UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Aline Mayara Santos Costa

# Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão São Luís - MA

São Luís - MA

2022

Aline Mayara Santos Costa

# Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão São Luís - MA

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Maranhão.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Maranhão

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto

São Luís - MA

2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Costa, Aline Mayara Santos.
Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão São Luís - MA / Aline Mayara Santos Costa. - 2022.
70 f.

Coorientador(a): Pedro Bezerra Leite Neto.
Orientador(a): Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís do Maranhão, 2022.

1. Baía de São Marcos. 2. Canal do Boqueirão. 3. Delft3D-FLOW. 4. Energia Maremotriz. 5. Energias Renováveis. I. Leite Neto, Pedro Bezerra. II. Mendez, Osvaldo Ronald Saavedra. III. Título.

Aline Mayara Santos Costa

# Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão São Luís - MA

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Maranhão.

São Luís - MA, 25 de fevereiro de 2022:

---

**Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez**
Orientador
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto**
Co-orientador
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Shigeaki Leite de Lima**
Examinador Interno
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho**
Examinador Externo
Universidade Federal de Itajubá

São Luís - MA
2022

*A minha mãe, valente, que hoje habita em mim.*
*As minhas irmãs, inabaláveis, que me deram propósito para lutar.*
*A minha madrinha e avó, personificações do amor, da doação e da bondade.*
*E a todas as pioneiras, que abriram caminho para as mulheres na sociedade.*

# Agradecimentos

Inicio meus agradecimentos exaltando a Universidade Federal do Maranhão[1], minha instituição formadora, responsável por oportunizar meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal, através dos recursos em mim investidos, em todo meu percurso desde a graduação. Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), todos os funcionários e todos os professores que contribuíram para minha formação.

Em segundo lugar agradeço ao meu orientador, professor Osvaldo Saavedra, pelos conhecimentos compartilhados, paciência, respeito e dedicação que teve à orientação, à esse projeto, e ao Instituto de Energia Elétrica (IEE). Me orgulho muito em lê-lo como orientador, não apenas pelo pesquisador notável que é, como também pelo empenho que põe em tudo que faz e/ou participa. Agradeço também ao meu coorientador, professor Pedro Bezerra, pela disponibilidade, atenção e cuidado que teve, principalmente nas etapas de revisão deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos aos professores Audálio Torres, Mauro Michelena e Felipe Pimenta, pelas abundantes contribuições, uma vez que ambos, com toda sua experiencia na área, se mostraram à disposição para ajudar, direcionando, pontuando, questionando e revisando a pesquisa no decorrer de seu desenvolvimento. Ao professor Shigeaki Lima agradeço pela luxuosa parceria, continua assistência e pelas ricas contribuições acadêmicas dentro e fora dos projetos desenvolvidos no Instituto. A todos os professores que tive o prazer de trabalhar, em campo e em laboratório, meus mais singelos agradecimentos.

Aos pesquisadores Anthea Czizeweski, Rômulo Soares, e em especial a Diego Cosme e meu grande amigo Rafael Veras, que caminharam comigo na construção, elaboração, e revisão de todas as produções científicas realizadas ao longo destes dois anos, agradeço pela colaboração acadêmica. Também ao pesquisador, parceiro e amigo, Leandro Massetti, pelo apoio acadêmico, suporte no convívio diário, pelo incentivo, carinho e paciência, lhe sou muito grata.

Agradeço à todos os meus colegas e amigos que integram o IEE, por tornarem minha caminhada acadêmica mais leve, rica e incrivelmente interessante, graças à diversidade, e o respeito pelas diferenças. Tive a oportunidade de participar de discussões e debates que me engrandeceram como pesquisadora e ser humano. Registro também a minha profunda gratidão por conviver com mulheres de muita fibra, mães, pesquisadoras "superpoderosas", trabalhadoras, e companheiras, pelas quais tenho muito orgulho e admiração. Da mesma forma agradeço a todos os meus amigos de fora do Instituto que, junto comigo, acreditaram

[1] <http://portais.ufma.br/PortalUfma/index.jsf/>

no meu sonho. De modo muito particular sou grata a Pati, Nati, Fran, Marcos, Anna e Leonilson, que influenciaram positivamente e diretamente o grande dia (minha defesa), vocês foram peças muito importantes.

A minha família agradeço, em especial a minha vó, que lá de longe, torce, reza e me incentiva. Agradeço também a Maria, minha tia que foi totalmente fundamental e se fez presente em todo meu caminhar, não tenho palavras para descrever o quanto sou grata por todo cuidado e amor que recebi. E a Brenda minha irmã, que segurou firme minha mão, principalmente nessa reta final, a ela agradeço por todo acessoamento, parceria e dedicação. Também a quem se fez família, Carluzia e Ortegal, que sempre me deram pronto suporte e apoio nos vários momentos em que precisei.

Por fim, ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo (PRH-ANP), agradeço pelo apoio financeiro, da mesma maneira que também agradeço ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF). Com reconhecimento aos professores Wendel Salles e Lyzette Moura pelo acompanhamento, gentileza, preocupação e incentivo durante todo o período letivo.

*"Tenho esperança de que um maior conhecimento do mar, que há milênios dá sabedoria ao homem, inspire mais uma vez os pensamentos e as ações daqueles que preservarão o equilíbrio da natureza e permitirão a conservação da própria vida."*

(Jacques Cousteau, oceanógrafo.)

# Resumo

A energia das marés é uma fonte alternativa para a geração de energia elétrica. O aproveitamento do comprovado potencial energético dos oceanos configura uma possibilidade promissora para produzir energia limpa e sem impactos ao meio ambiente. O Brasil apresenta um potencial maremotriz significativo, principalmente na Costa da Região Norte, que abrange os Estados do Amapá e Pará, e Costa da Região Nordeste, abrangendo apenas o Estado do Maranhão. O Canal do Boqueirão, localizado na Baía de São Marcos, no Maranhão, é reconhecido por sua grande variação do nível do mar e as fortes correntes de maré, o que evidencia um grande potencial maremotriz. Este trabalho propõe uma modelagem computacional para avaliação preliminar do potencial destas correntes no Canal. Foram realizadas também medições in loco, e os dados coletados foram utilizados para calibração do modelo, caracterização da área de estudo e análises de resultados, que compararam dados medidos e dados simulados. Como resultado foi possível obter curvas de velocidades capazes de estimar o potencial energético anual. A estimativa do potencial energético obtida pelo do modelo hidrodinâmico na região do Canal do Boqueirão foi de 1,7992 GWh/ano.

**Palavras-chave**: Energias Renováveis. Energia Maremotriz. Delft3D-FLOW. Baía de São Marcos. Canal do Boqueirão.

# Abstract

Tidal energy is an alternative source for generating electricity. Hence, the utilization of the energy potential of the oceans represents an approach to produce clean energy without impacting the environment. Brazil presents a notable tidal potential, mainly on the coast of the North Region, which comprises the states of Amapá and Pará, and the coast of the Northeast Region, covering only the state of Maranhão. The Boqueirão Channel, located in the São Marcos Bay, in Maranhão, is recognized for its major sea level variation and strong tidal currents, which denotes a large potential of tidal currents. Thus, this work proposes a computational modeling for preliminary assessment of the potential tidal currents in the Channel. In loco measurements were also carried out, and the data collected were used for model calibration, characterization of the study area, and analysis of the results, which compared measured and simulated data. A result, it was possible to obtain curves to estimate the annual energy potential. The estimate of the energy potential by the hydrodynamic model in the Boqueirão Channel region was 1.7992 GWh/year.

**Keywords**: Renewable Energies. Tidal Energy. Delft3D-FLOW. São Marcos Bay. Boqueirão Channel.

# Lista de ilustrações


Figura 1.1 – Localização da área de interesse. Mapa do Brasil, com destaque para o Estado do Maranhão 1.1.a; Mapa do Estado do Maranhão com destaque para a Grande São Luís 1.1.b; Destaque para as Ilhas de São Luís e do Medo 1.1.c. . . . . 16
Figura 2.1 – Ilustração das posições dos astros Lua, Sol e Terra, na formação das marés de sizígia (a) e (c) e quadratura (b) e (d). Tamanhos e distâncias são apenas ilustrativos. . . . . 20
Figura 2.2 – Formas de maré. (a) Curva de maré que ilustra a maré semidiurna, (b) mista e (c) diurna. . . . . 21
Figura 2.3 – Distribuição global das formas de marés. . . . . 22
Figura 2.4 – Distribuição global das amplitudes de maré. . . . . 22
Figura 2.5 – Ilustração dos componentes necessários para o funcionamento de uma usina maremotriz. . . . . 23
Figura 2.6 – Usina Maremotriz de La Rance, localizada na França. . . . . 24
Figura 2.7 – Usina Maremotriz do Lago Sihwa, Coreia do Sul. . . . . 24
Figura 2.8 – Usina de Annapolis Royal, Localizada na Nova Escócia, Canadá. . . . . 25
Figura 2.9 – Ilustração de componentes de uma usina maremotriz, com turbinas de eixo horizontal. (a) Turbina submersa. (b) Seta ilustrando o sentido da corrente. . . . . 26
Figura 2.10–Seaflow, instalado no Canal de Bristol, em Devon, Inglaterra. . . . . 27
Figura 2.11–Turbina de centro aberto OpenHydro no local de teste de marés EMEC. 28
Figura 2.12–Distribuição de amplitudes de maré ao longo do litoral brasileiro. Amplitude máxima da maré astronômica a partir da base de dados GOT (*Global Ocean Tides*). . . . . 29
Figura 3.1 – Local do fundeio para extração de dados (com marcador). Destaque para as Ilhas do Medo e de São Luís. . . . . 34
Figura 3.2 – ADCP. (a) Sonda unida ao peso, por uma corda. (b) Sensor unido à antena GPS (sistema de Posicionamento Global) em uma prancha. . . 35
Figura 3.3 – Sonda utilizada no fundeio para medições, com os sensores CTD. (a) Sonda unida ao peso, por uma corda. (b) Sensores condutividade, temperatura e profundidade, na sonda. . . . . 36
Figura 3.4 – Gráfico da Temperatura. Dados medidos com retirada dos valores nulos, 3.4a; Dados medidos mais interpolação para valores nulos, 3.4a; Gráfico com os subplots 3.4a e 3.4b, e escala temporal no eixo x, 3.4b. . . . . 37

Figura 3.5 – Gráfico da salinidade. Dados medidos com retirada dos valores nulos 3.5a; Dados medidos mais interpolação para valores nulos 3.5b; Gráfico com os subplots 3.5a e 3.5b e escala temporal no eixo x. . . . . 38
Figura 3.6 – Gráfico da amplitude de maré durante o fundeio. Dados brutos da profundidade (3.6a), média móvel dos dados brutos (3.6b) e ajuntamento dos dois gráficos anteriores para melhor visualização dos resultados (3.6c). 40
Figura 3.7 – Velocidade ao longo do perfil vertical no período medido. . . . . 41
Figura 3.8 – Localização do domínio numérico. Costa da América do Sul (a). Grade 1 (b). Grade 2 (c). . . . . 42
Figura 3.9 – Mapas com a localização do domínio numérico e aninhamento de grades. (a) Delimitação do Estado do Maranhão, com destaque para a grade 1. (b) Aninhamento das grades 1 e 2. . . . . 43
Figura 3.10–Dados batimétricos da grade 1. . . . . 44
Figura 3.11–Dados batimétricos da grade 2. . . . . 45
Figura 4.1 – Dados de simulação de amplitude de maré, durante o ano de 2021, em 6 dos pontos de observação presentes no Canal do Boqueirão. . . . . 47
Figura 4.2 – Localização espacial dos pontos de observação inseridos no Canal do Boqueirão, com a batimetria utilizada na simulação numérica. . . . . 48
Figura 4.3 – Dados de amplitude de maré durante o ano de 2021 em um dos pontos de observação do Canal do Boqueirão. . . . . 48
Figura 4.4 – Amplitudes de Maré nos meses de Janeiro e Dezembro, respectivamente, em relação às fases da Lua. . . . . 49
Figura 4.5 – Velocidade média ao longo do perfil vertical, período de 1 ano (2021). . 50
Figura 4.6 – Dados de velocidade média de maré, ao longo do perfil vertical, período de 1 ano (2021). . . . . 50
Figura 4.7 – Influência da mudança de sentido da maré, com relação a sua velocidade. (a) Variação do campo vertical de corrente. (b) Perfil médio de velocidade da corrente de maré. . . . . 51
Figura 4.8 – Dados simulados (a) de velocidade das correntes de maré ao longo dos meses de outubro, novembro e dezembro. (b) Divisão do mês de janeiro em marés de quadratura (Q1 e Q2) e de sizígia (S1 e S2), com destaque à maré de quadratura (Q1), período em que ocorreu o fundeio (c). . . . 52
Figura 4.9 – Comparação dos dados de velocidade média de corrente de maré. (a) Dados simulados, considerando o ponto de observação (39,65). (b) Dados medidos, obtidos no fundeio realizado no Canal do Boqueirão. . . . . 53
Figura 4.10–Apresentação dos dados gerados pelo modelo numérico, em comparação com os dados simulados, ao longo do ano de 2021. . . . . 54

Figura 4.11–Dados gerados pelo modelo numérico em comparação com os dados simulados. (a) Primeiro, (b) segundo, (c) terceiro e (d) quarto trimestre de 2021. . . . . 55
Figura 4.12–Comparação dos dados de velocidade média de corrente de maré, dados de medição extraídos do Canal do Boqueirão, dados simulados e resultado do modelo numérico. . . . . 56
Figura 4.13–Curvas da densidade de potência ao longo do perfil vertical do Canal do Boqueirão. . . . . 57
Figura 4.14–Densidade de potência média da coluna d'água ao longo de todo o tempo de medição. . . . . 58
Figura 4.15–Densidade de potência média da coluna d'água ao longo do período de um ano, a partir de extrapolação feita com dados de medição. . . . . 59
Figura 4.16–Densidade de potência média da coluna d'água, ao longo de 1 ano. . . 60

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Potencial Teórico dos diferentes tipos de energias oceânicas. . . . . 31
Tabela 2.2 – Recurso maremotriz disponível na Europa. . . . . 31
Tabela 2.3 – Principais usinas maremotrizes. . . . . 31
Tabela 3.1 – Relação entre os lançamentos do CTD e os dados de profundidade medidos. . . . . 39
Tabela 4.1 – Diferença de amplitudes de maré, na região do Canal do Boqueirão, entre pontos de observação e a simulação realizada. . . . . 49
Tabela 4.2 – Métricas de avaliação . . . . . 56
Tabela 4.3 – Estimação do potencial energético em 6 pontos de observação, no Canal do Boqueirão. . . . . 60

# Sumário


**1 INTRODUÇÃO . . . . . 15**
**1.1 Objetivos . . . . . 17**
**1.2 Organização do Trabalho . . . . . 17**

**2 ENERGIAS RENOVÁVEIS OCEÂNICAS . . . . . 19**
**2.1 Geração das Marés . . . . . 20**
**2.2 Energia de Correntes de Maré . . . . . 21**
**2.3 Dispositivos de geração de energia de maré . . . . . 23**
2.3.1 Energia da variação do nível de maré . . . . . 23
2.3.2 Energia de correntes de maré . . . . . 25
**2.4 Energias Oceânicas no Brasil . . . . . 28**
**2.5 Estimativa do Potencial Energético . . . . . 30**

**3 MODELAGEM COMPUTACIONAL HIDRODINÂMICA . . . . . 33**
**3.1 Introdução . . . . . 33**
**3.2 Caracterização da Área Alvo . . . . . 33**
**3.3 Campanha de medições . . . . . 35**
**3.4 Etapas da Simulação Computacional . . . . . 41**
3.4.1 Obtenção dos dados de entrada . . . . . 41
3.4.2 Elaboração do Domínio Numérico . . . . . 42
3.4.3 Geração dos Dados Batimétricos . . . . . 43
3.4.4 Configuração das Rodadas de Simulação . . . . . 46

**4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . . 47**
**4.1 Amplitude de Maré . . . . . 47**
**4.2 Velocidade das correntes de Maré . . . . . 50**
**4.3 Estimativa do Potencial Energético . . . . . 57**

**5 CONCLUSÃO . . . . . 61**
**5.1 Trabalhos Futuros . . . . . 62**
**5.2 Artigos Associados a Dissertação . . . . . 62**

**REFERÊNCIAS . . . . . 64**

# 1 Introdução

O mundo vivia um aumento gradual do consumo de energia elétrica. Hoje, principalmente com as tecnologias no processo industrial, e o advento da internet e todas as ferramentas que vieram a posteriori com seu uso, esse processo encontra-se acelerado. No Brasil, de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2020), os setores que mais consumem energia elétrica são os setores de transporte (32,7%), industria (30,4%), setor energético (11,2%), residencial (10,3%), terciário ou de serviços (5,1%) e agropecuário (4,9%). Entretanto, apesar de o maior consumo de energia não ser oriundo de atividades individuais, o crescimento populacional também possui um impacto significativo na alta do consumo de energia elétrica.

Necessita-se de energia para o desenvolvimento e prosperidade da sociedade de maneira ampla. Estudos comprovam a relação entre desenvolvimento econômico e social, e o acesso a energia elétrica (REDDY et al., 2000; ALTAY; TOPCU et al., 2015; REIS; SANTOS, 2006; BORGES, 2012; WERLANG; GELLER, 2018). De acordo com Mulugetta, Hagan e Kammen (2019), o acesso escasso a energia elétrica dificulta o alcance aos cuidados de saúde, reduz as oportunidades de educação, aumenta a desigualdade de gênero e limita a capacidade das pessoas de se engajarem na economia global.

Em contrapartida, com o aumento do consumo de energia, aumenta também a degradação do meio ambiente em consequência principalmente do uso de fontes de energias não renováveis, ou as chamadas fontes sujas de energia, que abastecem globalmente os setores da nossa sociedade. As fontes não renováveis, cuja queima gera poluentes na atmosfera, traz malefícios para o meio ambiente e para os seres vivos de modo geral. Elas são geradas por recursos naturais que não se renovam, ou seja, são esgotáveis, como o próprio nome sugere. Leite et al. (2011) afirmam que estes problemas têm desafiado o setor energético mundial a buscar novas fontes energéticas, sendo algumas destas bastante promissoras e relativamente recentes.

Uma das fontes de energia que ganharam destaque no rol das energias renováveis, de acordo com Dias et al. (2014), são as energias provenientes do oceano, as chamadas energias renováveis oceânicas. Apontamentos feitos pelos mesmos autores mostram que o oceano apresenta diversas possibilidades de extração de energia para fins de geração de eletricidade. As mais conhecidas são, energia das ondas, energia de correntes, que podem ser tanto correntes oceânicas, quanto correntes de maré, conversão de energia térmica oceânica e gradiente de salinidade (AGENCY-IRENA, 2020).

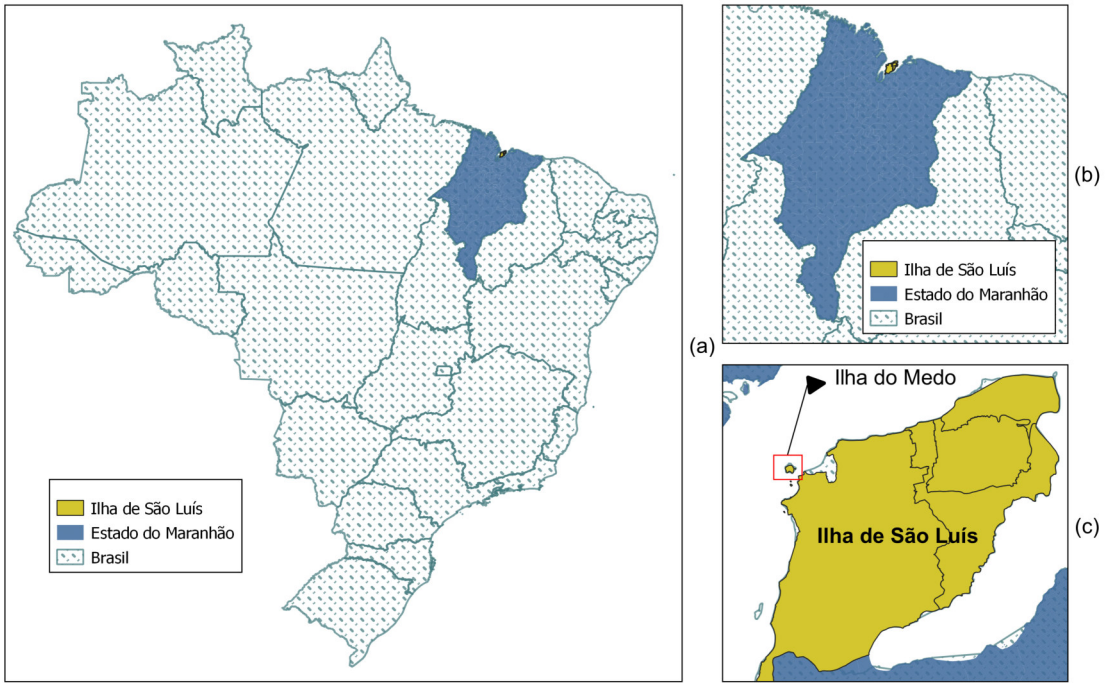
Dentre ambas, a energia proveniente das correntes de maré, gerada tanto pelas oscilações de suas correntes, quanto pela diferença de altura entre maré alta e maré baixa,

ganham destaque por serem fontes energéticas bastante promissoras dentre as fontes de energias renováveis (ASTARIZ; IGLESIAS, 2015). Sua baixa interferência em áreas costeiras, alto potencial teórico de geração e maior previsibilidade, devido à sua relação direta com fenômenos astronômicos, fazem desse tipo de fonte, uma fonte propícia à exploração (GOMES et al., 2019; LEITE; SAAVEDRA; RIBEIRO, 2017; JUNIOR et al., 2018). Dessa forma, a mesma poderia ser aproveitada para suprir demandadas de energia, garantindo a segurança do sistema elétrico.

