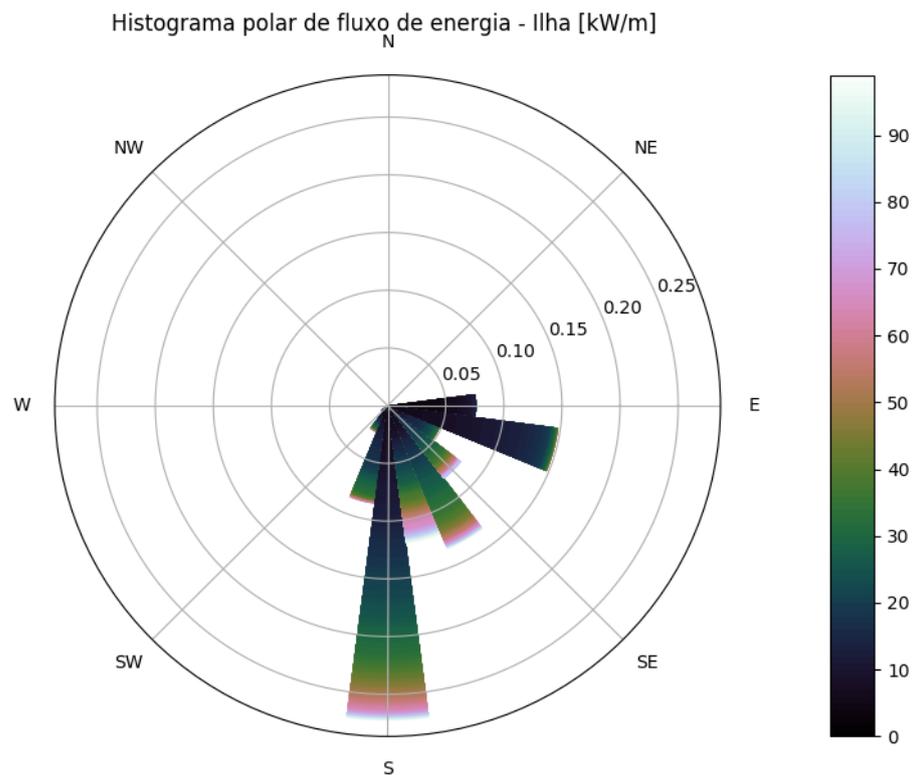


Figura 4.16: Histograma polar do fluxo de energia, em  $kW/m$ , no período estudado para o ponto Ilha em frequência de ocorrência.

Na Figura 4.17 são apresentados os histogramas polares para as diferentes estações do ano. Os resultados são bastante interessantes pois são fortemente corroborados por dois trabalhos anteriores, apesar desses não terem utilizado a mesma ferramenta. O artigo de Pianca et al. (2010) apresenta histogramas polares de altura significativa e período de pico para as quatro estações. Já a dissertação de Carvalho (2010) traz um histograma da porcentagem do fluxo de energia em função da direção ao longo do tempo.

O verão é menos intenso e apresenta FE vindos dos quadrantes sul e leste, sendo a

primeira mais energética. Em Pianca et al. (2010) as frequências nessa estação são bem distribuídas entre sul e nordeste, mas a altura significativa e principalmente o período de pico são maiores de sul, o que indica um FE mais intenso nessa direção.

O trabalho de Carvalho (2010) mostra que a maioria da energia provém da faixa entre sudoeste e sudeste durante todo o ano. Já a banda de sudeste a nordeste responde por uma parte de cerca de 10% a 20% ao longo do ano, exceto no outono, quando ela é desprezível. Isso é visto no histograma polar do outono que apresenta praticamente todo o FE vindo de sul e sudeste. Em Pianca et al. (2010) a banda de sul representa mais de 45% das ocorrências com intensidades maiores que as outras direções.

Tanto o inverno como a primavera apresentam a maior ocorrência de energia do sul, com contribuição de leste que é um pouco maior na primavera. Ambos os trabalhos citados corroboram este resultado, confirmando que as ondas de sul são as mais energéticas e que devam ser o foco no caso de uma tecnologia de extração com direção preferencial.

