



## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS CORRENTES OCEÂNICAS NO BRASIL

Anderson Elias Soares

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

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão  
Raquel Toste Ferreira dos  
Santos

Rio de Janeiro  
Março de 2024

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS CORRENTES  
OCEÂNICAS NO BRASIL

Anderson Elias Soares

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

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão  
Raquel Toste Ferreira dos Santos

Aprovada por: Prof. Djalma Mosqueira Falcão  
Dr.a Raquel Toste Ferreira dos Santos  
Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima  
Prof. Luiz Paulo de Freitas Assad  
Prof. Milad Shadman

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2024

Soares, Anderson Elias

Avaliação do potencial energético das correntes oceânicas no Brasil/Anderson Elias Soares. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIV, 63 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão

Raquel Toste Ferreira dos Santos

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 55 – 63.

1. Potencial energético de correntes oceânicas. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. Mudanças climáticas. I. Falcão, Djalma Mosqueira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

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

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS CORRENTES OCEÂNICAS NO BRASIL

Anderson Elias Soares

Março/2024

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão  
Raquel Toste Ferreira dos Santos

Programa: Engenharia Elétrica

A crescente busca por fontes de energia, impulsionada tanto pelo aumento do consumo de eletricidade quanto pela urgência em diminuir emissões de gases de efeito estufa, tem elevado o uso das energias renováveis. Neste contexto, os mares surgem como fontes promissoras para enriquecer e diversificar a matriz energética. Este estudo tem como foco a análise do potencial teórico para geração de energia a partir das correntes oceânicas ao longo do litoral brasileiro, usando os resultados de um modelo climático global, o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM). Para superar limitações de resolução espacial e temporal do BESM, aplicou-se o modelo hidrodinâmico *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) para a regionalização dos resultados. Visando considerar os efeitos das mudanças climáticas na densidade de potência das correntes oceânicas, as simulações representaram as condições climáticas atuais e futuras, com base no cenário histórico e no RCP4.5, respectivamente. Utilizaram-se os resultados dessas simulações como condições de contorno e forçantes de superfície em um modelo aninhado com três grades numéricas, sendo uma de  $1/5^\circ$  e duas de  $1/15^\circ$  de resolução horizontal, focando nas áreas de maior densidade de energia cinética nas costas sudeste e na margem equatorial brasileira, influenciadas principalmente pela Corrente do Brasil (CB) e pela Corrente Norte do Brasil (CNB). A investigação incluiu uma avaliação da densidade de potência hidrocínética no oceano em escala anual e sazonal, bem como uma análise dos impactos potenciais das mudanças climáticas sobre esta fonte de energia emergente. Em particular, foi identificada uma região com potencial energético crescente e menor variação de potência diante do cenário de mudanças climáticas simulado, aproximadamente entre 80 a 100 m perto do Rio Grande do Norte.

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

## ASSESSMENT OF THE ENERGETIC POTENTIAL OF OCEAN CURRENTS IN BRAZIL

Anderson Elias Soares

March/2024

Advisors: Djalma Mosqueira Falcão  
Raquel Toste Ferreira dos Santos

Department: Electrical Engineering

The increasing search for energy sources, driven by both the rise in electricity consumption and the urgency to reduce greenhouse gas emissions, has boosted the use of renewable energies. In this context, the seas emerge as promising sources to enrich and diversify the energy matrix. This study focuses on analyzing the theoretical potential for energy generation from ocean currents along the Brazilian coast, using results from a global climate model, the Brazilian Earth System Model (BESM). To overcome the BESM's spatial and temporal resolution limitations, the Regional Ocean Modeling System (ROMS) was applied for the regionalization of results. Aiming to consider the effects of climate change on the power density of ocean currents, simulations represented current and future climate conditions, based on the historical scenario and RCP4.5, respectively. The results of these simulations were used as boundary conditions and surface forcing in a nested model with three numerical grids, one with  $1/5^\circ$  and two with  $1/15^\circ$  horizontal resolution, focusing on areas with the highest kinetic energy density on the southeast coasts and the Brazilian equatorial margin, mainly influenced by the Brazil Current and the North Brazil Current. The investigation included an evaluation of the hydrokinetic power density in the ocean on an annual and seasonal scale, as well as an analysis of the potential impacts of climate changes on this emerging energy source. In particular, a region with increasing energy potential and less power variation in the face of simulated climate change was identified, approximately between 80 to 100 m near Rio Grande do Norte.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
<b>2 Energia de correntes oceânicas</b>	<b>4</b>
2.1 Aspectos gerais sobre energia de correntes oceânicas . . . . .	4
<b>3 Materiais e métodos</b>	<b>11</b>
3.1 BESM . . . . .	12
3.1.1 Experimentos . . . . .	12
3.1.2 Áreas de maior potencial hidrocínético . . . . .	14
3.1.3 Período de modelagem . . . . .	18
3.2 Regional Ocean Modelling System - ROMS . . . . .	21
3.2.1 Formulação do modelo . . . . .	22
3.2.2 Sistema de coordenadas e discretização espacial . . . . .	25
3.2.3 Aninhamento de grades . . . . .	29
3.3 Grades Numéricas . . . . .	31
3.4 Modelagem computacional . . . . .	32
3.5 Análise dos resultados . . . . .	35
3.5.1 Validação do modelo . . . . .	35
3.5.2 Variabilidade espacial e temporal de densidade de potência . . . . .	36
<b>4 Resultados</b>	<b>37</b>
4.1 Validação . . . . .	37
4.1.1 Estabilidade numérica . . . . .	37
4.1.2 Energia cinética de superfície . . . . .	38

4.1.3	Temperatura . . . . .	41
4.2	Densidade de Potência no Clima Atual . . . . .	43
4.2.1	0-20 metros . . . . .	44
4.2.2	80-100 metros . . . . .	46
4.3	Densidade de Potência no Clima Futuro . . . . .	48
4.3.1	0-20 metros . . . . .	48
4.3.2	80-100 metros . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>53</b>
5.1	Trabalhos futuros . . . . .	54
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>55</b>

# Lista de Figuras

1	Esquema representando a localização das principais correntes oceânicas de superfície. Fonte: NOAA, retirado de [17]. . . . .	5
2	Representação da localização das correntes CB e CNB. A linha pontilhada indica a quebra de plataforma. Retirado de [23] . . . . .	5
3	Esquema simplificado de dispositivos conversores de energia de correntes. Retirado de [25]. . . . .	6
4	Curva de potência típica de uma turbina hidrocínética. Retirado de [4]. . . . .	7
5	Esquema do sistema de ancoragem da turbina hidrocínética descrita em [31]. Retirado de [31] . . . . .	8
6	Esquema proposto por [29](a) e protótipo da turbina durante o experimento no mar (b). Retirado de [29]. . . . .	9
7	Esquema do teste da turbina Kairyu(a) e foto da turbina no mar (b). Retirado de [32]. . . . .	10
8	Esquema normalmente adotado em sistemas de conversão de energia de correntes oceânicas. Retirado de [27] . . . . .	10
9	(a) campo médio da energia ( $E_c/\rho$ ) para o período de 1975-2005 em $J.(kg/m^3)^{-1}$ e em (b) a diferença entre a média do período de 2075-2105 em relação à média de 1975-2005. . . . .	16
10	Divisão da ZEE em regiões com predominância da CNB e CB em verde, com base na grade numérica do BESM. . . . .	17
11	Série temporal de energia cinética por unidade de massa (preto) e a média correspondente a 30 anos (vermelho) para as regiões da CNB (superior) e CB (inferior). A área cinza indica que a série para o intervalo de 2006 a 2074 foi suprimida. . . . .	18

12	Espectro de potência da ondaleta (esquerda) para série de energia cinética, com destaque em linha sólida vermelha para regiões com significância maior que 95% e cone de influência em linha tracejada branca, para série de energia cinética da região CNB normalizada pelo desvio padrão. E espectro de potência global (direita) em linha sólida azul e significância de 95% em linha tracejada vermelha. . . . .	19
13	Espectro de potência da ondaleta (esquerda) para série de energia cinética, com destaque em linha sólida vermelha para regiões com significância maior que 95% e cone de influência em linha tracejada branca, para série de energia cinética da região BC normalizada pelo desvio padrão. E espectro de potência global (direita) em linha sólida azul e significância de 95% em linha tracejada vermelha. . . . .	19
14	Série de energia para o ano climatológico de referência (preto) e para 1993 (vermelho). . . . .	21
15	Série de energia para o ano climatológico de referência (preto) e para 2085 (vermelho). . . . .	21
16	Representação do perfil utilizando coordenada $z$ , profundidade em metros (Adaptado de [69]). . . . .	25
17	Representação do perfil utilizando coordenada $\sigma$ , profundidade em metros (Adaptado de [69]). . . . .	26
18	Representação do perfil utilizando coordenada $\sigma$ , exemplificando a variação na resolução nas camadas superficiais devido a profundidade (Adaptado de [65]). . . . .	26
19	Representação do perfil utilizando coordenada vertical híbrida S (Adaptado de [69]). . . . .	27
20	Representação do perfil utilizando coordenada híbrida S, exemplificando a quase planificação e alta resolução das camadas superiores (Adaptado de [65]). . . . .	27
21	Localização vertical das variáveis na grade do ROMS, as camadas sombreadas em vermelho ( <i>bed</i> ) referem-se a representação de sedimentos que não foram utilizadas neste trabalho (Figura 21) (Retirado de [67]). . . . .	28
22	Localização horizontal das variáveis na grade do ROMS. (Retirado de [67]). . . . .	29
23	Exemplo de aninhamento de grades. Em azul a grade menor resolução, em vermelho a grade de resolução intermediária e em verde a grade mais resolvida. (Retirado de [67]). . . . .	30
24	Esquema de aninhamento e batimetria da grade G1. . . . .	31

25	Vista bidimensional (a) e tridimensional (b) da batimetria, em metros, na região da grade G2N. . . . .	32
26	Vista bidimensional (a) e tridimensional (b) da batimetria, em metros, na região da grade G2S. . . . .	32
27	Esquema de integração entre o BESM e o ROMS, e a interação entre as grades modeladas. O BESM fornece as condições de contorno (CC) atmosférica e condição inicial (CI) oceânica para todas as grades e a CC. oceânica apenas a grade G1. . . . .	33
28	Localização dos rios e suas séries climatológicas de vazão, em $m^3/s$ , utilizadas na modelagem hidrodinâmica. . . . .	34
29	Série temporal da média volumétrica de energia cinética para o experimento histórico (a) e RCP4.5 (b). As linhas claras indicam a série bruta enquanto a escura é a média móvel com janela de 1 mês. . . .	38
30	Séries temporais da média superficial de energia cinética. A legenda mostra as cores bases usada para cada grade. Linha clara: série bruta do ROMS. Linha grossa escura: média móvel da série do ROMS . Linha fina escura: média móvel do produto de reanálise (GLORYS). .	39
31	Campos de MKE para o ano de 1993, utilizando as velocidade integradas entre 0 a 200m com os resultados do (a) BESM, (b) ROMS, com grade G2S e G2N sobrepostos à grade G1, e (c) GLORYS. . . .	40
32	Campos de profundidade correspondente à maior ocorrência de velocidades máximas com os resultados do BESM (a), da grade G1 (b) e GLORYS (c). . . . .	41
33	Campos de temperatura média de superfície para o ano de 1993 no (a) BESM, (b) modelada no ROMS,(c) observada e os campos de anomalia entre o modelo e a observação, sendo (d) BESM e (e) modelado no ROMS . . . . .	42
34	Série temporal de TSM para os pontos (a) P1, (b) P2 e (c) P3, para o modelo ROMS (azul) e observação (vermelho) . As linhas claras indicam a série bruta enquanto a escura é a média móvel com janela de 1 mês. . . . .	43
35	Densidade de potência em $W/m^2$ calculadas a partir das velocidades integradas entre 0 e 20 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e). . . . .	44
36	Coefficiente de variação de densidade de potência representativo para profundidades entre 0 a 20 metros. . . . .	46

37	Densidade de potência em $W/m^2$ calculadas a partir das velocidades integradas entre 80 e 100 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e). . . . .	47
38	Coefficiente de variação de densidade de potência representativo para profundidades entre 80 e 100 metros. . . . .	48
39	Anomalia de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) em $W/m^2$ calculadas a partir das velocidades integradas entre 0 e 20 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e). . . . .	49
40	Anomalia do coeficiente de variação de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) representativo para profundidades entre 0 e 20 metros. . . . .	50
41	Anomalia de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) em $W/m^2$ calculadas a partir das velocidades integradas entre 80 e 100 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e). . . . .	51
42	Anomalia do coeficiente de variação de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) representativo para profundidades entre 80 e 100 metros. . . . .	52

# Lista de Tabelas

- 1 Resumo dos indicadores estatísticos, correlação e erro quadrático médio normalizado, para os anos escolhidos para modelagem e as médias dos indicadores em relação as séries anuais. . . . . 21

# Lista de Abreviaturas

ANA	Agência Nacional de Águas, p. 34
BESM	<i>Brazilian Earth System Model</i> , p. 11
CB	Corrente do Brasil, p. 5
CNB	Corrente Norte do Brasil, p. 5
COV	coeficiente de variação, p. 36
CSE	Corrente Sul-Equatorial, p. 16
EMEC	<i>European Marine Energy Centre</i> , p. 6
GLORY	<i>Global Ocean Reanalysis and Simulation</i> , p. 35
IEA	<i>International Energy Agency</i> , p. 1
IHI	<i>Ishikawajima-Harima Heavy Industries</i> , p. 9
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 12
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 11
LAMCE	Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia, p. 32
MKE	<i>Mean Kinect Energy</i> , p. 39
MPI	Message Passing Interface, p. 33
NEDO	<i>New Energy and Industrial Technology Development Organization</i> , p. 9
OSTIA	<i>Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis</i> , p. 35
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> , p. 10

ROMS	Regional Ocean Modelling System, p. 21
SIN	Sistema Interligado Nacional, p. 54
TSM	temperatura de superfície do mar, p. 35
ZEE	Zona Econômica Exclusiva, p. 11

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo inicial serão contextualizados as motivações e objetivos acerca da avaliação do potencial energético das correntes oceânicas no Brasil. Também será abordada a necessidade de se considerar as mudanças climáticas para o planejamento estratégico de energia.

### 1.1 Contexto

Ao longo do tempo, a produção de energia tem desempenhado um papel primordial para a manutenção e desenvolvimento da sociedade. A demanda por este insumo apresenta uma correlação forte com o tamanho populacional e progresso econômico, apesar das diferenças sociais dentre países [1]. Em consequência à corrente expansão e previsão de crescimento de ambos fatores [2], é observado e expectado uma crescente produção de energia em todo o mundo.

Ao analisar a matriz energética global, percebe-se a grande dependência por fontes não renováveis de energia. No quesito geração de eletricidade o cenário é semelhante, no relatório sobre o balanço de energia global realizado pela IEA (*International Energy Agency*) é mostrado que mesmo com a elevada penetração de energias renováveis nos últimos anos, existe uma grande dominância na utilização de combustíveis fósseis em toda série histórica (1971-2018). Em 2018, cerca de 38% da produção de energia foram provenientes do carvão e aproximadamente 26% foram a partir de energias renováveis [3]. Além disso, neste mesmo relatório é apontado um aumento de 3,2% na produção de energia quando comparado com 2017 .

A utilização de combustíveis fósseis acarreta o aumento da emissão de gases de efeito estufa e, por conseguinte, as mudanças climáticas. Por isso, há um empenho global para adotar políticas que visem a diminuição dos impactos ambientais gerados pela emissão de carbono. Com isso, a busca por novas fontes de energia para descarbonização da matriz energética ganha relevância. Não obstante, há também a necessidade de substituir o combustível fóssil, já que se trata de um recurso esgo-

tável. Esse processo, de troca do atual modelo energético altamente poluente por um de menor impacto ambiental, é chamado transição energética.

O Brasil, apesar de possuir uma matriz elétrica com bastantes renováveis, tem sua produção de energia muito dependente das condições climáticas e do tempo. Dessa forma, é necessário o investimento na diversificação das fontes para garantir a segurança no abastecimento de energia. Ademais, os efeitos dos esforços para descarbonização da energia geram inovações e transformações que são eficientes e sustentáveis, como por exemplo a eletromobilidade, que por sua vez aumenta a necessidade da ampliação na capacidade de geração.

Neste contexto, a produção de energia a partir de correntes oceânicas apresenta-se como uma oportunidade para expansão da oferta de energia, já que a produção de energia hidrocínética em oceanos proporciona uma alternativa sustentável às fontes convencionais [4, 5]. Adicionalmente, o aprimoramento dos modelos numéricos hidrodinâmicos, que podem incluir a assimilação de dados observacionais, contribui significativamente para o entendimento do comportamento passado (*hindcasts*) e a previsibilidade das correntes oceânicas [6–10]. Isso não apenas eleva a precisão dos estudos voltados ao potencial energético dos oceanos, mas também aumenta a confiabilidade nas previsões de geração de energia.

No entanto, por ser uma fonte emergente, demanda desenvolvimento tecnológico, já que os dispositivos para geração de correntes estão mais estabelecidos para energia proveniente das correntes de marés, que são caracterizadas por serem bidirecionais, possuírem alta intensidade de velocidade de pico e, normalmente, ocorrem em regiões mais rasas. No entanto, diferentemente das correntes de marés, as correntes oceânicas ocorrem geralmente em regiões mais profundas e, apesar de apresentarem velocidades menores, são caracterizadas por uma maior constância, atribuída à sua natureza predominantemente unidirecional [11].

Contudo, sob a perspectiva das mudanças climáticas, mudanças nas correntes oceânicas são esperadas, tanto em termos de posicionamento quanto de intensidade [12–15]. Dessa forma, é importante avaliar como estas alterações são projetadas e como isso afeta o potencial energético.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar o potencial energético teórico das correntes oceânicas ao longo da costa brasileira, compreendendo a dinâmica destas correntes e o possível impacto das mudanças climáticas nessa fonte de energia renovável. Os objetivos específicos são:

- Implementar um modelo hidrodinâmico avançado capaz de capturar a dinâmica das principais correntes oceânicas na costa brasileira.

- Avaliar a distribuição e variabilidade da densidade de potência, espacial e temporal, da energia cinética disponível nas correntes oceânicas.
- Examinar como as mudanças climáticas podem influenciar o potencial energético das correntes oceânicas, utilizando o resultado de projeção climática do modelo climático global BESM, sob o cenário RCP4.5.

# Capítulo 2

## Energia de correntes oceânicas

Este capítulo discorre sobre a energia gerada pelas correntes oceânicas, explorando inicialmente sua formação e as correntes predominantes ao longo da costa brasileira. São examinados alguns modelos de turbinas que aproveitam a energia cinética da água e, embora muitas tecnologias sejam originalmente concebidas para correntes de maré, são apresentados alguns projetos que mostram os avanços direcionados às correntes oceânicas. Para finalizar, é apresentado o sistema de transmissão de torque e geração normalmente adotado nesses projetos.

### 2.1 Aspectos gerais sobre energia de correntes oceânicas

A energia oriunda dos oceanos está associada ao movimento em larga escala das águas devido às marés, à ação dos ventos e à circulação termohalina [16]. No que tange a extração de energia a partir das correntes oceânicas, esta se refere ao movimento gerado pela ação do vento que move o fluido principalmente nas porções mais superficiais da coluna d'água.

As correntes oceânicas são caracterizadas por possuírem um fluxo e posicionamento aproximadamente constantes, apesar de haver variações sazonais, em resposta aos sistemas de pressão atmosféricos. Uma idealização das principais correntes do oceano global é apresentada na Figura 1.

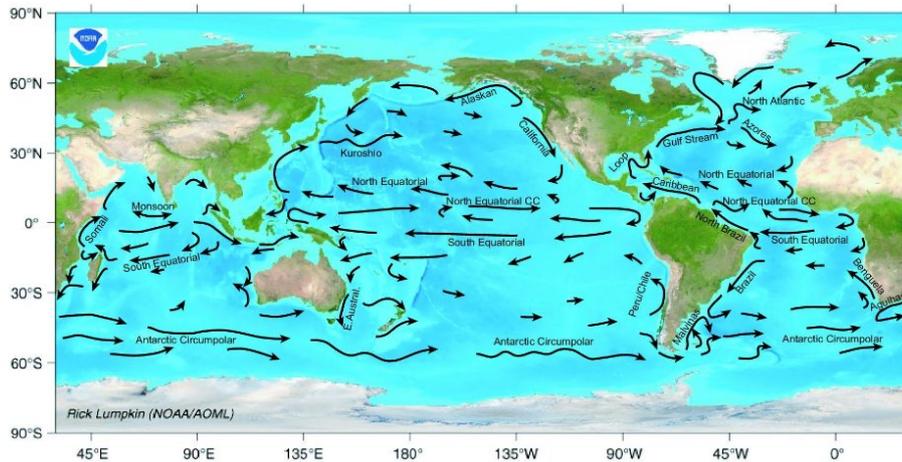


Figura 1: Esquema representando a localização das principais correntes oceânicas de superfície. Fonte: NOAA, retirado de [17].

Essas principais correntes são caracterizadas por fluírem em regiões caracterizadas por batimetrias mais profundas do oceano. Na costa do Brasil são representadas pela Corrente Norte do Brasil (CNB) e Corrente do Brasil (CB), esquematizadas na Figura 2, que fluem ao longo da quebra de plataforma, entre as isobatimétricas de 200 e 2000 m [9, 18–22].

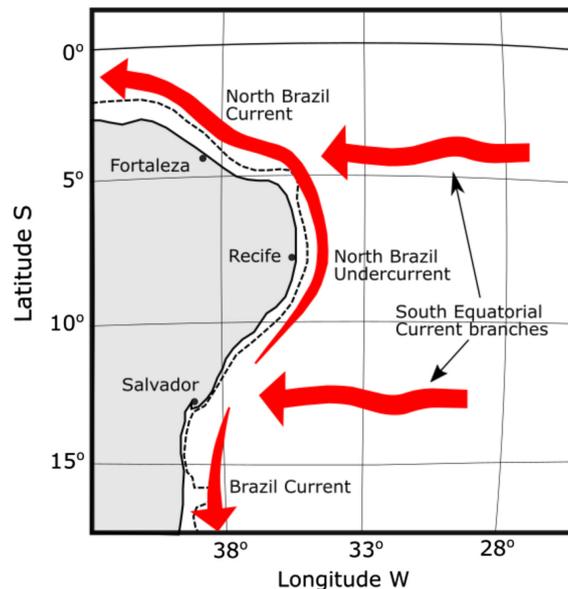


Figura 2: Representação da localização das correntes CB e CNB. A linha pontilhada indica a quebra de plataforma. Retirado de [23]

O presente trabalho foca na energia extraída a partir das correntes oceânicas, embora muitos dos dispositivos atualmente em desenvolvimento sejam direcionados predominantemente para a extração de energia das correntes de maré. As correntes de maré se referem ao movimento horizontal das marés, principalmente induzidos pela força gravitacional combinada da Terra, do Sol e da Lua. Com essa compreensão, será feita uma exposição abrangente sobre os dispositivos de conversão de

correntes, destacando sua aplicabilidade primária nas correntes de maré, para em seguida, direcionar a discussão aos avanços voltados para o aproveitamento energético das correntes oceânicas.