Estudos preliminares apontam que o Brasil apresenta um potencial eletromaremotriz bastante significativo, principalmente na costa do Maranhão, Pará e Amapá. Esse potencial energético seria o equivalente a 16,8% do consumo nacional do Brasil em 2008, de acordo com dados do (BEN, 2020). As fortes correntes de maré que ocorrem nos estuários da Baía de São Marcos, no Maranhão e do Canal do Varador, no Amapá, fazem destas regiões promissoras para exploração dos recursos renováveis marinhos.

O litoral do Maranhão, além de possuir fortes correntes de maré, apresenta uma das maiores variações de amplitude de maré da costa brasileira, mostrando-se uma fonte promissora de recursos renováveis, de acordo com Czizeweski, Pimenta e Saavedra (2020). Um dos locais onde essas características são marcantes é o Canal do Boqueirão, localizado na Costa do Estado do Maranhão, Brasil (Figura 1.1.a), entre a Grande São Luís, também chamada de Ilha de Upaon-Açu (Figura 1.1.b) e a Ilha do Medo (Figura 1.1.c) (CASTRO et al., 2014). A Figura 1.1 ilustra sua localização.

Figura 1.1 – Localização da área de interesse. Mapa do Brasil, com destaque para o Estado do Maranhão 1.1.a; Mapa do Estado do Maranhão com destaque para a Grande São Luís 1.1.b; Destaque para as Ilhas de São Luís e do Medo 1.1.c.




Fonte: Elaborada pela autora.

Diante do cenário apresentado, nesta dissertação realizou-se uma modelagem computacional hidrodinâmica, com o intuito de avaliar o potencial de correntes de maré, de uma área de estudo específica, utilizando como ferramenta o *software* Delft3D. Para fins de estudo de caso, a região considerada foi o Canal do Boqueirão, por seu reconhecido potencial energético, localizado entre as Ilhas de São Luís e do Medo. Foram realizadas também medições in loco, e os dados coletados foram utilizados para calibração do modelo, caracterização da área de estudo e análises de resultados, que compararam dados medidos e dados simulados.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é realizar a caracterização energética de sítios na Baia de São Marcos e estimar o potencial energético das correntes de maré nessas áreas, levando em conta a morfologia dos estuários e utilizando como ferramenta de modelagem o *Software* Delft3D. Como estudo de caso o local escolhido foi o Canal do Boqueirão, no Maranhão, localizado entre as Ilhas do Medo e de São Luís. A escolha deste local se deu em virtude de seu reconhecido potencial energético.

### Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização da área de estudo, através de pesquisas bibliográficas e, posteriormente, de reconhecimento do local, oleta e análise de dados.
- Realizar, utilizando o *Software* Delft3D, a modelagem hidrodinâmica da área de estudo para avaliação preliminar do potencial de correntes de maré.
- Das medições realizadas in loco, utilizar os dados coletados para calibrar o modelo hidrodinâmico e realizar comparações entre os dados simulados e os dados coletados;
- Estimar o potencial energético, proveniente das correntes de maré, na região do Canal do Boqueirão através da simulação hidrodinâmica realizada.

## 1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 faz um apanhado das informações bibliográficas e fundamentação teórica a respeito das energias renováveis oceânicas e suas especificidades. No contexto brasileiro, são apresentadas informações quanto ao comportamento das correntes de maré principalmente nas regiões do Amapá, Pará e Maranhão, afim de realizar uma estimativa de seu potencial energético.

- O Capítulo 3 descreve as etapas da simulação hidrodinâmica, realizadas a partir do *Software* Delft3D. Este capítulo detalha também a coleta de dados feita no Canal do Boqueirão, elucidando a importância dessa momento, tanto para caracterização da área de estudo, quanto para a calibração e análise do modelo hidrodinâmico.

- O Capítulo 4 apresenta as análises e discussões realizadas, a partir da simulação hidrodinâmica, ao longo dos resultados apresentados. Foram realizadas análises também da região de estudo, de sua caracterização, e de seu potencial energético retratado no referencial bibliográfico deste trabalho.

- O Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho realizado, bem como as contribuições futuras e trabalhos científicos desenvolvidos ao londo do mestrado.

# 2 Energias Renováveis Oceânicas

Cerca de 70% da superfície do planeta é coberta por água. E é a enorme extensão dos oceanos que faz deste a maior reserva energética existente na Terra. Uma vez que esse tipo de energia renovável não foi amplamente explorado, como outras fontes renováveis tais como a eólica, solar, hídrica, biomassa, etc, cria-se uma expectativa com relação ao seu potencial e todas as etapas e tecnologias envolvidas no processo de geração.

As energias renováveis oceânicas são um conjunto de fontes energéticas renováveis, que podem ser divididas em cinco principais categorias (SIMÕES et al., 2017), que seguem listadas logo abaixo. Além disso, embora não seja o alvo deste trabalho, estas energias poderiam ser usadas não só para geração de eletricidade, como também para geração direta de água potável ou para suprir necessidades térmicas, como resfriamento, de acordo com Fleming (2012).

Os principais tipos de fontes de energia encontradas nos oceanos são:

- **Marés:** Energia de maré ou maremotriz. Delas podem ser extraídas dois tipos de energia: a cinética, proveniente das correntes marítimas, e a potencial, gerada a partir da diferença de altura entre as marés alta e baixa;
  - **Correntes (Marés e Oceânicas):** Energia cinética extraída das correntes marinhas. São resultado do movimento horizontal da água (LOBO et al., 2021). Essas correntes podem ser originarias tanto da maré, quanto do oceano;
- **Ondas:** Energia das ondas ou ondomotriz. Como o próprio nome sugere, é gerada a partir do movimento das ondas do mar. Estas são resultado dos ventos nas superfícies dos oceanos em conjunto com o movimento do planeta;
- **Gradiente de Temperatura:** Utiliza o diferencial de temperatura entre as águas quentes superficiais e as geladas águas profundas, para geração de energia. Também conhecida pela sigla OTEC, que vem do inglês "*ocean thermal energy conversion*";
- **Gradiente de Salinidade:** Também conhecida como energia osmótica. Aproveita-se a energia osmótica da diferença de salinidade entre a água doce dos rios e a água salgada para geração de energia.

Para o melhor entendimento deste trabalho, é necessário compreender como as marés são geradas e como os astros, principalmente o Sol e a Lua, influenciam seu comportamento. A Seção 2.1 faz referência a essas explanações.

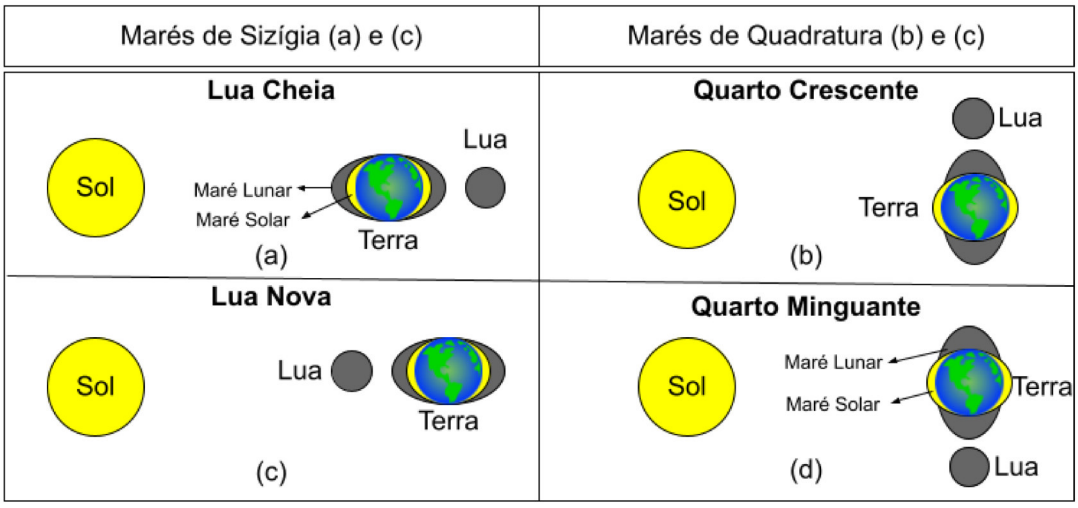
## 2.1 Geração das Marés

Supondo, de maneira grosseira, que os oceanos do planeta Terra não sofressem qualquer interferência astronômica externa, principalmente do Sol e da Lua, a maior força que agiria sobre as águas do planeta, seria a força gravitacional do próprio planeta. A água superficial seria, em qualquer ponto, atraída para o centro da Terra, o que faria desta uma superfície hídrica sem qualquer influência destes astros, ou seja, sem marés astronômicas.

Entretanto os oceanos sofrem não só influência do Sol e da Lua, como também de outros astros. Os dois primeiros ganham destaque por aspectos distintos. A Lua é o abjeto astronômico relevante mais próximo da Terra, e embora sua massa seja imensamente inferior a do Sol (a massa da Lua é de $7,3474271x10^{22}$ kg, enquanto a massa do Sol é de $1,988x10^{30}$ kg), este se encontra mais próximo do planeta, o que o torna o principal gerador das marés. A nível de observação, a atração exercida pelo Sol é de apenas 46% da exercida pela Lua. Já o Sol, mesmo à 150 milhões de quilômetros da Terra, ainda exerce influência significativa devido sua massa (MONTEIRO, 2002; OLIVEIRA; SARAIVA, 2004).

De acordo com Camargo e Harari (2017) as variações cíclicas das posições da Lua e do Sol, produzem oscilações no nível do mar. As diferentes posições desses astros em relação à Terra também receberam nomenclaturas e estas são explanadas na Figura 2.1 e nos tópicos que seguem.

Figura 2.1 – Ilustração das posições dos astros Lua, Sol e Terra, na formação das marés de sizígia (a) e (c) e quadratura (b) e (d). Tamanhos e distâncias são apenas ilustrativos.




Fonte: Elaborada pela autora.

- **Marés de Sizígia:** ocorrem nos períodos em que Terra, Sol e Lua estão alinhados, como o próprio nome sugere. Nesse cenário as marés possuem as maiores amplitudes,

devido a força gravitacional exercida pelos astros sobre elas. As fases da Lua que englobam esses períodos são lua nova e lua cheia.

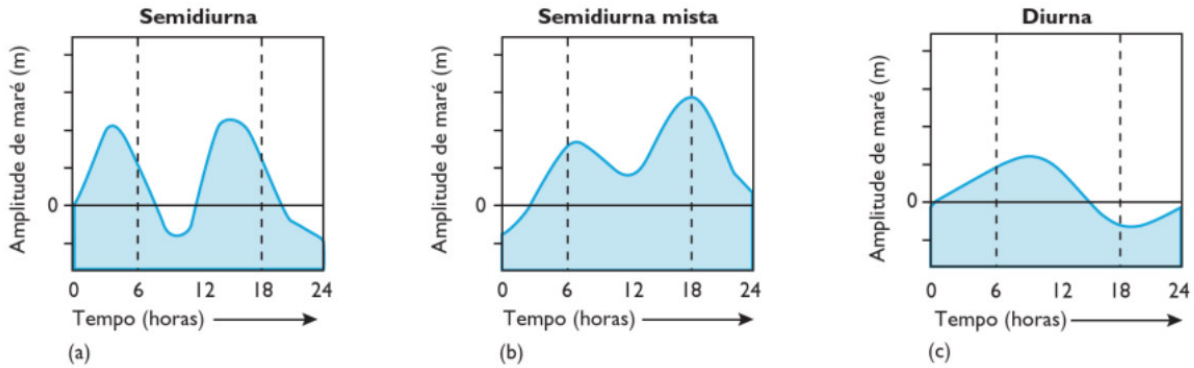
- **Marés de Quadratura:** ocorrem nos períodos em que Terra, Sol e Lua estão em quadratura (90° entre eles). Nesse cenário as marés possuem amplitudes pequenas, devido a interferência na força gravitacional pela posição em que os astros se encontram. As fases da Lua que englobam esses períodos são lua crescente e minguante.

Para descrever as características das oscilações de maré em um determinado local, alguns aspectos descritivos são utilizados em escala global. Quando um nível máximo é atingido em um ciclo de maré, o chamamos de maré alta ou preamar. Quando um nível mínimo é atingido, o chamamos de maré baixa ou baixa-mar. A diferença entre os níveis de preamar e baixa-mar é chamada de *range* de maré. E por último, a diferença entre preamar e o nível médio do mar é chamada de amplitude de maré.

## 2.2 Energia de Correntes de Maré

Compreende-se por energia de correntes de maré a energia gerada a partir do movimento horizontal da água, influenciado principalmente por fatores meteorológicos. Entretanto para que se possa pensar em tecnologias e estratégias para geração de energia através das correntes de maré é necessário conhecer seu comportamento. As marés possuem comportamentos distintos em cada lugar da Terra. Esses comportamentos dizem respeito principalmente à forma e à variação da maré, mas também a natureza do local.

Figura 2.2 – Formas de maré. (a) Curva de maré que ilustra a maré semidiurna, (b) mista e (c) diurna.

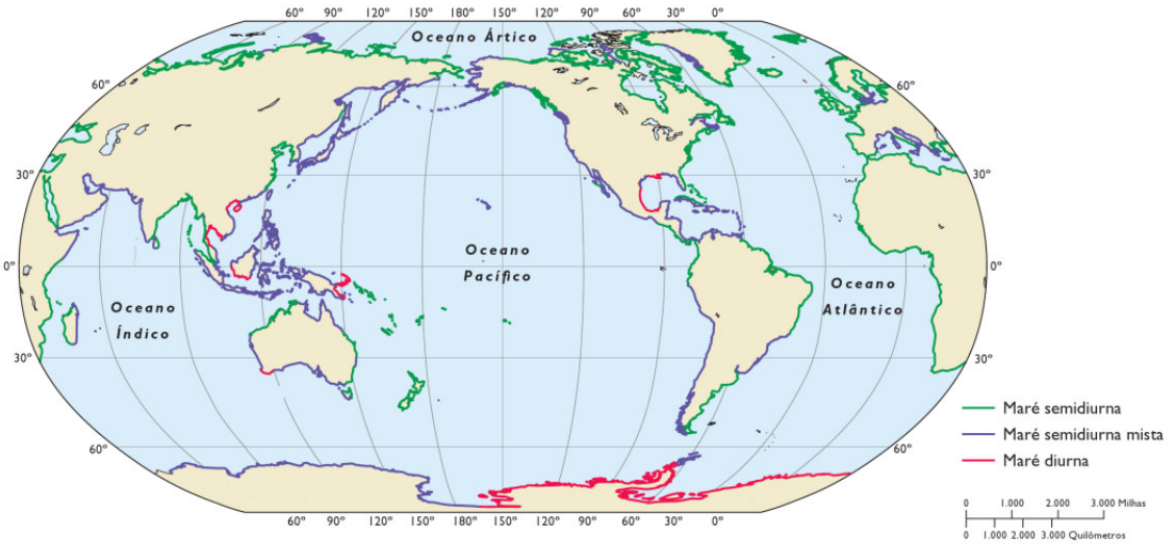



Fonte: Castro e Huber (2012).

De acordo com Melo (2017) o tipo de maré refere-se à forma característica da subida e descida do nível do mar tal como representado pelas curvas de maré na Figura 2.2. Estas podem ser diurnas, quando no dia há apenas uma maré baixa e uma maré alta, semidiurnas, quando há no dia duas marés altas e duas marés baixas, e por fim mistas,

que carregam características das marés diurnas e semidiurnas (CASTRO; HUBER, 2012). A Figura 2.3 ilustra a distribuição das formas de maré ao longo do planeta.

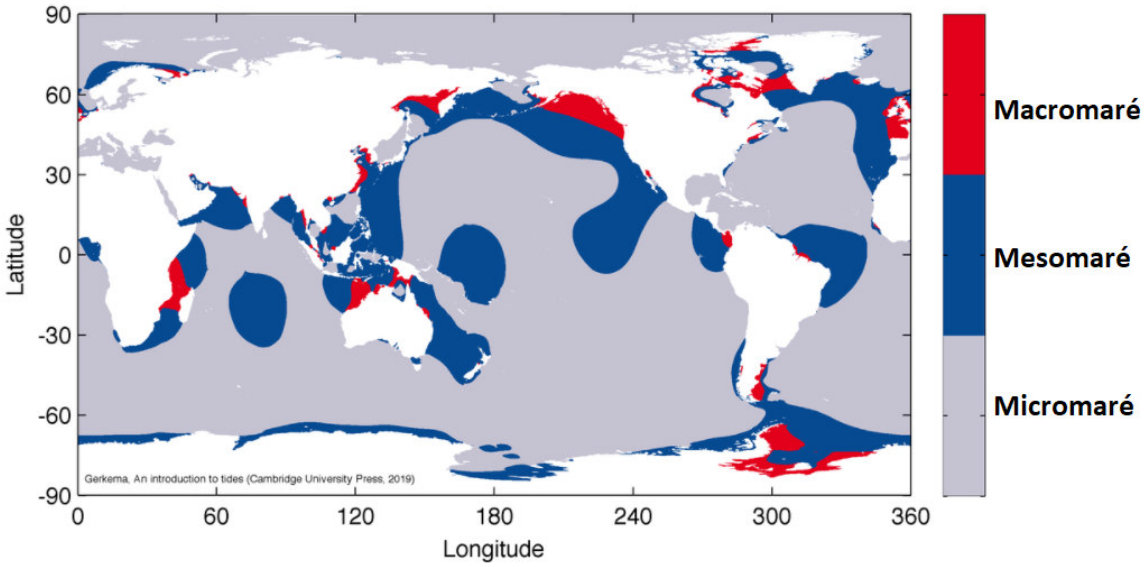
Figura 2.3 – Distribuição global das formas de marés.




Fonte: Castro e Huber (2012).

As variações ou amplitudes de maré, podem ser classificadas em micromarés, que acontece quando a diferença da preamar e a baixa-mar é menor que 2 metros, em mesomarés, que ocorre quando essa diferença está entre 2 e 4 metros, e em macromarés, quando a diferença está entre 4 e 6 metros, como ilustra a Figura 2.4. Algumas literaturas usam o termo hipermarés para classificar amplitudes maiores que 6 metros (MELO, 2017), outras apenas utilizam o termo macromarés para amplitudes acima de 4 metros (SEGAR, 1998).

Figura 2.4 – Distribuição global das amplitudes de maré.




Fonte: Modificado de Dronkers (2005).

O comportamento das correntes de maré também possui influência da morfologia do local. Os locais próximos à costa, ou com alguma barreira física, tendem a se comportar em sentidos distintos na enchente e na vazante.