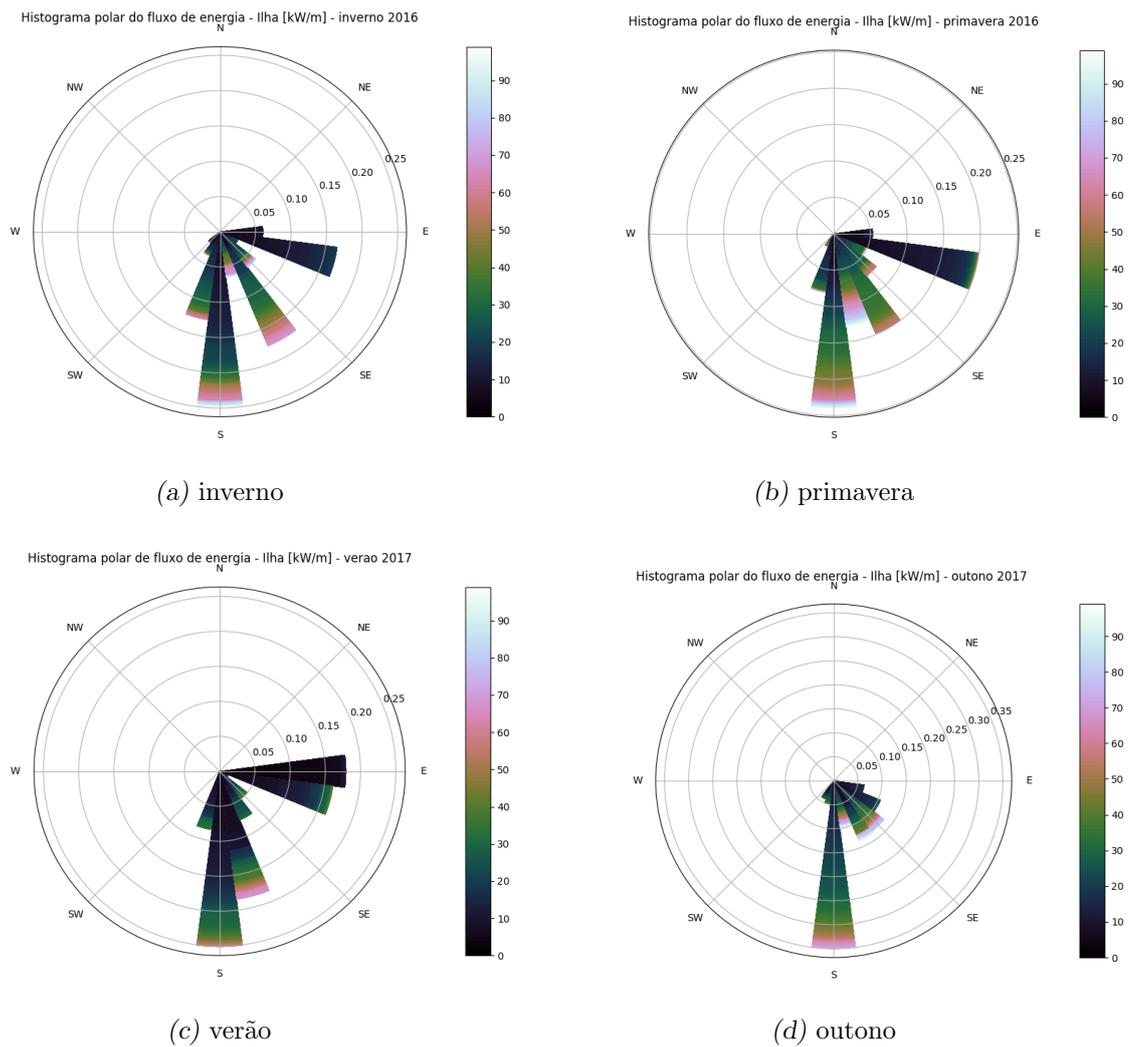


Figura 4.17: Histogramas polares sazonais do fluxo de energia, em  $kW/m$ , para o ponto Ilha em frequência de ocorrência.

### 4.3 Discussão

Com a utilização do modelo UWMW foi possível estudar as ondas na costa do Estado de São Paulo de 1° de julho de 2016 a 30 de junho de 2017. Em seguida, foi analisado o fluxo de energia em diferentes escalas de tempo.

Do ponto de vista médio e sazonal, o resultado foi superior ao encontrado na literatura em Carvalho (2010), Ostritz (2012) e Gomes (2014). Isso era esperado pois: há indícios que o modelo UMWM apresenta valores de altura significativas maiores que o WW3 utilizados nos trabalhos citados e, também por conta do método de cálculo não simplificado,

utilizando a velocidade de grupo, que apresenta uma superestimativa em relação à fórmula simplificada. Vale notar que as pesquisas mencionadas estudavam pontos na quebra da plataforma continental, diferentemente deste estudo que focou na região costeira, onde é de se esperar intensidades menores de fluxo de energia que em mares profundos

Este trabalho também apresentou grande correlação com o clima de ondas encontrado em Pianca et al. (2010), e reforça a relação entre as ondas mais energéticas de sul e os Sistemas Frontais associados a baixas pressões e ciclones subtropicais no Atlântico Sul. Em menor escala, as ondas de leste associadas aos ventos da ASAS também apresentaram uma contribuição energética sobretudo no verão.