Para a conversão da energia cinética das correntes em eletricidade são utilizados conversores com topologias variadas para maximizar a eficiência de captação de energia. Conforme registrado pelo *European Marine Energy Centre* (EMEC) em 2020, haviam 97 dispositivos dedicados ao aproveitamento dessa energia, seja em estágio de pesquisa, desenvolvimento ou comercialização. Estes dispositivos estão sendo pioneiramente desenvolvidos em países que lideram no campo da inovação energética marinha, incluindo, mas não limitado a, Reino Unido, Estados Unidos, França, Noruega, Austrália e Canadá [24].

Estes dispositivos são classificados, segundo o EMEC, em turbinas de eixo horizontal, turbinas de eixo vertical, hidrofólios oscilantes, turbinas instaladas no interior de dutos Venturi e outros. A Figura 3 apresenta uma esquematização simples dos principais dispositivos de conversão de energia cinética do oceano.

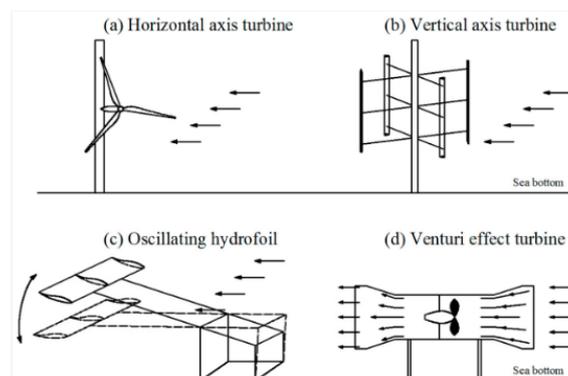


Figura 3: Esquema simplificado de dispositivos conversores de energia de correntes. Retirado de [25].

As turbinas de eixo horizontal operam com o eixo de rotação paralelo à direção do fluxo de água, capturando a energia cinética através de pás que giram em torno de um eixo horizontal. Essas turbinas são projetadas para se alinhar com a direção do fluxo, otimizando a captação de energia. Por outro lado, turbinas de eixo vertical possuem um eixo de rotação perpendicular ao fluxo da água, o que lhes permite capturar energia independentemente da direção do fluxo, tornando-as versáteis para diversas condições. Hidrofólios oscilantes não giram em torno de um eixo fixo, ao invés disso, movem-se para cima e para baixo ou lateralmente em resposta ao fluxo de água, um método que simula o movimento de nadadeiras de peixes para gerar energia. Por fim, turbinas instaladas no interior de dutos Venturi são colocadas em passagens estreitas onde a velocidade do fluxo de água aumenta devido ao efeito Venturi, potencializando a eficiência na geração de energia ao aproveitar a aceleração do fluxo em um espaço confinado.

Dentre essas tecnologias, as turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal representam grande parte das aplicações e desenvolvimento atuais [26], cuja potência extraída do fluxo de água pela turbina é calculada conforme a Equação 2.1.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_P \quad (2.1)$$

Onde  $P$  é a potência em  $W$ ,  $\rho$  é a densidade da água em  $kg/m^3$ ,  $A$  é a área varrida pelas pás da turbina em  $m^2$ ,  $v$  é a velocidade da água em  $m/s$  e  $c_P$  é o coeficiente de potência da turbina. Este coeficiente representa o quanto da energia cinética da água pode ser convertida em potência mecânica no rotor.

As turbinas hidrocínéticas operam dentro de um intervalo específico de velocidades, como ilustrado na Figura 4. Neste intervalo, destaca-se a velocidade de *cut-in*, que é o limite mínimo de velocidade para a turbina começar a gerar eletricidade. Além disso, menciona-se a velocidade nominal (*rated speed*), que é o ponto no qual a turbina alcança sua potência nominal (*rated power*).

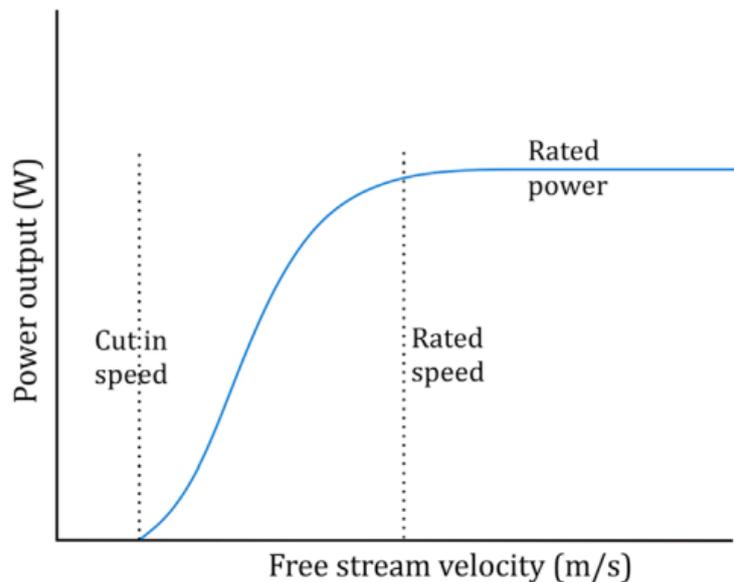


Figura 4: Curva de potência típica de uma turbina hidrocínética. Retirado de [4].

Na literatura, encontra-se alguns trabalhos que revisam os parâmetros das turbinas hidrocínéticas [4, 27]. É reportado que o valor de  $c_P$  varia entre 0,3 e 0,45, a velocidade de *cut-in* é tipicamente maior ou igual a 0,7  $m/s$  e a velocidade nominal frequentemente maior que 2  $m/s$ , podendo chegar a valores superiores a 3,5  $m/s$ . A maior parte dos sistemas é de eixo horizontal, de 2 ou 3 pás, com valores de potência elétrica comumente superiores a 0,5 MW e com diâmetros superiores a 15 m. Já as turbinas de eixo vertical não apresentam valores de potência superiores a 0,25 MW.

Devido à aplicação primária em correntes de maré, nota-se que as velocidades

nominais das turbinas projetadas são elevadas, além disso costumam estar fixadas no leito oceânico e demandam sistemas de controle capazes de operar eficientemente em duas direções de fluxo.

Para o contexto de correntes oceânicas, a literatura indica uma tendência na adoção de turbinas de eixo horizontal equipadas com flutuadores [28–30], especialmente projetadas para aproveitar as características direcionais e operar em regiões de maior batimetria.

No relatório técnico sobre metodologia para o projeto de dispositivos de conversão de energia marinha [31], disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, é possível encontrar um modelo de referência de uma turbina hidrocínética projetada para operar na costa sul da Flórida para o aproveitamento energético da Corrente do Golfo. Este dispositivo opera com velocidade de *cut-in* de  $0,5 \text{ m/s}$  e atinge a potência nominal de  $1 \text{ MW}$  na velocidade de  $1,7 \text{ m/s}$ . Além disso, seu rotor possui  $33 \text{ m}$  de diâmetro e um  $c_p$  de  $0,48$ . Composto por 4 rotores, o dispositivo é projetado para funcionar submerso a  $50 \text{ m}$  de profundidade, ancorado ao fundo do mar com estacas de sucção e âncoras de arrasto, esquematizado na Figura 5. As estacas de sucção limitam o movimento vertical, enquanto âncoras de arrasto gerenciam as forças horizontais do fluxo de água. Também são utilizados tanques de flutuabilidade que ajudam a manter a turbina numa posição aproximadamente estacionária na coluna de água.

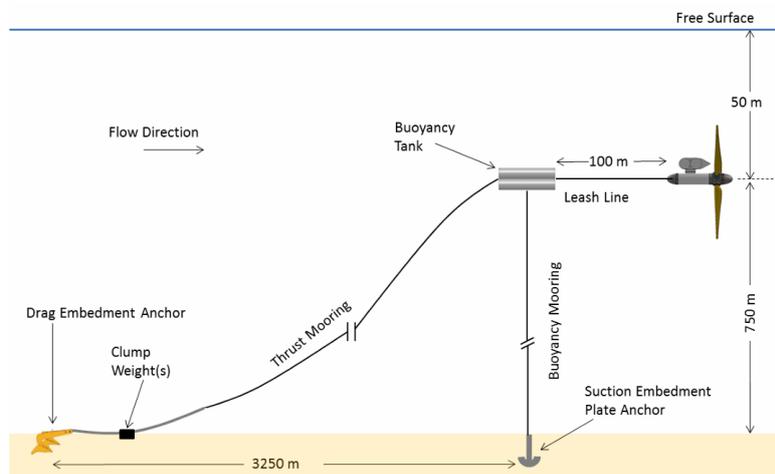


Figura 5: Esquema do sistema de ancoragem da turbina hidrocínética descrita em [31]. Retirado de [31]

No estudo realizado com o apoio da Universidade de Ciências e Tecnologia de Okinawa e pela Universidade de Engenharia de Hiroshima [29], foi proposta uma turbina de corrente oceânica flutuante de rotor único, otimizada para explorar a Corrente de Kuroshio próximo à costa do Japão. Este dispositivo foi projetado para operar a  $100 \text{ m}$  abaixo da superfície (Figura 6 (a)), utilizando um sistema com um flutuador acima e um contrapeso abaixo, garantindo estabilidade no posicionamento

da turbina. A fim de comprovar a viabilidade e eficiência do projeto, foram conduzidos experimentos em dois ambientes distintos: um tanque de testes e no mar. No tanque de testes, avaliou-se um protótipo equipado com um rotor de 1,46 m de diâmetro, com potência nominal de 1 kW. Sob condições controladas, com a velocidade do fluxo variando de 0,7 a 1,2 m/s, o protótipo alcançou uma potência de saída máxima de cerca de 400 W à velocidade de 1,2 m/s, e o  $c_p$  máximo observado foi de 0,43. Para os testes no mar, o protótipo, agora com um rotor de 2 m de diâmetro, foi rebocado por uma embarcação a uma velocidade constante de 1 m/s, mantendo a turbina aproximadamente 2 metros abaixo da superfície (Figura 6 (b)). Nessa configuração, foi verificado a geração de energia, com o dispositivo alcançando também 400 W de potência.

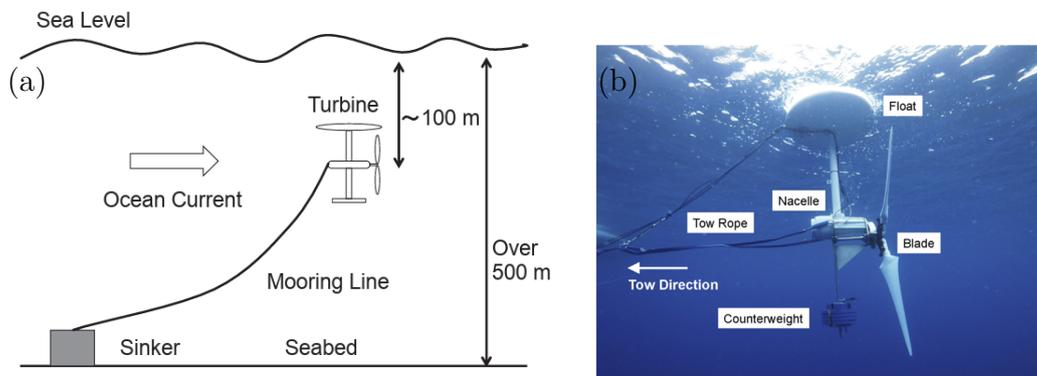


Figura 6: Esquema proposto por [29](a) e protótipo da turbina durante o experimento no mar (b). Retirado de [29].

Ainda visando o aproveitamento da Corrente de Kuroshio, a IHI Corporation em colaboração com a *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO) desenvolveram o dispositivo denominado Kairyu [32]. O sistema é composto por duas turbinas de 50 kW cada, totalizando 100 kW de potência nominal, com rotor de 11 m de diâmetro, projetado para uma velocidade nominal de 1,5 m/s. O dispositivo utiliza 3 cilindros flutuadores, um sistema de ancoragem de linha única e é projetado para operar 50 m abaixo da superfície. Este dispositivo foi testado em uma aplicação real na costa da ilha de Kuchinoshima para simular condições da Corrente de Kuroshio através de um teste de reboque, similar ao que foi descrito anteriormente, porém com a turbina submersa em 30 m (Figura 7). Durante este teste, Kairyu demonstrou a viabilidade do procedimento de instalação e uma produção de energia de 70 a 90 kW em uma velocidade de fluxo de 1,5 m/s e com velocidade de *cut-in* de 0,7 m/s, evidenciando o potencial da turbina para aplicações comerciais futuras [30].

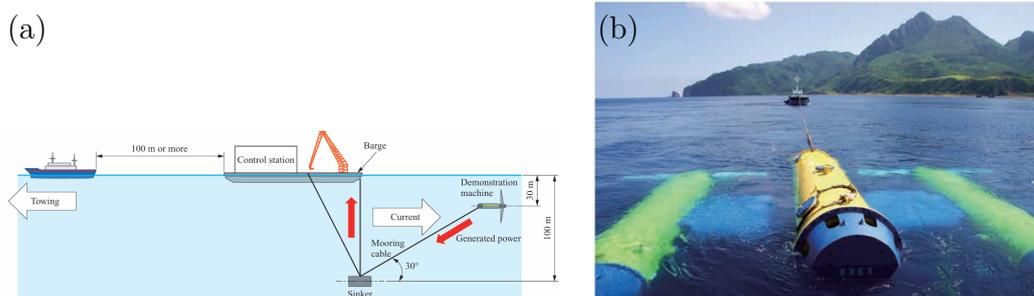


Figura 7: Esquema do teste da turbina Kairyu(a) e foto da turbina no mar (b). Retirado de [32].

Além do uso de turbinas hidrocinéticas de eixo horizontal e flutuadores, há também a escolha do sistema transmissão de potência (torque) e geração. Comumente, recorre-se ao uso de caixas de engrenagens para transmitir a potência mecânica ao gerador, o que contribui para a redução do peso do equipamento [33]. Isso se deve ao fato de que aumentar a velocidade de rotação permite a utilização de geradores fisicamente menores e, por consequência, mais leves. Esta redução de peso é particularmente benéfica em sistemas que incluem flutuadores [33]. Embora haja a possibilidade de empregar geradores síncronos ou assíncronos, os sistemas de conversão de correntes oceânicas mencionados anteriormente fazem uso de geradores síncronos de ímã permanente (PMSG, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Adicionalmente, para projetos que visam a integração com a rede elétrica, antecipa-se a implementação de conversores de energia, essenciais para atender as características da rede, incluindo tensão, frequência e fase [27]. Para ilustrar, a Figura 8 apresenta a configuração normalmente adotada nos projetos direcionados à extração de energia das correntes oceânicas.

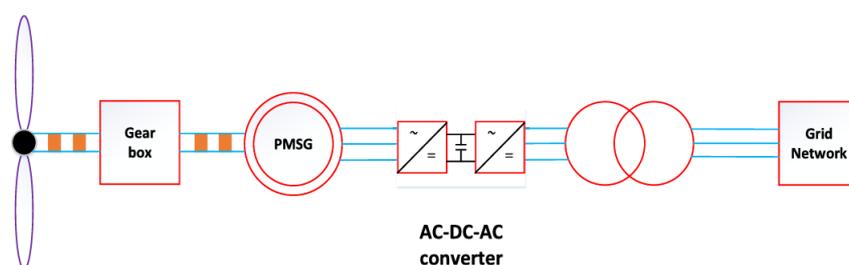


Figura 8: Esquema normalmente adotado em sistemas de conversão de energia de correntes oceânicas. Retirado de [27]

# Capítulo 3

## Materiais e métodos

As correntes oceânicas são reservatórios de energia cinética com o potencial de serem transformadas em energia elétrica por meio de turbinas hidrocínéticas. No entanto, a viabilidade dessa fonte de energia pode sofrer alterações devido aos impactos das mudanças climáticas. Tais mudanças podem ter efeitos variados, incluindo o fortalecimento ou enfraquecimento das correntes, aumento na variabilidade da disponibilidade energética ou até mesmo a alteração geográfica das áreas viáveis para a extração de energia. É essencial entender a distribuição atual da densidade de potência e antecipar possíveis mudanças climáticas que possam impactar a energia disponível pelas correntes oceânicas.

Nesse contexto, para a avaliação do potencial energético de correntes oceânicas no Brasil, foram utilizados os resultados do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM - *Brazilian Earth System Model*). Inicialmente será analisada a energia cinética das correntes oceânicas superficiais que se encontram dentro da Zona Econômica Exclusiva do Brasil (ZEE) e após encontradas as regiões com maior potencial para exploração de energia será aplicada a modelagem numérica computacional para o *downscaling* dos resultados hidrodinâmicos e a obtenção de valores de correntes com maior resolução espacial e temporal.

Com o intuito de avaliar os efeitos das mudanças climáticas para a produção hidrocínética no oceano, a simulação deve representar as condições atuais de clima e a condição futura, neste caso baseada no cenário RCP4.5 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (IPCC).

A seguir, será apresentado o modelo BESM, a metodologia utilizada para análise da energia cinética das correntes oceânicas e escolha das regiões para *downscaling* e o período de simulação hidrodinâmica. Também será descrito a metodologia a ser aplicada para a obtenção dos resultados com alta resolução.

## 3.1 BESM

O BESM é um modelo de sistema terrestre, ou seja, representa de forma acoplada, dentre outros, os processos entre oceano e atmosfera. O modelo tem como objetivo produzir projeções baseadas em cenários que possam auxiliar na investigação dos efeitos das mudanças climáticas e seus impactos na sociedade [34].

Este modelo de alta complexidade é resultado de uma iniciativa nacional liderada por cientistas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O código fonte e os dados gerados pelo BESM estão disponíveis de forma gratuita para toda comunidade acadêmica.

Os resultados utilizados neste trabalho se baseiam na versão BESM-OA2.5 (*Brazilian Earth System Model Ocean Atmosphere version 2.5*), que utiliza o BAM (*Brazilian Atmospheric Model*; [35]) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) como modelo atmosférico de circulação global, o MOM4p1 (*Modular Ocean Model version 4p1*; [36]) do GFDL (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) como modelo oceânico e o FMS (*Flexible Modeling System*; [36]) do GFDL como acoplador.

O BESM-OA2.5 é a evolução do BESM-OA2.3 descrito por [34]. A principal diferença entre o BESM-OA2.5 e sua versão anterior está no módulo atmosférico, que utiliza parametrizações mais simples dos fenômenos físicos acarretando em custos operacionais menores [37]. Também apresenta melhorias no balanço de energia no topo da atmosfera [37], isto significa que o modelo aperfeiçoou sua capacidade de representar o sistema de troca de energia em forma de radiação, entre a Terra e a atmosfera, que está diretamente relacionada com a temperatura média global, um resultado importante calculado por modelos climáticos. Outros avanços foram apontados por [37], como a melhor representação do vento, umidade e temperatura na camada de superfície, além de melhorias nos processos microfísicos (nuvens).

O módulo oceânico contém a principal variável para o estudo que se refere aos valores das componentes horizontais de velocidade das correntes. Este módulo utiliza uma grade tridimensional com resolução horizontal de  $1^\circ$  na longitude e na latitude possui  $1/4^\circ$  entre  $10^\circ\text{S}$  e  $10^\circ\text{N}$ , variando gradualmente até  $1^\circ$  de resolução entre  $10^\circ$  e  $45^\circ$  e depois até  $2^\circ$  de resolução entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , em ambos hemisférios. Na vertical possui 50 camadas, tendo 10m de resolução nas camadas superficiais variando até aproximadamente 370m de resolução nas camadas mais profundas.

### 3.1.1 Experimentos

Os experimentos realizados com o BESM-OA2.5 seguem o protocolo CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project 5th Phase*) que tem por objetivo fornecer

uma estrutura para a realização dos experimentos, permitindo assim avaliar a capacidade dos modelos em representar o clima passado recente, prover projeções do clima futuro em escalas de tempo distintas e entender os mecanismos responsáveis pelas diferenças nas projeções futuras [38].

Os experimentos podem ser repetidos pelo mesmo modelo mudando algumas configurações da simulação. Por esta razão os experimentos são separados por *ensembles*, facilitando a identificação de como foram realizados (por exemplo, 'r2i1p1'). Basicamente, três configurações distinguem as rodadas, são elas: condições iniciais (r), método de inicialização (i) e física do modelo (p) [39].

Brevemente, serão explicadas as principais características de cada experimento CMIP5 [38] simulados no BESM-OA2.5, disponibilizados pelo INPE.

- ***piControl***- simula condições referentes ao período pré-industrial, com concentração constante de  $CO_2$  na atmosfera e o uso de terra<sup>1</sup> é inalterado. Este serve como base para o experimento histórico e *abrupt 4 × CO<sub>2</sub>*.
- **Histórico**- simula o clima para o período de 1850 a, no mínimo, 2005. Os dados de concentração de  $CO_2$  na atmosfera não são constantes mas sim baseado em observações fornecida pelo AR5 (*Assessment Report 5*) do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e considera o uso da terra. Desse modo este experimento é utilizado para representar o clima passado/presente e é utilizado como condição inicial para cenários futuros.
- **RCP4.5**- simula um cenário futuro correspondente ao período de 2006 a, no mínimo, 2100. A concentração dos gases de efeito estufa variam com o tempo de acordo com a trajetória representativa de concentração RCP4.5 (*Representative Concentration Pathway 4.5*), este forçante radioativo atmosférico atinge  $4,5 Wm^{-2}$  em 2100.
- **RCP8.5**- de forma similar ao experimento RCP4.5, porém baseado no cenário RCP8.5 que atinge  $8,5 Wm^{-2}$  em 2100.
- ***Abrupt 4 × CO<sub>2</sub>***- simula um cenário em que a quantidade de  $CO_2$  é quadruplicada em relação ao experimento *piControl*. Este experimento é utilizado para avaliar a sensibilidade climática do modelo.

Todavia, os artigos relacionados aos experimentos realizados com BESM [34, 40, 41] relatam que antes dos experimentos CMIP5 é realizado o *spin-up*<sup>2</sup> do modelo

---

<sup>1</sup>O uso de terra relaciona-se com o valor de albedo, que é a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente. Por exemplo, em casos de desflorestamento, menor é a energia absorvida, aumentando o valor de albedo nessa região.

<sup>2</sup>O *spin-up* é o tempo de simulação necessário para alcançar o equilíbrio dinâmico das equações do modelo mediante os forçantes.

oceânico e acoplado. A princípio, apenas o modelo oceânico é simulado por um período de 71 anos (*spin-up* do modelo oceânico), com o oceano inicialmente em repouso e com campos de salinidade e temperatura de [42]. Deste período, os 13 primeiros anos são forçados por campos atmosféricos climatológicos (vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar, e precipitação) e os 58 anos seguintes forçados por campos atmosféricos de [43] que variam interanualmente, enquanto a descarga de rios e variáveis de gelo foram mantidas em médias mensais climatológicas. Após isso, inicia-se o *spin-up* da modelagem acoplada cujo estado final do oceano e atmosfera é usado como condição inicial para o experimento *piControl*.

Dentre as simulações realizadas com o BESM, serão utilizados, no presente trabalho, os resultados dos experimentos da simulação histórica e RCP4.5. Até o momento apenas um membro de *ensemble* foi disponibilizado, o r1i1p1, que é o utilizado nesse trabalho. Posto isso, o histórico apresenta resultados de 1850 a 2005, utilizando como condição inicial o 14º ano de simulação do *piControl*. O experimento histórico fornecerá os dados para representar as condições atuais do oceano, sendo utilizado apenas o período de 1975 a 2005.