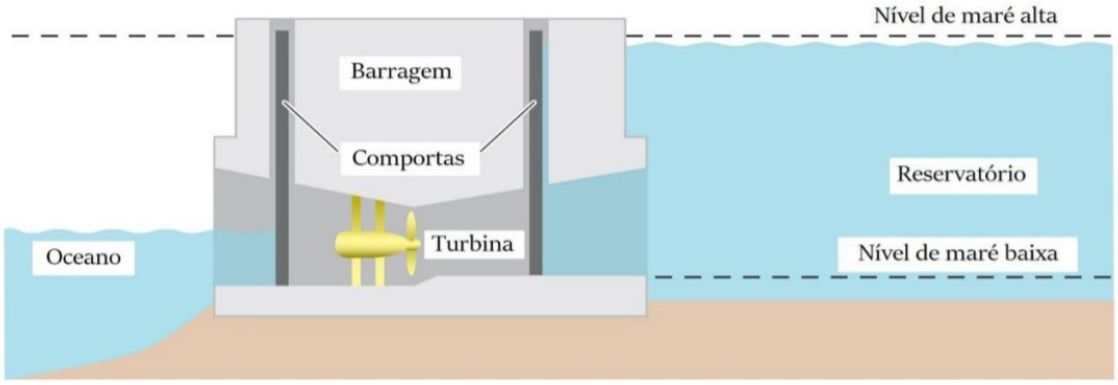
## 2.3 Dispositivos de geração de energia de maré

A energia das marés ou energia maremotriz, é uma forma de geração de eletricidade obtida a partir das alterações de nível das marés, através de barragens (que aproveitam a diferença de altura entre as marés alta e baixa) ou através de turbinas submersas (que aproveitam as correntes marítimas) (FLEMING, 2012). Esta seção dedica-se a apresentar os dispositivos utilizados para exploração destas.

### 2.3.1 Energia da variação do nível de maré

O oceano possui energia potencial proveniente das amplitudes de maré, que ocorrem com menos ou mais intensidade, principalmente de acordo com os fenômenos astronômicos e as características do local, em cada região do planeta (Figura 2.4). O aproveitamento dessa energia pode ser feito nos dois sentidos. Quando a maré enche a água passa pela turbina, gerando energia, e enchendo o reservatório. Da mesma forma, na maré vazante a água esvazia o reservatório, passando novamente através da turbina, agora em sentido contrário ao do enchimento, e produz novamente energia elétrica. A Figura 2.5 ilustra cada um dos componentes desse sistema.

Figura 2.5 – Ilustração dos componentes necessários para o funcionamento de uma usina maremotriz.




Fonte: Selin (2019), Cisco et al. (2020)

Uma das plantas de geração mais antigas, e também mais conhecidas por esse tipo de tecnologia, é a Usina Maremotriz de La Rance (vide Figura 2.6), que localiza-se no estuário do Rio francês Rance, em Bretanha. A usina foi construída entre 1961 e 1967. De acordo com Takenouchi et al. (2006) a barragem que fecha o estuário do Rio Rance, tem 720 metros de largura e armazena uma área de 22km$^2$ de água. A barragem possui ainda

24 turbinas de bulbo[1] reversíveis de 10MW em operação e uma diferença de maré de 13,5 metros, o que é responsável por 240 MW de geração (SIFFERT, 2010).

Figura 2.6 – Usina Maremotriz de La Rance, localizada na França.

Fonte: Tripadvisor (2018).

Figura 2.7 – Usina Maremotriz do Lago Sihwa, Coreia do Sul.

Fonte: ANDRITZ Hydro (2021).

[1] A turbina bolbo (ou bulbo) é uma combinação integral coaxial de uma turbina hidráulica com um gerador elétrico.

Outra usina que está em funcionamento desde 2011 e superou a capacidade de geração de La Rance, é a Usina Maremotriz do Lago Sihwa (vide Figura 2.7), que localiza-se na Coreia do Sul, cidade de Ansan. Considerada a maior usina maremotriz do mundo, possui capacidade de geração de 254 MW. Sua barragem possui 10 turbinas de bulbo submersas de 25,4 MW em operação, e uma diferença de maré média de 5,6 metros, com valores de até 7,8 metros na maré de sizígia. O formato de geração de suas turbinas acontece apenas na maré enchente, sendo que na maré vazante, o lago é esvaziado através de um conjunto de comportas. De acordo com Kim et al. (2012) essa abordagem não convencional de aproveitamento somente na maré enchente foi escolhida para equilibrar uma mistura complexa de considerações existentes sobre uso da terra, uso da água, conservação, meio ambiente e geração de energia.

A Usina de Annapolis Royal (vide Figura 2.8), que localiza-se na Nova Escócia, Canadá, foi construída na década de 80, utilizando-se uma barragem já existente no Rio Annapolis, e estava em operação desde 1984. Sua potência instalada era de 20 MW e possuía uma amplitude de maré de 17 metros. De acordo com Clark (2007), por questões ambientais o nível do reservatório manteve-se baixo do planejado. Apesar desta restrição operacional, a usina era despachada comercialmente e foi considerada um projeto bem sucedido.

Figura 2.8 – Usina de Annapolis Royal, Localizada na Nova Escócia, Canadá.

Fonte: Fabio Roques (2016).

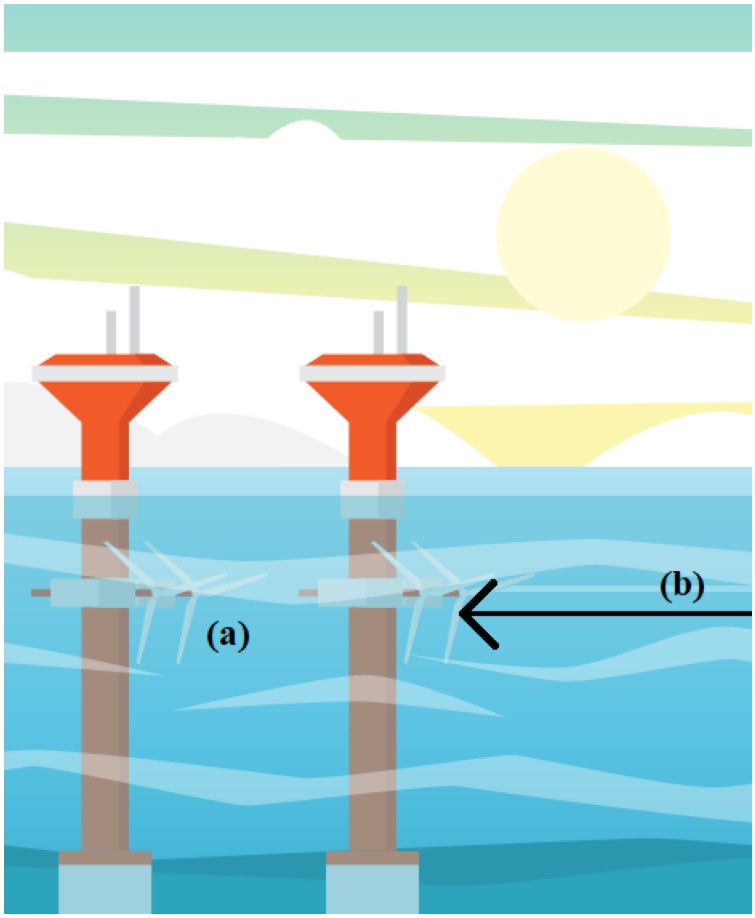
### 2.3.2 Energia de correntes de maré

Outra forma de exploração da energia de maré ocorre através de suas correntes. De maneira muito similar à geração de energia através de turbinas eólicas, as usinas de

aproveitamento das correntes de maré são instaladas e permanecem submersas no leito do estuário. As turbinas são acionadas de acordo com o fluxo de água que entra e sai do estuário durante a variação das marés (SIFFERT, 2010).

As formas mais comuns para extração de energia de corrente de maré, com relação às turbinas, são as turbinas de corrente de maré de eixo horizontal, que atuam de forma paralela ao fluxo da água (Figura 2.9). E as turbinas de corrente de maré de eixo vertical, perpendicular à direção do fluxo de água.

Figura 2.9 – Ilustração de componentes de uma usina maremotriz, com turbinas de eixo horizontal. (a) Turbina submersa. (b) Seta ilustrando o sentido da corrente.




Fonte: Modificado de Vecteezy (2016).

Um exemplo desse tipo de sistema é o conversor Seaflow (Figura 2.10), instalado em 2003 no Canal de Bristol, na Inglaterra, tem uma capacidade de 300kW e opera desde a sua instalação (WESTWOOD, 2004). O conversor possui duas pás de 5,5 metros cada, e um rotor de eixo horizontal. De acordo com Siffert (2010), possui orientação fixa, mas o rotor gira 180°. Esse mecanismo permite que este seja usado tanto na preamar quanto na baixa-mar.

Outro marco importante na geração de energia de correntes de maré foi o sistema OpeHydro, instalado em maio de 2008. A turbina de centro, ilustrada na Figura 2.11,

possui capacidade de 250 kW. A turbina está instalada no Centro Europeu de Energia Marinha (*European Marine Energy Centre - EMEC*), em Orkney, na Escócia. A turbina não oferece riscos à navegação pois está instalada no leito do estuário sendo totalmente invisível na superfície.

Figura 2.10 – Seaflow, instalado no Canal de Bristol, em Devon, Inglaterra.

Fonte: MadeBrave®. (2021).

Estudos mostram que o potencial energético europeu, no que tange as energias oceânicas, está distribuído principalmente entre o Reino Unido com 48%, França com 42% e Irlanda com 8% (ELGHALI; CHARPENTIER; BENBOUZID, 2013; UIHLEIN; MAGAGNA, 2016; JOHNSTONE et al., 2013). Entretanto alguns problemas devem ser solucionados para que se tenha uma implantação de turbinas de maneira eficiente. De acordo com Tawil, Charpentier e Benbouzid (2017) existem dificuldades operacionais ligadas à instalação de turbinas em locais profundos, devido a diminuição gradual da velocidade de corrente, e aos gastos atrelados à projetos oceânicos profundos.

Alguns trabalhos levam em conta tais questões, como o trabalho de Tawil, Charpentier e Benbouzid (2017). Eles realizaram um método de caracterização energética de sítios de maré. A área de estudo utilizada para esse método foi uma região próxima à Ilha Ouessant, localizada na Bretanha, França. O estudo tem como objetivo encontrar a localização ideal para a instalação de turbina de maré. Os autores avaliam as correntes de maré em diferentes locais e horários específicos da zona estudada, para que então a energia

possa ser medida em diferentes tipos de turbina. Como resultado os autores apontaram que, com relação a área de estudo, foi possível encontrar o melhor ponto para o posicionamento das turbinas e a turbina que melhor funcionaria nesse ambiente. Os dados obtidos através do método utilizado conferem com os dados medidos no local.

Figura 2.11 – Turbina de centro aberto OpenHydro no local de teste de marés EMEC.

Fonte: Brookes-Roper/Archive (2021).

Anos de estudo e implantação mostraram que a maneira mais direta de desenvolver energia de corrente de maré é através da adaptação de turbinas eólicas de eixo horizontal. A geração em larga escala também requer turbinas totalmente submersas e sistemas *offshore* grandes e robustos, que de acordo com Rocha (2020) só tornaram-se viáveis agora.

## 2.4 Energias Oceânicas no Brasil

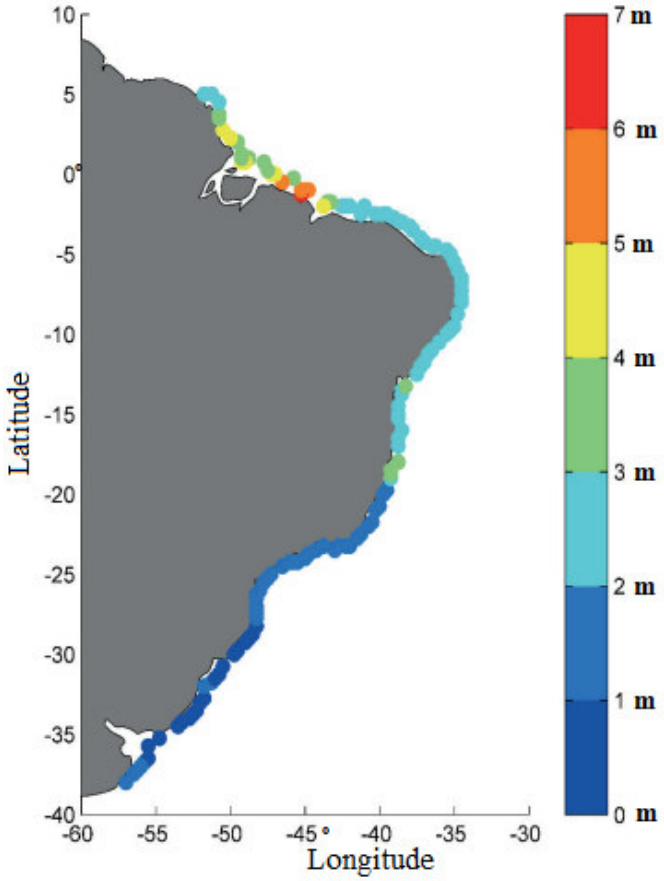
De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), seja por questões de ocupação do território brasileiro, ou devido a tendência da população mundial em habitar áreas litorâneas, o Brasil possui 26,6% da população em municípios da zona costeira, o equivalente a 50,7 milhões de habitantes. Isso explica a maior quantidade de empresas industriais, comerciais e também atividades, direta ou indiretamente, ligadas ao turismo, produção de petróleo e gás natural, pesca e serviços que atendem à dinâmica econômica gerada por esses municípios e outros próximos (RIBEIRO et al., 2020; IBGE, 2017; OLIVEIRA et al., 2016).

Levando em consideração as proporções do Brasil, um país de 8.516.000 $km^2$, a ocupação de quase um terço da população no litoral é um valor muito expressivo. Se levássemos em consideração a faixa de território que se estende por 200 km a partir do litoral, esse valor poderia chegar a quase metade da população, de acordo com Fleming (2012).

O início desta seção percorre as características geográficas e econômicas do Brasil para que se possa criar uma conexão entre essas variáveis e as características oceanográficas do país. O Brasil possui um litoral com uma das maiores variações de correntes de maré do mundo, o livro Thurman e Trujillo (2004) cita a Cidade de São Luís do Maranhão, no Brasil, como uma das cidades entre as 21 principais, que possuem estuários com potencial para geração de energia das marés do mundo.

Mas está não é a única cidade mencionada, estudos apontam o litoral norte e nordeste do Brasil como uma das regiões com maior amplitude de maré da América do Sul, e a maior amplitude de maré do Brasil, como ilustra a Figura 2.12 (FLEMING, 2012; MUEHE et al., 2006; CAMARGO; HARARI, 2017; EPE, 2020; LEITE et al., 2011).

Figura 2.12 – Distribuição de amplitudes de maré ao longo do litoral brasileiro. Amplitude máxima da maré astronômica a partir da base de dados GOT (*Global Ocean Tides*).




Fonte: Modificada de González et al. (2018).

Ainda de acordo com Camargo e Harari (2017) o Brasil possui locais considerados adequados para construção de usinas de energia de maré, devido as grandes alturas de marés observáveis, como na foz do Rio Mearim, no Maranhão, na foz do Tocantins, Estado do Pará e na margem esquerda da foz do Amazonas, no Amapá. De acordo com o autor, o impacto ambiental nesses locais seria mínimo, pois as águas represadas pelas barragens não inundariam terras novas, apenas aquelas que a própria maré já cobre.

Outros trabalhos realizados acerca das regiões com maior amplitude de maré do Brasil (Figura 2.12), trazem resultados que corroboram com os estudos anteriores. O trabalho de Santos et al. (2006), por exemplo, tem como área de estudo a região costeira amazônica, no Brasil, e passa pelos Estados do Pará e Amapá. De acordo com ele, em regiões tropicais, as marés apresentam formas semidiurnas e mistas e suas amplitudes variam de micromarés até macromarés (Figura 2.3). Em regiões como essas, a morfologia dos oceanos, possui um papel decisivo no tipo e na amplitude das marés (SANTOS et al., 2006).

Já o trabalho de Czizeweski, Pimenta e Saavedra (2020) elabora um modelo hidrodinâmico 3D que simula a circulação das marés no Golfo do Maranhão, para estudar sua atividade e estimar a energia associada ao fenômeno. Após as simulações, foi concluído que o Golfão Maranhense é uma área pertinente para investigação de energia de marés. Os autores afirmam ainda que o estuário maranhense é longo, e apresenta variações significativas da fase das marés, o que permite uma disposição geográfica das turbinas para reduzir o tempo de inatividade e garantir maior eficiência na produção de energia.

Outro trabalho realizado no Estado do Maranhão, dessa vez com foco na usina maremotriz, é o trabalho de Leite et al. (2012). Os autores apresentam uma metodologia para a estimação de indicadores energéticos de uma usina maremotriz, desenvolvendo uma estratégia de despacho, baseada em Algoritmos Genéticos, que visa maximizar a energia total gerada pela usina, através do despacho ótimo das turbinas, durante o processo de geração. O estudo de caso foi realizado o estuário do Bacanga, da cidade de São Luís. Como resultado o trabalho aponta aproveitamento significativo do potencial do estuário e ainda melhorias, em termos de eficiência, dos equipamentos eletromecânicos disponíveis atualmente.

## 2.5 Estimativa do Potencial Energético

No mundo, o potencial de geração de energia proveniente dos oceanos é elevado, devido principalmente a extensão do planeta coberta por água, e aos fenômenos astronômicos. Este valor está estimado entre entre 500 a 1000 TWh/ano, equivalente de 5 a 10 vezes o potencial de geração do oeste Europeu. Isto representa de 3% a 7% da energia total dissipada pelas marés no mundo.

Entretanto, apenas uma parte desse potencial pode ser explorado devido os requisitos necessários para geração de cada tipo de energia, restrições econômicas e tecnológicas (CHARLIER, 2003). A Tabela 2.1 detalha o potencial energético teórico mundial, dos diferentes tipos de energias oceânicas.

Tabela 2.1 – Potencial Teórico dos diferentes tipos de energias oceânicas.

| **Tipo de Energia Oceânica** | **TWh/ano** | **Ej/ano** |
|---|---|---|
| Maré | 22000 | 579 |
| Ondas | 18000 | 65 |
| Gradiente de Temperatura | 2000000 | 7200 |
| Gradiente de salinidade | 23000 | 83 |
| Total | 2063000 | 7400 |

Fonte: Charlier (2003)

Na Europa, por exemplo, o estudo feito por (FLEMING, 2012) aponta que alguns países se destacam com relação a geração de energia proveniente de fontes oceânicas. A Tabela 2.2 detalha o recurso maremotriz disponível na região.

Tabela 2.2 – Recurso maremotriz disponível na Europa.

| **País** | **Capacidade (MW)** | **Geração (TWh/ano)** | **Europa (%)** |
|---|---|---|---|
| Reino Unido | 25,2 | 50,2 | 47,7 |
| França | 22,8 | 44,4 | 42,1 |
| Irlanda | 4,3 | 8 | 4,6 |
| Holanda | 1 | 1,8 | 1,8 |
| Alemanha | 0,4 | 0,8 | 0,7 |
| Espanha | 0,07 | 0,13 | 0,1 |
| Total | 63,8 | 105,4 | 100 |

Fonte: Elghali, Charpentier e Benbouzid (2013), Uihlein e Magagna (2016), Johnstone et al. (2013)

Tabela 2.3 – Principais usinas maremotrizes.

| **País** | **Usina Maremotriz** | **Capacidade (MW)** | **Funcionamento** |
|---|---|---|---|
| Canadá | Annapolis | 20 | 1984 |
| China | Jiangxia | 3,2 | 1980-2019 |
| Rússia | Kislaya Guba | 1,7 | 1968 |
| França | La Rance | 240 | 1966 |
| Coreia do Sul | Sihwa Lake | 254 | 2011 |
| Reino Unido | Strangford Lough SeaGen | 1,2 | 2008 |
| Coreia do Sul | Uldolmok | 1,5 | 2009 |

Fonte: BORGES (2012), Uihlein e Magagna (2016)

De maneira mais ampla os trabalho de BORGES (2012), Uihlein e Magagna (2016), detalham na Tabela 2.3 as principais usinas maremotrizes do mundo, valores de geração e período de funcionamento. As usinas de La Rance, do Lago Sihwa, e de Annapolis Royal, por exemplo, citadas neste trabalho, possuem uma diferença de maré satisfatória, para um critério de disponibilidade econômica. A Tabela 2.2 aponta algumas destas usinas.

No Brasil dois tipos de geração de energia ganham destaque, ondomotriz e maremotriz. Com relação à primeira, um projeto piloto de utilização de energia do movimento das ondas, foi implementado em Pecém, no Ceará. Estudos realizados indicam uma estimativa para Costa do Ceará de 7,7 $KW/m^2$. Estefen et al. (2007), admitem uma capacidade máxima de aproveitamento do recurso das ondas entre 10% e 15% do total disponível. Portanto, uma estimativa de aproveitamento anual equivalente a 50 TWh para na região sul do país.

Já o potencial de geração de energia e maremotriz chama atenção, principalmente as Regiões Norte e Nordeste do Brasil, devido a grande variação do nível do mar e as fortes correntes de maré. Dados do (BEN, 2020) apontam que o Brasil apresenta um potencial maremotriz bastante significativo, principalmente na costa do Maranhão, Pará e Amapá. Esse potencial energético seria o equivalente a 16,8% do consumo nacional do Brasil em 2008, de acordo com dados do (BEN, 2020).