O valor do FE médio encontrado de  $22,3 \text{ kW/m}$  é significativo e indica viabilidade de extração. Apesar de não se enquadrar entre os locais mais energéticos do planeta (Iglesias et al., 2009; Rusu e Guedes Soares, 2009; Robertson et al., 2014), essa intensidade pode subsidiar sistemas de exploração, como indicam os trabalhos de Thorpe (1999), Beserra (2007), Falcão (2010) e Andres et al. (2014). Para o aproveitamento e competitividade de uma fonte energética o mais importante é o custo da energia,  $R\$/MWh$  por exemplo, que não depende apenas da disponibilidade do recurso mas, também, da sua variabilidade temporal e custo de extração.

Por conta da resolução espacial obtida com o modelo UMWM, não é possível resolver com precisão de  $km$  os locais mais adequados à instalação de uma planta de geração ondomotriz. Entretanto, é possível apontar a região oceânica da ISS com alto potencial, sobretudo os pontos que não possuam bloqueios a leste e sul. No caso de uma usina de coluna de ar oscilante como a da Central de Ondas do Pico - Açores (Falcão, 2000), o LIMPET (Heath et al., 2000), ou a sugerida no trabalho de Cordeiro (2015) que prevê a instalação na costa, a indicação seria um local que estivesse direcionado, aberto, para o sul.

## Conclusões

### 5.1 Conclusões

Este trabalho quantificou o potencial energético dos oceanos na região de São Sebastião obtendo médias de fluxo de energia de ondas de  $22,3 \text{ kW/m}$  e de densidade de potência de correntes de até  $473,2 \text{ W/m}^2$ . Isso indica que em ambos os casos a exploração é viável, sobretudo levando em consideração o fato que a região possui o terminal petrolífero mais movimentados do país e uma tecnologia naval desenvolvida, o que pode diminuir custos de instalação, operação e manutenção. A essas vantagens, soma-se ainda a proximidade da costa e de centros consumidores de energia, o que diminui as possíveis perdas no transporte de eletricidade.

Do ponto de vista de energia das correntes, duas áreas são claramente propícias à exploração: a região central do CSS e a região a sudeste da ISS, próxima à Ponta do Boi. A primeira apresenta média anual da ordem de  $370,0 \text{ W/m}^2$  e tem correntes médias de até  $0,64 \text{ m/s}$ , além de ser próxima da costa urbanizada facilitando a questão de infraestrutura e está protegida de intempéries, sobretudo ondas de gravidade. Já a segunda, está um pouco mais afastada do continente, mas apresenta altas densidades de potência (maiores que  $473,2 \text{ W/m}^2$ ) e correntes médias (maiores que  $0,6 \text{ m/s}$ ) e, por conta da maior exposição, poderia ser aproveitada por uma usina combinada com energia eólica e ondomotriz.

Por conta da resolução espacial do modelo utilizado, não foi possível resolver o potencial energético das ondas para todas as diferentes feições da região de São Sebastião.

Entretanto, pode-se verificar quantitativamente e qualitativamente que o fluxo de energia na região é provavelmente maior do que a média da região costeira da PCSE. Assim, pode-se confirmar as características sazonais, com verão menos energético que outras estações, e direcionais que indicam que ondas de quadrante sul são as que mais contribuem para o potencial.

Com os resultados apresentados, para ambas modalidades de recursos, é possível tomar decisões de tecnologias mais adequadas a serem utilizadas para cada projeto, custos e instalações de futuros empreendimentos, identificar necessidades de regulamentação técnica e ambiental e perspectivas para a recente área de Energias Marinhas Renováveis no Brasil. Apesar de não ter uma mentalidade marítima, o País conta com uma forte indústria naval *offshore* voltada para a extração de recursos fósseis que poderia servir de base para desenvolvimento dessas fontes alternativas limpas.

## 5.2 Limitações do Trabalho

Esta pesquisa utilizou resultados de modelos comparados com dados coletados em campo, assim como a maior parte das pesquisas realizadas no País na área de Energias Renováveis do Mar. Isso se deve pela falta de projetos e campanhas de monitoramento de dados oceanográficos de longo prazo e de grande abrangência espacial. Iniciativas como Rede Ondas são louváveis e deveriam receber mais incentivos e fomentos dos órgãos públicos.