Já o experimento RCP4.5 apresenta projeções para o período entre 2006 e 2105, utilizando como condição inicial o final do período histórico. O RCP4.5 foi escolhido pois representa um cenário futuro de emissões intermediárias que considera políticas para mitigação na emissão de poluentes como a precificação das emissões com consequente aumento de áreas reflorestadas, diferente do RCP8.5, que é um cenário de alta emissão e nenhuma intervenção política visando reduções.

Além dos pontos já citados, o experimento RCP4.5 supõe mudanças no sistema de energia, como a troca de combustíveis por eletricidade, tecnologias de energia com baixa emissão e uso de tecnologias com captura de carbono [44]. Em consequência a isso, é obtido uma produção crescente de eletricidade, maior utilização de energias renováveis e emissões negativas na produção de eletricidade.

### 3.1.2 Áreas de maior potencial hidrocínético

Com o intuito de definir a região de modelagem, foi realizada uma análise preliminar em relação à energia cinética para avaliar quais regiões são mais propensas à geração de energia. A partir das correntes oceânicas extraídas dos resultados dos experimentos histórico e RCP4.5, foi avaliada a energia cinética para a região da ZEE. Como descrito anteriormente, as velocidades estão descritas em 50 níveis de profundidade e não é um interesse inicial avaliar a distribuição de energia ao longo da coluna d'água. Por esta razão será utilizada a velocidade integrada verticalmente ponderada pela profundidade da coluna d'água para o cálculo da energia cinética, equação 3.1. Desta forma, facilita-se a análise com geração de mapas e séries tem-

porais que abrangem toda região de estudo, pois diminui uma dimensão espacial.

$$\bar{v}(x, y) = \frac{\int_0^{h(x,y)} \vec{v}(x, y, z) dz}{h(x, y)} \quad (3.1)$$

Sendo  $v$  a velocidade,  $x$  e  $y$  as coordenadas horizontais,  $z$  a coordenada vertical e  $h$  é a profundidade de fundo. Considerando a energia cinética conforme a equação 3.2, visando desconsiderar a densidade foi calculada a energia cinética dividida pela densidade conforme a equação 3.3.

$$E_c = \frac{m|v|^2}{2} \quad (3.2)$$

$$\frac{E_c}{\rho} = \frac{V|v|^2}{2} \quad (3.3)$$

A Figura9 (a) mostra a média de energia cinética para o período de 1975 a 2005, referentes ao experimento histórico do BESM. Já a Figura9 (b) mostra a diferença entre a média para 2075-2105, referentes ao experimento RCP4.5, em relação a média de 1975-2005, possibilitando a comparação quanto ao crescimento ou decaimento de energia na projeção em relação às condições atuais do oceano. É possível notar que a região dentro da ZEE próximo à costa norte do Brasil possui uma grande extensão com elevada energia cinética, contudo a projeção indica uma diminuição da energia para esta região no final do século. Outra região que ganha destaque está próxima da costa sul do Brasil e com menor intensidade na costa sudeste, sendo projetada uma elevação da energia no final do século para grande parte desta região.

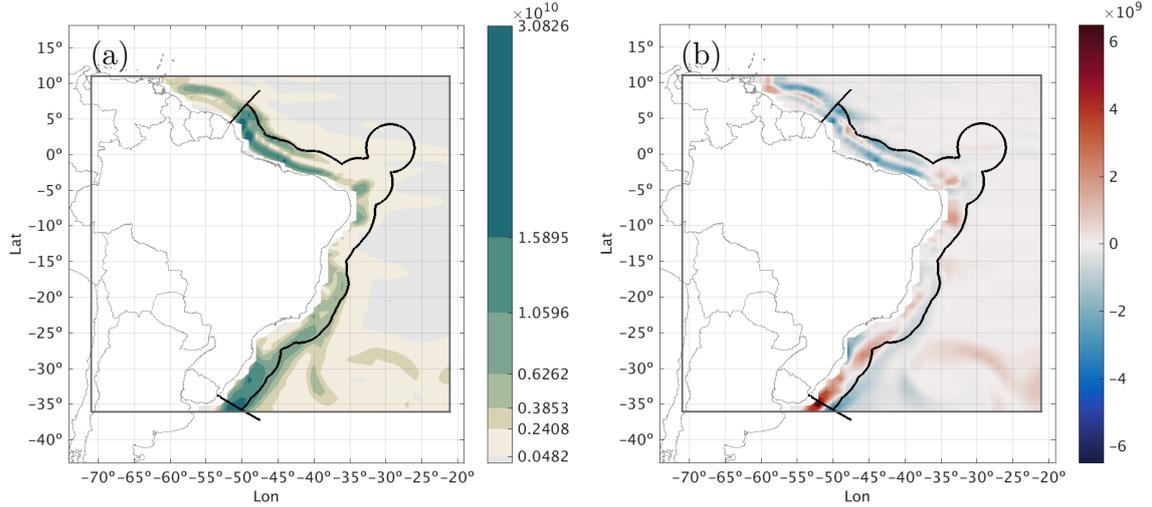


Figura 9: (a) campo médio da energia ( $E_c/\rho$ ) para o período de 1975-2005 em  $J.(kg/m^3)^{-1}$  e em (b) a diferença entre a média do período de 2075-2105 em relação à média de 1975-2005.

Estas regiões de maior energia cinética estão associadas à presença das correntes que contornam a costa brasileira. Estas são originadas a partir da bifurcação da Corrente Sul-Equatorial (CSE) do oceano Atlântico ao se aproximar da costa nordeste brasileira, sendo a Corrente Norte do Brasil (CNB) que segue na direção Noroeste e a Corrente do Brasil (CB) na direção Sul [45, 46]. Sendo assim, foram escolhidas duas áreas para modelagem numérica, uma na região onde se encontra a CNB e outra a CB.

Portanto, para que seja possível particionar a ZEE em regiões com predominância da CB e CNB é preciso conhecer o ponto de origem das correntes. No trabalho realizado em [47], foram gerados campos de fluxo de correntes geostróficas calculadas para os 500 m superiores a partir de dados observacionais coletados, em sua maioria, ao longo de 1925-1927 e 1959-1983. Foi observado que, próximo à costa, a CSE se divide em BC e NBC em  $10^\circ S$ , contudo um pouco mais afastado da costa, mas ainda dentro da ZEE, aproximadamente  $14^\circ S$  e  $35^\circ W$ , é possível observar que o ramo sul da SEC possui direção norte e contribui para formação da CNB. Já em [48], com base nas correntes geostróficas calculadas para os 1000 m superiores a partir de dados observacionais coletados ao longo de 1986, verificam a origem da CNB ao sul de  $10,5^\circ S$ . Entretanto, na literatura recente, constata-se a variabilidade sazonal da bifurcação, dessa forma é obtida uma melhor descrição da origem de ambas correntes ao longo do tempo.

Verificaram em [45] através do uso da modelagem numérica, utilizando médias climatológicas mensais como condição de contorno, que a bifurcação ocorre entre  $10^\circ - 14^\circ S$ . Já [15] realizaram a modelagem numérica utilizando modelos climáticos como condição de contorno. De acordo com os autores, para o período de 1995 a 2005, na média, a bifurcação ocorreu em  $13,22^\circ S$  e para a projeção de 2090 a 2100,

baseada no cenário RCP4.5, ocorreu em  $10, 90^{\circ}S$  e para ambos períodos a localização variou aproximadamente entre  $5^{\circ}$  e  $15^{\circ}S$ .

Dessa forma, foi escolhida a região entre  $5^{\circ}$  e  $15^{\circ}S$  como região onde ocorre a bifurcação, que de acordo com a Figura 9 (a) é uma região de menor relevância devido à baixa energia cinética comparada com as demais regiões da ZEE. A Figura 10 mostra as células da grade numérica do BESM que dividem a ZEE em regiões com predominância da CNB e CB, que serão utilizadas nas análises a seguir.

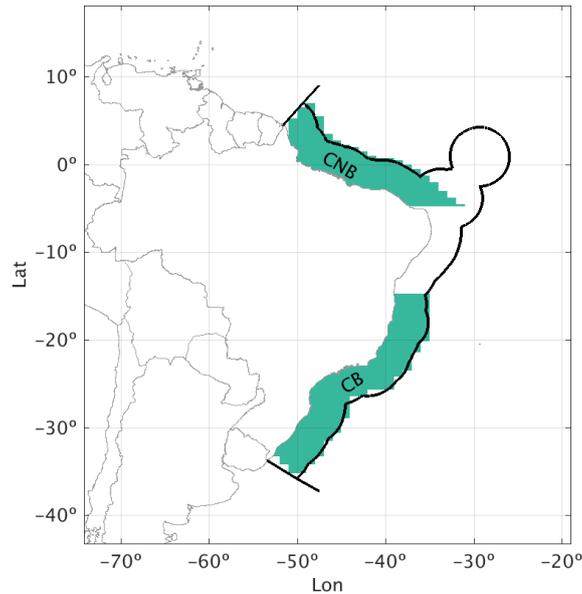


Figura 10: Divisão da ZEE em regiões com predominância da CNB e CB em verde, com base na grade numérica do BESM.

Na Figura 11 é possível verificar que a série de energia cinética por unidade massa para CNB possui valores superiores quando comparados com a CB. Isto já era previsto, já que grande parte do fluxo da CSE contribui para a formação da CNB enquanto uma pequena parte forma a CB [47]. Entretanto, projeta-se uma diminuição da energia cinética média da CNB de aproximadamente 8.5% para os 30 anos finais e um aumento de 1.5% para CB 11, corroborando com a análise inicial apresentada na Figura 9.

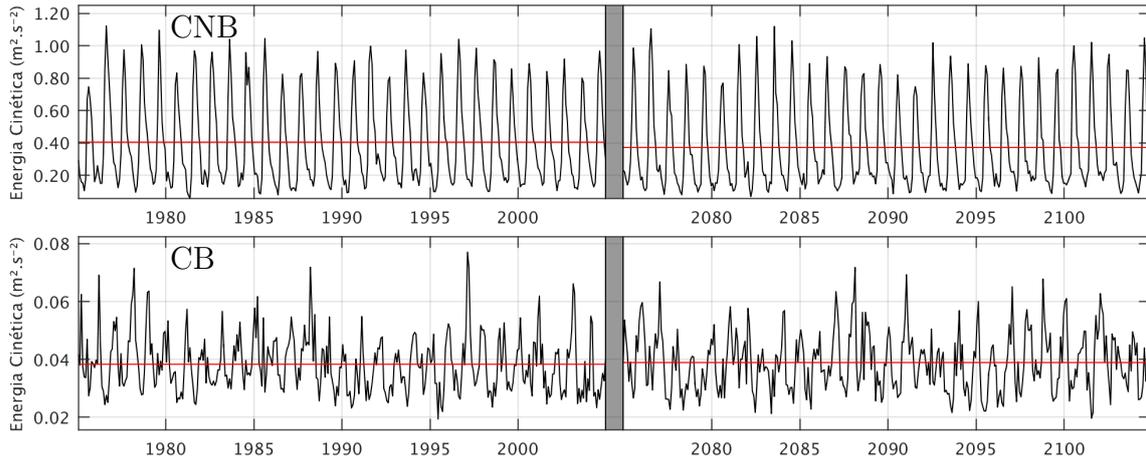


Figura 11: Série temporal de energia cinética por unidade de massa (preto) e a média correspondente a 30 anos (vermelho) para as regiões da CNB (superior) e CB (inferior). A área cinza indica que a série para o intervalo de 2006 a 2074 foi suprimida.

### 3.1.3 Período de modelagem

Para escolha do período de modelagem, foi estudada a série de energia cinética de 1975-2105 e para isso foi utilizada a transformada em ondaleta. Esta ferramenta é indicada para análise de séries não estacionárias [49], como as relacionadas aos fenômenos climáticos [50]. Com a ondaleta é possível estudar não somente a distribuição de frequência da série, como na transformada de Fourier, mas também sua distribuição temporal [49]. Deste modo é possível identificar quais frequências transportam maior quantidade de energia significativa e quando isso ocorre no tempo [51].

Na Figura 12 encontra-se o espectro de potência e o espectro global para a série de energia cinética para a região da CNB. No espectro de potência da ondaleta identifica-se que o período de 1 ano, para todo o tempo analisado, encontra-se dentro da faixa de significância maior que 95% e, com menor regularidade e potência, o período referente a 6 meses. A mesma conclusão é obtida através do espectro global.

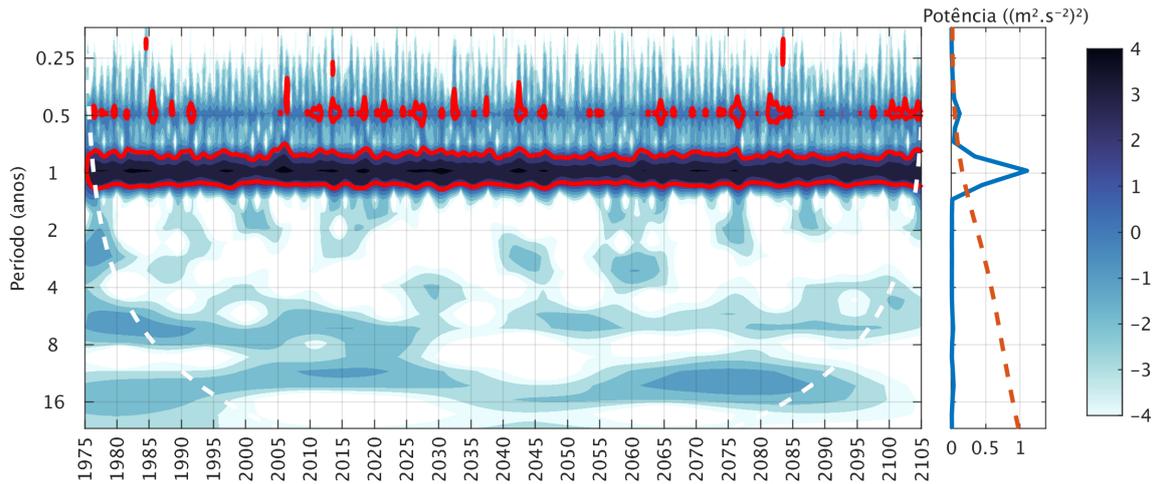


Figura 12: Espectro de potência da ondaleta (esquerda) para série de energia cinética, com destaque em linha sólida vermelha para regiões com significância maior que 95% e cone de influência em linha tracejada branca, para série de energia cinética da região CNB normalizada pelo desvio padrão. E espectro de potência global (direita) em linha sólida azul e significância de 95% em linha tracejada vermelha.

Na Figura 13 encontra-se o espectro de potência e o espectro global para a série de energia cinética para a região da BC. No espectro de potência da ondaleta identifica-se que o período de 1 ano corresponde à faixa de maior intensidade dentro da significância maior que 95%, porém com intervalos referente aos períodos 2026-2028, 2041-2044 e 2092-2093. Apesar da maior irregularidade e menor potência, os períodos entre 2 e 6 meses também se destacam, no entanto, analisando o espectro global, apenas para o período de 1 ano a potência mostra-se significativa.

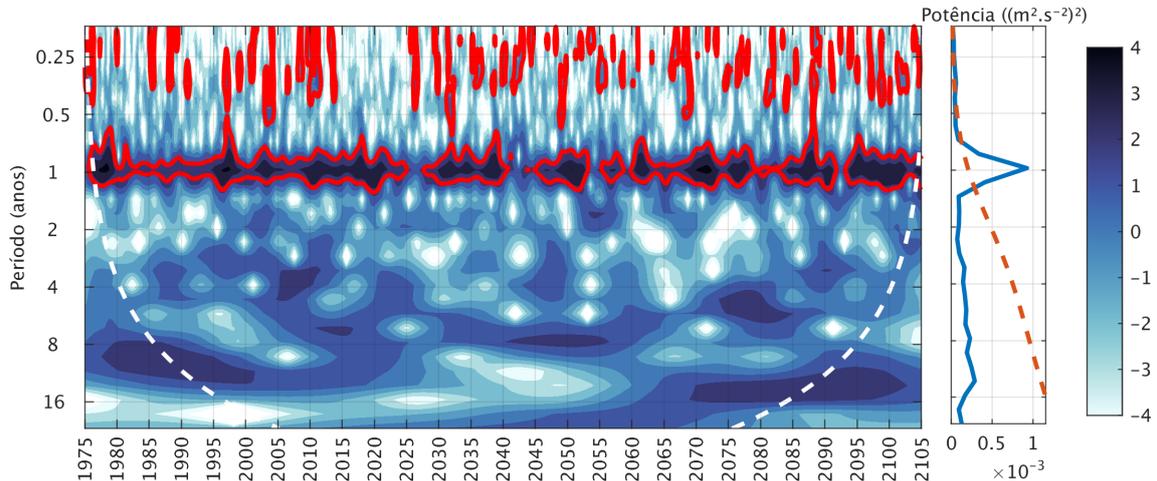


Figura 13: Espectro de potência da ondaleta (esquerda) para série de energia cinética, com destaque em linha sólida vermelha para regiões com significância maior que 95% e cone de influência em linha tracejada branca, para série de energia cinética da região BC normalizada pelo desvio padrão. E espectro de potência global (direita) em linha sólida azul e significância de 95% em linha tracejada vermelha.

De forma geral, a transformada em ondaleta para ambas regiões revela que não há períodos maiores que 1 ano com energia significativa. Considerando os custos

computacionais de fazer uma simulação para períodos maiores e considerando que variações de maiores períodos podem ser capturadas em um período climatológico de 30 anos, apenas um ano foi simulado representando cada experimento. Optou-se por calcular um ano climatológico com base nos resultados de média mensal do BESM e verificar qual ano representa melhor o clima atual e futuro.

Para tal fim, foi calculado um ano climatológico de referência a partir da média mensal da série de energia cinética para as regiões da CNB e CB, para o período de 1975-2005 e outro para 2075-2105. A partir disso, foi escolhido o ano que melhor se ajusta ao ano de referência utilizando como parâmetros a correlação (Equação 3.4) e o erro quadrático médio (Equação 3.5) entre a série do ano climatológico de referência e as séries anuais.

$$corr(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \cdot \left( \frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (3.4)$$

$$EQM(A, B) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2 \quad (3.5)$$

Onde,  $corr$  é o coeficiente de correlação de Pearson,  $EQM$  é o erro quadrático médio,  $A$  e  $B$  são as séries temporais,  $N$  é a quantidade de dados que compõe as séries,  $\mu_A$  e  $\mu_B$  é a média para série  $A$  e  $B$ , enquanto  $\sigma_A$  e  $\sigma_B$  é o desvio padrão para série  $A$  e  $B$ . Para os cálculos realizados, pode-se assumir que  $A$  é a série mensal de energia para o ano climatológico de referência para região da CNB (CB), enquanto  $B$  é a série mensal de energia para cada ano para região da CNB (CB).

Os anos que não possuem forte correlação (abaixo de 0.7 [52]) com o ano climático de referência foram descartados e foi escolhido o que possui menor erro quadrático médio dentre os restantes. Como a análise deve considerar ambas regiões e já estas possuem grande diferença no valor da energia, os erros foram normalizados pelo valor máximo, conforme mostra a Equação 3.6.

$$EQM_T = \frac{EQM_{CNB}}{\max(EQM_{CNB})} + \frac{EQM_{CB}}{\max(EQM_{CB})} \quad (3.6)$$

Onde  $EQM_{CNB}$ ,  $EQM_{CB}$  é o erro quadrático médio anual para região CNB e CB, já  $EQM_T$  corresponde ao erro quadrático médio total.

Por fim, os anos escolhidos para modelagem foram 1993 e 2085. As Figuras 14 e 15 apresentam as séries de energia cinética para o ano climatológico de referência e os anos escolhidos para modelagem. Em ambos anos escolhidos, percebe-se uma maior concordância para a série da região CNB do que para CB. Isso é explicado pela análise da ondaleta feita anteriormente, onde para a CB existe uma potência significativa para períodos menores que 1 ano, faixa de 2 a 6 meses, tornando a série

mais ruidosa. A Tabela 1 mostra um resumo dos indicadores estatísticos utilizados para a escolha dos anos de modelagem e mostra que ambos indicadores para os anos escolhidos são melhores em relação à média.

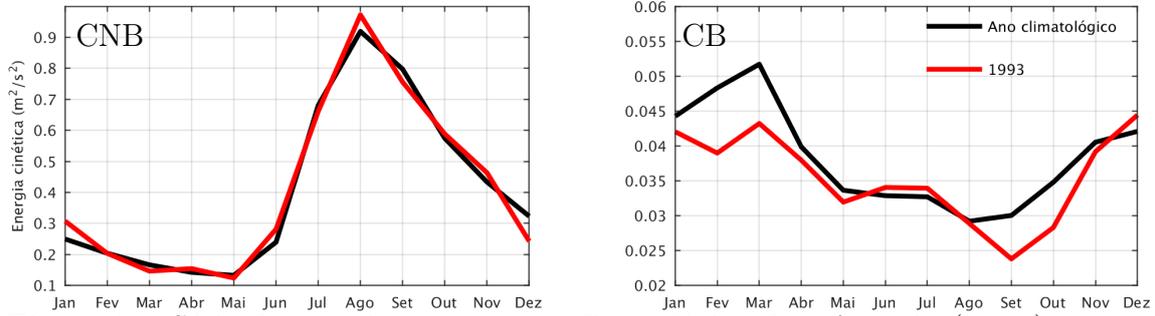


Figura 14: Série de energia para o ano climatológico de referência (preto) e para 1993 (vermelho).

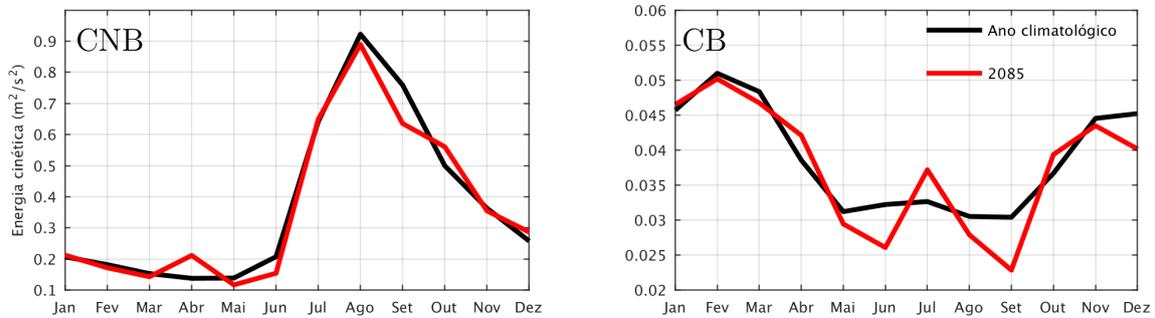


Figura 15: Série de energia para o ano climatológico de referência (preto) e para 2085 (vermelho).

Tabela 1: Resumo dos indicadores estatísticos, correlação e erro quadrático médio normalizado, para os anos escolhidos para modelagem e as médias dos indicadores em relação as séries anuais.