# 3 Modelagem Computacional Hidrodinâmica

## 3.1 Introdução

Os tópicos a seguir, mencionados no Capítulo 3, descrevem as etapas realizadas neste trabalho para implementação de um modelo computacional hidrodinâmico capaz de estimar o potencial de correntes de maré, no Canal do Boqueirão.

- Estudo preliminar da região de interesse: a Seção 3.2 reúne informações da área alvo, como também é chamada a região de interesse, afim de caracterizá-la. Nesta etapa, os dados obtidos na literatura também são comparados com os medidos, ao longo do trabalho.
- Levantamento de dados no local: esta etapa do trabalho é apresentada na Seção 3.3, nela constam os dados brutos e algumas análises preliminares realizadas a partir da medição de dados no local. Em uma embarcação fundeada, no Canal do Boqueirão, estavam os equipamentos utilizados na medição.
- Simulações numéricas: a Seção 3.4 apresenta todas as etapas da simulação hidrodinâmica, que utilizou-se da ferramenta computacional Delft3D-FLOW. Os dados obtidos para realização desta etapa provém de modelos globais, dados medidos, dados de cartas náuticas e valores da literatura;
- Construção do modelo: nesta etapa, dados medidos, extraídos da região de interesse, são utilizados para construção do modelo computacional hidrodinâmico, para o período de 1 ano.

## 3.2 Caracterização da Área Alvo

A região de interesse está localizado na Costa do Estado do Maranhão, Brasil (Figura 1.1a), entre a Grande São Luís, também chamada de Ilha de Upaon-Açu (Figura 1.1a) e a Ilha do Medo (Figura 1.1c), como mostrado no Capítulo 1. Na Figura 3.1, o local das medições está destacado por um marcador vermelho.

As coordenadas do local formam uma pequena área que vai de $2°31'44.8"S$ a $2°31'49.1"S$ (latitude) e $44°21'42.8"W$ a $44°21'42.2"W$ (longitude), em meio ao Canal do Boqueirão, que é um canal natural que possui pouco mais de 900 metros de largura, e profundidades que variam de 20 a 30 metros (CASTRO et al., 2014).

Figura 3.1 – Local do fundeio para extração de dados (com marcador). Destaque para as Ilhas do Medo e de São Luís.

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com as tabelas das estações maregráficas e tábuas de maré, do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil[1], as amplitudes de marés na área de interesse possuem médias de preamares de sizígia (MHWS) de 6,02 metros, e médias das preamares de quadratura (MHWN) 4,87 metros, em São Luís. Já no Canal do Boqueirão a maré possui grande amplitude, podendo atingir 6,5 metros de altura, de acordo com os trabalhos de MOLION e Bernardo (2002), Dillenburg e Hesp (2008).

O regime de maré, com uma duração de cerca de 25 horas, atinge a velocidade máxima de corrente na terceira hora de enchente e na terceira hora de vazante, decrescendo proporcionalmente até as estofas de preamar e baixa-mar. Soares (2015) descreve sobre a Baía de São Marcos, apontando que as velocidades de correntes de maré alcançam até 2,5 m/s no Canal do Boqueirão. Estudos realizados neste trabalho após o período de fundeio, para extração e análise de dados, chegaram à mesma velocidade na preamar, mesmo no período de quadratura.

Na parte mais profunda da região de interesse ocorrem constantes mudanças. Essas transformações acontecem devido às grandes amplitudes e fortes correntes de marés, que são características responsáveis pelo transporte de sedimentos e migração de barras arenosas no fundo do canal. Segundo Viana (2000), durante a maré enchente, a hidrodinâmica conduz

[1] <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/dados-de-mare-mapa>

a ação das ondas da faixa do litoral para o mar, enquanto há sizígia, a elevação do nível do mar possibilita a formação de correntes que movimentam os sedimentos arenosos. Segundo o mesmo autor, durante a maré vazante, a ação das correntes manifesta-se em sentido contrário, ao longo dos canais de marés no interior da baía de São Marcos (MORAIS, 1977).

## 3.3 Campanha de medições

Foram realizadas, nos os dias 09 e 10 de novembro de 2021, medições contínuas de perfis verticais de velocidade e direção de correntes, no local indicado pela Figura 3.1, durante um ciclo completo de 25 horas.

A equipe embarcada para a realização da medição de dados foi formada por sete integrantes, entre pessoas diretamente ligadas ao projeto, e tripulantes responsáveis pela embarcação. A embarcação utilizada para realização da campanha de medição foi a Tchegla Insc.: 1210143607. Já os dispositivos utilizados foram, um Perfilador Acústico de Correntes por Doppler (ADCP) e, simultaneamente, uma sonda multiparâmetros com sensores de temperatura, salinidade e turbidez, exibidos nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

Figura 3.2 – ADCP. (a) Sonda unida ao peso, por uma corda. (b) Sensor unido à antena GPS (sistema de Posicionamento Global) em uma prancha.

(a) (b)

Fonte: Elaborada pela autora.

O ADCP, do inglês, *acoustic doppler current profiler*, é um medidor de corrente hidroacústica, similar aos sonares, utilizado para medir as velocidades de correntes ao longo de toda a profundidade do canal usando o efeito Doppler, que se define como a propriedade refletiva do som nas partículas dentro da coluna d'água (SIMPSON, 2001; BRUMLEY et al., 1991).

O dispositivo ADCP utilizado na campanha de medição foi a sonda acústica da marca Sontek[2] de frequência 100 kHz (vide, Figura 3.2a), e possui frequência de aquisição de dados de 60 segundos. Possui ainda um referenciador de fundo (conhecido como botton track) e localizador geográfico do tipo GPS. A sonda foi anexada a uma prancha , e esta foi fixada na embarcação fundeada, conforme mostrado na Figura 3.2b. As medições de velocidade e profundidade foram obtidas utilizado os 3 eixos, X, Y e Z (Norte/Sul, Leste/Oeste e Up/Down, respectivamente).

Figura 3.3 – Sonda utilizada no fundeio para medições, com os sensores CTD. (a) Sonda unida ao peso, por uma corda. (b) Sensores condutividade, temperatura e profundidade, na sonda.

(a) (b)

Fonte: Elaborada pela autora.

Já a sonda multiparâmetros utilizada foi o modelo YSI EXO1[3](vide Figura 3.3a). Esta possuía os sensores de condutividade, temperatura e profundidade (vide Figura 3.3b). O dispositivo é comumente chamado de CTD, do inglês *conductivity, salinity e depth*. Através dos sensores que possui, consegue medir o grau de salinidade da água,

[2] <https://www.sontek.com/ocean-coastal-monitoring>
[3] <http://aquasense.igd.unb.br/equipamentos/campo/ctd/>

temperatura e pressão. Os valores obtidos de condutividade e profundidade podem ser convertidos em salinidade e pressão (STEWART, 2008; ENCARNACION; JOHNSTONE; ORDONEZ-SANCHEZ, 2019).

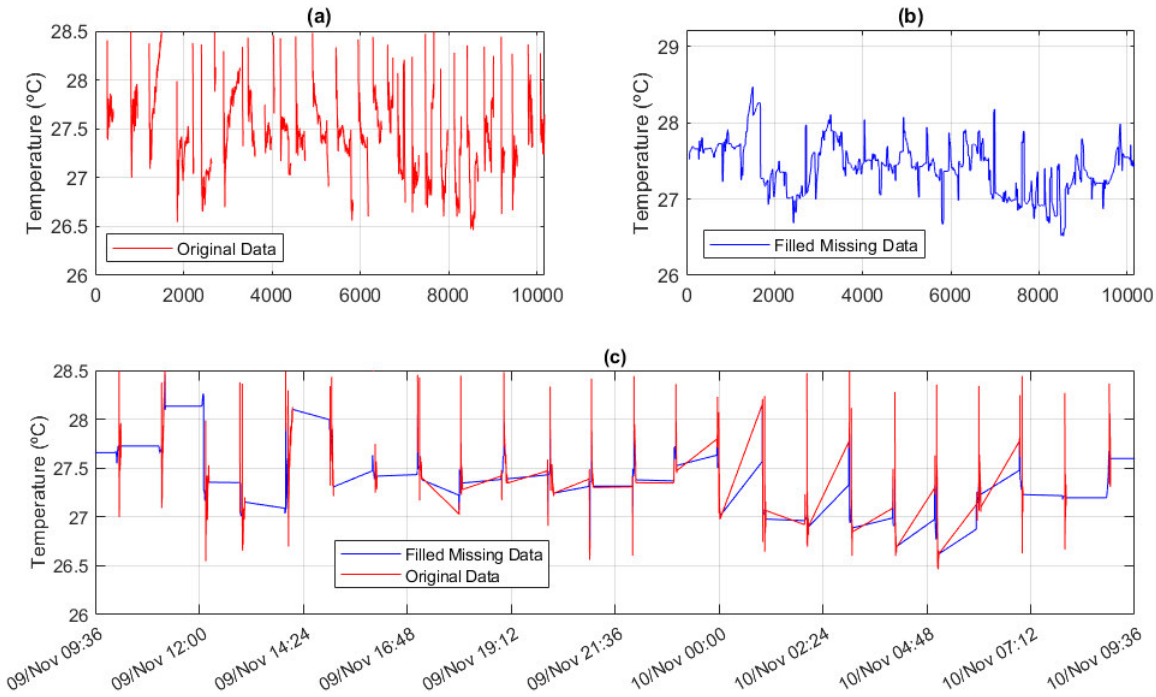
O modelo do sensor CTD utilizado neste trabalho tem capacidade de armazenamento interno de memória 512 MB, comunicadores USB e *Bluetooth* para envio de dados, alimentação de 9-16 Volts e 2 baterias internas tamanho D (pilha tamanho D). A sonda trabalha na faixa de temperatura de -5 a 50°C, entretanto armazena informações em temperaturas de até -20 a 80 °C.

## Avaliação Preliminar dos Dados Medidos

Inicialmente serão analisados os dados obtidos pelo CTD. No procedimento de extração de dados, o CTD era ligado ainda na embarcação, e logo após lançado ao mar. O dispositivo estava unido a um peso, responsável por fazê-lo chegar ao fundo do canal, e uma corda para que pudesse ser lançado e puxado à embarcação.

Desta forma, o dispositivo coletou também valores de fora da água (antes do lançamento, e no retorno do dispositivo à embarcação). Os dados extraídos pelo CTD seguem o mesmo padrão, com valores de medições e ruídos entre um lançamento e outro.

Figura 3.4 – Gráfico da Temperatura. Dados medidos com retirada dos valores nulos, 3.4a; Dados medidos mais interpolação para valores nulos, 3.4a; Gráfico com os subplots 3.4a e 3.4b, e escala temporal no eixo x, 3.4b.




Fonte: Elaborada pela autora.

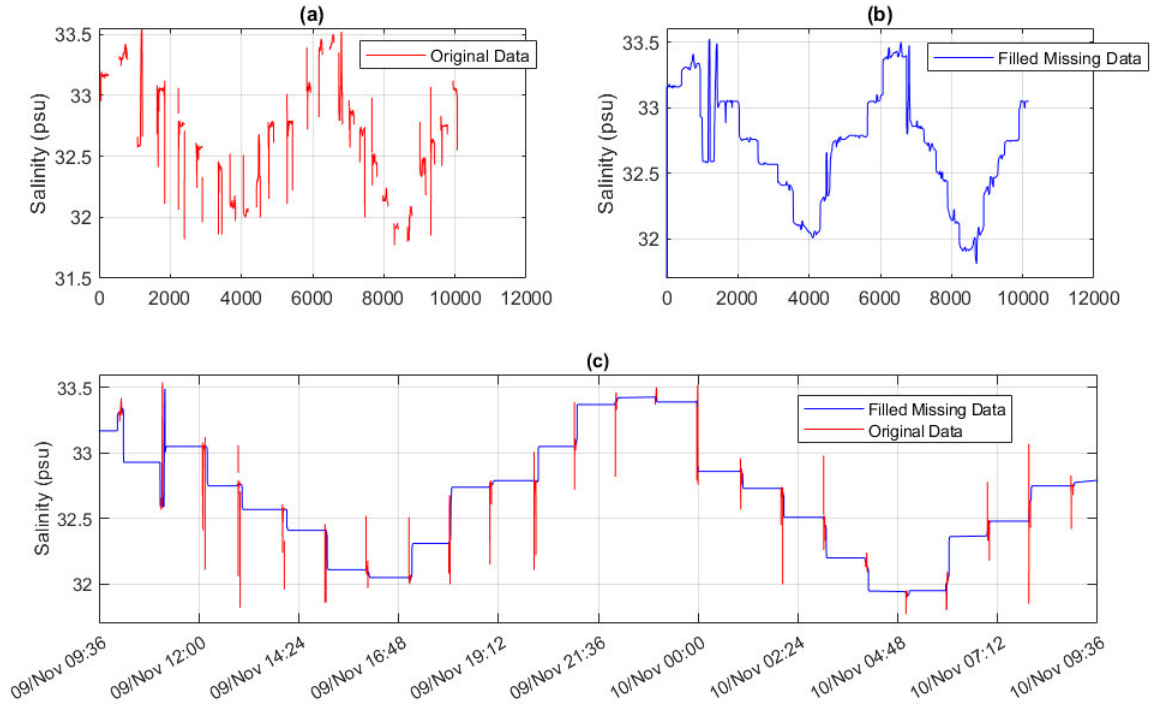
De acordo com os estudos realizados após a medição no local verificou-se que a temperatura na água é quase homogênea entre os perfis verticais, os valores médios medidos para temperatura são de $28,1681°C$. O gráfico da Figura 3.4 apresenta todos os dados de temperatura obtidos pelo CTD durante o fundeio.

No gráfico da Figura (3.4a), os valores apresentados são os valores brutos, extraídos do CTD com retirada apenas dos valores de transição entre os lançamentos. O gráfico da Figura (3.4b) apresenta os valores obtidos para a temperatura após o tratamento de dados. Foi feita uma média móvel com 450 amostras anteriores para interpolação dos dados nulos. Com o intuito de obter uma melhor visualização da temperatura média da água, o gráfico da Figura (3.4c), é a união dos plotes anteriores.

As análises de salinidade mostraram que não houve gradientes verticais significativos, e assim os valores para salinidade são de $32,7092psu$ *(practical salinity unit)* ou $g/kg$, em média (vide Figure 3.5). No entanto, foi possível observar que as pequenas variações de salinidade acompanham regularmente a oscilação da maré. Os maiores valores de salinidade ocorrem nas preamares e menores na baixa-mares.

Da mesma maneira, os gráficos dispostos na figura 3.5 representam os dados brutos da salinidade (vide Figure 3.5a), dados tratados (vide Figure 3.5b) e ajuntamento dos dois gráficos anteriores para melhor visualização dos resultados (vide Figure 3.5c).

Figura 3.5 – Gráfico da salinidade. Dados medidos com retirada dos valores nulos 3.5a; Dados medidos mais interpolação para valores nulos 3.5b; Gráfico com os subplots 3.5a e 3.5b e escala temporal no eixo x.




Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com as tabelas das estações maregráficas e tábuas de maré, do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, as amplitudes de marés na área de interesse possuem médias de preamares de sizígia (MHWS) de 6,02 metros, e médias das preamares de quadratura (MHWN) 4,87 metros, em São Luís.

Já no Canal do Boqueirão a maré possui grande amplitude, com média de 2,9 metros, podendo atingir 6,5 metros de altura, de acordo com (MOLION; BERNARDO, 2002; DILLENBURG; HESP, 2008). Durante a campanha de medição, que foi realizado em maré de quadratura, a amplitude de maré chegou a 5,2 metros.

Em quatro dos 26 lançamentos, entretanto, foram encontradas lacunas para os valores de amplitude de maré. Essa falha na extração dos dados resultou das fortes correntes de maré que ocorrem nas mudanças de sentido da corrente (enchente ou vazante). Com as fortes correntes, o equipamento era levado também no sentido horizontal, o que o impedia de tocar o fundo do mar, comprometendo assim a extração real dos valores de profundidade no lançamento.

Associados aos dados de amplitude de maré, estão os dados de profundidade, ilustrados pela Tabela 3.1. Eles se referem à profundidade máxima, medida em metros, no Canal do Boqueirão.

Tabela 3.1 – Relação entre os lançamentos do CTD e os dados de profundidade medidos.

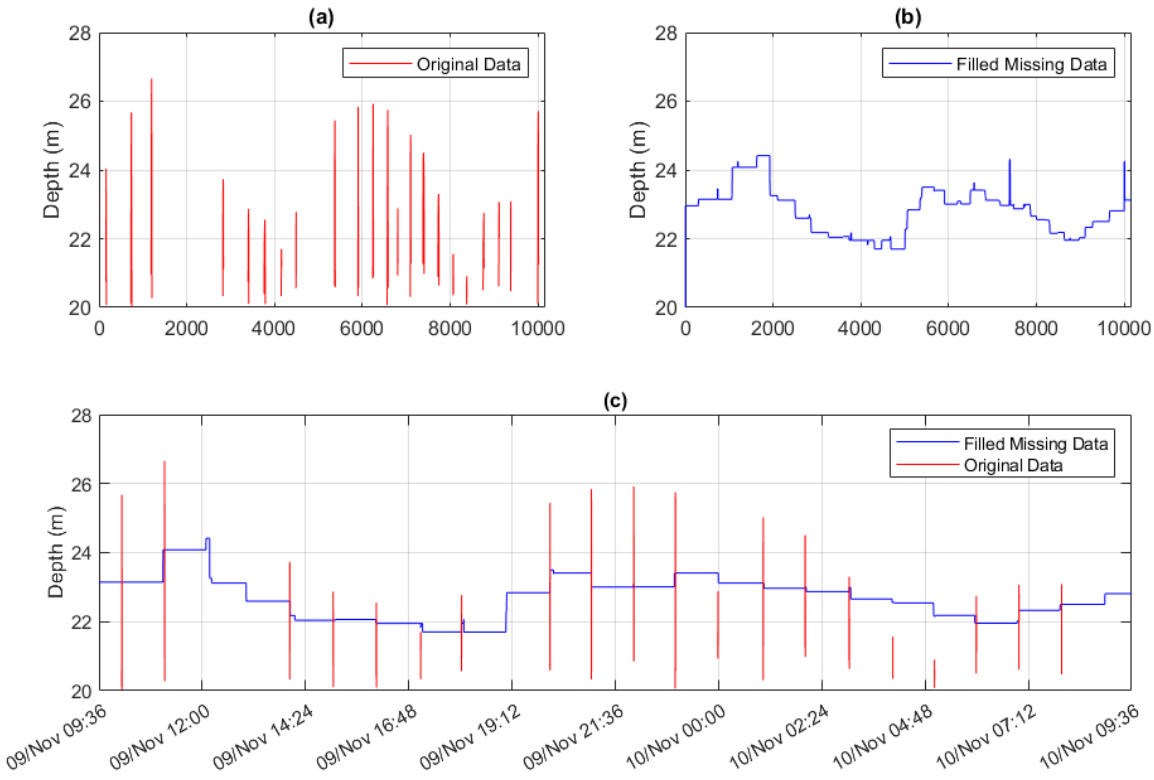
| **Lançamento do CTD na água** | **Profundidade máx. medida (m)** | **Lançamento do CTD na água** | **Profundidade máx. medida (m)** |
|---|---|---|---|
| 1 | 25,611 | 14 | 25,748 |
| 2 | 26,659 | 15 | 22,879 |
| 3 | 13,327 | 16 | 24,914 |
| 4 | 17,519 | 17 | 24,460 |
| 5 | 23,583 | 18 | 23,287 |
| 6 | 22,779 | 19 | 21,455 |
| 7 | 22,469 | 20 | 20,897 |
| 8 | 21,505 | 21 | 22,614 |
| 9 | 22,600 | 22 | 22,965 |
| 10 | 18,992 | 23 | 23,067 |
| 11 | 25,439 | 24 | 22,086 |
| 12 | 25,757 | 25 | 15,839 |
| 13 | 25,890 | 26 | 25,709 |

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 3.6 ilustra as profundidades extraídas com o CTD ao longo de todo o fundeio. Os gráficos dispostos na figura 3.6 representam os dados brutos da profundidade (vide Figure 3.6a), média móvel dos dados brutos (vide Figure 3.6b) e ajuntamento dos dois gráficos anteriores para melhor visualização dos resultados (vide Figure 3.6c).

O regime de maré possui uma duração de cerca de 25 horas e atinge a velocidade máxima de corrente na terceira hora de enchente e na terceira hora de vazante, decrescendo proporcionalmente até as estofas de preamar e baixa-mar (MARQUES, 2007).