Outra limitação encontrada foi o fato de se analisar um período determinado de um ano, o que faz com que as médias para cada estação, por exemplo, não sejam representativas das climatologias sazonais. Para isso, seria necessário um estudo de mais longa duração de preferência com um maior suporte de dados coletados. Assim como os intervalos de tempo utilizados nas entradas e saídas não foram variados para estudar sua sensibilidade em relação aos resultados.

Uma limitação da implementação do sECOM que é utilizada é o fato dele ser forçado com climatologias da CB, não permitindo assim a presença de meandramentos e de vórtices que podem afetar a PCSE e a intrusão da ACAS. Variabilidades temporais das descargas

fluviais podem afetar pontualmente a circulação na PCI. Isso poderia ser compensado com a assimilação de dados, caso eles tivessem disponíveis.

O modelo UWMW resolve as ondas espectralmente, ou seja, no domínio da frequência e da direção. Uma parametrização é utilizada para se obter o fluxo de energia que pode não ser adequado para uma região com um espectro bimodal, como a área de estudo.

Finalmente, os resultados do potencial tanto para ondas quanto para correntes têm indícios de serem superestimados quando comparados com resultados anteriores. As causas são diferentes mas a dificuldade na solução é a mesma: a falta de um acervo grande de dados para comparação e verificação de simulações numéricas.

### 5.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas em itens sugestões de trabalhos futuros e melhorias que poderiam ser feitas, separadas por áreas.

#### 5.3.1 Correntes

- Fazer simulações de mais longos períodos. Se possível de mais de uma década de forma a produzir uma climatologia de densidade de potência na PCSP.
- Fazer simulações para estimativa da densidade de potência usando como entradas uma forçante por vez e/ou combinações delas para tentar quantificar a importância de cada uma na avaliação do potencial de correntes. Isso seria importante para caracterização do recurso, escolha da tecnologia, projeto do dispositivo e desenvolvimento de estratégias de instalação, operação e manutenção.
- Levantar o potencial energético em outras localidades não resolvidas pela grade do modelo sECOM que foi utilizado. Regiões estuarinas como Santos e Ilha Comprida podem apresentar locais viáveis para a extração de energia das correntes.
- Estudar a ocorrência de eventos extremos, suas causas e sua recorrência. São informações importantes para minimizar riscos de projetos de longo prazo e até dimi-

nuir custos de investimento.

- Investigar a banda supra inercial de correntes, sobretudo as superficiais. Analisar, por exemplo, a influência das ondas de gravidade nas correntes e seu efeito na densidade de potência.
- Integrar resultados do modelo de onda no modelo hidrodinâmico para melhorar a parametrização do coeficiente de arrasto visando melhorar a incorporação da forçante meteorológica.

### 5.3.2 Ondas

- Melhorar a calibração do modelo UMWM para a região de interesse. De preferência utilizando um conjunto maior de dados do que os disponíveis atualmente.
- Utilizar os resultados espectrais de energia do UMWM para calcular discretamente o fluxo de energia, sem utilizar a parametrização de altura significativa, e comparar com o cálculo tradicional.
- Melhorar a resolução espacial do modelo para poder resolver melhor as regiões costeiras do Estado de São Paulo de forma a identificar mais especificamente locais adequados à extração de energia das ondas.

### 5.3.3 Energias Marinhas Renováveis

- Construir e instalar protótipos de geração, a partir de correntes ou ondas. Isso é importante por diversos motivos, entre eles: obter dados da real taxa de conversão da energia do recurso em eletricidade, adquirir experiência de forma a desenvolver melhores projetos, avaliar os custos de operação e manutenção, quantificar os riscos envolvidos e diminuir o custo da energia.
- Estudar a complementariedade entre as Energias Marinhas Renováveis e outras fontes energéticas intermitentes, como eólica e solar.
- Desenvolver estudos para escolha de local de instalação levando em conta aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos.

- Estudar impactos associados à exploração do recurso. Tanto em seus aspectos biológicos, de sedimentação e socioambientais.
- Criar base técnica para desenvolvimento de legislação específica para extração de Energias Marinhas Renováveis.
- Criar rede nacional de pesquisadores em Energias Marinhas Renováveis para troca de conhecimento e fortalecimento da área como forma de aumentar a visibilidade e a possibilidade de fomento.