	<i>corr</i>				EQM			
	Média (1975-2005)	1993	Média (2075-2105)	2085	Média (1975-2005)	1993	Média (2075-2105)	2085
CNB	0,979	0,989	0,981	0,982	0,348	0,111	0,282	0,176
CB	0,778	0,844	0,773	0,911	0,362	0,162	0,305	0,088

Com as áreas e período de modelagem determinados, o próximo passo é apresentar o modelo que foi utilizado na modelagem hidrodinâmica.

## 3.2 Regional Ocean Modelling System - ROMS

O *Regional Ocean Modelling System* (ROMS), desenvolvido pela *Rutgers University* em colaboração com outros centros de pesquisa, é um modelo oceânico de

estado da arte amplamente utilizado pela comunidade científica em diversas aplicações, sejam elas estudos de correntes oceânicas [9, 53–55], gelo marinho [56], estuários [57, 58], energias oceânicas [59–61], dentre outros.

O ROMS foi desenvolvido principalmente para aplicações regionais, nas quais se faz necessário o uso de condições de contorno laterais [62], como realizado neste trabalho. É um modelo de superfície livre que soluciona equações primitivas de movimento aplicadas em um sistema de coordenadas horizontais curvilíneas e de coordenada vertical generalizada que acompanha o terreno [63].

A solução das equações hidrodinâmicas resolvidas pelo ROMS é realizada pelo método de diferenças finitas. De forma geral, as equações tridimensionais de Navier-Stokes com médias de Reynolds são resolvidas com aproximação hidrostática e de Boussinesq [63]. As equações são acopladas para resolver as variáveis prognósticas do modelo para os respectivos pontos na grade numérica, as principais são: componentes horizontais da velocidade, elevação da superfície livre, além das propriedades da água do mar, como temperatura e salinidade [53].

Diante do exposto, a abrangente aplicabilidade do modelo oceânico ROMS, que inclui desde investigações científicas até implementações práticas em engenharia, atesta a sua capacidade de equilibrar com eficácia a precisão numérica, mesmo com as simplificações e parametrizações adotadas, com o esforço computacional. Portanto, a adoção do ROMS para este estudo se justifica plenamente, dada sua robustez e confiabilidade na simulação da complexa dinâmica oceânica.

### 3.2.1 Formulação do modelo

A seguir são apresentadas as equações governantes do modelo na forma Cartesiana. As equações 3.7 e 3.8 representam o balanço da quantidade de movimento em  $x$  e  $y$ , e 3.9 em  $z$ . Estas consideram a aproximação de Boussinesq, que desconsidera as variações de densidade exceto na contribuição do empuxo na equação de movimento vertical (Equação 3.9), e a aproximação hidrostática, que impõe equilíbrio do gradiente de pressão vertical pelo empuxo. Já 3.10 é a equação de continuidade para um fluido incompressível e 3.11 é a equação de advecção e difusão, que determina o transporte dos escalares como temperatura e salinidade [64].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{u'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v - fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (3.9)$$

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{C'w'} - \nu_\theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_C + D_C \quad (3.11)$$

Onde,  $u, v, w$  são os componentes da velocidade ( $\vec{v}$ ) nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente;  $t$  é o tempo;  $f$  é o parâmetro de Coriolis;  $F_u$ ,  $F_v$  e  $F_C$  são os forçantes;  $D_u$ ,  $D_v$  e  $D_C$  são os termos difusivos horizontais;  $\nu$  e  $\nu_\theta$  são viscosidade e difusividade molecular;  $\rho_0 + \rho$  é a densidade total local;  $\phi$  é a pressão dinâmica  $P/\rho_0$ , sendo  $P$  a pressão total ( $P \approx -\rho_0 g z$ ) e  $C$  é o escalar. Nas equações, a barra superior indica média no tempo e o apóstrofo indica uma flutuação sobre a média, refletindo as variações associadas à turbulência.

Essas equações são fechadas pela parametrização dos termos relacionados ao escoamento turbulento, conforme a Equação 3.12.

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad \overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial v}{\partial z} \quad \overline{C'w'} = -K_C \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.12)$$

Onde,  $K_M$  e  $K_C$  são, respectivamente, a viscosidade e difusividade turbulenta vertical.

No interior do grade numérica, este sistema de equações é resolvido pelo método de diferenças finitas, no entanto, nos pontos de grade localizados nas interfaces laterais e verticais, a imposição de condições de contorno é necessária. Na vertical, a condição de contorno é aplicada para a camada de superfície e para o fundo, como mostram as equações a seguir [64, 65].

Para a superfície ( $z = \zeta(x, y, t)$ ):

$$K_m \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_s^x(x, y, t) \quad (3.13)$$

$$K_m \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_s^y(x, y, t) \quad (3.14)$$

$$K_C \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_T}{\rho_o c_P} \quad (3.15)$$

$$K_C \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{e - p}{\rho_o} \quad (3.16)$$

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3.17)$$

Para o fundo ( $z = -h(x, y)$ ):

$$K_m \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_b^x(x, y, t) \quad (3.18)$$

$$K_m \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_b^y(x, y, t) \quad (3.19)$$

$$K_C \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.20)$$

$$K_C \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (3.21)$$

$$-w + \vec{v} \cdot \nabla h = 0 \quad (3.22)$$

Onde,  $\tau_s^x$  e  $\tau_s^y(x, y, t)$  são as tensões de cisalhamento do vento na direção x e y;  $T$  e  $S$ , temperatura e salinidade;  $Q_T$  é o fluxo de calor;  $c_P$  é capacidade térmica da água;  $e$  e  $p$ , a evaporação e precipitação;  $\zeta$ , a elevação da superfície livre e  $\tau_b^x(x, y, t)$  e  $\tau_b^y(x, y, t)$ , a tensão de cisalhamento de fundo.

As condições de contorno na superfície e no fundo são fundamentais para representar os processos de troca entre o oceano e a atmosfera, bem como a interação do oceano com o seu leito. Nas equações 3.13 e 3.14, a viscosidade turbulenta vertical modula o impacto da tensão de cisalhamento do vento, influenciando o perfil de velocidade imediatamente abaixo da interface ar-mar. A temperatura de superfície é afetada pelo fluxo de calor entre a atmosfera e oceano e é representado pela equação 3.15, onde  $Q_T$  é calculado utilizando a radiação de onda longa e de onda curta, e o calor latente e sensível [66, 67]. Já a salinidade é afetada pelo balanço entre evaporação e precipitação (Equação 3.16). A Equação 3.18 assegura que qualquer variação temporal na elevação na superfície do oceano seja compensada pelo movimento vertical da água, refletindo um equilíbrio entre as forças que agem na coluna d'água.

No fundo do oceano, as tensões de cisalhamento oferecem resistência ao movimento da água e estão incluídas nas equações 3.18 e 3.19. A suposição de isolamento térmico e salino, equações 3.20 e 3.21 respectivamente, estabelece que não há troca

significativa de calor ou sal com o fundo oceânico. Por fim, a equação 3.22 indica que, para um fluido incompressível, a variação de volume na coluna d'água devido às correntes horizontais e à topografia variável do fundo é contrabalançada pela velocidade vertical da água.

As condições de contorno lateral ditam como os forçantes oceânicos externos afetam a solução nos contornos das grades. No ROMS algumas condições estão implementadas e suas descrições serão omitidas no presente trabalho, mas podem ser encontradas em [67, 68]. No capítulo 3.4, são mencionadas as condições de contorno utilizadas nos experimentos de *downscaling*.

### 3.2.2 Sistema de coordenadas e discretização espacial

O sistema de coordenadas vertical utilizado pelo ROMS é composto pelas características de dois sistemas de coordenadas, a  $z$  e a  $\sigma$ .

Quando utilizada apenas a coordenada  $z$ , é possível obter uma maior resolução nas camadas superficiais (Figura 16). Entretanto, encontra dificuldades ao representar domínios com grande variação topográfica. Isto ocorre principalmente em áreas costeiras, onde o contorno é representado por uma série de degraus, dificultando a aplicação e resolução das equações hidrodinâmicas nesta região [65].

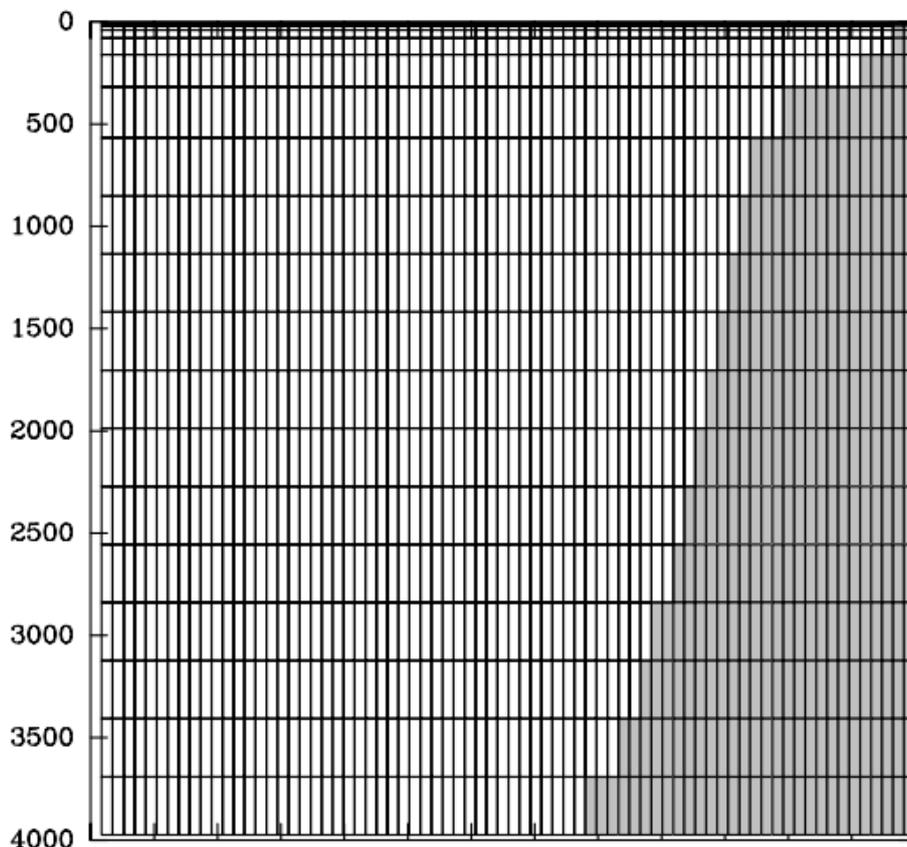


Figura 16: Representação do perfil utilizando coordenada  $z$ , profundidade em metros (Adaptado de [69]).

Já a coordenada  $\sigma$  tem a vantagem de acompanhar a superfície de fundo (Figura 17), isto simplifica o cálculo das equações hidrodinâmicas [65] e aprimora a habilidade em simular as interações entre o fluxo e a batimetria [69]. Por outro lado, neste sistema de coordenada, não é possível manter igualmente a alta resolução nas camadas superficiais independente da profundidade, ou seja, quanto maior a profundidade menor a resolução vertical das camadas superficiais (Figura 18).

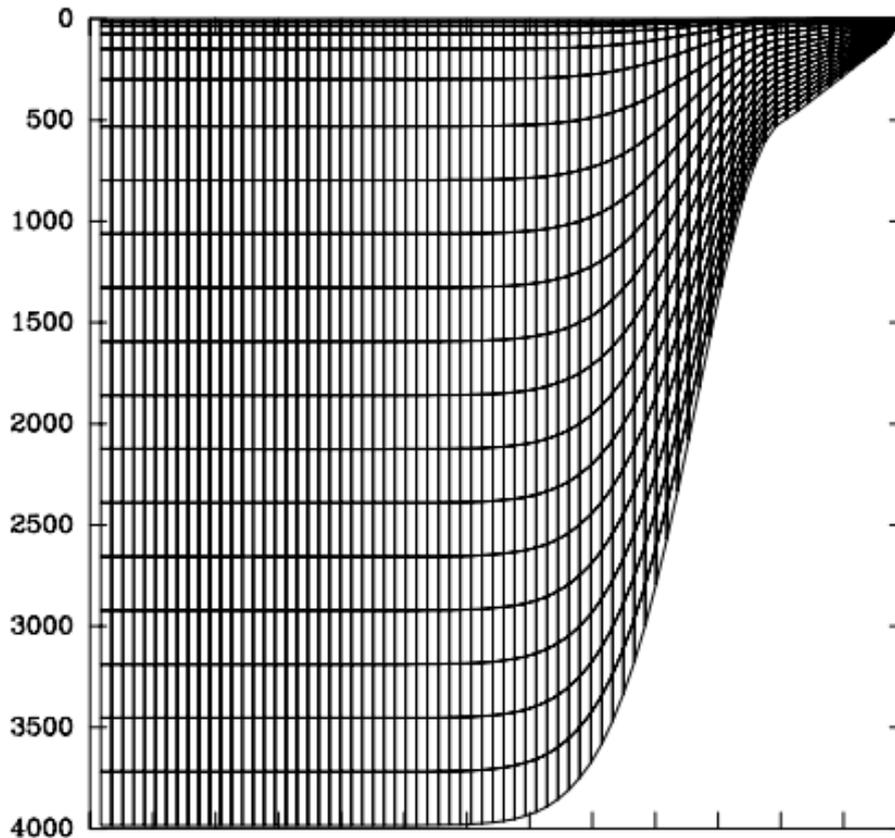


Figura 17: Representação do perfil utilizando coordenada  $\sigma$ , profundidade em metros (Adaptado de [69]).

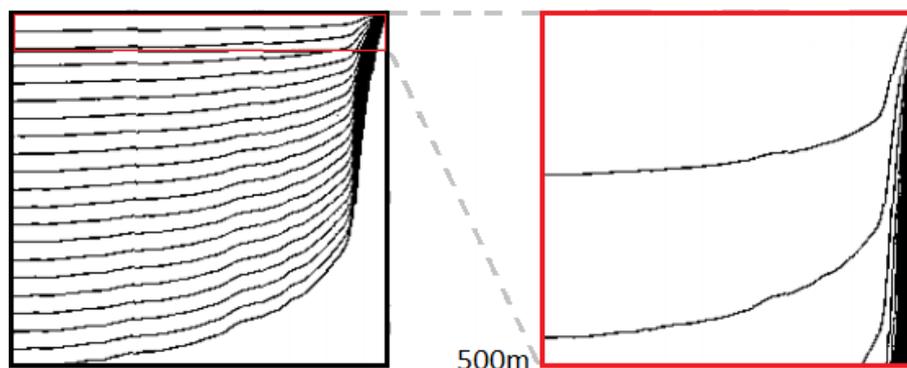


Figura 18: Representação do perfil utilizando coordenada  $\sigma$ , exemplificando a variação na resolução nas camadas superficiais devido a profundidade (Adaptado de [65]).

De maneira a agregar o que há de melhor em ambas coordenadas, o ROMS utiliza

um sistema de coordenadas híbrido S (Figura 19). Assim, as camadas superficiais são mais planas e podem possuir maior resolução (Figura 20), enquanto as camadas próximas ao fundo estão alinhadas ao terreno.

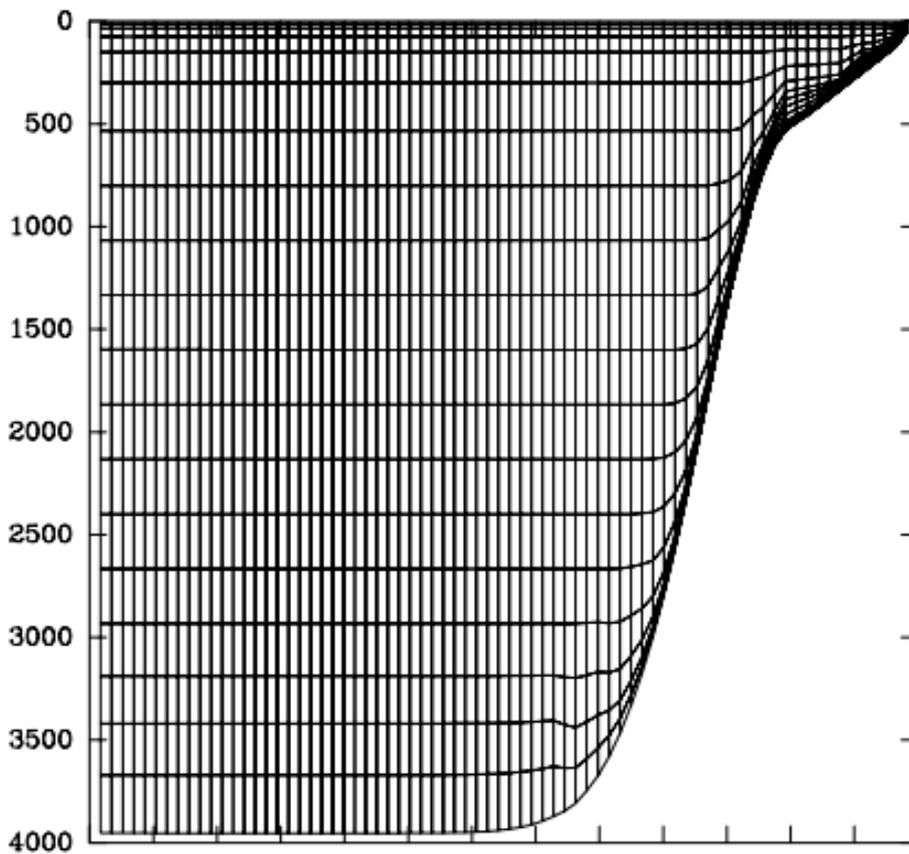


Figura 19: Representação do perfil utilizando coordenada vertical híbrida S (Adaptado de [69]).

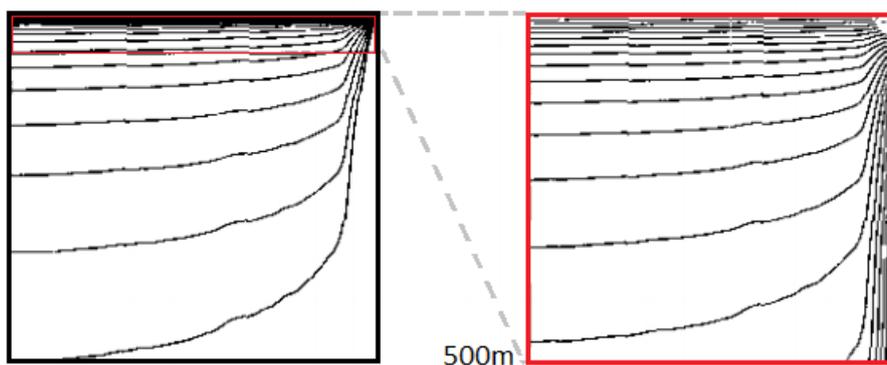


Figura 20: Representação do perfil utilizando coordenada híbrida S, exemplificando a quase planificação e alta resolução das camadas superiores (Adaptado de [65]).

Desta forma, a região de estudo é discretizada verticalmente de forma a representar uma grade onde é aplicada a aproximação por diferenças finitas de segunda ordem. As variáveis são alocadas de tal forma que as componentes de velocidade horizontais ( $u$  e  $v$ ), a densidade local ( $\rho$ ) e traçadores, como temperatura e salini-

dade, são resolvidos no centro da célula, enquanto a velocidade vertical ( $w$ ) na base e no topo das células [64, 67].

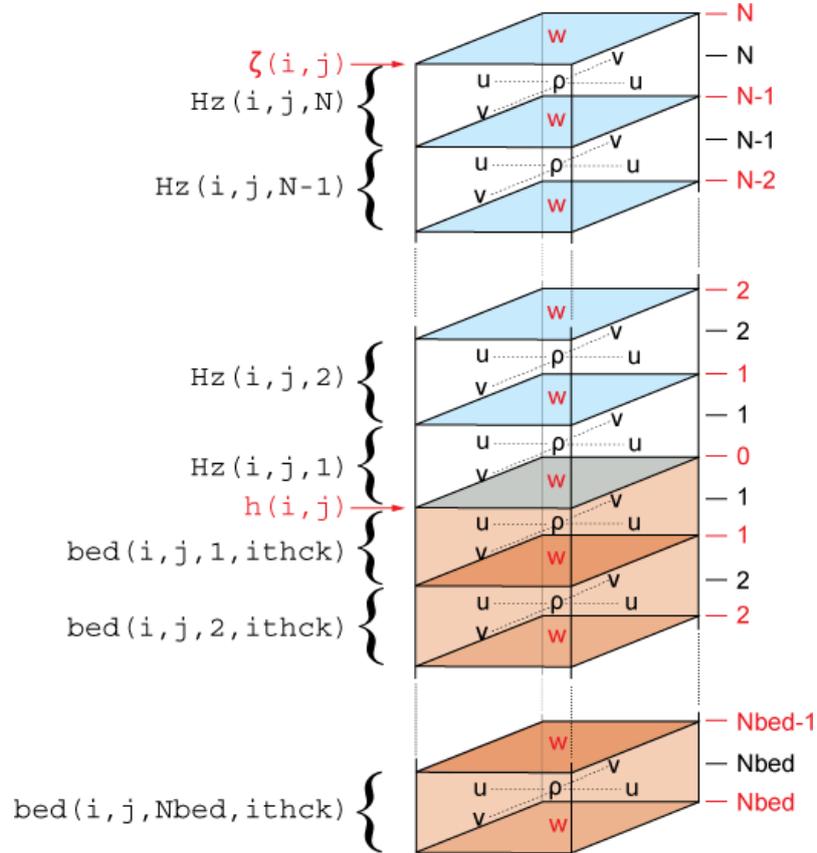


Figura 21: Localização vertical das variáveis na grade do ROMS, as camadas sombreadas em vermelho (*bed*) referem-se a representação de sedimentos que não foram utilizadas neste trabalho (Figura 21) (Retirado de [67]).

Na horizontal, a grade também é discretizada de forma a utilizar diferenças finitas de segunda ordem. As variáveis são alocadas como em uma grade conhecida como C de Arakawa, onde a superfície livre, a densidade e os traçadores estão localizados no centro de cada célula (pontos  $\rho$ ) e as componentes de velocidade horizontal  $u$  e  $v$  estão localizados nos contornos oeste/leste e sul/norte, respectivamente, de cada célula (pontos  $u$  e pontos  $v$ ) (Figura 22) [64, 67].