Figura 3.6 – Gráfico da amplitude de maré durante o fundeio. Dados brutos da profundidade (3.6a), média móvel dos dados brutos (3.6b) e ajuntamento dos dois gráficos anteriores para melhor visualização dos resultados (3.6c).



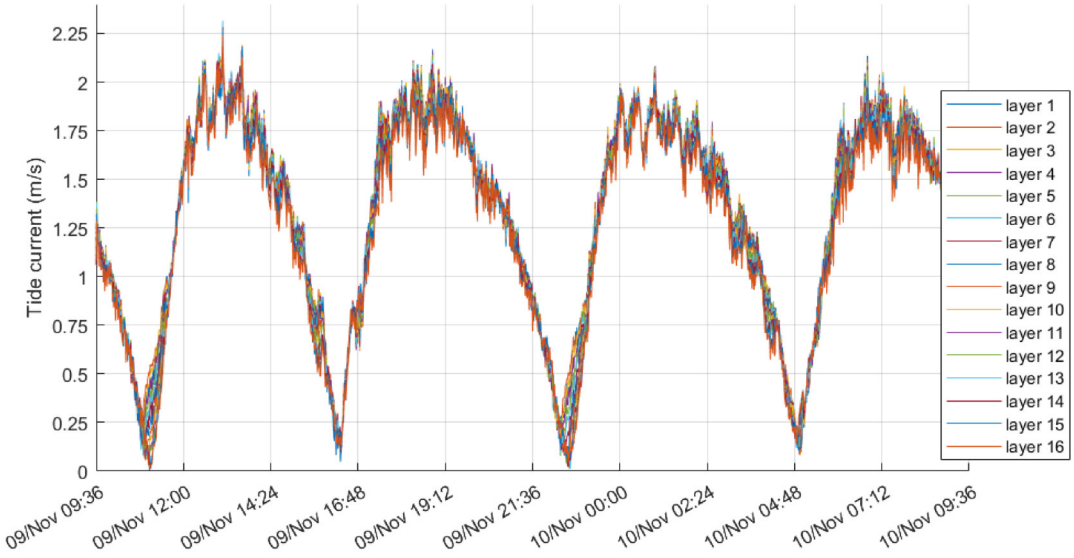

Fonte: Elaborada pela autora.

Marques (2007) descreve sobre a Baía de São Marcos, apontando que as velocidades de correntes de maré alcançam até 2,5 m/s no Canal do Boqueirão. Durante a campanha de medição, em mar de quadratura, foram encontradas velocidades de correntes de maré que chegaram superiores a 2,3 m/s.

A Figura 3.7 ilustra as velocidades de cada uma das 16 camadas verticais ao longo da campanha de medição. Também é possível observar o perfil vertical, no qual a camada um, mais próxima do espelho d'água, possui maiores velocidades e a camada 16, mais próxima do leito e mais afetada pela rugosidade, possui menores velocidades. Cada uma das camadas possui aproximadamente um metro.

Na parte mais profunda da região de interesse ocorrem constantes mudanças. Essas transformações acontecem devido às grandes amplitudes e fortes correntes de marés, que são características responsáveis pelo transporte de sedimentos e migração de barras arenosas no fundo do Canal.

Figura 3.7 – Velocidade ao longo do perfil vertical no período medido.




Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo Viana (2000), durante a maré enchente, a hidrodinâmica conduz a ação das ondas da faixa do litoral para o mar, enquanto há sizígia, a elevação do nível do mar possibilita a formação de correntes que movimentam os sedimentos arenosos. Durante a maré vazante, a ação das correntes manifesta-se em sentido contrário, ao longo dos canais de marés no interior da baía de São Marcos (MORAIS, 1977).

## 3.4 Etapas da Simulação Computacional

### 3.4.1 Obtenção dos dados de entrada

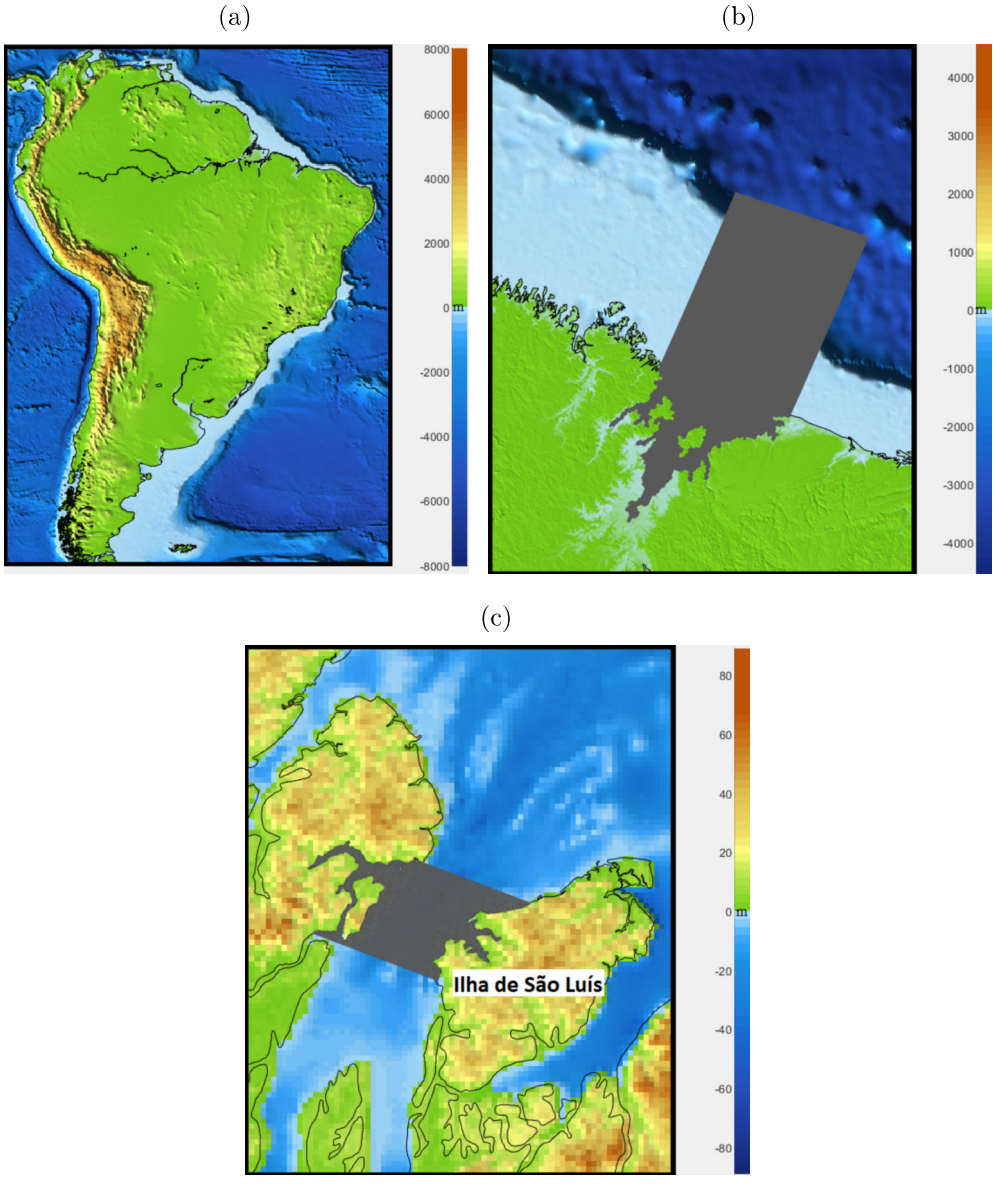
A etapa inicial do trabalho consistiu no mapeamento de dados da região. Esses dados foram utilizados como dados de entrada para calibração do modelo numérico. A ferramenta computacional utilizada para criação do modelo foi o *Software* de código aberto Delft3D-FLOW, um programa que realiza simulações hidrodinâmicas nas dimensões 2D ou 3D. De acordo com Deltares (2013), a ferramenta calcula fenômenos de fluxo e transporte, que resultam de forças meteorológicas e de maré, em uma grade ajustada de limite retilínea ou curvilínea.

A ferramenta utilizada neste trabalho, possui parâmetros com valores padrão que podem ou não ser ajustados de acordo com o local, e dados que devem ser inseridos ao modelo. Alguns desses parâmetros ajustáveis são temperatura, salinidade e viscosidade da água e rugosidade do leito. Existem também dados que devem ser inseridos ao modelo. A exemplo, as condições de contorno externo, que incluem nível médio do mar e correntes marítimas, e os dados de batimetria para o mar profundo. Esses dados foram extraídos dos modelos globais TPXO e ETOPO, respectivamente.

### 3.4.2 Elaboração do Domínio Numérico

Nesta etapa, foi realizada a delimitação da região de interesse, que engloba o Canal do Boqueirão e arredores. Entretanto, um domínio maior foi necessário para criação do modelo hidrodinâmico.

Figura 3.8 – Localização do domínio numérico. Costa da América do Sul (a). Grade 1 (b). Grade 2 (c).

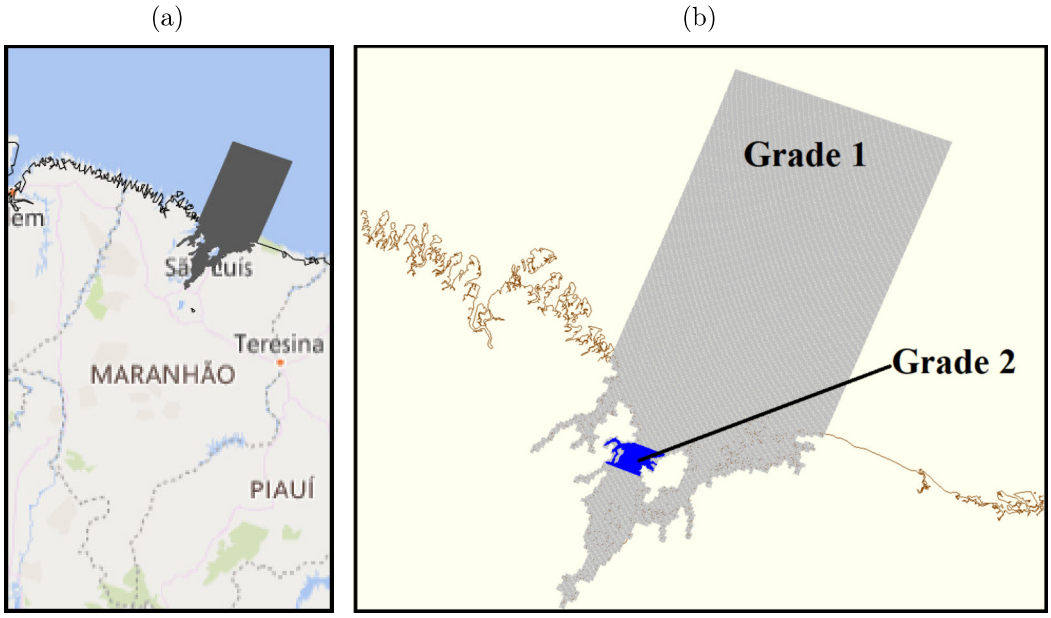



Fonte: Elaborada pela autora.

Um domínio mais extenso resolve o problema da baixa precisão das informações de circulação oceânica externas ao modelo, mas exige muito mais recursos computacionais e tempo de simulação. Desta forma foi necessária a criação de grades aninhadas para resolução do problema, como ilustra a Figura 3.9b.

Foram criadas duas grades, uma maior e menos definida (vide Figura 3.8a), que recebe as condições de fronteira do modelo global TPXO, e uma menor e mais refinada (vide Figura 3.8c), abrangendo principalmente o Canal do Boqueirão e arredores. As grades batimétricas possuem uma proporção de 3 para 1 (BOERSMA et al., 1997; MILLAR; SMITH; REEVE, 2007). A resolução da grade maior é de 300 metros e da grade menor, por sua vez é de 100, como sugere a literatura.

Figura 3.9 – Mapas com a localização do domínio numérico e aninhamento de grades. (a) Delimitação do Estado do Maranhão, com destaque para a grade 1. (b) Aninhamento das grades 1 e 2.




Fonte: Elaborada pela autora.

A grade que engloba a região de interesse contém os dados de batimetria realizado in loco, juntamente com os dados de batimetria do modelo global ETOPO e dados de cartas náuticas.

Para criação da grade numérica foi necessário obter os contornos terrestres georreferenciados dentro do domínio definido. Esses contornos foram chamados de linha de costa. Neste trabalho, já que a região de interesse se localiza na Costa Maranhense, foi retirada do *software* Geodas da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), a linha de costa da região.

### 3.4.3 Geração dos Dados Batimétricos

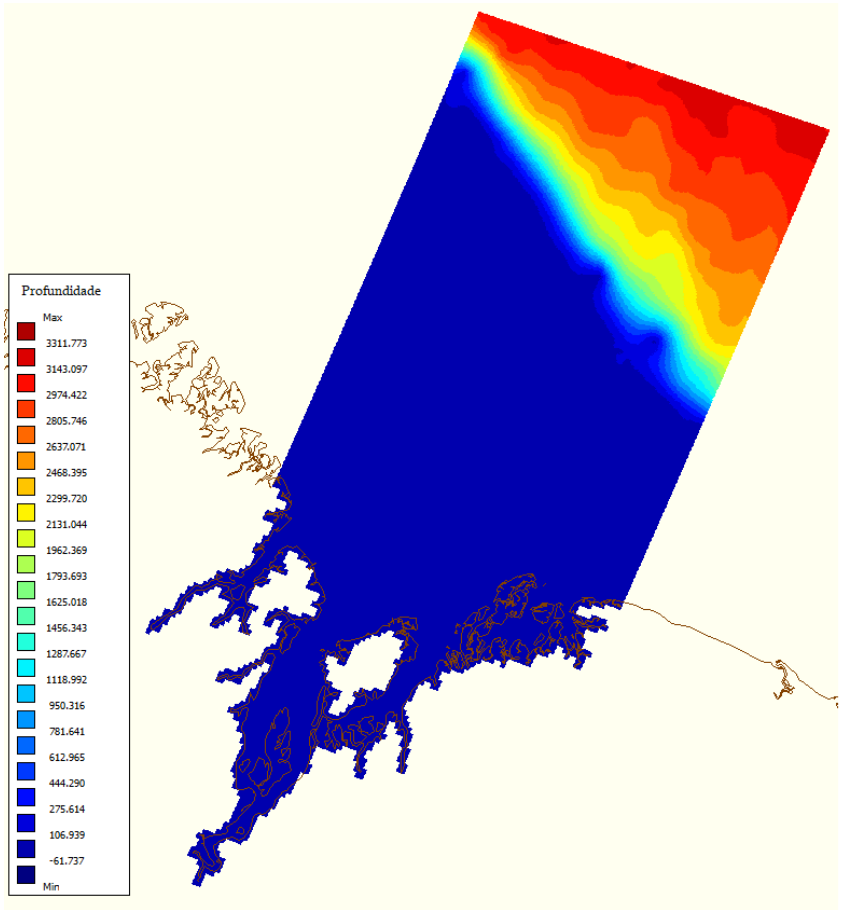
Os dados extraídos de modelos globais norteiam o modelo hidrodinâmico, entretanto as condições do contorno externo obtidas pelo TPXO perdem muita precisão em distâncias inferiores a 30 quilômetros da Costa (TURNER et al., 2013). Para solucionar esse problema,

o domínio do modelo simulado, se estende à uma distância de 150 quilômetros da Costa do Estado do Maranhão, como ilustra a Figura 3.8a.

A batimetria do modelo tem como saída a mesma matriz especializada da grade numérica, mas com um dado a mais em cada ponto, o de profundidade (DELTARES, 2013). Para o ajuste da batimetria na região de interesse, três tipos de dados foram mesclados:

- Dados medidos a partir de batimetria: Estes dados foram extraídos do Canal do Boqueirão, do fundeio atual de novembro de 2021 (citado na subseção 3.3), e de fundeios anteriores, obtidos em colaboração com as equipes do Instituto Nacional de Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF).

Figura 3.10 – Dados batimétricos da grade 1.



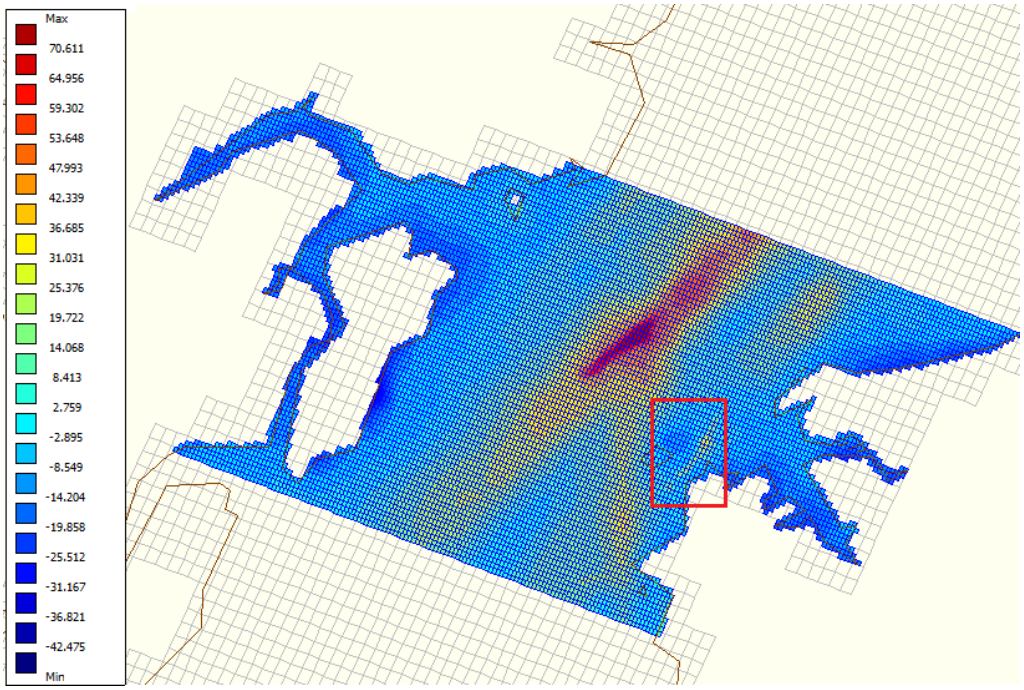

Fonte: Elaborada pela autora.

- Dados de Cartas Náuticas: Como não existiam dados de fundeios ao logo de todo o Canal, foi necessária a utilização de Cartas náuticas para preencher os demais locais com dados de profundidade. As Cartas Náuticas utilizadas foram extraídas do site da Marinha do Brasil[4].

[4] <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster?field_numero_raster_value=410&title=>

- Dados do Modelo Global: O restante das regiões continuaram com dados batimétricos do Modelo Global TPXO.

Figura 3.11 – Dados batimétricos da grade 2.




Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 3.10 ilustra todo o domínio da simulação e engloba uma área muito maior que a região de interesse, alcançando o mar profundo. Nota-se uma grande diferença entre máximos e mínimos de profundidade, na legenda da Figura. Já a Figura 3.11 engloba apenas a região de interesse e redondezas. Não há uma diferença tão grande entre os valores máximos e mínimos de profundidade, como os dados de batimetria da Figura 3.10. A Figura 3.11 destaca a região do Canal do Boqueirão, no retângulo vermelho. Nessa região a maior profundidade atinge 31 metros. Em ambas as Figuras a unidade desses dados está em metros, e os valores negativo são iguais a zero no modelo, ou seja, os valores negativos são ignorados.

O pacote Delft3D, além do módulo de criação de grade, também oferece um módulo para geração da batimetria, o QUICKIN. Nele é possível abrir diversas fontes de dados batimétricos e trabalhá-los, desde que todos estejam no mesmo sistema de projeção e na extensão aceita pelo programa. As equações governantes do modelo são calculadas em todos os pontos da grade numérica, e para que estas equações sejam solucionadas é necessário atribuir um valor de profundidade para cada ponto da grade (DELTARES, 2013).

### 3.4.4 Configuração das Rodadas de Simulação

As simulações numéricas foram realizadas inicialmente em 2D e cobriram um período de um ano, iniciando no dia 01 de janeiro de 2021 e finalizando no dia 31 de dezembro do mesmo ano. A escolha desse intervalo é pertinente, pois abrange todas as estações do ano, doze ciclos lunares, e engloba o período do ano em que as medições do fundeio foram realizadas.

Logo após a rodada da simulação 2D, realizado com a grade maior, inicia-se a simulação 3D na região de interesse. desta vez com a grade refinada em uma área bem menor em relação ao domínio determinado. Nesta simulação alguns parâmetros são adicionados, como a quantidade de camadas da da simulação 3D (10 camadas), inserção dos pontos de observação, que são pontos inseridos no Canal para observação dos resultados posteriormente, inserção das condições de contorno vindas do aninhamento das grades, e dados de batimetria no canal do Boqueirão.