## Referências Bibliográficas

- Amante C., Eakins B. W., ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division Colorado, 2009
- Andres A. d., MacGillivray A., Guanche R., Jeffrey H., Factors affecting LCOE of Ocean energy technologies: a study of technology and deployment attractiveness. In Proceedings of the International Conference on Ocean Energy, Halifax, NS, Canada , 2014, p. 4–6
- Arakawa A., Lamb V. R., Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Methods in computational physics*, 1977, v. 17, p. 173–265
- Banfield D., Donelan M., Cavaleri L., Winds, waves and shorelines from ancient martian seas, *Icarus*, 2015, v. 250, p. 368–383
- Beserra E. R., Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, 2007, Tese de Doutorado, 198 p.
- Blumberg A. F., Khan L. A., St. John J. P., Three-dimensional hydrodynamic model of New York Harbor region, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, v. 125, n. 8, p. 799–816

- Blumberg A. F., Mellor G. L., A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, *Three-dimensional coastal ocean models*, 1987, p. 1–16
- Borthwick A. G. L., Serhadlioglu S., Adcock T. A. A., Houlsby G. T., Draper S., Tidal stream energy resource assessment of the Anglesey Skerries, *International Journal of Marine Energy*, 2013, v. 3–4, p. e98–e111
- Boudière E., Maisondieu C., Ardhuin F., A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters, *International Journal of Marine Energy*, 2013, v. 3–4, p. e40–e50
- Branco F. V., Contribucoes de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2005, Dissertação de Mestrado, 154 p.
- Cahill B. G., Lewis T., Wave energy resource characterisation of the Atlantic Marine Energy Test Site, *International Journal of Marine Energy*, 2013, v. 1, p. 3–15
- Carvalho J. T., Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010, Dissertação de Mestrado, 143 p.
- Castro B. M., Wind driven currents in the Channel of São Sebastião: winter, 1979, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 1990, v. 38, n. 2, p. 111–132
- Castro B. M., Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, Tese de livre-docência, 1996, p. 248
- Castro B. M., Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight, *Continental Shelf Research*, 2014, v. 89, p. 15–23
- Castro B. M., Brandini F. P., Dottori M., Fortes J. F., A Amazônia Azul: recursos e preservação, *Revista USP*, 2017, v. 113, p. 7–26
- Castro B. M., Lee T. N., Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, v. 100, n. C8, p. 16045–16056

- Castro B. M. d., Miranda L. B. d., Hydrographic properties in the São Sebastião Channel: daily variations observed in March 1980, *Revista Brasileira de Oceanografia*, 1998, v. 46, n. 2, p. 111–123
- Cerda C., Castro B. M., Hydrographic climatology of South Brazil Bight shelf waters between Sao Sebastiao (24 S) and Cabo Sao Tome (22 S), *Continental Shelf Research*, 2014, v. 89, p. 5–14
- Chen S. S., Curcic M., Ocean surface waves in Hurricane Ike (2008) and Superstorm Sandy (2012): Coupled model predictions and observations, *Ocean Modelling*, 2016, v. 103, p. 161–176
- Coelho A. L., Massas de água e circulação no Canal de São Sebastião (SP), Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1997, Dissertação de Mestrado, 244 p.
- Cordeiro M. G., Modelagem e análise de desempenho de sistema para geração de energia elétrica através de ondas marítimas., Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2015, Dissertação de Mestrado, 106 p.
- Cornett A., Inventory of Canada's Marine Renewable Energy Resources, Technical Report, Canadian Hydraulics Centre, National Research Council Canada, 2006
- Costa P. R. d., Energia das ondas do mar para geração de eletricidade, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, 2004, Dissertação de Mestrado, 99 p.
- Courant R., Friedrichs K., Lewy H., On the partial difference equations of mathematical physics, *IBM journal of Research and Development*, 1967, v. 11, n. 2, p. 215–234
- Curcic M., Chen S. S., Özgökmen T. M., Hurricane-induced ocean waves and stokes drift and their impacts on surface transport and dispersion in the Gulf of Mexico, *Geophysical Research Letters*, 2016, v. 43, n. 6, p. 2773–2781
- Donelan M. A., Curcic M., Chen S. S., Magnusson A. K., Modeling waves and wind stress, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, v. 117, n. 7, p. 1–26
- Dottori M., Siegle E., Castro B. M., Hydrodynamics and water properties at the entrance of Araçá Bay, Brazil, *Ocean Dynamics*, 2015, v. 65, n. 12, p. 1731–1741