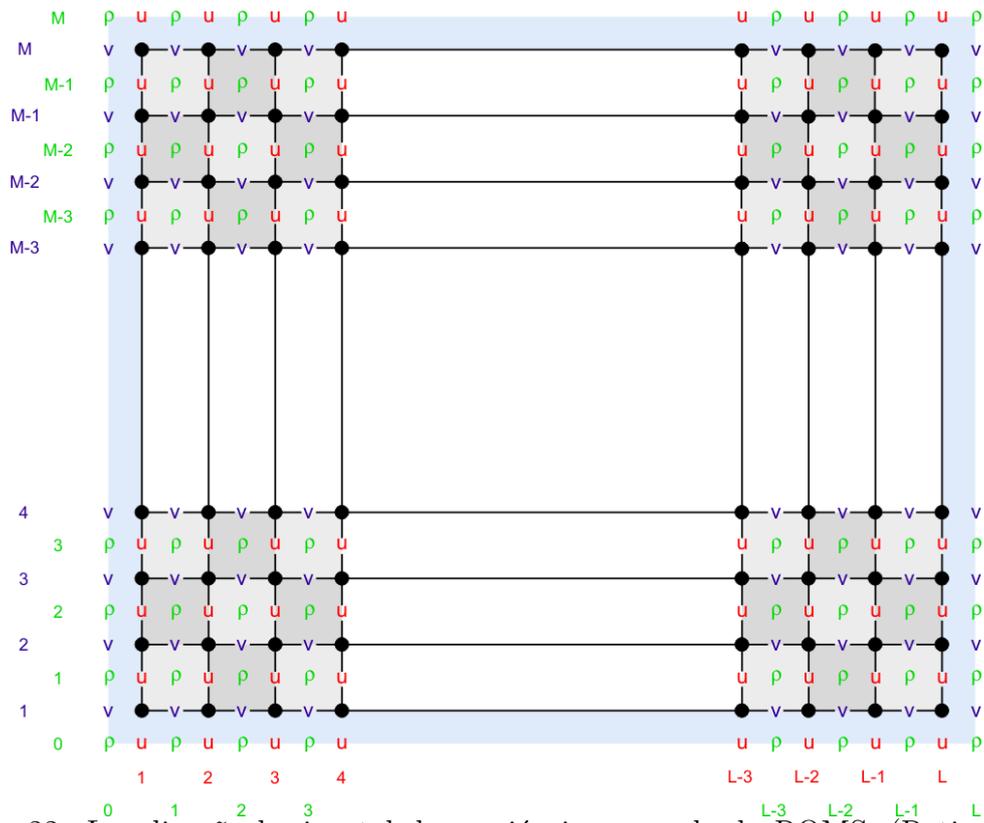


Figura 22: Localização horizontal das variáveis na grade do ROMS. (Retirado de [67]).

### 3.2.3 Aninhamento de grades

O aninhamento de grades permite o estudo mais detalhado de uma região que está inserida em um domínio mais abrangente. Com isso, resultados obtidos para grades menos resolutas são utilizados para modelagem em grades de maior resolução. Este refinamento sucessivo de grades é conhecido como *downscaling*.

No *downscaling* as grades com menor resolução (grade doadora) fornecem informação de contorno para as grades com maior resolução (grade receptora) (Figura 23). Essa troca de informações entre as grades pode ser realizada de forma *offline* ou *online*.

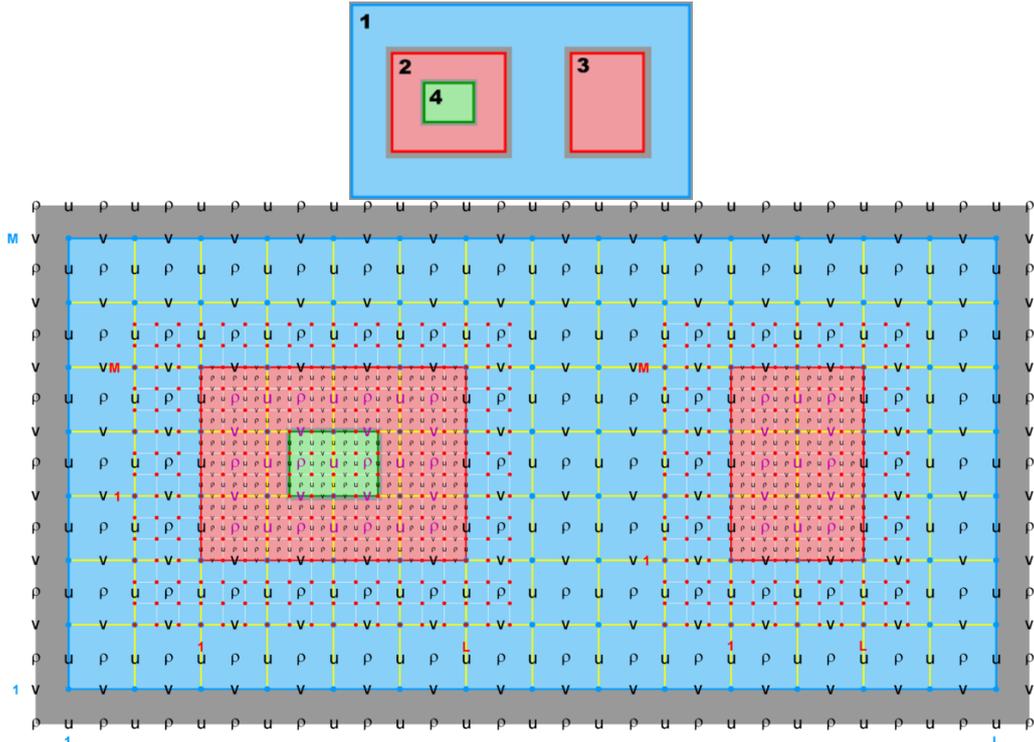


Figura 23: Exemplo de aninhamento de grades. Em azul a grade menor resolução, em vermelho a grade de resolução intermediária e em verde a grade mais resoluta. (Retirado de [67]).

Quando *offline*, a modelagem ocorre de forma independente para cada grade, começando pela de menor resolução e que somente após seu término fornecerá informação, a partir da elaboração de arquivos de contorno, para a grade de menor resolução.

Já no modo *online*, a modelagem ocorre de forma síncrona entre as grades. Deste jeito, não há necessidade de elaborar arquivos de contorno já que as informações são passadas entre as grades durante a simulação, permitindo uma maior frequência de atualização do que no aninhamento *offline* [70]. Contudo, esse esquema de aninhamento requer que as grades aninhadas sigam especificações precisas. Por exemplo, a batimetria da grade aninhada pode ser mais detalhada, mas a batimetria do entorno deve corresponder à da grade doadora para garantir consistência entre as grades. Além disso, a taxa de aumento de resolução das células da grade - geralmente em proporções como 3, 5 ou 7 - deve ser cuidadosamente escolhida para equilibrar resolução e eficiência computacional. Isso assegura que as transições entre as grades sejam suaves e que os processos oceanográficos sejam adequadamente representados em diferentes escalas. Além disso, a configuração dos pontos de contato entre as grades e os pesos de interpolação<sup>3</sup> garantem que as informações fluam corretamente entre as grades durante a simulação [67, 71].

<sup>3</sup>Em modelagem numérica, peso de interpolação é um coeficiente usado para calcular valores em pontos de uma grade numérica baseando-se em valores conhecidos de outra grade.

### 3.3 Grades Numéricas

Para avaliação da produção de energia pelas correntes oceânicas superficiais da costa brasileira, foram desenvolvidas três grades numéricas conforme ilustrado na Figura 24. As delimitações das grades levaram em conta as áreas de maior potencial hidrocínético, respeitando as limitações computacionais, tanto de tempo de simulação quanto de armazenamento dos resultados, e que permitisse o correto funcionamento do esquema de aninhamento *online*. Para a confecção das grades foi utilizada como fonte de dados batimétricos o produto ETOPO1 [72], processados no Easygrid, que é uma rotina computacional desenvolvida em linguagem Matlab (disponível em [73]). Para garantir a precisão das simulações e minimizar erros numéricos devido a variações abruptas na batimetria, foi necessário suavizar a batimetria da grade numérica, como em [9, 74, 75]. Para isso, foi utilizado o filtro de Shapiro [76], integrado ao pacote *GridBuilder v.1.3.3* (disponível em [77]), para suavizar irregularidades mantendo características essenciais da batimetria.

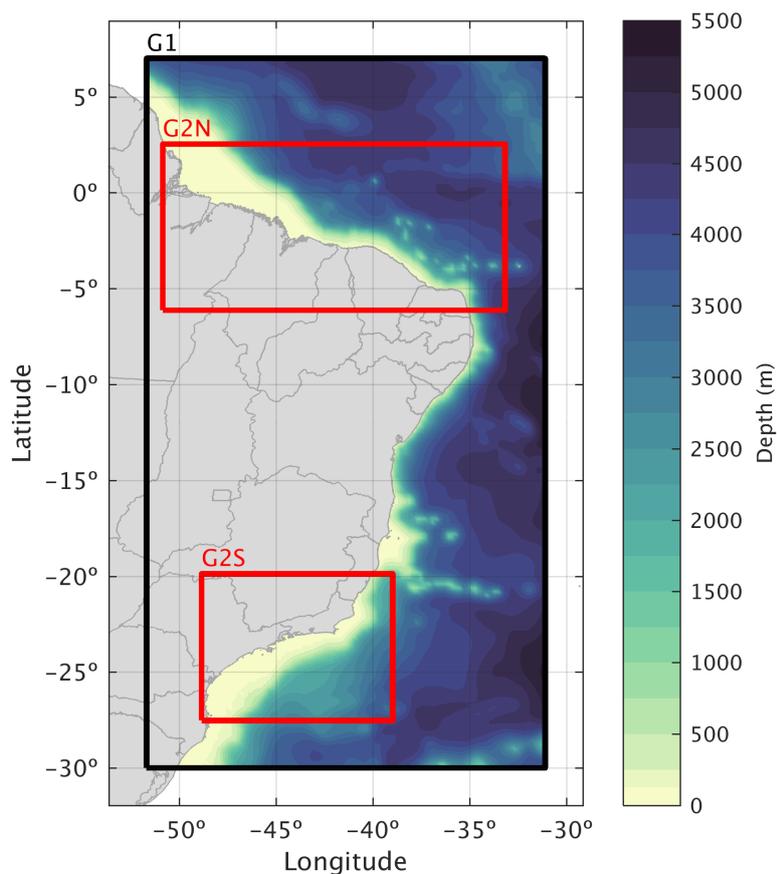


Figura 24: Esquema de aninhamento e batimetria da grade G1.

A grade G1 possui  $1/5^\circ$  de resolução espacial horizontal, ou aproximadamente 22,2 km, e se estende entre as latitudes  $7^\circ\text{N}$  e  $30^\circ\text{S}$ , e longitudes  $51,7^\circ\text{W}$  e  $31,1^\circ\text{W}$

. Sua área cobre grande parte da costa brasileira, permitindo uma análise conjunta da CB e CNB (24). A escolha da resolução é estratégica, pois mesmo sendo a grade modelada menos resolvida possui aumento de no mínimo 1,25 vezes, podendo ser 5 vezes mais resolvida quando comparada com a grade do modelo oceânico do BESM para a mesma região.

A grade G2N possui  $1/15^\circ$  de resolução, aproximadamente 7,4 km, entre as latitudes  $6,13^\circ S$  e  $2,53^\circ N$ , e entre as longitudes  $50,83^\circ W$  e  $33,17^\circ W$  26. Essa grade cobre grande parte da costa norte e nordeste, próximo ao limite norte do estado do Amapá ao extremo leste do estado do Rio Grande do Norte e resolverá melhor a dinâmica da CNB.

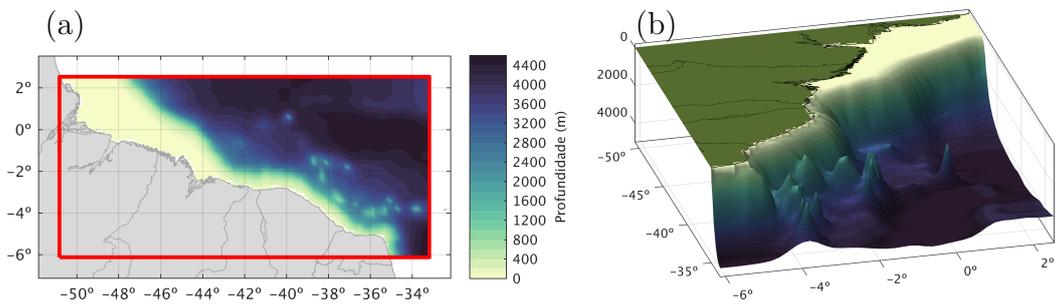


Figura 25: Vista bidimensional (a) e tridimensional (b) da batimetria, em metros, na região da grade G2N.

A grade G2S possui  $1/15^\circ$  de resolução, entre as latitudes  $27,53^\circ S$  e  $19,87^\circ S$ , e entre as longitudes  $48,83^\circ W$  e  $38,97^\circ W$ . Essa grade cobre grande parte da costa sudeste e sul, entre as regiões centrais dos estados de Espírito Santo e Santa Catarina, proporcionando uma análise mais detalhada da CB.

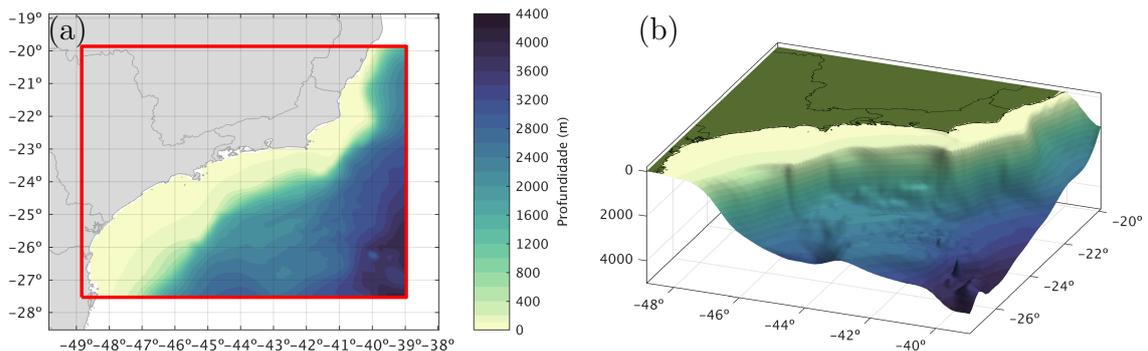


Figura 26: Vista bidimensional (a) e tridimensional (b) da batimetria, em metros, na região da grade G2S.

### 3.4 Modelagem computacional

A modelagem hidrodinâmica foi realizada utilizando a versão 4.1 do ROMS, executada numa plataforma de alto desempenho localizada no Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE) - equipado com processador Intel Xeon

Gold 6126, do qual foi utilizado um nó com 48 CPUs e a biblioteca *Message Passing Interface* (MPI) para execução do modelo em computação paralela.

Para a modelagem das grades, apresentadas anteriormente e representadas na Figura 24, foi utilizado o esquema de aninhamento *online* com o modo bidirecional (em inglês, *two-way nesting*) ativado. Desse modo, os resultados das grades mais resolutas, G2N e G2S, também são transferidos para a grade menos resolvida, G1. Esse processo de retroalimentação permite que a melhor representação dos processos oceanográficos das grades mais resolutas impliquem em melhorias na grade menos resolvida [71, 78].

Os arquivos de entrada foram preparados a partir de scripts Matlab inicialmente desenvolvidos pelo Prof H. Arango, adaptados para pesquisa [68] e que foram ajustados para o uso dos resultados do BESM. A Figura 27 apresenta o esquema de integração entre o modelo BESM e ROMS, via arquivos de condição de contorno e inicial, e a troca de informações oceânicas entre as grades.

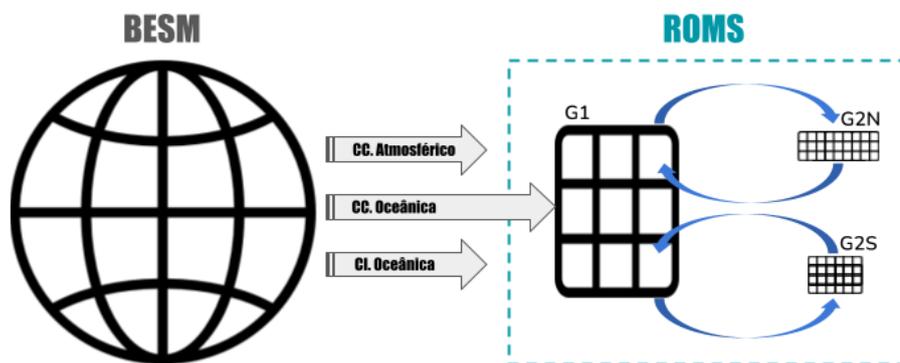


Figura 27: Esquema de integração entre o BESM e o ROMS, e a interação entre as grades modeladas. O BESM fornece as condições de contorno (CC) atmosférica e condição inicial (CI) oceânica para todas as grades e a CC. oceânica apenas a grade G1.

Nos contornos e como condição inicial oceânica da grade G1, foram utilizadas as médias mensais das variáveis do BESM de velocidade da corrente, temperatura, salinidade e elevação da superfície livre. Como condição de contorno lateral foi imposta a condição do tipo Chapman para elevação da superfície [79], a condição de Shchepetkin para o momento barotrópico [70], que é uma reformulação da condição de Flather [80] adequada para grades escalonadas, como a do tipo C de Arakawa, e uma condição mista de radiação com *nudging* para as velocidades baroclínicas, temperatura e salinidade [81]. As condições laterais foram escolhidas com base em trabalhos anteriores que realizaram modelagens para regiões contidas na grade [7, 9], bem como em testes de execução do modelo que ajudaram a refinar a aplicação dessas condições. O passo de tempo configurado foi de 600 s, com discretização vertical em 30 níveis.

A condição inicial das grades G2N e G2S, foi feita de forma similar a grade G1, porém a condição de contorno lateral é do tipo *Nested* para todas as variáveis, já que se trata de um modelo configurado para aninhamento *online*. Para essas grades de maior resolução o passo de tempo foi de 200 s, com 30 níveis verticais.

Os forçantes atmosféricos de superfície foram obtidos a partir das saídas diárias de pressão ao nível do mar, temperatura do ar, umidade específica, precipitação, radiações de onda longa e curta e campos de vento de superfície, extraídos do BESM. Esses dados foram utilizados para forçar todas as grades e os fluxos de superfície foram calculados utilizando o método de formulação Bulk [82].

Além dos arquivos confeccionados a partir dos resultados do BESM, também foram consideradas outros 2 forçantes confeccionados a partir de informações externas ao BESM: marés e vazão dos rios. As marés foram consideradas nas simulações pela extração de 13 constituintes harmônicos (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, M4, Ms4 e Mn4) do modelo global TPXO7.2 [83]. Por sua vez, as vazões climatológicas dos principais rios ao longo da costa brasileira foram calculadas usando médias mensais de registros históricos fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) e incluídas no modelo como fontes pontuais <sup>4</sup>.

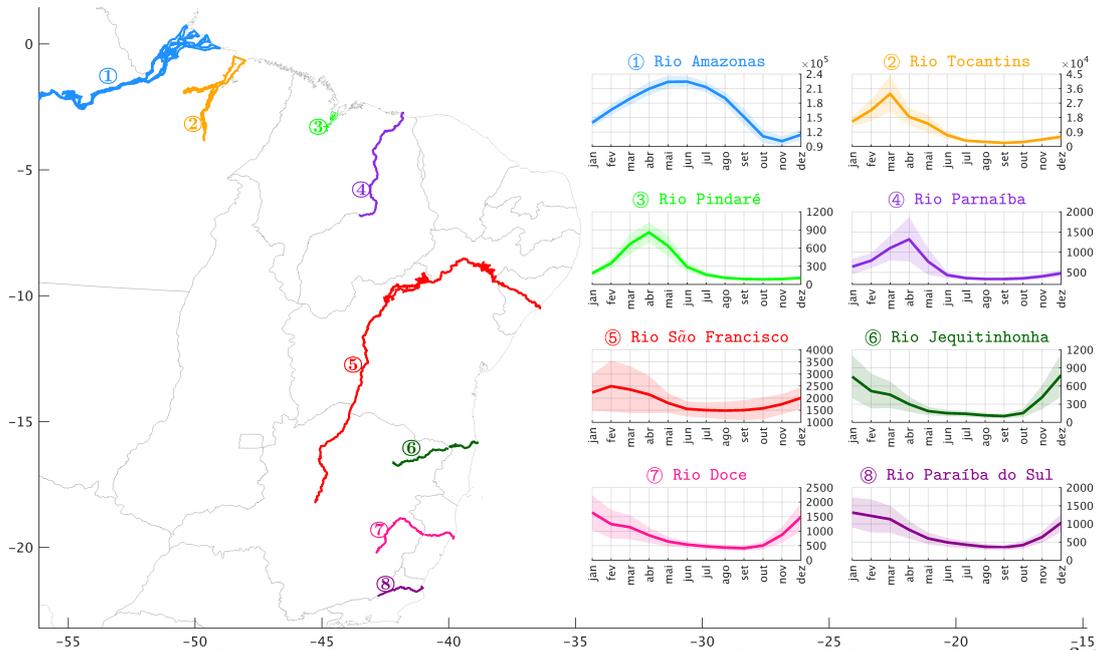


Figura 28: Localização dos rios e suas séries climatológicas de vazão, em  $m^3/s$ , utilizadas na modelagem hidrodinâmica.

Para cada cenário climático a modelagem foi executada iniciando um ano antes do período previamente escolhido, totalizando 2 anos de modelagem para o experimento representativo do clima atual, 1992-1993, e futuro, 2084-2085. O primeiro

<sup>4</sup>No contexto do modelo ROMS, uma 'fonte pontual' refere-se a uma entrada localizada de uma substância ou propriedade na grade do modelo, como a vazão de um rio em um ponto da grade.

ano de modelagem de cada experimento é utilizado como período de aquecimento, sendo utilizado apenas para análise de estabilidade do modelo.

Para otimizar o tamanho dos arquivos de saída, as variáveis de temperatura e salinidade foram salvas apenas para grade G1, e as componentes de velocidade horizontal foram salvas para todas as grades. Além disso, os resultados foram salvos com intervalo de 6h.

## 3.5 Análise dos resultados

Com os resultados das simulações hidrodinâmicas foram realizadas a validação do modelo, verificação da variabilidade espacial e temporal da densidade de energia disponível para produção de eletricidade, cálculo do fator de capacidade e, sempre que possível, comparação entre os experimentos.

### 3.5.1 Validação do modelo

Para averiguar a capacidade do modelo em representar o oceano, foram realizadas comparações entre dados observados e o resultado do experimento que representa a condição atual do oceano.

A temperatura de superfície do mar (TSM) calculada pelo modelo foi comparada à TSM observada no OSTIA (*Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis*). O OSTIA é um produto que fornece a temperatura global de superfície do mar, que é produzida a partir de medidas *in situ* e dados de satélite, disponibilizados em uma grade de  $1/20^\circ$  de resolução [84]. Foram obtidos campos médios anuais para os resultados do BESM, os resultados modelados no ROMS pela grade G1 e do OSTIA. Além disso, foi realizada a comparação de séries de temporais de TSM para pontos específicos da grade G1, e calculado o erro quadrático médio (RMSE) conforme a equação 3.23.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t^{\text{obs}} - y_t^{\text{mod}})^2} \quad (3.23)$$

A energia cinética foi avaliada em comparação com uma reanálise<sup>5</sup> global, dada a ausência de dados observacionais de correntes com a abrangência espacial e temporal requerida. Para este fim, foi utilizado o produto GLORYS12V1 (*Global Ocean Reanalysis and Simulation*), que é uma reanálise global oceânica com uma resolução horizontal de  $1/12^\circ$  e 50 níveis verticais[85]. Foi calculado a série temporal de energia cinética média na superfície para as grades G1, G2N e G2S e comparado

---

<sup>5</sup>Reanálise refere-se a um modelo numérico que considera observações de diversas fontes ao longo do tempo, usando um sistema de assimilação de dados para ajustar o modelo às observações.

com os valores calculados para a mesma região no GLORYS. Calculou-se também a correlação entre as séries, utilizando uma média móvel de 30 dias para suavizar as flutuações de curto prazo.