Durante o processo de configuração das rodadas de simulação, foi necessário reconfigurar o modelo e rodá-lo novamente algumas vezes. Esse processo de configuração das rodadas de simulação aconteceu para troca do passo, troca da data de simulação, inserção de pontos de interesse, informações adicionais e/ou reparos, até que se chegasse a configuração desejada.

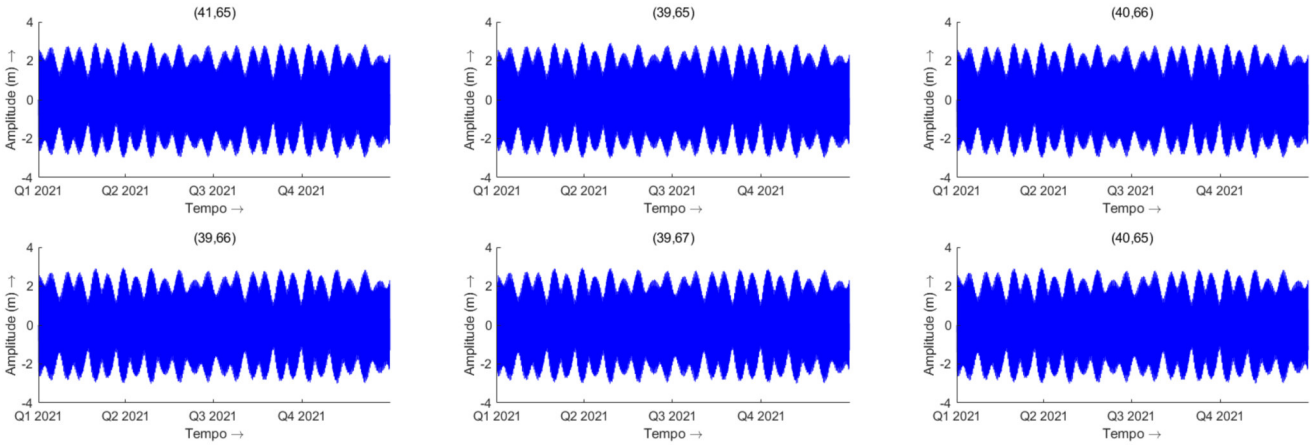
# 4 Discussão e Análise dos Resultados

Esta etapa do trabalho destina-se à apresentação dos resultados da modelagem. Para organização das análises, o capítulo foi dividido em três seções com enfoque nos resultados de amplitude de maré, velocidade de suas correntes, e potencial energético da região de estudo.

## 4.1 Amplitude de Maré

A Figura 4.1, que deve ser comparada aos dados medidos, é composta por dados de amplitudes de maré, simulados por um o período de 1 ano, em 6 pontos localizados no Canal do Boqueirão. Esses pontos, também chamados de pontos de observação, formam uma área de aproximadamente $600m^2$ e apresentam um comportamento semelhante entre si, no que diz respeito à amplitude. A Figura 4.2 indica a localização espacial desses pontos no Canal.

Figura 4.1 – Dados de simulação de amplitude de maré, durante o ano de 2021, em 6 dos pontos de observação presentes no Canal do Boqueirão.



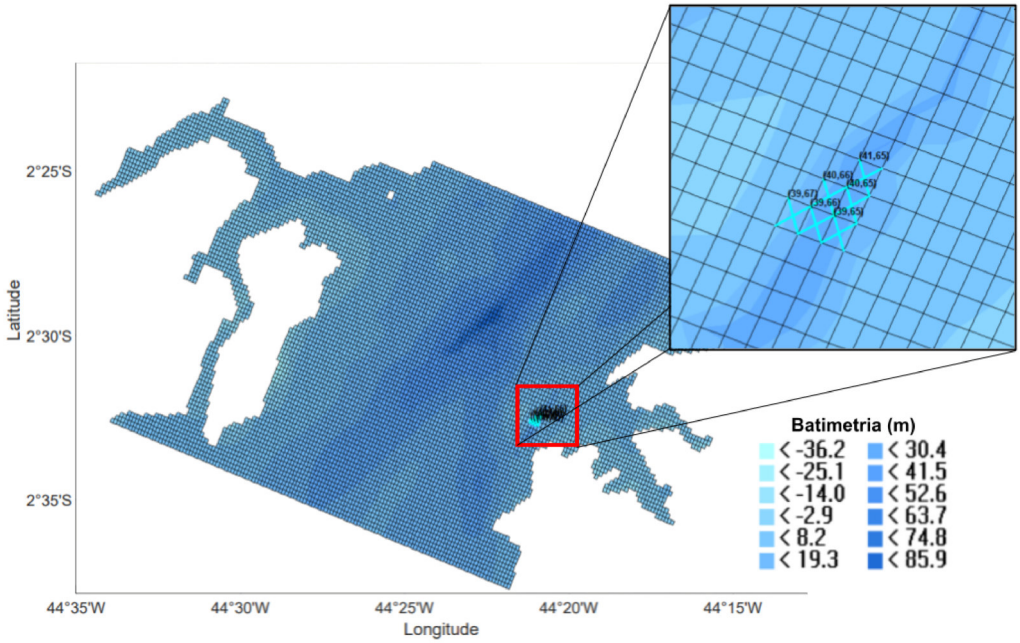

Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos de observação, por estarem próximos, formam uma área com características semelhantes, conforme a simulação numérica salienta. Logo foi escolhido um dos pontos da região com intuito de analisar os dados de saída obtidos. Vale ressaltar que cada ponto representa uma área de $100m^2$, o que ainda é uma área com tamanho significativo para as análises que serão realizadas.

Esses valores são menores que os valores medidos na mesma região e ano, referente ao dias em que foi realizada a campanha de medição, no mesmo ano, na mesma região, em maré de quadratura.

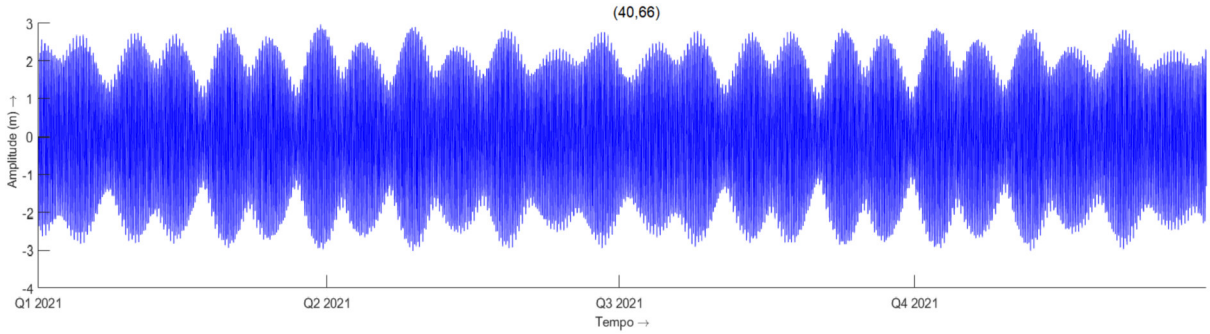
Para melhor visualização dos dados a Figura 4.3, que é um dos pontos de observação presentes na Figura 4.1, foi ampliada. Ela ilustra as amplitudes de maré simuladas ao logo do ano de 2021, no ponto (40,66). No gráfico observa-se amplitudes de maré de até 6 metros, nas marés de sizígia, e de 4,5 metros nas marés de quadratura. Durante a campanha de medição, também realizada na região do Canal do Boqueirão, as amplitudes de maré chegaram a picos de 6,659 metros, com médias para preamar de 5,6600 metros, e baixa-mar e 2.6070 metros. Pode-se analisar então que os valores medidos foram maiores que os valores obtidos pela simulação, como apresenta a Tabela 4.1.

Figura 4.2 – Localização espacial dos pontos de observação inseridos no Canal do Boqueirão, com a batimetria utilizada na simulação numérica.




Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.3 – Dados de amplitude de maré durante o ano de 2021 em um dos pontos de observação do Canal do Boqueirão.




Fonte: Elaborada pela autora.

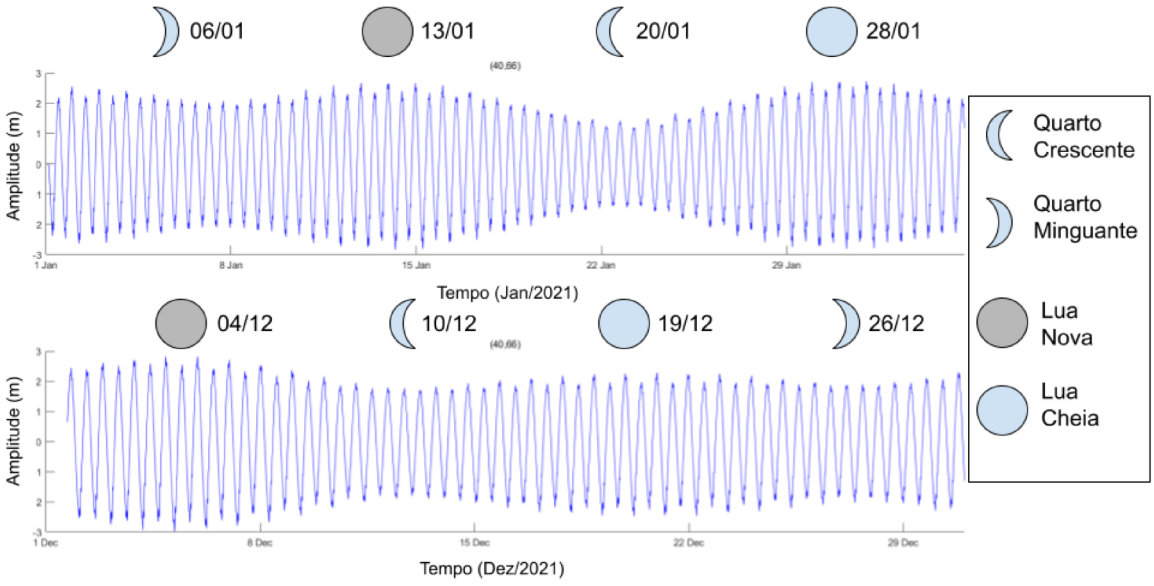
Tabela 4.1 – Diferença de amplitudes de maré, na região do Canal do Boqueirão, entre pontos de observação e a simulação realizada.

| **Fonte de dados** | | **Preamar (m)** | **Baixa-mar (m)** |
|---|---|---|---|
| **Resultado da simulação** | | 6,0 | 4,5 |
| **Região dos pontos de Observação** | **(40,66)** | 5,9 | 2,2 |
| | **(41,65)** | 5,9 | 2,1 |
| | **(39,65)** | 5,8 | 2,0 |
| | **(39,66)** | 5,8 | 2,1 |
| | **(39,67)** | 5,9 | 2,1 |
| | **(40,65)** | 5,9 | 2,1 |
| **Média (pontos de observação)** | | 5,8667 | 2,1000 |
| **Diferença entre resultados da simulação e média dos pontos analisados** | | 0,1333 | 2,4000 |

Fonte: Elaborada pela autora.

Outros dados que devem ser analisados são aqueles relacionados à maré astronômica. A Figura 4.4 ilustra o comportamento das marés, ao decorrer dos meses de janeiro e dezembro de 2021. Embora os dados sejam subestimados pela simulação, nota-se o comportamento já citado na Seção 2.1, de maiores amplitudes nas Luas nova e cheia (marés de sizígia), e menores amplitudes nas Luas de quarto crescente e minguante (marés de quadratura). Vale ressaltar que a constante movimentação dos astros responsáveis pelas marés, também tornam as amplitudes maiores ou menores no decorrer dos meses.

Figura 4.4 – Amplitudes de Maré nos meses de Janeiro e Dezembro, respectivamente, em relação às fases da Lua.




Fonte: Elaborada pela autora.

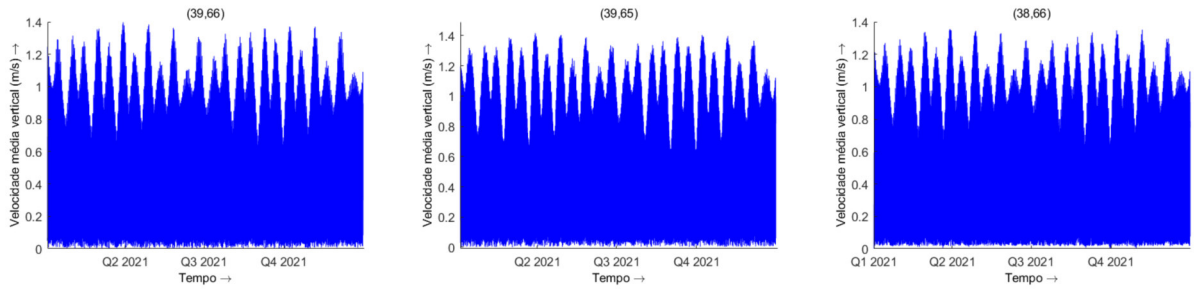
A maré característica da região da costa maranhense é a maré semidiurna, com dois ciclos de marés de amplitudes semelhantes em cada dia, ou seja, duas marés-altas e duas marés-baixas. Embora com variações locais, nas marés semi-diurnas as marés oscilam num período médio de 12 horas e 24 minutos, como ilustra o gráfico da Figura 4.4.

## 4.2 Velocidade das correntes de Maré

Para analise das velocidades de corrente de maré, da mesma maneira que foram avaliadas as amplitudes de maré, serão apresentados os dados de 3 pontos de observação, localizados no Canal do Boqueirão.

A Figura 4.5, que deve ser comparada aos dados medidos, é composta por dados simulados por um período de 1 ano. Esses pontos, também chamados de pontos de observação, formam uma área de aproximadamente $300m^2$. Na região, um deles se sobressai com melhores resultados de velocidade média e é ilustrado na Figura 4.5. A Figura 4.2 indica a localização espacial desses pontos no Canal.

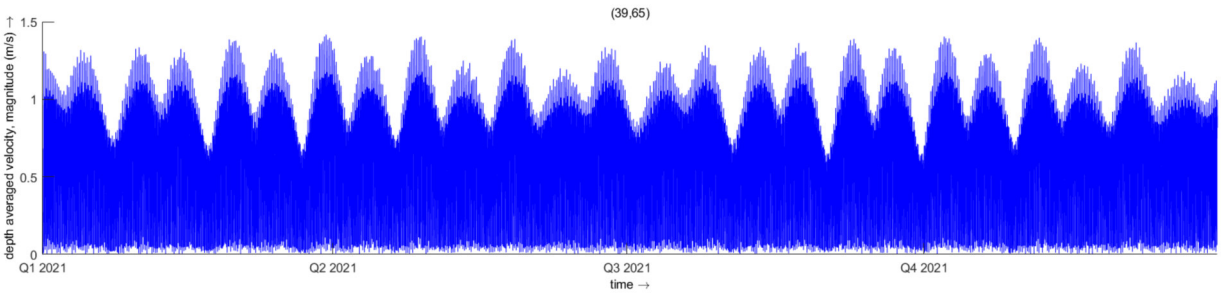
Figura 4.5 – Velocidade média ao longo do perfil vertical, período de 1 ano (2021).




Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 4.6 ilustra a velocidade média das correntes de maré, simuladas ao logo do ano de 2021. O gráfico ilustra velocidades máximas de até 1,4 m/s, nas marés de sizígia, e de até 1,08 m/s, nas marés de quadratura.

Figura 4.6 – Dados de velocidade média de maré, ao longo do perfil vertical, período de 1 ano (2021).



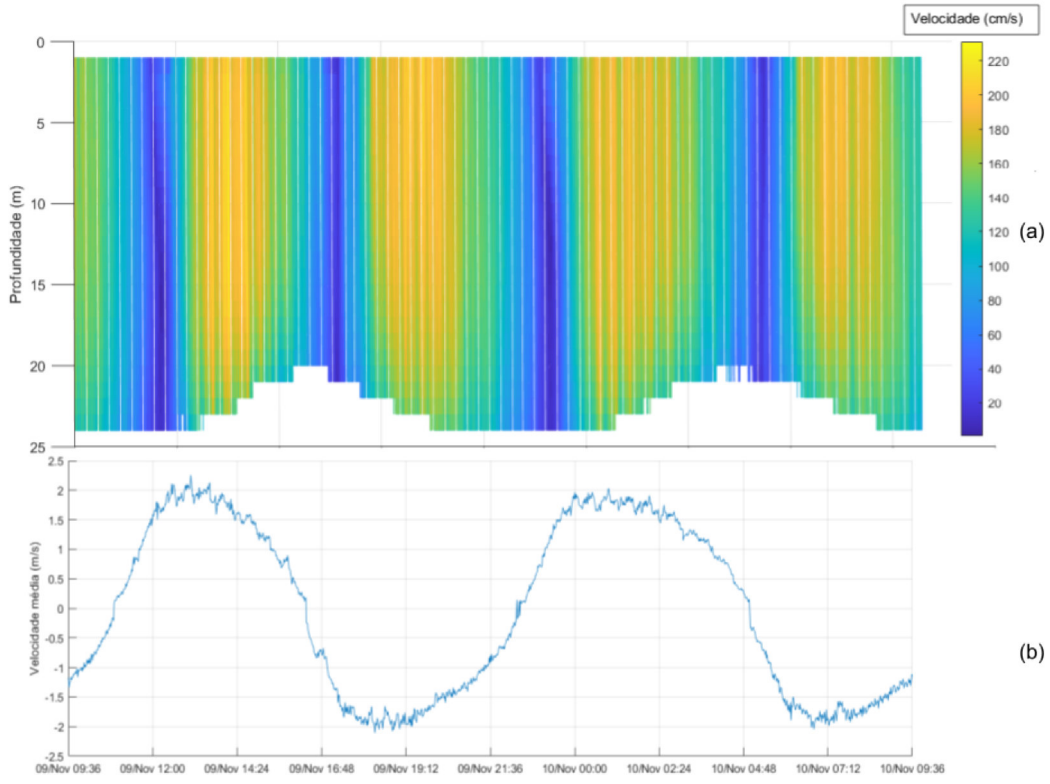

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados da simulação apresentam valores menores que os valores obtidos na campanha de medição do mesmo ano, na mesma região, em maré de quadratura. Uma das razões para não obtenção de resultados próximos aos valores medidos, acontece devido a dificuldade de criação de uma batimetria que englobe toda a área de estudo.

A batimetria obtida do modelo global responde bem em mar profundo, entretanto em regiões costeiras, possui limitações. Por isso a necessidade da da calibração do modelo com dados medidos.

Os dados da Figura 4.7 são da campanha de medição realizada no Canal. Na Figura são observadas as velocidades e direções das correntes de maré, bem como a variação no campo vertical das correntes, ao longo de aproximadamente um ciclo da maré. Os valores negativos representam fluxo da corrente de enchente e os valores positivos representam fluxo de vazante.

Figura 4.7 – Influência da mudança de sentido da maré, com relação a sua velocidade. (a) Variação do campo vertical de corrente. (b) Perfil médio de velocidade da corrente de maré.



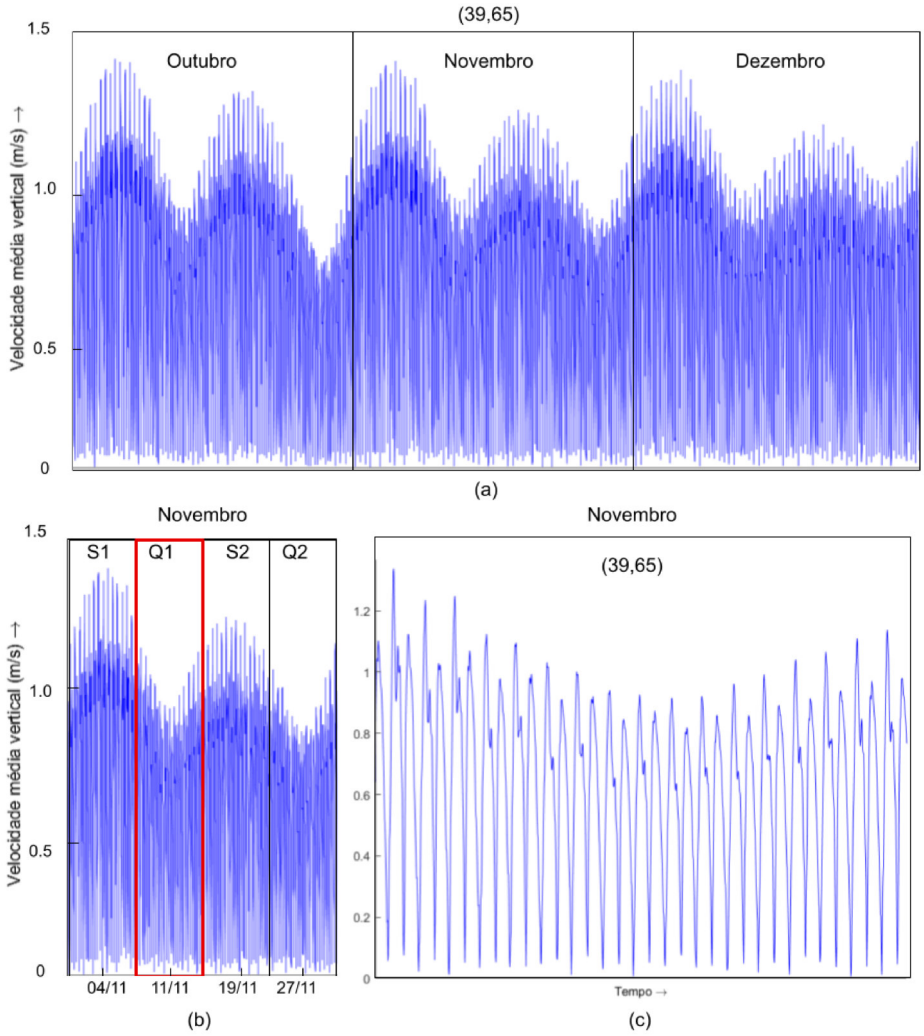

Fonte: Elaborada pela autora.