- Egbert G. D., Erofeeva S. Y., Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, v. 19, n. 2, p. 183–204
- Emilsson I., As correntes marítimas no Canal de São Sebastião, *Ciência Cult.*, São Paulo, 1962, v. 14, n. 4, p. 269–270
- EPE Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2017
- Etemadi A., Emdadi A., AsefAfshar O., Emami Y., Electricity generation by the ocean thermal energy, *Energy Procedia*, 2011, v. 12, p. 936–943
- Falcão A. F. d. O., The shoreline OWC wave power plant at the Azores. In *Fourth European Wave Energy Conference*, Aalborg, Denmark, Dec , 2000, p. 4–6
- Falcão A. F. d. O., Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, v. 14, p. 899–918
- Ferreira R. M. d. S. d. A., Técnica de interferometria SAR e modelagem hidrodinâmica para avaliação de locais adequados ao aproveitamento da energia das correntes de maré, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, 2011, Tese de Doutorado, 173 p.
- Fischer A., Avaliação do potencial energético de correntes oceânicas no litoral Sul do Brasil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2014, Tese de Doutorado, 117 p.
- Fischer A., Machado C. L., de Almeida L. B., Beluco A., Energetic Potential And Variability Of Ocean Currents On The Southern Coast Of Brazil, *Ieee Latin America Transactions*, 2015, v. 13, n. 5, p. 1369–1375
- Fontes R. F. C., As correntes no canal de São Sebastião, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1995, Dissertação de Mestrado, 159 p.
- Fortes J. F., Ferraz L. M., Projeto de gerador elétrico para utilização na extração de energia das ondas e estudo de sua viabilidade, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2014, Trabalho de Conclusão de Curso, 101 p.

- Freitas S., Longo K., Silva Dias M., Chatfield R., Silva Dias P., Artaxo P., Andreae M., Grell G., Rodrigues L., Fazenda A., et al., The coupled aerosol and tracer transport model to the Brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (CATT-BRAMS)–Part 1: Model description and evaluation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, v. 9, n. 8, p. 2843–2861
- Georgas N., Establishing confidence in marine forecast system: The design of a high fidelity marine forecast model for the NY/NJ Harbor estuary and its adjoining coastal waters, Stevens Institute of Technology, 2010, Tese de Doutorado, 269 p.
- Georgas N., Blumberg A., Herrington T., Wakeman T., Saleh F., Runnels D., Jordi A., Ying K., Yin L., Ramaswamy V., et al., The Stevens Flood Advisory System: Operational H3e lood Forecasts for the Greater New York/New Jersey Metropolitan Region, *Flood Risk Management and Response*, 2016, p. 194
- Georgas N., Blumberg A. F., Establishing confidence in marine forecast systems: The design and skill assessment of the New York Harbor Observation and Prediction System, version 3 (NYHOPS v3). In *Proceedings of the 11th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, Seattle, Washington (2009) , 2010, p. 660–685
- Georgas N., Blumberg A. F., Bruno M. S., Runnels D. S., Marine forecasting for the New York urban waters and harbor approaches: the design and automation of NYHOPS. In *3rd International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation & Optimization*. Athens, Greece , 2009, p. 345–352
- Georgas N., Blumberg A. F., Herrington T. O., An operational coastal wave forecasting model for New Jersey and Long Island waters, *Shore and beach*, 2007, v. 75, n. 2, p. 30
- Gomes C. P., Caracterização do regime de ondas da costa brasileira: base para o desenvolvimento de um gerador elétrico para extração de energia das ondas., Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2014, Trabalho de Conclusão de Curso, 47 p.
- González-Gorbeña E., Rosman P. C., Qassim R. Y., Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2015, v. 1, n. 4, p. 421–433