### 3.5.2 Variabilidade espacial e temporal de densidade de potência

Para a avaliação da variabilidade espacial e temporal, será calculado a distribuição média da densidade de potência, calculada pela equação 3.24, para médias anuais e sazonais de velocidade.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (3.24)$$

Onde  $\frac{P}{A}$  é a densidade de potência em  $W/m^2$ ,  $\rho$  equivale a  $1025 \text{ kg}/m^3$ , valor típico da densidade para água salgada oceânica. Embora a densidade de potência indique a energia total disponível por unidade de área, apenas uma fração dessa energia pode ser efetivamente extraída, o que se deve às limitações na eficiência das turbinas hidrocínicas.

Também foram calculados mapas de coeficiente de variação (COV) da densidade de potência, equação 3.25. Este parâmetro indica a variabilidade temporal da densidade de potência. Quanto mais próximo de zero, menor é a variabilidade [86].

$$\text{COV}(P) = \frac{\sigma(P(t))}{\mu(P(t))} = \left( \frac{(P - \bar{P})^2}{\bar{P}} \right)^{0.5} \quad (3.25)$$

Com estas análises busca-se regiões com alta densidade de potência, o que torna a extração de energia mais viável, e baixo COV, que indica uma produção de energia mais contínua.

Assim, essa abordagem possibilita a estimativa do potencial teórico da energia disponível nas correntes oceânicas, desconsiderando, nesta fase do estudo, quaisquer restrições técnicas, operacionais ou econômicas que possam limitar a implementação prática dessa fonte renovável de energia.

# Capítulo 4

## Resultados

Neste capítulo, são apresentadas a validação da modelagem hidrodinâmica e análise dos resultados.

### 4.1 Validação

Inicialmente, é feita uma validação dos resultados para garantir que o modelo atinge a estabilidade e consegue representar as principais feições oceanográficas.

#### 4.1.1 Estabilidade numérica

A Figura 29 apresenta a série temporal da média volumétrica de energia cinética considerando a profundidade total das grades. Nela é possível observar que em aproximadamente 6 meses após o início da modelagem é atingido o equilíbrio numérico em ambos os experimentos, validando a escolha do tempo de aquecimento de 1 ano. Nela também é possível observar que as características de densidade de energia seguem o mesmo padrão encontrado com os resultados do BESM, com maior intensidade para grade G2N, onde está localizada a CNB, e que inclusive modula a série da grade G1.

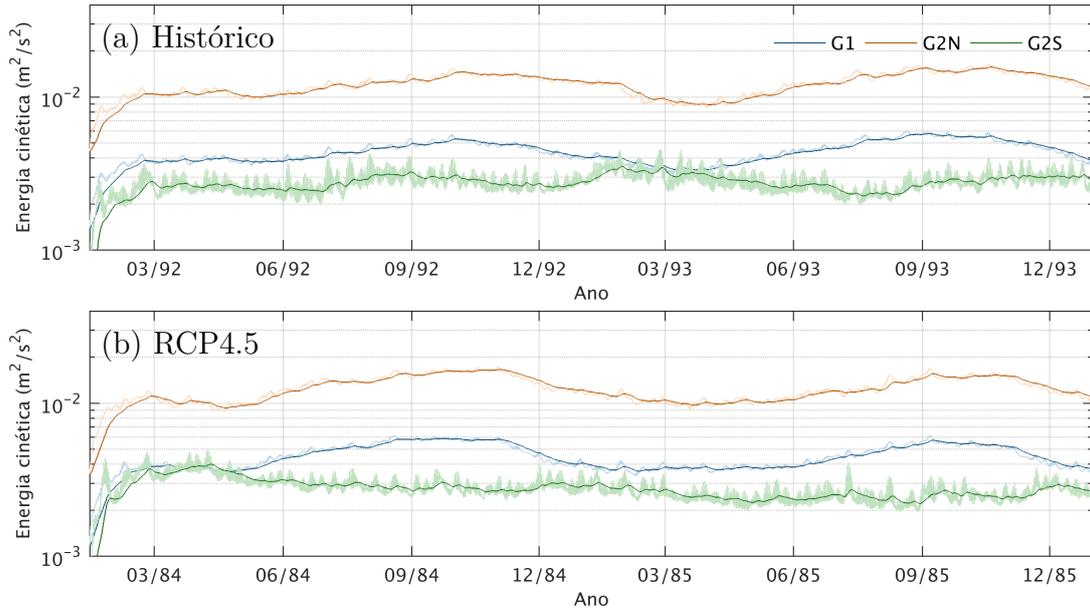


Figura 29: Série temporal da média volumétrica de energia cinética para o experimento histórico (a) e RCP4.5 (b). As linhas claras indicam a série bruta enquanto a escura é a média móvel com janela de 1 mês.

#### 4.1.2 Energia cinética de superfície

A Figura 30 apresenta a comparação entre as séries temporais da média superficial de energia cinética para cada grade e para energias calculadas com o produto de reanálise global. A partir dela é possível inferir que a sazonalidade é bem representada e com valores de energia cinética na mesma ordem de grandeza comparada ao GLORYS. Tais resultados implicam em altos valores de correlação, considerando a média móvel de 30 dias, de 0,85 para G1, 0,65 para G2N e 0,87 para G2S, indicando uma boa representação da dinâmica de superfície do oceano em relação a esta base hidrodinâmica de referência.

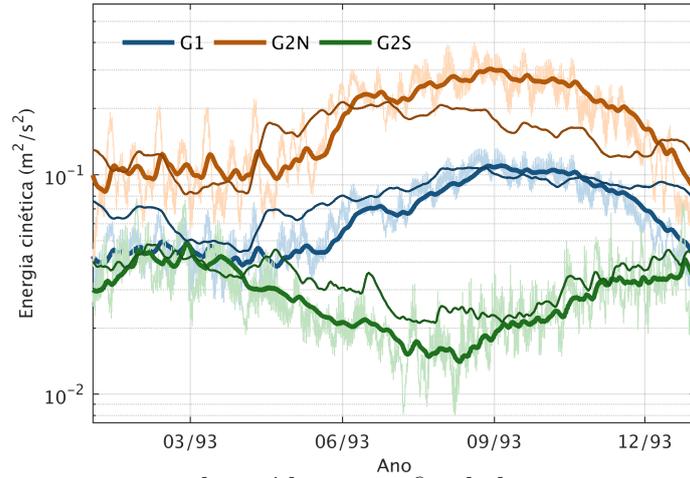


Figura 30: Séries temporais da média superficial de energia cinética. A legenda mostra as cores bases usada para cada grade. Linha clara: série bruta do ROMS. Linha grossa escura: média móvel da série do ROMS . Linha fina escura: média móvel do produto de reanálise (GLORYS).

A Figura 31 apresenta os campos de energia cinética média (MKE) e as linhas de fluxo médio resultante da velocidade integrada entre 0 e 200 m para o ano de 1993, fornecendo uma comparação entre o BESM, ROMS e o GLORYS. Nela podemos notar que o BESM (Figura 31(a)) apresenta uma distribuição mais homogênea quando comparada com o GLORYS (Figura 31(c)), além disso as linhas de fluxo sugerem um comportamento mais uniforme em toda área. Em contraste, a regionalização (Figura 31(b)) mostrou mais eficiente em capturar as variações de MKE ao longo da costa, destacando-se a representação do MKE devido à CB próximo ao Rio de Janeiro e melhor distribuição da energia na costa norte e nordeste oriundas da melhor representação da CNB. Além disso, as linhas de fluxo indicam a representação de fenômenos de menores escalas foram capturados pelo ROMS, também presentes no campo de referência, que são cruciais para entender a circulação oceânica regional e que afetam a variabilidade da energia das correntes oceânicas.

Apesar da evidente melhora na representação ao longo do domínio, percebe-se uma subestimação de energia pra CNB e um fluxo mais estruturado para CB entre as latitudes  $21^{\circ}S$  e  $23^{\circ}S$ .

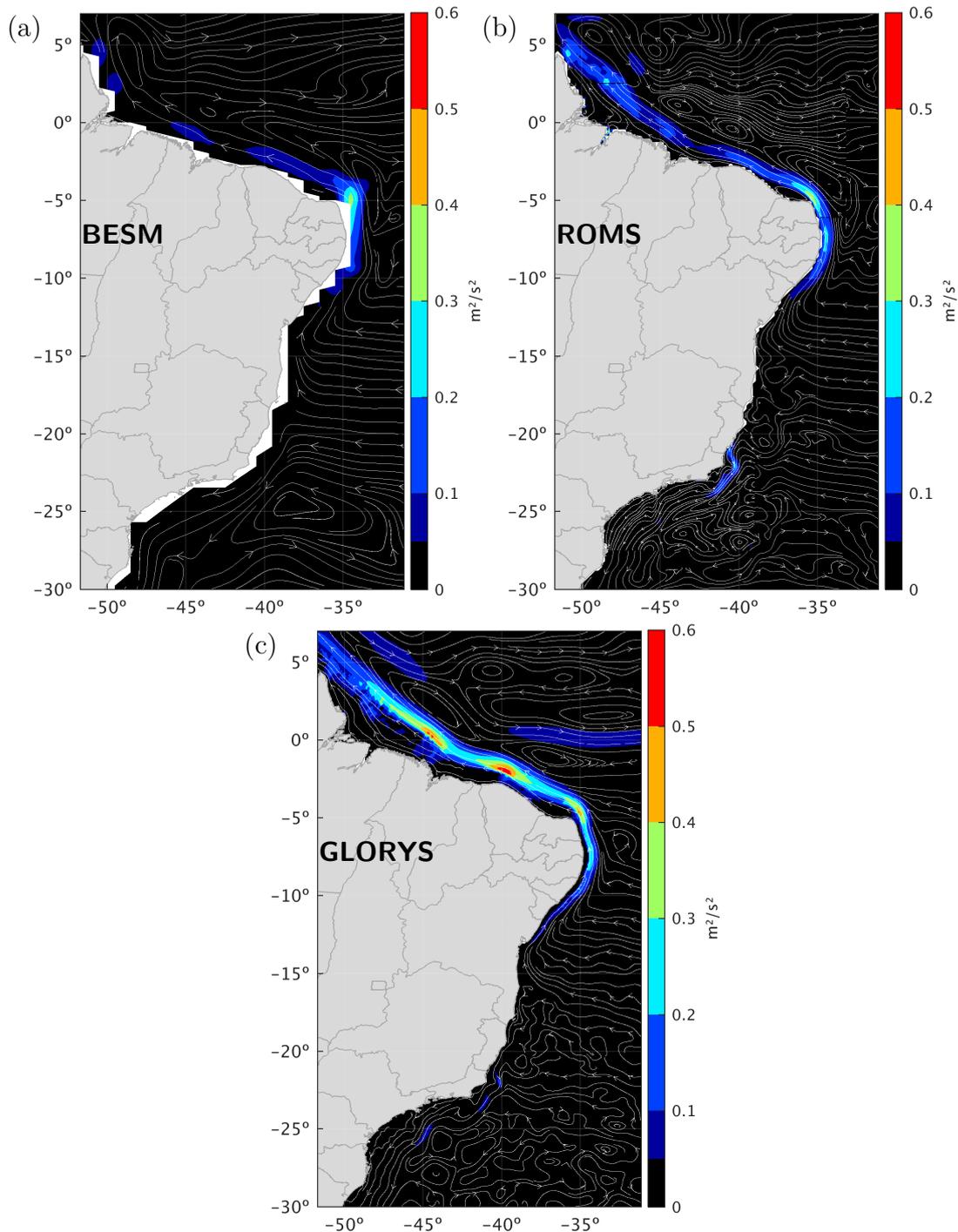


Figura 31: Campos de MKE para o ano de 1993, utilizando as velocidade integradas entre 0 a 200m com os resultados do (a) BESM, (b) ROMS, com grade G2S e G2N sobrepostos à grade G1, e (c) GLORYS.

A Figura 32 mostra as profundidades com maior frequência de velocidade máxima dentre os 200 m próximos à superfície para cada ponto da grade do BESM (Figura 32(a)), G1 (Figura 32(b)) e do GLORYS (Figura 32(c)). Para a região da CB, para latitudes inferiores a 20°S, há uma concordância entre os modelos com as velocidades máximas ocorrendo bem próximo à superfície, entre 0 e 20 metros. Entre 15°S e 5°S os modelos ROMS e GLORYS também concordam que há maior

ocorrência de velocidades máximas próximo à costa principalmente entre 180 e 200 m, entretanto o BESM inicia essa faixa com maiores profundidades mais ao sul, em aproximadamente  $18^{\circ}S$ , e a partir de  $12^{\circ}S$  a região com maior ocorrência de máxima velocidade fica um pouco mais rasa, entre 80 e 140 m.

Seguindo a inclinação da costa brasileira, próximo a  $5^{\circ}S$ , essa faixa de ocorrência em maiores profundidade é observado no ROMS e no GLORYS, porém no GLORYS ela se estende até  $42^{\circ}W$  com profundidade preferencial entre 120 e 160 m, já no ROMS até aproximadamente  $37^{\circ}W$  e com profundidades entre 80 e 100 m. Já o BESM não apresenta características semelhantes.

Para o restante da área junto à costa norte, todos modelos concordam com maiores frequências ocorrendo próximo à superfície, com diferenças em relação à parte mais oceânica. Desta forma, conclui-se que o *downscaling* realizado no ROMS melhorou os resultados da parte dinâmica do BESM, se aproximando das características encontradas no produto de reanálise global de alta resolução.

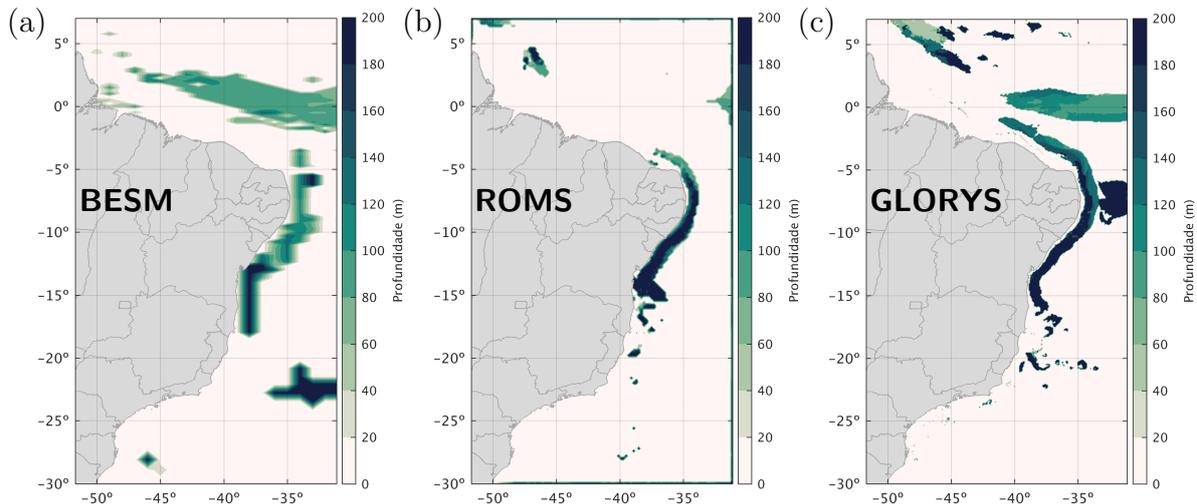


Figura 32: Campos de profundidade correspondente à maior ocorrência de velocidades máximas com os resultados do BESM (a), da grade G1 (b) e GLORYS (c).

### 4.1.3 Temperatura

Na Figura 33 (a,b,c) são apresentados os campos de temperatura média para a superfície do mar para o ano de 1993, para os resultados do modelo BESM, ROMS e a observação, respectivamente. Apesar de um resfriamento na parte oceânica entre as latitudes  $2, 5^{\circ}N$  e  $1, 5^{\circ}N$ , é possível observar que houve uma melhoria no gradiente de temperatura para as latitudes inferiores a  $5^{\circ}S$  e principalmente junto à costa sul e sudeste. Já os campos de anomalia, além de confirmar os apontamentos anteriores, também deixa evidente a melhoria da temperatura próximo aos rios Amazonas e Pindaré, provavelmente devido à inclusão das vazões dos rios na simulação feita no ROMS. Já no extremo oposto da grade, é observado que o anomalia do ROMS

acompanha o padrão de distribuição do modelo BESM, porém com valores mais próximos da observação.

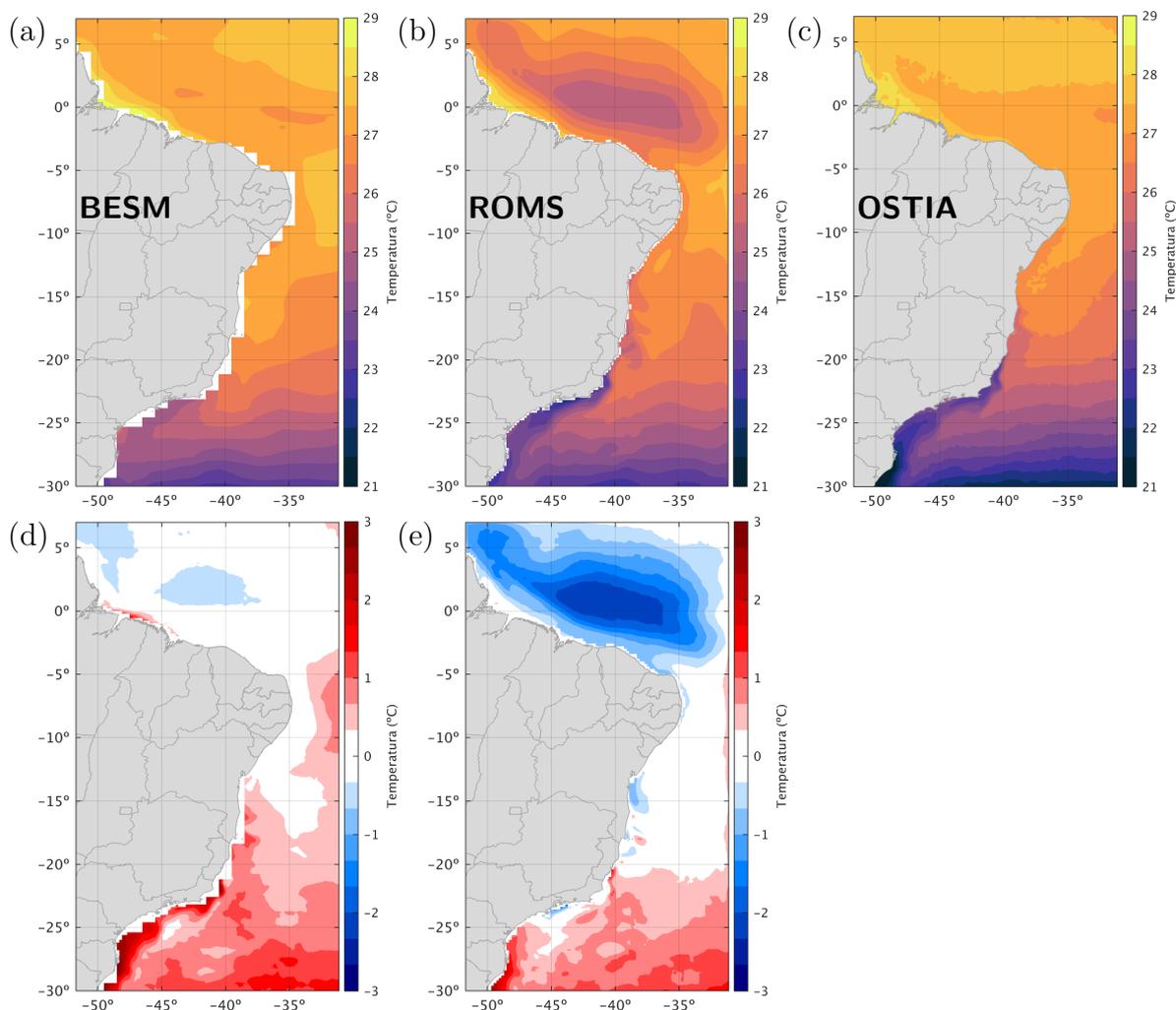


Figura 33: Campos de temperatura média de superfície para o ano de 1993 no (a) BESM, (b) modelada no ROMS, (c) observada e os campos de anomalia entre o modelo e a observação, sendo (d) BESM e (e) modelado no ROMS

A Figura 34 apresenta as séries temporais de TSM modelada e observada, de três pontos localizados em regiões estratégicas para o entendimento das correntes de superfície. O ponto P1, que está inserido na região de dominância da CNB, apresenta uma subestimação para grande parte do período modelado com RMSE de  $1,11^{\circ}\text{C}$ , mas apresenta uma correlação positiva de 0,61. O ponto P2 está localizado na região onde a CSE bifurca, apresentando uma correlação positiva de 0,95 e  $0,74^{\circ}\text{C}$  de RMSE. Por último, o ponto P3, localizado próximo a região mais energética da CB, também apresenta uma forte correlação de 0,82 e  $0,77^{\circ}\text{C}$  de RMSE. Os pontos P2 e P3, de modo geral, apresentam uma superestimação de temperatura para o verão austral e uma subestimação no resto no ano.

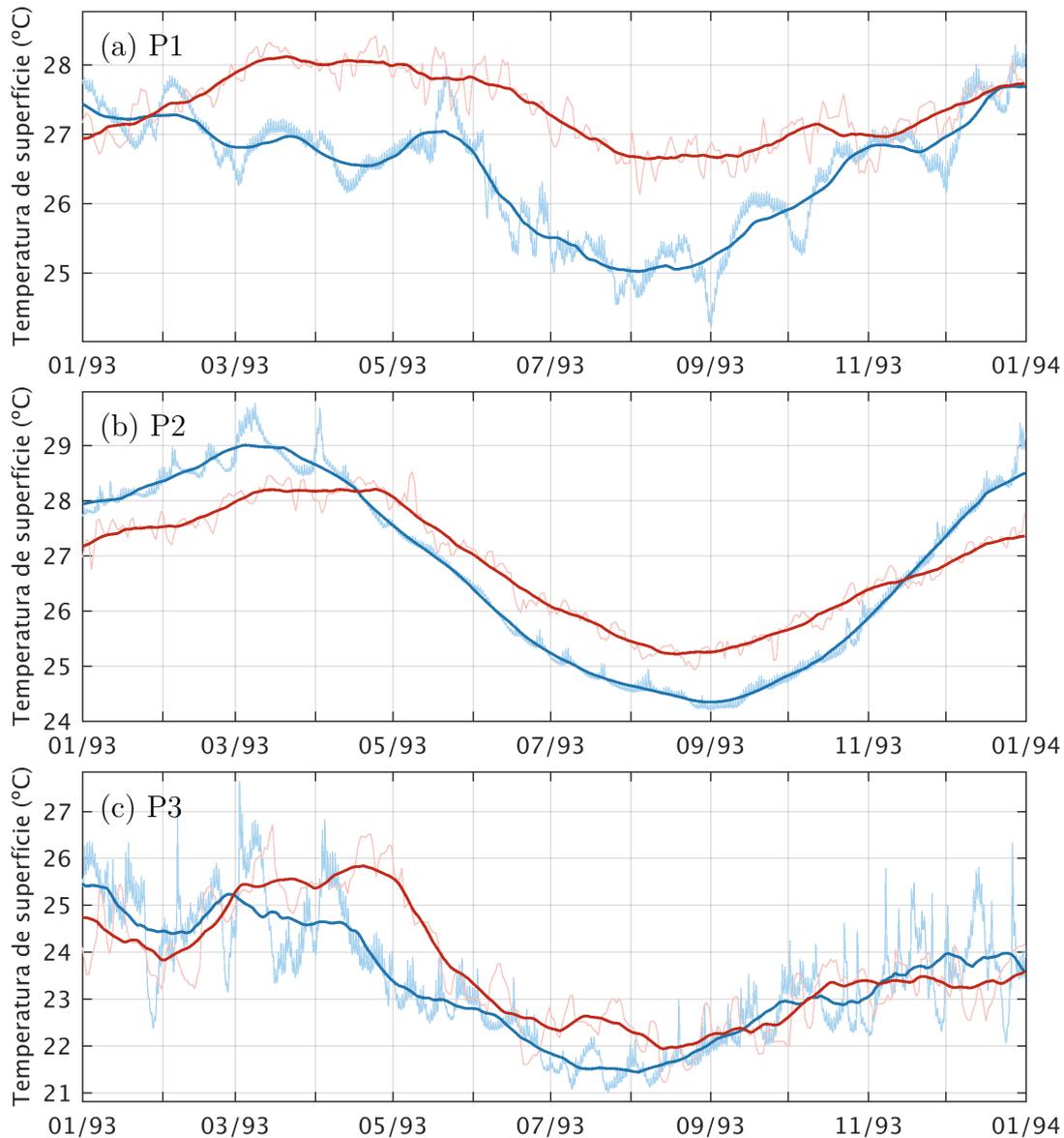


Figura 34: Série temporal de TSM para os pontos (a) P1, (b) P2 e (c) P3, para o modelo ROMS (azul) e observação (vermelho) . As linhas claras indicam a série bruta enquanto a escura é a média móvel com janela de 1 mês.