- Grabbe M., Lalander E., Lundin S., Leijon M., A review of the tidal current energy resource in Norway, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, v. 13, n. 8, p. 1898–1909
- Hagerman G., Polagye B., Bedard R., Previsic M., Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices, EPRI North American tidal in stream power feasibility demonstration project, 2006, v. 1
- Harari J., Camargo R. d., Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): circulação de maré, *Revista Brasileira de Oceanografia*, 1998, v. 46, n. 2, p. 135–156
- Heath T., Whittaker T., Boake C., The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland). In *Proceedings of the 4th European wave energy conference*, Aalborg, Denmark , 2000, p. 49–55
- Hemer M. A., Griffin D. A., The wave energy resource along Australia’s Southern margin, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, v. 2, n. 4, p. 043108
- IBGE Censo 2010, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010
- Iglesias G., Carballo R., Wave energy potential along the Death Coast (Spain), *Energy*, 2009, v. 34, n. 11, p. 1963–1975
- Iglesias G., López M., Carballo R., Castro A., Fraguera J. A., Frigaard P., Wave energy potential in Galicia (NW Spain), *Renewable Energy*, 2009, v. 34, n. 11, p. 2323–2333
- Iwasaki S., Isobe A., Kako S., Uchida K., Tokai T., Fate of microplastics and mesoplastics carried by surface currents and wind waves: A numerical model approach in the Sea of Japan, *Marine Pollution Bulletin*, 2017, v. 121, n. 1-2, p. 85–96
- Khan M. J., Bhuyan G., Iqbal M. T., Quaicoe J. E., Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, *Applied Energy*, 2009, v. 86, n. 10, p. 1823–1835
- Kirinus E. D. P., Estudo da Viabilidade de Conversão da Energia das Correntes em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira, Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Oceanografia, 2017, Tese de Doutorado, 229 p.

- Kirinus E. D. P., Marques W. C., Viability of the application of marine current power generators in the south Brazilian shelf, *Applied Energy*, 2015a, v. 155, p. 23–34
- Kirinus E. P., Marques W. C., Viabilidade do uso de turbinas hidrocínéticas na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira., *Scientia Plena*, 2015b, v. 11, n. 8, p. 1–10
- Kirinus E. P., Stringari C. E., Marques W. C., Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil., *Vetor*, 2012, v. 22, p. 83–103
- Kundu P. K., Cohen I., *Fluid mechanics.* Elsevier Acad. Press, London, 2008, 766 p.
- Kvinge T., On the special current and water level variations in the channel of São Sebastiao, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 1967, v. 16, n. 1, p. 23–38
- Laws N. D., Epps B. P., Hydrokinetic energy conversion\_ Technology, research, and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, v. 57, p. 1245–1259
- Leandro R. P., *Climatologia das águas do Canal de São Sebastião (SP).*, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1999, Dissertação de Mestrado, 162 p.
- Lenee-Bluhm P., Paasch R., Özkan-Haller H. T., Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest, *Renewable Energy*, 2011, v. 36, n. 8, p. 2106–2119
- Lima S. L. d., Saavedra O. R., Barros A. K., Camelo N. J., Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas. In V Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, São Pedro, São Paulo, Brasil , 2003
- Liu H. W., Ma S., Li W., Gu H. G., Lin Y. G., Sun X. J., A review on the development of tidal current energy in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, v. 15, n. 2, p. 1141–1146
- Liu T., Wang B., Hirose N., Yamashiro T., Yamada H., High-resolution modeling of the Kuroshio Current power south of Japan, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2017, p. 1–19
- Martín J. J. N., *Avaliação Econômica dos Recursos Energéticos das Ondas do Mar*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, 2012, Dissertação de Mestrado, 118 p.

- Miranda L. B. d., Castro B. M., Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião (SP), Publicação especial do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 1995, v. 11, p. 1–9
- Miranda L. B. d., Mesquita A. R. d., França C. A. d. S., Estudo da circulação e dos processos de mistura no extremo sul do mar de Cananéia: condições de dezembro de 1991, Boletim do Instituto Oceanográfico, 1995, v. 43, n. 2, p. 153–164
- Morais P. H. L. S., Hidrodinâmica da Plataforma Continental Interna do estado de São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2016, Dissertação de Mestrado, 103 p.
- Neves M. G. d. C., Estudo da viabilidade de implantação de plantas para conversão de energia térmica do oceano (OTEC) no Brasil, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, 2015, Dissertação de Mestrado, 162 p.
- Oey L.-Y., An OGCM with movable land–sea boundaries, *Ocean Modelling*, 2006, v. 13, n. 2, p. 176–195
- Oleinik P. H., Marques W. C., Kirinus E. d. P., Estimate of the Wave Climate on the Most Energetic Locations of the South-Southeastern Brazilian Shelf. In *Defect and Diffusion Forum*, 2016a, p. 130–140
- Oleinik P. H., Marques W. C., Kirinus E. d. P., Simulação de ondas oceânicas na costa Sul-Sudeste brasileira para análise do potencial energético, *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, 2016b, v. 26, n. 2, p. 39–50
- Ostritz F., Estimativa Do Potencial Energético Gerado Por Ondas Na Costa Do Brasil Com Ênfase No Estado Do Ceará, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, 2012, Dissertação de Mestrado, 58 p.
- Parente F. T. F., Hidrodinâmica da Plataforma Continental da bacia Sergipe-Alagoas, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2016, Dissertação de Mestrado, 114 p.