## 4.2 Densidade de Potência no Clima Atual

Utilizando mapas de densidade de potência, que foram calculados a partir da velocidade integrada entre 0-20 m e 80-100 m da coluna d'água, será discutido sua distribuição, tanto para escala de tempo anual quanto para sazonal. As profundidades selecionadas são justificadas pela concordância entre o resultado modelado e o GLORYS, em relação à frequência de velocidades máximas encontradas na região onde a energia cinética é mais expressiva, discutidas em 4.1.2. Além disso, para cada faixa de profundidade selecionada, será examinado a distribuição do coeficiente de variação da densidade de potência. Vale salientar que as faixas de profundidade

referem-se à posição na coluna d'água e não a faixas batimétricas. Além disso, foi utilizado o valor de  $300 \text{ W/m}^2$  como valor significativo de energia. Este se refere a uma densidade de potência gerada por um fluxo com velocidade média de aproximadamente  $0.84 \text{ m/s}$ , valor ligeiramente superior as velocidade de *cut-in* dos dispositivos de conversão de energia de correntes oceânicas discutidos na seção 2.1.

#### 4.2.1 0-20 metros

Na escala anual, a distribuição da densidade de potência (Figura 35(a)) revela uma clara concentração energética próximo à superfície oceânica, com destaque para margem equatorial devido à influência da CNB, com densidade de potência atingindo  $380 \text{ W/m}^2$ . Já na costa sudeste, a presença da CB mostra-se mais evidente em uma estreita faixa adjacente ao estado do Rio de Janeiro, porém em grande parte com densidade inferior a  $300 \text{ W/m}^2$ .

Na análise sazonal, na região influenciada pela CNB é possível identificar uma alta densidade de potência que atinge valores superiores a  $800 \text{ W/m}^2$  no inverno, próximo à costa do Ceará, e na primavera, entre o Pará e Amapá, atingindo  $1400 \text{ W/m}^2$  próximo ao Amapá. Em contraste, a região da CB apresenta um comportamento muito próximo da média anual, sendo o inverno a estação mais enfraquecida e a região próxima a  $22^\circ\text{S}$  exibindo um máximo de  $425 \text{ W/m}^2$  para o verão.

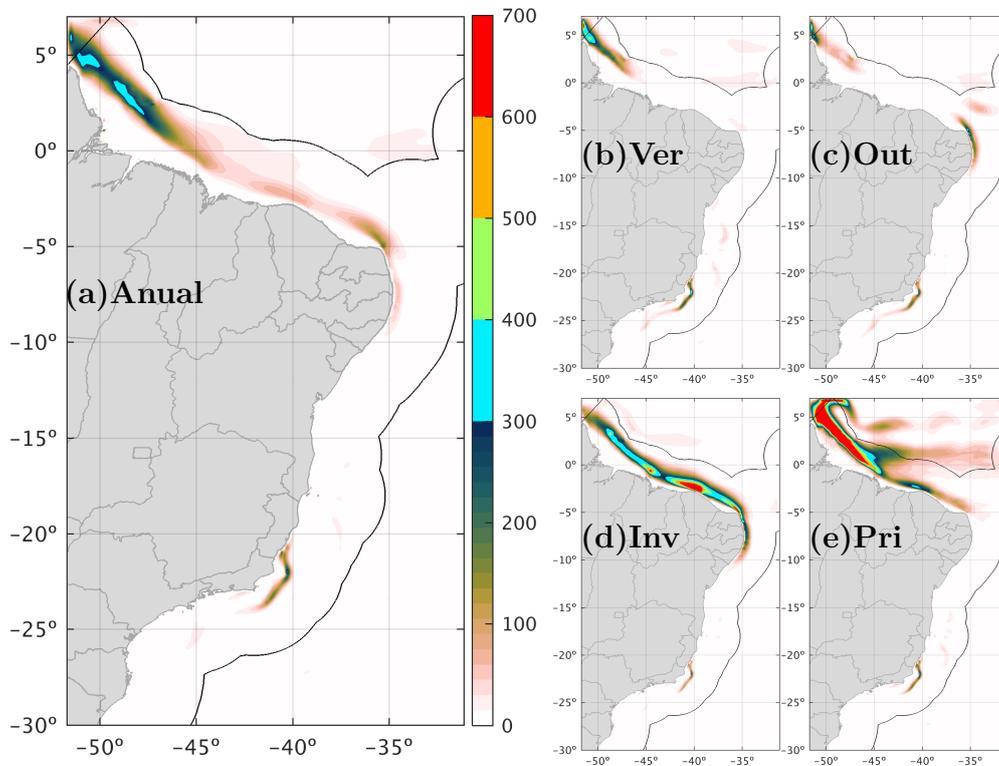


Figura 35: Densidade de potência em  $\text{W/m}^2$  calculadas a partir das velocidades integradas entre 0 e 20 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e).

Uma análise da densidade de potência baseada em velocidades superficiais do modelo GLORYS para o período de dez anos, entre 2007 e 2017, é apresentada em [25]. Esta análise revelou regiões ao longo da costa, particularmente adjacentes aos estados do Ceará e Pará, como áreas de maiores valores de densidade de potência, consistente com as regiões observadas no presente estudo. No entanto, foi reportado valores mais elevados de densidade de potência, tanto nas médias anuais quanto nas médias sazonais, em comparação com os resultados do presente estudo para essas regiões mais significativas. Essa variação nos valores de densidade de potência pode ser atribuída a diferenças metodológicas entre os dois estudos. Aqui, a densidade foi calculada com base em uma média dos primeiros 20 m da coluna d'água, contrastando com a abordagem que utilizou apenas a velocidade superficial. Além disso, a resolução do forçante atmosférico no GLORYS, de  $0,75^\circ$  [87], difere do forçante utilizado no ROMS, derivado do BESM, que tem uma resolução aproximada de  $1,86^\circ$ . Essa diferença na resolução do forçante atmosférico é relevante, visto que o vento desempenha um papel crucial na dinâmica da CNB, potencialmente influenciando os resultados da densidade de potência calculados.

A Figura 36 mostra que o COV reflete a análise da distribuição sazonal de densidade de potência. Apesar da região da CB apresentar uma densidade de potência menor, é encontrado um fluxo mais estruturado ao longo das estações, acarretando em valores inferiores a 0,6 em seu eixo. Por outro lado, a região da CNB, apesar de sua alta densidade de potência, apresenta uma variação sazonal significativa, culminando num COV, na maior parte, superior a 1.

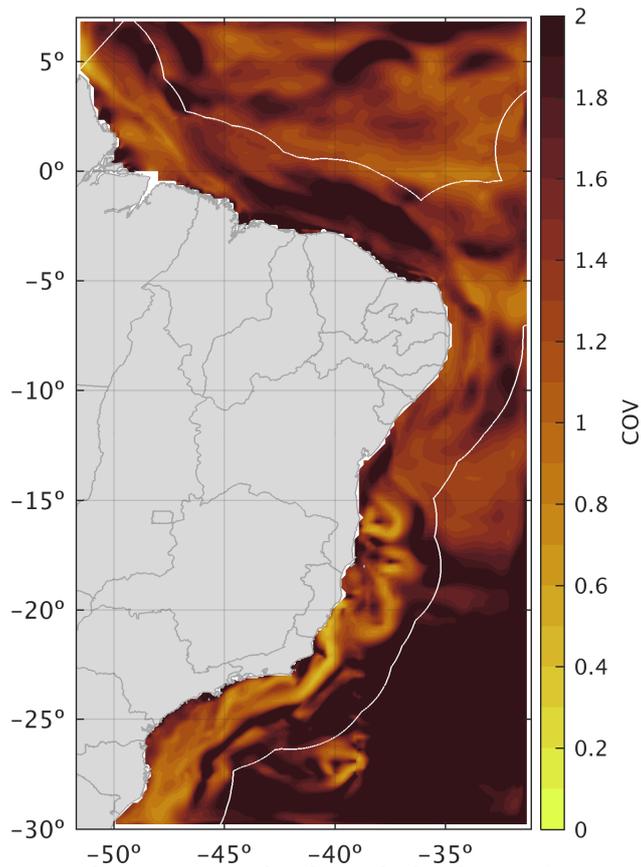


Figura 36: Coeficiente de variação de densidade de potência representativo para profundidades entre 0 a 20 metros.

#### 4.2.2 80-100 metros

Na faixa de profundidades de 80 a 100 m, a região próxima ao Rio Grande do Norte apresenta o valor máximo, de aproximadamente  $600 \text{ W/m}^2$ , para a densidade de potência anual. Um fato que chama atenção, quando comparado com os valores encontrados próximos à superfície, é que essa mesma região apresenta valores recorrentes de energia expressiva ao longo das estações, com máxima no outono em torno de  $720 \text{ W/m}^2$ . A região sob influência da CB possui valores ainda menores do que aqueles observados na superfície.

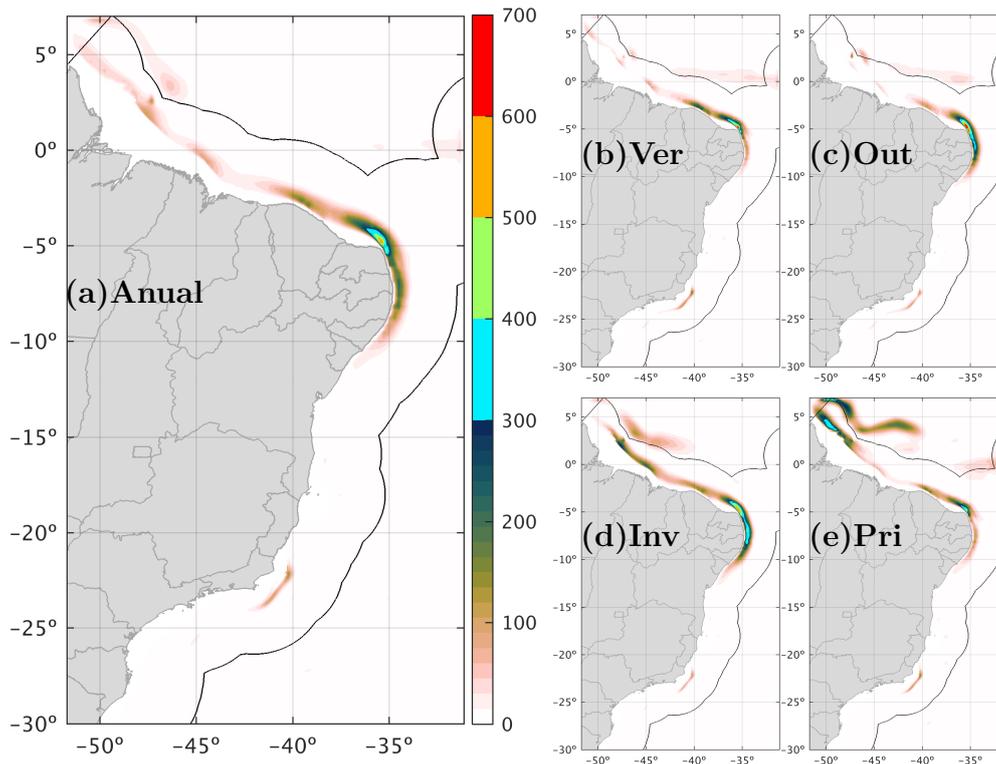


Figura 37: Densidade de potência em  $W/m^2$  calculadas a partir das velocidades integradas entre 80 e 100 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e).

Até o momento, a literatura científica se concentra predominantemente no mapeamento da densidade de potência em regiões superficiais do oceano ao longo da costa brasileira [25], deixando uma lacuna significativa no que diz respeito à avaliação dessas densidades em maiores profundidades. É importante destacar que, embora a posição na coluna d'água para a extração de energia possa variar de acordo com o *design* específico de cada projeto, as tecnologias emergentes destinadas à exploração das correntes oceânicas, particularmente aquelas que empregam dispositivos flutuantes, são geralmente projetadas para operar a profundidades de pelo menos 50 m abaixo da superfície da água (vide seção 2.1).

Em relação ao coeficiente de variação, a Figura 38 mostra uma diminuição considerável na região adjacente à costa nordeste, em especial próximo ao Rio Grande do Norte, onde atinge valores abaixo de 0,5 na zona de densidade de potência máxima, corroborando com a análise sazonal de densidade de potência. Adicionalmente, na região influenciada pela CB, observa-se uma consistência com a análise realizada na superfície, caracterizando-se por baixos valores de COV mas em uma zona de baixa densidade de potência.



relação à média anual.

Para a média anual, há um aumento da densidade de potência próximo a costa, principalmente próximo ao Amapá, onde a densidade máxima de potência anual para o clima atual mostrou-se mais forte. Entretanto, na análise sazonal, há um enfraquecimento no verão e inverno que são contrabalanceados por um aumento no outono e, ainda maior, na primavera.

Outra região no clima atual que se destacou foi próximo ao Ceará, entretanto no clima futuro apresentou uma densidade de potência menor no inverno e um aumento na primavera.

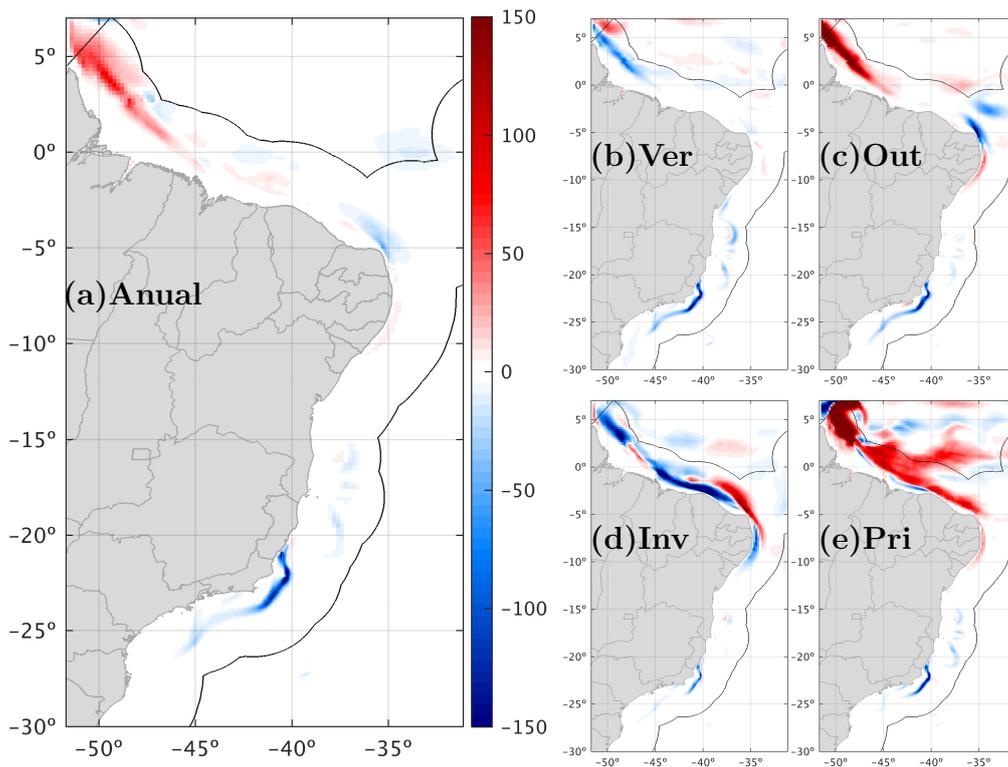


Figura 39: Anomalia de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) em  $W/m^2$  calculadas a partir das velocidades integradas entre 0 e 20 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e).

A Figura 40 apresenta a anomalia para o coeficiente estatístico COV, onde podemos observar que com o enfraquecimento da densidade de potência na região da CB há um aumento do COV, enquanto que, de modo geral, há uma diminuição para a região da CNB. Este resultado indica menores variações na densidade de potência ao longo do tempo.

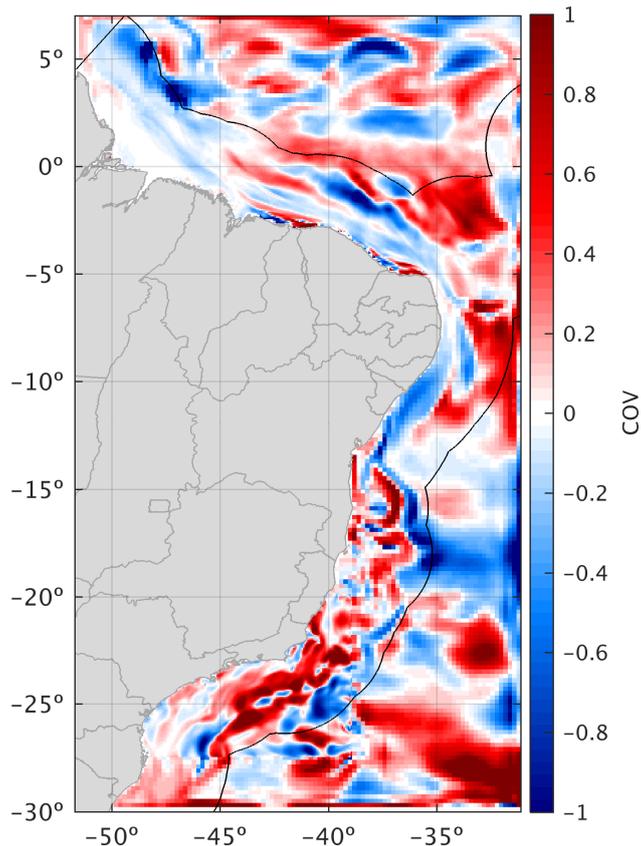


Figura 40: Anomalia do coeficiente de variação de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) representativo para profundidades entre 0 e 20 metros.

### 4.3.2 80-100 metros

Para as anomalias da densidade de potência para as profundidades 80-100 m (Figura 41), há uma maior coesão entre a anomalia média anual e sazonal em relação à análise de profundidade mais rasas. Para a região da CB, é encontrado o mesmo padrão da análise entre 0-20 m, indicando um possível enfraquecimento da densidade de potência ao longo da coluna d'água. Para a região da CNB, a média anual mostra um pequeno aumento para o clima futuro, já na análise sazonal é projetado um aumento para grande parte da região, sendo o inverno a única estação com enfraquecimento expressivo.

A região próxima ao Rio Grande do Norte, com máxima potência no clima atual, apresentou um aumento significativo nos meses de outono e primavera, sendo o inverno a única estação com enfraquecimento.

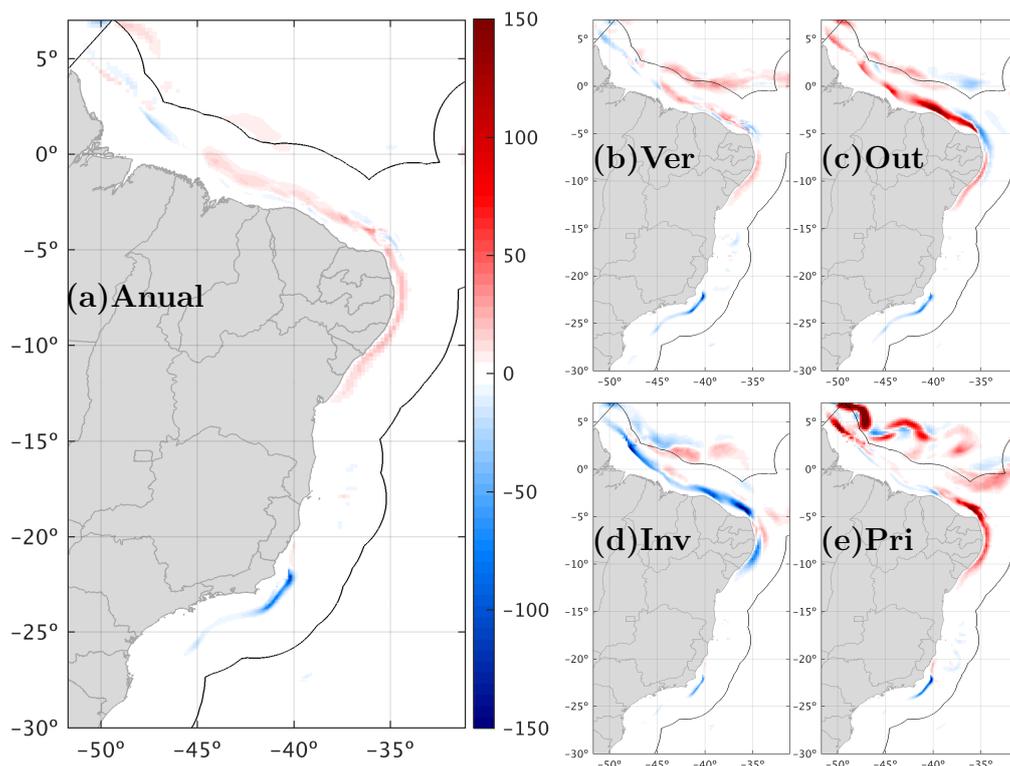


Figura 41: Anomalia de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) em  $W/m^2$  calculadas a partir das velocidades integradas entre 80 e 100 metros para média anual (a) e para as estações: verão (b), outono(c), inverno (d) e primavera (e).

Na Figura 42 observamos a diminuição do COV para a região da CNB e um aumento para região da CB. Reafirmando uma maior estabilidade na densidade de potência para o clima futuro na região influenciada pela CNB.

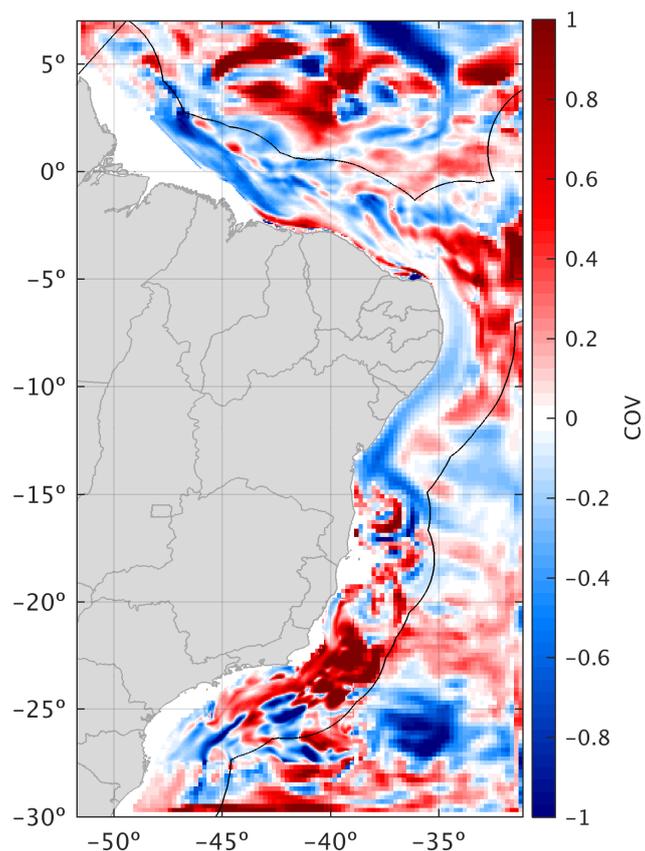


Figura 42: Anomalia do coeficiente de variação de densidade de potência (RCP4.5-Histórico) representativo para profundidades entre 80 e 100 metros.

# Capítulo 5

## Conclusão

Neste trabalho, foi investigado o potencial energético teórico de correntes oceânicas na costa brasileira, bem como os possíveis impactos das mudanças climáticas na distribuição dessa energia. Para isso, foi utilizado o modelo oceânico ROMS, empregando como condição de contorno os resultados fornecidos pelo modelo de sistema terrestre BESM-OA2.5 para o cenário histórico, representando o clima atual, e RCP4.5, representando o clima futuro. A modelagem foi conduzida em 3 grades numéricas com esquema de aninhamento *online*, permitindo a troca de informações bidirecionais entre elas, o que proporcionou um esquema de regionalização único para a avaliação do potencial energético.

A validação dos resultados do modelo foi feita a partir de dados observacionais de temperatura e comparação com resultados de um modelo de reanálise global, amplamente utilizado em pesquisas científicas, para avaliação da distribuição energética ao longo da costa. Foi concluído que o modelo representa satisfatoriamente a condição de clima atual e a regionalização se mostrou uma ferramenta poderosa para a melhorar a representação dinâmica das correntes oceânicas.

Para o clima atual, os resultados mostraram que para as profundidades entre 0 e 20 m, há uma densidade de potência considerável na região influenciada pela CNB próximo ao estado do Ceará e para uma faixa entre o Pará e Amapá, porém com uma marcada variabilidade sazonal. Já entre 80 e 100 m, destaca-se a região próximo ao Rio Grande do Norte, com uma densidade de potência mais estável entre as estações, refletindo em um baixo COV e onde também os resultados de clima futuro mostram-se mais promissores, devido ao aumento da densidade de potência e redução do COV.

Já para região influenciada pela CB, não foram encontrados valores significativos para o clima atual e os resultados indicam um enfraquecimento da densidade de potência nas duas faixas de profundidades avaliadas para o cenário de mudanças climáticas, tornando a região não promissora para extração de energia.

Embora este trabalho não tenha investigado aspectos técnicos específicos, como a

viabilidade econômica de conectar as regiões promissoras para a extração de energia das correntes oceânicas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), é importante reconhecer o potencial dessas áreas em um contexto mais amplo de sustentabilidade. Com o aumento do comprometimento das empresas petrolíferas em reduzir suas emissões de carbono, a energia gerada pelas correntes oceânicas surge como uma alternativa atraente.

Por fim, este estudo destaca-se pela sua natureza interdisciplinar, integrando conhecimentos de planejamento energético estratégico, modelagem computacional avançada e análise de grande volume de dados. A convergência dessas áreas são fundamentais não apenas para o conhecimento do aproveitamento da energia de correntes oceânicas, mas também é essencial para impulsionar o desenvolvimento tecnológico nacional para exploração da energia no oceano.

## 5.1 Trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos e considerando as limitações inerentes ao uso de um único modelo climático global, recomenda-se a implementação da regionalização usando dados oriundos de outros modelos climáticos globais. Esta estratégia não apenas enriqueceria a compreensão das dinâmicas climáticas regionais, mas também aumentaria a confiabilidade das projeções futuras em relação às mudanças climáticas e seus impactos na geração de energia pelas correntes oceânicas.

Além disso, a região próxima ao Rio Grande do Norte, que se destacou quanto à disponibilidade energética, merece atenção especial em estudos futuros. Recomenda-se a elaboração de um modelo regional de alta resolução que abranja um intervalo temporal mais extenso com foco nessa região. Esta modelagem poderia utilizar os resultados de modelos de reanálise global, isso possibilitaria uma análise mais detalhada do potencial energético da corrente oceânica, possibilitando estudos que visam o potencial técnico e econômico dessa energia atualmente.

Ademais, a metodologia utilizada neste trabalho possui potencial para ser adaptada e aplicada no mapeamento energético de outras fontes renováveis no oceano. Frente as mudanças climáticas e seu impacto direto na temperatura oceânica, destaca-se a importância de explorar a energia derivada do gradiente térmico oceânico.

# Referências Bibliográficas

- [1] SORRELL, S. “Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, pp. 74–82, 2015.
- [2] BP. “BP Energy Outlook”. 2019. Disponível em: <[https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/de\\_at/austria/home/wer-wir-sind/bp-gruppe/pdfs/bp-energy-outlook-2019.pdf](https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/de_at/austria/home/wer-wir-sind/bp-gruppe/pdfs/bp-energy-outlook-2019.pdf)>. Acessado em 10 de fevereiro de 2020.
- [3] IEA. “World Energy Balances: Overview”. 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview#world>>. Acessado em 10 de janeiro de 2021.
- [4] YUCE, M. I., MURATOGLU, A. “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, pp. 72–82, 2015.
- [5] ROURKE, F. O., BOYLE, F., REYNOLDS, A. “Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 3, pp. 1026–1036, 2010.
- [6] ROBINSON, A. R. “Predicting open ocean currents, fronts and eddies”. In: *Elsevier oceanography series*, v. 45, Elsevier, pp. 89–111, 1987.
- [7] DA ROCHA FRAGOSO, M., DE CARVALHO, G. V., SOARES, F. L. M., et al. “A 4D-variational ocean data assimilation application for Santos Basin, Brazil”, *Ocean dynamics*, v. 66, pp. 419–434, 2016.
- [8] TOSTE, R., BÖCK, C. S., DA SILVA, M. S., et al. “CODAR data assimilation into an integrated ocean forecasting system for the Brazilian Southeastern coast”, *Ocean Modelling*, v. 188, pp. 102331, 2024.
- [9] DE FREITAS ASSAD, L. P., TOSTE, R., BÖCK, C. S., et al. “Ocean climatology at Brazilian Equatorial Margin: a numerical approach”, *Journal of Computational Science*, v. 44, pp. 101159, 2020.

- [10] BARRETO, F. T., CURBANI, F. E., ZIELINSKY, G. M., et al. “Development of a multigrid operational forecast system for the oceanic region off Rio de Janeiro State”, *Ocean Modelling*, v. 184, pp. 102206, 2023.
- [11] BORETTI, A. “State-of-the-art of MW-level capacity oceanic current turbines”, *Nonlinear Engineering*, v. 9, n. 1, pp. 361–369, 2020. doi: doi:10.1515/nleng-2020-0022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/nleng-2020-0022>>.
- [12] PONTES, G., GUPTA, A. S., TASCETTO, A. “Projected changes to South Atlantic boundary currents and confluence region in the CMIP5 models: the role of wind and deep ocean changes”, *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 9, pp. 094013, 2016.
- [13] SEN GUPTA, A., STELLEMA, A., PONTES, G. M., et al. “Future changes to the upper ocean Western Boundary Currents across two generations of climate models”, *Scientific reports*, v. 11, n. 1, pp. 9538, 2021.
- [14] HU, S., SPRINTALL, J., GUAN, C., et al. “Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades”, *Science advances*, v. 6, n. 6, pp. eaax7727, 2020.
- [15] TOSTE, R., DE FREITAS ASSAD, L. P., LANDAU, L. “Downscaling of the global HadGEM2-ES results to model the future and present-day ocean conditions of the southeastern Brazilian continental shelf”, *Climate Dynamics*, v. 51, n. 1-2, pp. 143–159, 2018.
- [16] HUANG, R. X. *Ocean circulation: wind-driven and thermohaline processes*. NY, Cambridge University Press, 2010.
- [17] ZARUBIN, B. “Ocean Current Energy: Underwater Turbines”. 2014. Disponível em: <<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/zarubin2/>>. Acessado em 07 de março de 2024.
- [18] GOUVEIA, M. B., DURAN, R., LORENZZETTI, J. A., et al. “Persistent meanders and eddies lead to quasi-steady Lagrangian transport patterns in a weak western boundary current”, *Scientific reports*, v. 11, n. 1, pp. 497, 2021.
- [19] EVANS, D. L., SIGNORINI, S. S. “Vertical structure of the Brazil Current”, *Nature*, v. 315, n. 6014, pp. 48–50, 1985.

- [20] DA SILVEIRA, I., CALADO, L., CASTRO, B., et al. “On the baroclinic structure of the Brazil Current–Intermediate Western Boundary Current system at 22–23 S”, *Geophysical research letters*, v. 31, n. 14, 2004.
- [21] DA SILVEIRA, I. C., PEREIRA, F., FLIERL, G. R., et al. “The Brazil Current quasi-stationary unstable meanders at 22° S–23° S”, *Progress in Oceanography*, v. 210, pp. 102925, 2023.
- [22] JOHNS, W. E., LEE, T. N., SCHOTT, F. A., et al. “The North Brazil Current retroflection: Seasonal structure and eddy variability”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 95, n. C12, pp. 22103–22120, 1990.
- [23] SCHETTINI, C. A. F., DE CARVALHO DOMINGUES, E., TRUCCOLO, E. C., et al. “Seasonal variability of water masses and currents at the eastern Brazilian continental shelf (7.5–9°S)”, *Regional studies in marine science*, v. 16, pp. 131–144, 2017.
- [24] EUROPEAN MARINE ENERGY CENTRE. “Tidal Energy Developers”. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers/>. Acessado em 5 de março de 2024.
- [25] SHADMAN, M., SILVA, C., FALLER, D., et al. “Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil”, *Energies*, v. 12, n. 19, 2019. ISSN: 1996-1073. doi: 10.3390/en12193658. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3658>>.
- [26] MAGAGNA, D., UIHLEIN, A. “Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives”, *International Journal of Marine Energy*, v. 11, pp. 84–104, 2015.
- [27] QIAN, P., FENG, B., LIU, H., et al. “Review on configuration and control methods of tidal current turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 108, pp. 125–139, 2019.
- [28] CHEN, J.-H., CHIU, F.-C., HSIN, C.-Y., et al. “Hydrodynamic consideration in ocean current turbine design”, *Journal of Hydrodynamics*, v. 28, n. 6, pp. 1037–1042, 2016.
- [29] SHIRASAWA, K., TOKUNAGA, K., IWASHITA, H., et al. “Experimental verification of a floating ocean-current turbine with a single rotor for use in Kuroshio currents”, *Renewable Energy*, v. 91, pp. 189–195, 2016. ISSN: 0960-1481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.035>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116300350>>.

- [30] UENO, T., NAGAYA, S., SHIMIZU, M., et al. “Development and demonstration test for floating type ocean current turbine system conducted in kuroshio current”. In: *2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*, pp. 1–6. IEEE, 2018.
- [31] NEARY, V., PREVISIC, M., JEPSEN, R., et al. “Reference model 4 (RM4): ocean current turbine”. In: *Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies*, pp. 180–228, Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories, 2014.
- [32] IHI. “Demonstration test of Ocean Current Turbine System for reliability and economic performance evaluation”, *IHI Engineering Review*, v. 56, n. 2, pp. 1–8, 2019. Disponível em: <[https://www.ihl.co.jp/en/technology/techinfo/contents\\_no/\\_icsFiles/afieldfile/2023/10/31/Vol156No2\\_09.pdf](https://www.ihl.co.jp/en/technology/techinfo/contents_no/_icsFiles/afieldfile/2023/10/31/Vol156No2_09.pdf)>. Acessado em 07 de março de 2023.
- [33] RØKKE, A., NILSSEN, R. “Marine Current Turbines and Generator preference. A technology review”, 2013.
- [34] NOBRE, P., SIQUEIRA, L. S., DE ALMEIDA, R. A., et al. “Climate simulation and change in the Brazilian climate model”, *Journal of Climate*, v. 26, n. 17, pp. 6716–6732, 2013.
- [35] FIGUEROA, S. N., BONATTI, J. P., KUBOTA, P. Y., et al. “The Brazilian global atmospheric model (BAM): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution”, *Weather and Forecasting*, v. 31, n. 5, pp. 1547–1572, 2016.
- [36] GRIFFIES, S. M., SCHMIDT, M., HERZFELD, M. “Elements of mom4p1”, *GFDL Ocean Group Tech. Rep.*, v. 6, pp. 377, 2009.
- [37] CAPISTRANO, V. B., NOBRE, P., TEDESCHI, R., et al. “Overview of climate change in the BESM-OA2. 5 climate model”, *Geoscientific Model Development*, v. 12, pp. 1613–1642, 2018.
- [38] TAYLOR, K. E., STOUFFER, R. J., MEEHL, G. A. “An overview of CMIP5 and the experiment design”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 4, pp. 485–498, 2012.
- [39] TAYLOR, K. E., BALAJI, V., HANKIN, S., et al. “CMIP5 data reference syntax (DRS) and controlled vocabularies”, *Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison*, 2011.

- [40] NOBRE, P., DE ALMEIDA, R. A., MALAGUTTI, M., et al. “Coupled ocean–atmosphere variations over the South Atlantic Ocean”, *Journal of Climate*, v. 25, n. 18, pp. 6349–6358, 2012.
- [41] VEIGA, S. F., NOBRE, P., GIAROLLA, E., et al. “The Brazilian Earth System Model ocean–atmosphere (BESM-OA) version 2.5: evaluation of its CMIP5 historical simulation”, *Geoscientific Model Development (Online)*, v. 12, n. 4, 2019.
- [42] LEVITUS, S. *Climatological atlas of the world ocean*, v. 13. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1982.
- [43] LARGE, W., YEAGER, S. “The global climatology of an interannually varying air–sea flux data set”, *Climate dynamics*, v. 33, n. 2-3, pp. 341–364, 2009.
- [44] THOMSON, A. M., CALVIN, K. V., SMITH, S. J., et al. “RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100”, *Climatic change*, v. 109, n. 1-2, pp. 77, 2011.
- [45] RODRIGUES, R. R., ROTHSTEIN, L. M., WIMBUSH, M. “Seasonal variability of the South Equatorial Current bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 37, n. 1, pp. 16–30, 2007.
- [46] STRAMMA, L., IKEDA, Y., PETERSON, R. G. “Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20 S”, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, v. 37, n. 12, pp. 1875–1886, 1990.
- [47] STRAMMA, L. “Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic”, *Journal of Marine Research*, v. 49, n. 2, pp. 281–294, 1991.
- [48] DA SILVEIRA, I. C., DE MIRANDA, L. B., BROWN, W. S. “On the origins of the North Brazil Current”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 99, n. C11, pp. 22501–22512, 1994.
- [49] TORRENCE, C., COMPO, G. P. “A practical guide to wavelet analysis”, *Bulletin of the American Meteorological society*, v. 79, n. 1, pp. 61–78, 1998.
- [50] WANG, W., HU, S., LI, Y. “Wavelet transform method for synthetic generation of daily streamflow”, *Water resources management*, v. 25, n. 1, pp. 41–57, 2011.
- [51] BARBOSA, A. C., BLITZKOW, D. “Ondaletas: Histórico e aplicação”, *São Paulo*, p. 38, 2008.

- [52] SCHOBER, P., BOER, C., SCHWARTE, L. A. “Correlation coefficients: appropriate use and interpretation”, *Anesthesia & Analgesia*, v. 126, n. 5, pp. 1763–1768, 2018.
- [53] MARCHESIELLO, P., MCWILLIAMS, J. C., SHCHEPETKIN, A. “Equilibrium structure and dynamics of the California Current System”, *Journal of physical Oceanography*, v. 33, n. 4, pp. 753–783, 2003.
- [54] PELIZ, Á., DUBERT, J., HAIDVOGEL, D. B., et al. “Generation and unstable evolution of a density-driven eastern poleward current: The Iberian Poleward Current”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 108, n. C8, 2003.
- [55] DI LORENZO, E. “Seasonal dynamics of the surface circulation in the Southern California Current System”, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 50, n. 14-16, pp. 2371–2388, 2003.
- [56] BUDGELL, W. “Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region”, *Ocean Dynamics*, v. 55, n. 3-4, pp. 370–387, 2005.
- [57] WARNER, J. C., GEYER, W. R., LERCZAK, J. A. “Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 110, n. C5, 2005.
- [58] RANGEL, R. H. O., DE FREITAS ASSAD, L. P., PASSOS, E. N., et al. “Marine and Atmospheric Forecast Computational System for Nautical Sports in Guanabara Bay (Brazil)”. In: *International Conference on Computational Science*, pp. 215–228. Springer, 2019.
- [59] BARBARIOL, F., BENETAZZO, A., CARNIEL, S., et al. “Improving the assessment of wave energy resources by means of coupled wave-ocean numerical modeling”, *Renewable Energy*, v. 60, pp. 462–471, 2013.
- [60] ROC, T., CONLEY, D. C., GREAVES, D. “Methodology for tidal turbine representation in ocean circulation model”, *Renewable Energy*, v. 51, pp. 448–464, 2013.
- [61] CHIRI, H., CID, A., ABASCAL, A. J., et al. “A high-resolution hindcast of sea level and 3D currents for marine renewable energy applications: A case study in the Bay of Biscay”, *Renewable Energy*, v. 134, pp. 783–795, 2019.
- [62] HAIDVOGEL, D. B., ARANGO, H., BUDGELL, W. P., et al. “Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment

of the Regional Ocean Modeling System”, *Journal of Computational Physics*, v. 227, n. 7, pp. 3595–3624, 2008.

- [63] SHCHEPETKIN, A. F., MCWILLIAMS, J. C. “The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model”, *Ocean modelling*, v. 9, n. 4, pp. 347–404, 2005.
- [64] HEDSTRÖM, K. S. “Draft technical manual for a coupled sea-ice/ocean circulation model (version 5)”, *US Department of the Interior Minerals Management Service Anchorage, Alaska (BOEM Cooperative Agreement M15AC00011)*, 2018.
- [65] SONG, Y., HAIDVOGEL, D. “A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system”, *Journal of Computational Physics*, v. 115, n. 1, pp. 228–244, 1994.
- [66] PARKINSON, C. L., WASHINGTON, W. M. “A large-scale numerical model of sea ice”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 84, n. C1, pp. 311–337, 1979.
- [67] MYROMS. “Portal de documentação do ROMS”. Disponível em: <[www.myroms.org/wiki](http://www.myroms.org/wiki)>. Acessado em 20 de março de 2021.
- [68] SANTOS, R. T. F. D. “Efeitos da subida do nível do mar na inundação costeira na costa leste do Brasil devido às mudanças climáticas”, 2017.
- [69] EZER, T., MELLOR, G. L. “A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids”, *Ocean Modelling*, v. 6, n. 3-4, pp. 379–403, 2004.
- [70] MASON, E., MOLEMAKER, J., SHCHEPETKIN, A. F., et al. “Procedures for offline grid nesting in regional ocean models”, *Ocean modelling*, v. 35, n. 1-2, pp. 1–15, 2010.
- [71] DEBREU, L., MARCHESIELLO, P., PENVEN, P., et al. “Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation”, *Ocean Modelling*, v. 49, pp. 1–21, 2012.
- [72] AMANTE, C., EAKINS, B. W. “ETOPO1 Global Relief Model converted to PanMap layer format”. 2009.
- [73] ROMS-COMMUNITY. “EasyGrid”. Disponível em: <<https://www.myroms.org/wiki/easygrid>>. Acessado em 14 de novembro de 2023.

- [74] MUNIR, A. S., NASUTION, Y. N., MANDANG, I. “A Numerical Study of The Outflow of Makassar Strait Using Regional Ocean Modelling System (ROMS)”. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 618, p. 012012. IOP Publishing, 2020.
- [75] RIVAS CAMARGO, D. A., COUNILLON, F. S., KEENLYSIDE, N. S. “On dynamical downscaling of ENSO-induced oceanic anomalies off Baja California Peninsula, Mexico: role of the air-sea heat flux”, 2023.
- [76] SHAPIRO, R. “Linear filtering”, *Mathematics of computation*, v. 29, n. 132, pp. 1094–1097, 1975.
- [77] JAMES, C. “GridBuilder”. Disponível em: <<https://austides.com/downloads/>>. Acessado em 02 de agosto de 2022.
- [78] DEBREU, L., BLAYO, E. “Two-way embedding algorithms: a review: Submitted to Ocean Dynamics: Special Issue on Multi-Scale Modelling: Nested Grid and Unstructured Mesh Approaches”, *Ocean Dynamics*, v. 58, pp. 415–428, 2008.
- [79] CHAPMAN, D. C. “Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model”, *Journal of Physical oceanography*, v. 15, n. 8, pp. 1060–1075, 1985.
- [80] FLATHER, R. A. “A tidal model of the northwest European continental shelf”, *Mem. Soc. R. Sci. Liege*, v. 10, n. 6, pp. 141–164, 1976.
- [81] MARCHESIELLO, P., MCWILLIAMS, J. C., SHCHEPETKIN, A. “Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models”, *Ocean Modelling*, v. 3, n. 1–2, pp. 1 – 20, 2001. ISSN: 1463-5003. doi: 10.1016/S1463-5003(00)00013-5.
- [82] LIU, W. T., KATSAROS, K. B., BUSINGER, J. A. “Bulk Parameterization of Air-Sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface”, *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 36, n. 9, pp. 1722 – 1735, 1979. doi: 10.1175/1520-0469(1979)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2.
- [83] EGBERT, G. D., EROFEEVA, S. Y. “Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, n. 2, pp. 183–204, 2002.
- [84] GOOD, S., FIEDLER, E., MAO, C., et al. “The Current Configuration of the OSTIA System for Operational Production of Foundation Sea Surface

Temperature and Ice Concentration Analyses”, *Remote Sensing*, v. 12, n. 4, 2020. ISSN: 2072-4292. doi: 10.3390/rs12040720. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/4/720>>.

[85] CMEMS. “Global Ocean Physics Reanalysis”. Disponível em: <<https://10.48670/moi-00021>>. Acessado em 15 de setembro de 2022.

[86] SHADMAN, M., SILVA, C., FALLER, D., et al. “Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil”, *Energies*, v. 12, n. 19, 2019. ISSN: 1996-1073. doi: 10.3390/en12193658. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3658>>.

[87] ECMWF. “ERA-Interim: documentation”. Disponível em: <<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA-Interim%3A+documentation/#ERAInterim:documentation-Spatialgrid>>. Acessado em 10 de março de 2024.