- Pereira A. F., Castro B. M., Calado L., da Silveira I. C. A., Numerical simulation of M2 internal tides in the South Brazil Bight and their interaction with the Brazil Current, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, v. 112, n. C4
- Pianca C., Mazzini P. L. F., Siegle E., Brazilian offshore wave climate based on nww3 reanalysis 1\* 2, *Brazilian Journal of Oceanography*, 2010, v. 58, n. 1, p. 53–70
- Reboita M. S., Da Rocha R. P., Ambrizzi T., Sugahara S., South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3), *Climate Dynamics*, 2010, v. 35, n. 7-8, p. 1331–1347
- Reid R. O., Bodine B. R., Numerical model for storm surges in Galveston Bay, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 1968, v. 94, n. 1, p. 33–58
- Rezende J. H. M., Intrusões da água central do atlântico sul na plataforma continental sudeste durante o verão, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2003, Tese de Doutorado, 120 p.
- Robertson B. R. D., Hiles C. E., Buckham B. J., Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island, Canada, *Renewable Energy*, 2014, v. 71, p. 665–678
- Rourke F. O., Boyle F., Reynolds A., Tidal current energy resource assessment in Ireland: Current status and future update, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, v. 14, n. 9, p. 3206–3212
- Rusu E., Guedes Soares C., Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore, *Renewable Energy*, 2009, v. 34, n. 6, p. 1501–1516
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H.-y., Iredell M., et al., The NCEP climate forecast system version 2, *Journal of Climate*, 2014, v. 27, n. 6, p. 2185–2208
- Saket A., Etemad-Shahidi A., Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran, *Renewable Energy*, 2012, v. 40, n. 1, p. 90–97

- Siffert J. R. R., Aspectos Regulatórios De Energia Renovável De Fontes Oceânicas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, 2010, Dissertação de Mestrado, 150 p.
- Silva D. A., Análise da dispersão de material radioativo por modelagem numérica na Baía de Ilha Grande - RJ, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2016, Trabalho de Conclusão de Curso, 30 p.
- Silva J. S., Viabilidade de geração de energia elétrica através de ondas oceânicas no litoral norte do Rio Grande do Sul : estudo de um sistema híbrido de energias renováveis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2012, Dissertação de Mestrado, 117 p.
- Silva L. d. S., Miranda L. d., Castro Filho B. d., Relatório do Projeto "Oceanografia da Plataforma Interna de São Sebastião" (OPISS), Relatórios Técnicos do Instituto Oceanográfico, 2001, v. 47, p. 1–31
- Silveira I. C. A., Schmidt A. C. K., Campos E. J. D., de Godoi S. S., Ikeda Y., A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira, *Revista Brasileira de Oceanografia*, 2000, v. 48, n. 2, p. 171–183
- Souza R. V. d., O potencial energético do gradiente térmico na plataforma continental do sul do Brasil, Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Matemática, Estatística e Física, 2014, Dissertação de Mestrado, 149 p.
- Souza R. V. d., Marques W. C., Energy budget of the thermal gradient in the Southern Brazilian continental shelf, *Renewable Energy*, 2016, v. 91, p. 531–539
- Stech J. L., Lorenzetti J. A., The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, v. 97, n. C6, p. 9507–9520
- Taylor G. W., Burns J. R., Kammann S. M., Powers W. B., Welsh T. R., The Energy Harvesting Eel: A Small Subsurface Ocean/River Power Generator, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, v. 26, n. 4, p. 539–547
- Thorpe T. W., A Brief Review of Wave Energy, Technical report ETSU-R120, 1999, p. 200

- 
- Tolman H. L., et al., User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14, Technical note, MMAB Contribution, 2009, v. 276, p. 220
- Uihlein A., Magagna D., Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, v. 58, p. 1070–1081
- Vakis A. I., Meijer H., Prins W. A., First steps in the design and construction of the ocean grazer. In *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* , 2014, p. V002T09A004–V002T09A004
- Vanzwieten J. H., Meyer I., Alsenas G. M., Evaluation of HYCOM as a tool for ocean current energy assessment. In *Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium*, Seattle, Washington, USA , 2014, p. 1–11
- Willmott C. J., On the validation of models, *Physical geography*, 1981, v. 2, n. 2, p. 184–194
- Zhou Z., Sculler F., Charpentier J. F., Benbouzid M., Tang T., An up-to-date review of large marine tidal current turbine technologies. In *Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)* , 2014, p. 480–484