Ainda na Figura 4.7, no período entre 9 e 11 horas, houve o predomínio das correntes de enchente, em toda coluna d'água, com velocidade máxima de 1,78 m/s. Após a estofa (velocidades próximas a zero) de enchente, predominou um fluxo de vazante, que rapidamente aumentou em intensidade, alcançando por volta das 13 horas um valor de 2,31 m/s (valor mais alto registrado na campanha). Por volta das 17 horas, cerca de 1

hora após a baixa-mar prevista, o fluxo inverteu para correntes de enchente, que atingiram um valor máximo às 19h34min de 2,16 m/s. Novamente, após a estofa de enchente, o fluxo foi de vazante com máximo de 2,08 m/s, às 01h43min. Por fim, após a baixa-mar das 04h49min, o fluxo retornou para enchente, alcançando um máximo de 2,13 m/s, às 07h33min.

É possível observar um aumento na velocidade das correntes de maré sempre que ocorre uma inversão no sentido da corrente, ou enchente (em direção ao interior da Baía de São Marcos) ou vazante (em direção ao oceano), a depender do estágio da maré. Por esse motivo, a maré apresentará o dobro de picos de velocidade em comparação aos picos de amplitude, como ilustra a Figura 4.7.

Figura 4.8 – Dados simulados (a) de velocidade das correntes de maré ao longo dos meses de outubro, novembro e dezembro. (b) Divisão do mês de janeiro em marés de quadratura (Q1 e Q2) e de sizígia (S1 e S2), com destaque à maré de quadratura (Q1), período em que ocorreu o fundeio (c).

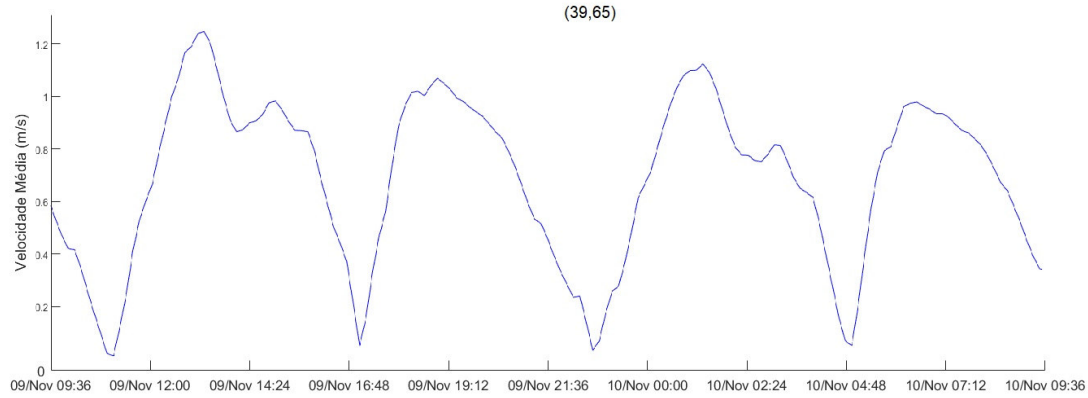



Fonte: Elaborada pela autora.

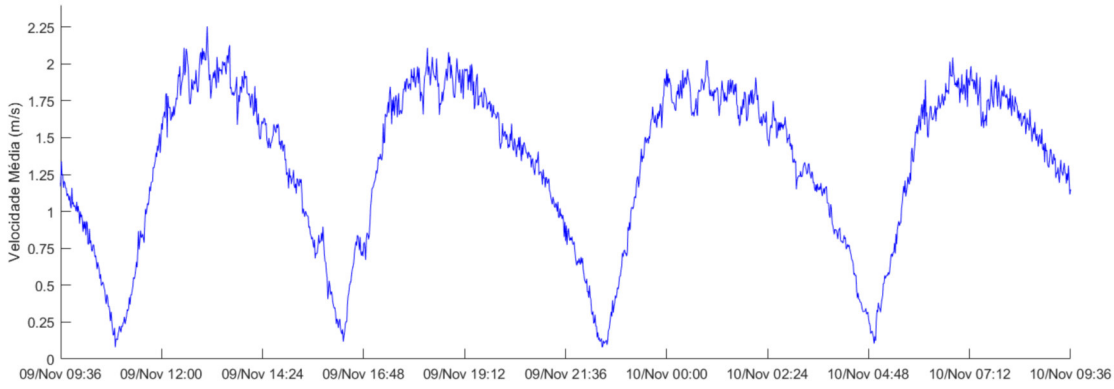
A Figura 4.8 ilustra o comportamento das velocidades médias de correntes de maré, ao longo do perfil vertical, nos três últimos meses do ano de 2021. Na Figura 4.8a há uma divisão entre os meses de outubro, novembro e dezembro, destacando o comportamento das correntes em cada mês. Na Figura 4.8b, novembro, mês que foi realizada a companha de medição, em quatro partes, destacando o período da campanha, e caracterizando este e os demais períodos em marés de sizígia e quadratura. As marés de quadratura são representadas pela letra Q e as marés de sizígia pela letra S. Ao todo, observa-se duas marés de sizígias (S1 e S2), com velocidades de 1,4 e 1,18 m/s, e duas marés de quadraturas (Q1 e Q2), com velocidades abaixo de 1 m/s. A Figura 4.8c, amplia o período da primeira maré de quadratura do mês de novembro. O dia 11 possui as velocidades de corrente de maré mais baixas do período Q1.

Figura 4.9 – Comparação dos dados de velocidade média de corrente de maré. (a) Dados simulados, considerando o ponto de observação (39,65). (b) Dados medidos, obtidos no fundeio realizado no Canal do Boqueirão.

(a)




(b)




Fonte: Elaborada pela autora.

A campanha de medição, cobriu apenas duas oscilações completas de maré (25 horas), em razão principalmente dos custos envolvidos nesta ação. A Figura 4.9 faz uma

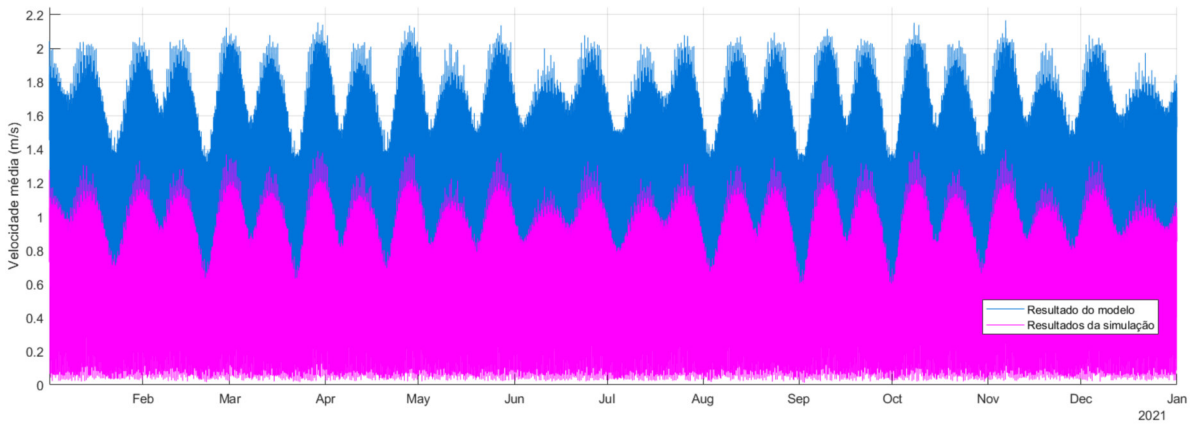
comparação entre os dados de velocidade média do perfil vertical medidos 4.9b e simulados 4.9a, durante o período de tempo da companha. Os dados medidos chegam a 2,25m/s, enquanto os dados simulados chegam à 1,25 m/s.

Durante a realização da simulação hidrodinâmica, em paralelo com a extração de dados da campanha de medição, observou-se que os dados simulados apresentaram magnitudes inferiores com relação aos dados medidos. Isso ocorre principalmente devido à falta de medições batimetrias em todo o domínio simulado, já que as informações de profundidade disponíveis nos modelos globais não são precisas, principalmente na região costeira. Todavia, o comportamento das curvas de velocidade e amplitude, respeitaram o comportamento dos dados medidos, mostrando-se uma referência para a criação do modelo.

Para criação do modelo hidrodinâmico foram utilizados como referência as curvas geradas na simulação para todo o ano de 2021, em conjunto com os dados extraídos na campanha de medição. Desta forma, foi realizada uma extrapolação da curva proveniente da campanha de medição, de modo a preencher o período de um ano completo. Este processo de extrapolação é a obtenção de valores de uma função fora de um intervalo, mediante o conhecimento de seu comportamento dentro desse intervalo. O resultado desse processo é ilustrado na 4.10, que representa comparativamente os dados de correntes de marés simulados e medidos, para o período de 2021, com a finalidade de estimar o potencial energético da região de estudo.

A Figura 4.10 ilustra o resultados da extrapolação realizada a partir de medições (curva em azul), juntamente com o comportamento dos dados simulados (curva em magenta). Para melhor visualização, os dados da Figura 4.11 são separados em 4 novos gráficos ilustrados na Figura 4.11. Eles representam o primeiro (Figura 4.11a), segundo (Figura 4.11b), terceiro (Figura 4.11c) e quarto (Figura 4.11d) trimestre do ano de 2021.

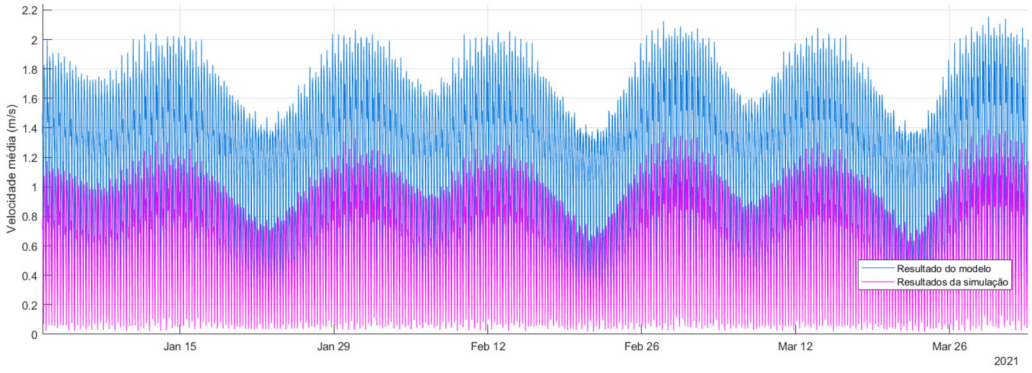
Figura 4.10 – Apresentação dos dados gerados pelo modelo numérico, em comparação com os dados simulados, ao longo do ano de 2021.



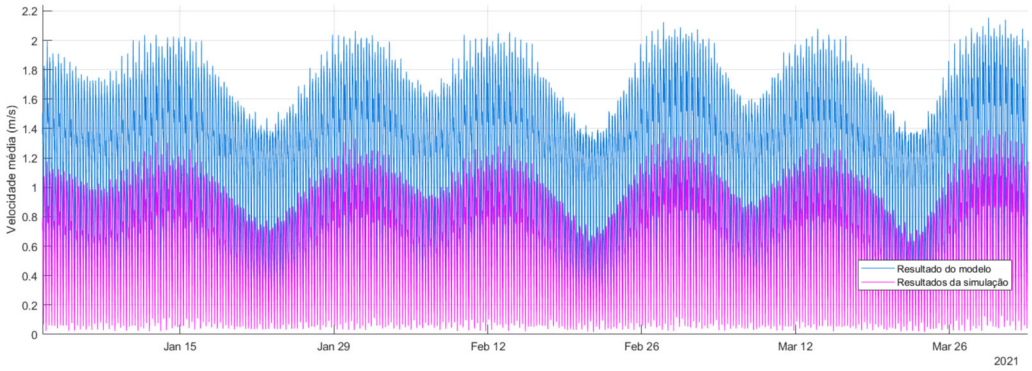

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.11 – Dados gerados pelo modelo numérico em comparação com os dados simulados. (a) Primeiro, (b) segundo, (c) terceiro e (d) quarto trimestre de 2021.

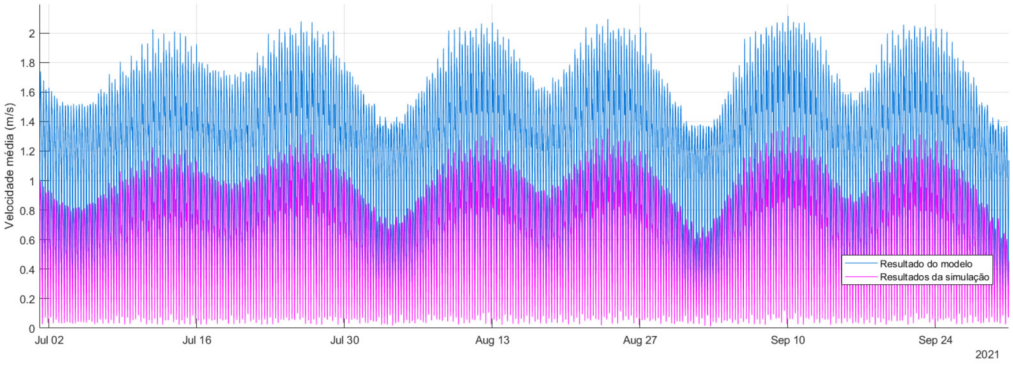
(a)



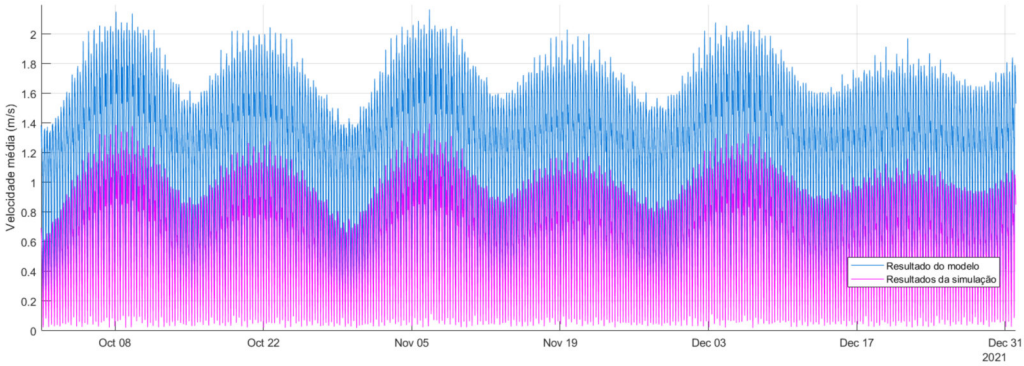

(b)




(c)




(d)




Fonte: Elaborada pela autora.

Após a criação do modelo numérico é possível comparar seus resultados com os valores obtidos através da campanha de medição. Para isso duas métricas foram utilizadas, a RMSE, raiz quadrada do erro médio (do inglês *Root Mean Squared Error*), e a MSE, erro médio quadrático (do inglês *Mean Squared Error*). O RMSE, bastante utilizado em séries temporais, previsão e análise de resultados experimentais, possui uma desvantagem em relação ao MSE, os erros são elevados ao quadrado antes de ter a média calculada.

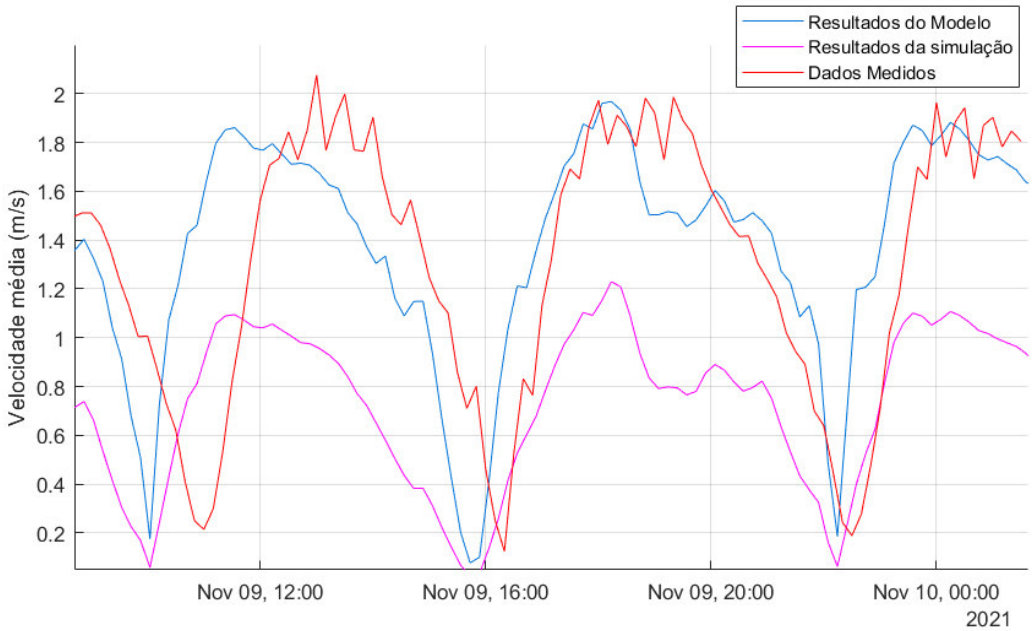
Portanto o índice do RMSE aumenta consideravelmente com valores diferentes do modelo hidrodinâmico. Entretanto possui a vantagem de apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. Da mesma forma que a métrica anterior, MSE mede a diferença entre os valores previstos por um modelo e os valores observados do ambiente que está sendo modelado. Não é tão sensível a erros quanto o RMSE, entretanto apresenta os resultados em uma unidade diferente da variável utilizada, elevando o resultado ao quadrado.

Tabela 4.2 – Métricas de avaliação

| **Métricas de Avaliação** | **Resultados** | **Unidade** |
|---|---|---|
| MSE | 0,14717 | $(m/s)^2$ |
| RMSE | 0.38362 | m/s |

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.12 – Comparação dos dados de velocidade média de corrente de maré, dados de medição extraídos do Canal do Boqueirão, dados simulados e resultado do modelo numérico.




Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 4.12 ilustra dados medidos, simulados e o resultado do modelo, no intervalo de tempo em que foi realizada a campanha de medição.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y_i})^2 \tag{4.1}$$

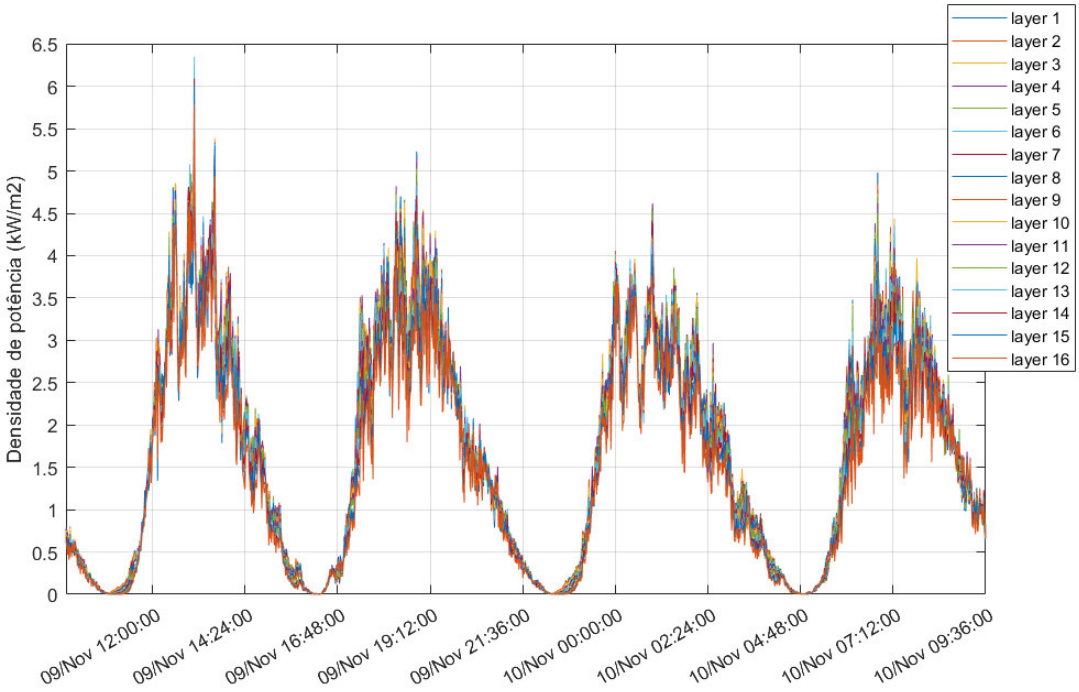
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y_i})^2} \tag{4.2}$$

O MSE calculado, utilizando 4.1, foi de 0,14717. enquanto o RMSE foi de 0,38362, calculado através de 4.2 (vide Tabela 4.2), onde: $n$: é a quantidade de amostras (dados); $y_1$: Dados de Medição (Figura 4.12) e $\overline{y_1}$ Resultado do Modelo (Figura 4.12).

## 4.3 Estimativa do Potencial Energético

Para realizar a estimativa da densidade de potência durante o período de medição, foram utilizados os dados medidos da velocidade em seu perfil vertical. A Figura 4.13 ilustra o comportamento de cada uma das camadas (*layers*), até os 16 metros de profundidade.

Figura 4.13 – Curvas da densidade de potência ao longo do perfil vertical do Canal do Boqueirão.




Fonte: Elaborada pela autora.

Para o cálculo da densidade de potência das correntes utilizou-se a Equação 4.3.

$$D_p = \frac{1}{2}\rho v^3 \tag{4.3}$$

No qual:

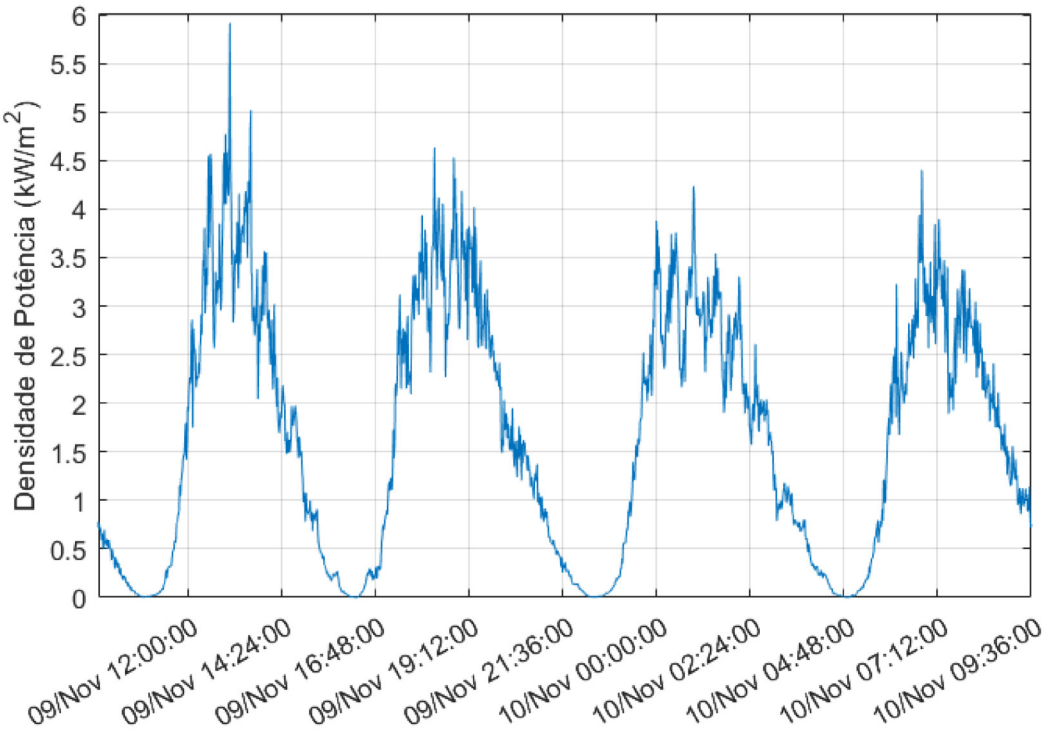
$D_p$: Densidade de potência ($kW/m^2$);

$\rho$: Massa específica da água do mar ($1024 kg/m^3$);

$v$: Velocidade da corrente ($m/s$).

A Figura 4.13 ilustra a densidade de potência na coluna d'água ao longo de todo o tempo de medição, considerando distâncias não superiores a 16 m do espelho d'água, enquanto a Figura 4.14 ilustra a média dos perfis. A maior densidade média da coluna d'água foi de 5,91 $kW/m^2$.

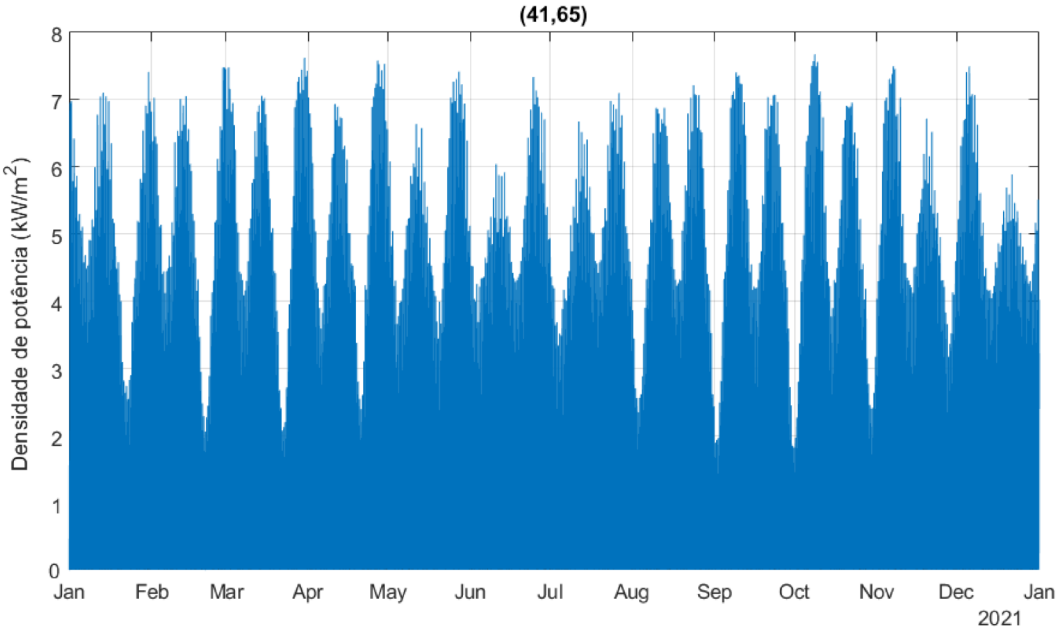
Figura 4.14 – Densidade de potência média da coluna d'água ao longo de todo o tempo de medição.




Fonte: Elaborada pela autora.

As análises que seguem ilustram as curvas de densidade de potência resultantes do modelo. A utilização da curva de velocidade das correntes maré, resultado do modelo numérico para o período de todo o ano de 2021, possibilitou a construção do gráfico da Figura 4.15. Neste gráfico é possível observar a densidade de potência durante um ano. De acordo com o modelo, a maior densidade na coluna d'água aconteceu no dia 08/10, chegando a 7,65 $kW$ de potência disponível por $m^2$.

Figura 4.15 – Densidade de potência média da coluna d'água ao longo do período de um ano, a partir de extrapolação feita com dados de medição.




Fonte: Elaborada pela autora.

Além disso, para realizar a estimação da densidade de potência durante o período de todo o ano, foram utilizados os dados da velocidade fornecidos pelo modelo. A Figura 4.16 ilustra o comportamento da curva da densidade de potência, ao logo do ano, em 6 pontos do Canal do Boqueirão.

A Equação 4.4 apresenta a forma continua da equação utilizada para o cálculo do potencial energético anual (Equação 4.5). Para cada intervalo de medição, que ocorreu de 10 em 10 minutos ($\frac{1}{6}$ de hora), é calculada a energia em $kWh$, considerando que a área de cada ponto de observação.

Forma contínua:

$$E = A \int_{t=0}^{n} D_p dt \tag{4.4}$$

Forma discreta:

$$E = A.\frac{1}{6} \sum_{t=0}^{n} D_p(t) \tag{4.5}$$

No qual:

$E$: Energia anual ($kWh$);

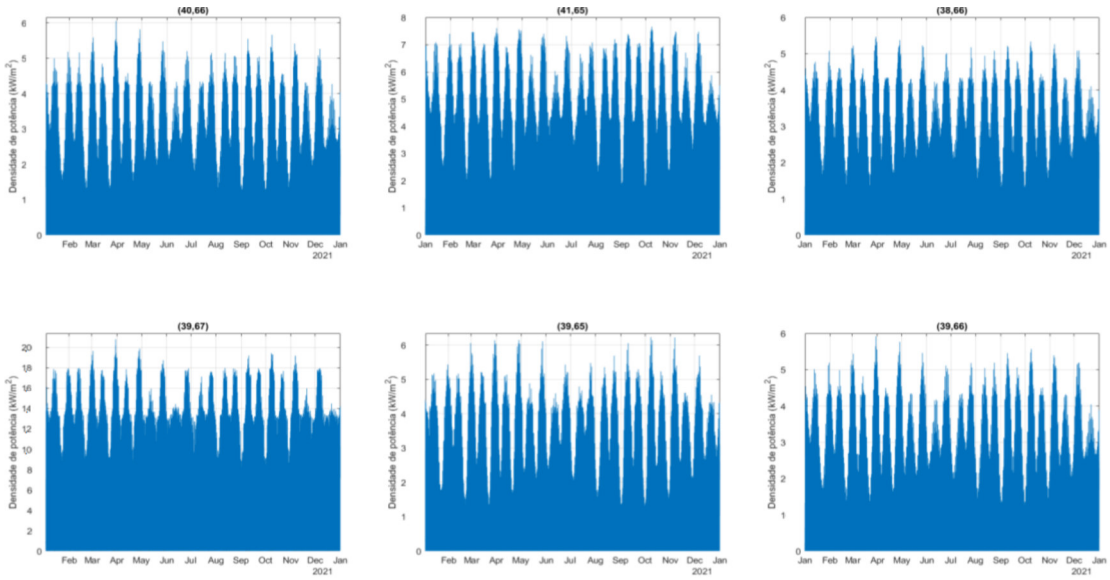
$D_p$: Densidade de potência ($kW/m^2$);

$n$: Quantidade de amostras em um ano.

$A$: Área de cada ponto de observação, ou tamanho a célula da grade menor ($m^2$);

A Figura 4.16, como dito anteriormente, ilustra a densidade de potência média da coluna d'água dos mesmos pontos de observação mapeados na Figura 4.2. Cada um deles possui uma área de 100 $m^2$. O ponto de observação que obteve os melhores resultados foi o (41,65), ilustrado na Figura 4.15.

Figura 4.16 – Densidade de potência média da coluna d'água, ao longo de 1 ano.




Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados do potencial energético em $(GWh/ano)$, para os pontos de observação em análise, tanto para a simulação quanto para o modelo. Observa-se que os resultados do modelo superam os valores da simulação, como esperado.

Tabela 4.3 – Estimação do potencial energético em 6 pontos de observação, no Canal do Boqueirão.

| **Pontos de observação** | **Simulação: Energia (GWh/ano)** | **Modelo: Energia (GWh/ano)** |
|---|---|---|
| (38,66) | 0,2218 | 1,3123 |
| (39,65) | 0,2488 | 1,4184 |
| (39,66) | 0,2116 | 1,2697 |
| (39,67) | 0,0505 | 0,5747 |
| (40,66) | 0,2011 | 1,2289 |
| (41,65) | 0,35842 | 1,7992 |

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a tabela 4.3 o ponto (41,65) apresenta a maior estimativa de potencial energético dentre os pontos analisados, que foi de 1,7992 GWh/ano. Vale ressaltar que os valores considerados para essa estimação se referem apenas a primeira camada da coluna d'água.

# 5 Conclusão

O Litoral do Maranhão mostrou-se uma fonte energética promissora de recursos hídricos, proveniente de suas fortes correntes de maré e uma das maiores variações de amplitudes da costa brasileira. Um dos locais específicos com tais características, localiza-se entre a Grande São Luís e a Ilha do Medo, o Canal do Boqueirão. Diante deste cenário, levando em consideração a oportunidade de geração de energias renováveis, o objetivo geral dessa dissertação foi mensurar o potencial energético dessa região, levando em conta a morfologia dos estuários, e utilizando como ferramentas: simulações computacionais e dados medidos in loco.

Para construção do modelo hidrodinâmico algumas etapas foram necessárias. O resumo de cada uma delas é apresentado a seguir:

- Inicialmente foi realizado um estudo preliminar teórico a respeito da área de interesse. Esse estudo reúne informações da área alvo, como também é chamada a região de interesse, afim de caracterizá-la. No trabalho os valores obtidos na literatura também foram comparados com os dados medidos, e mostraram-se semelhantes. Nesta etapa também foram realizados estudos das ferramentas que seriam utilizadas para construção do modelo.

- Logo após foi realizada a campanha de medição, para extração de dados reais, in loco. A campanha de medição, realizada no Canal do Boqueirão, obteve duração de 25 horas, ou seja, coletou dados de dois ciclos completos de maré. Entretanto dados como salinidade, temperatura e batimetria, fizeram parte dos dados iniciais inseridos na simulação. E os dados de corrente e amplitude de maré foram utilizados na extrapolação do modelo numérico;

- E por fim foi realizada a etapa de modelagem da área de interesse. Para implementação da simulação hidrodinâmica, foi utilizada a ferramenta computacional Delft3D-FLOW. Os dados obtidos para realização desta etapa foram provenientes de modelos globais, dados reais, dados de cartas náuticas e valores da literatura.

Em resumo, o modelo numérico foi útil para estimar o potencial energético das correntes de maré do Canal, e para o cálculo da estimativa anual de energia dos pontos de observação analisados (uma região de $600m^2$, aferido a cada $100m^2$). Como resultado, observa-se que há uma grande variação da estimativa do potencial energético anual entre os pontos avaliados: enquanto que no ponto 41,65 essa estimativa é de 1,7992 GWh/ano, no ponto 39,67, a estimativa é de apenas 31,9% deste valor (0,5747 GWh/ano). Esta diferença pode ser explicada pelas diferença dos dados batimétricas em cada um dos

pontos (regiões). De modo geral o modelo apresentou maiores resultados em relação à simulação computacional, realizada no Delft3D. Para os mesmos pontos a simulação obteve resultados de 0,0505 e 0,2011 $GWh/ano$, respectivamente.

Uma das maiores limitações encontradas neste trabalho foi a criação da batimetria da região do Canal do Boqueirão, que servia como dados de entrada da simulação computacional. Embora estivesse disponível os dados batimétricos proveniente de modelos globais, estes não ofereciam bons resultados para águas rasas (profundidade de 400 metros ou menos). Para reduzir o problema, foram utilizadas 3 fontes de informações: dados de campanha de medição (dados reais); dados de cartas náuticas; e dados do próprio modelo global. Embora os resultados de corrente e amplitude de maré tenham sido subestimados pelo modelo, o comportamento das curvas de correntes e amplitudes de maré apresentaram comportamento semelhante aos dados medidos no local de interesse.

Por fim, duas métricas foram utilizadas com a finalidade de comparar os dados de medição com o modelo hidrodinâmico (média de 6 pontos de observação). O MSE e o RMSE obtiveram resultados de 0,14717 $(m/s)^2$ e 0,38362 m/s, demonstrando que os valores reais mostraram-se muito similares aos valores do modelo implementado.

## 5.1 Trabalhos Futuros

No intuito de continuar o trabalho realizado nesta dissertação, os seguintes pontos são propostos para trabalhos futuros:

- O modelo desenvolvido pode ser aprimorado e torna-se uma ferramenta valiosa para estimação de energia com ou sem a etapa de medição de dados no local. Uma das formas seria trabalhar na construção de dados batimétricos para a região do Canal do Boqueirão e arredores, a partir de dados já disponíveis. Da mesma forma, o modelo poderia ser utilizado em outras regiões, com a mesma premissa.

- Estudo da utilização de um modelo de turbina específica, para geração de energia elétrica, desenvolvida para o litoral brasileiro, mas precisamente para a região do Canal do Boqueirão, respeitando as características do local. Uma vez que as correntes de maré apresentam velocidades satisfatórias para geração de energia ao compararmos turbinas já existentes no mercado.

## 5.2 Artigos Associados a Dissertação

- Modeling Tidal Streams of the Boqueirão Channel Using Delft3D. TENCON 2021 – Auckland, New Zealand. DOI: 10.1109/TENCON54134.2021.9707446

- Preliminary Assessment of the Potential for Tidal Currents in the Boqueirão Channel. IEMRE 2022 – Kolkata, India (Trabalho aceito e apresentado, aguardando publicação).

# Referências

AGENCY-IRENA, I. R. E. *Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies*. 2020. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Innovation-Outlook-Ocean-Energy-Technologies>. (Accessed on 06/07/2021). Citado na página 15.

ALTAY, B.; TOPCU, M. et al. Relationship between financial development and energy consumption: The case of turkey. *Bulletin of Energy Economics (BEE)*, The Economics and Social Development Organization (TESDO), v. 3, n. 1, p. 18–24, 2015. Citado na página 15.

ANDRITZ HYDRO. *South Korea - A technological powerhouse*. 2021. Disponível em: <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/hydro-news-asia/south-korea>. Acesso em: 23 jan. 2022. Citado na página 24.

ASTARIZ, S.; IGLESIAS, G. The economics of wave energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 45, p. 397–408, 2015. Citado na página 16.

BEN. *Balanço energético nacional. Relatório Sintese de 2021. Ano Base, 2020*. 2020. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 19 jan. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 32.

BOERSMA, B.; KOOPER, M.; NIEUWSTADT, T.; WESSELING, P. Local grid refinement in large-eddy simulation. *Journal of Engineering Mathematics*, Springer, v. 32, n. 2, p. 161–175, 1997. Citado na página 43.

BORGES, M. R. N. *Geração de energia elétrica: fundamentos*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 31 e 32.

BROOKES-ROPER/ARCHIVE, M. *European Marine Energy Centre - EMEC*. 2021. Citado na página 28.

BRUMLEY, B. H.; CABRERA, R. G.; DEINES, K. L.; TERRAY, E. A. Performance of a broad-band acoustic doppler current profiler. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, IEEE, v. 16, n. 4, p. 402–407, 1991. Citado na página 36.

CAMARGO, R. de; HARARI, J. *Introdução às Ciências do Mar - Capítulo 9: Marés*. [S.l.]: Pelotas: Ed. Textos, 2017. 602 p.; il.; color; 17,2 x 25 cm., 2017. Citado 3 vezes nas páginas 20, 29 e 30.

CASTRO, E.; MORAES, A.; PINHEIRO, E.; PONTES, J. Zoneamento geomorfológico da ilha do medo–ma. *REVISTA GEONORTE*, v. 5, n. 15, p. 150–155, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 33.

CASTRO, P.; HUBER, M. E. *Biologia marinha*. [S.l.]: AMGH Editora, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

CHARLIER, R. H. Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable & sustainable energy review*, v. 7, n. 3, p. 187–213, 2003. Citado na página 31.

CISCO, L. A.; KOCH, A. H. d. S.; CONDOTTA, M.; HOFSTATTER, R.; HARRAS, L. M.; PAIVA, M. d. S.; ISOLDI, L. A.; MACHADO, B. N. O oceano como fonte de energia: uma revisão da literatura. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia [recurso eletrônico]. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2021. Vol. 6, n. 2 (2020), p. 23-33.*, 2020. Citado na página 23.

CLARK, R. H. *Elements of tidal-electric engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. v. 33. Citado na página 25.

CZIZEWESKI, A.; PIMENTA, F. M.; SAAVEDRA, O. R. Numerical modeling of maranhão gulf tidal circulation and power density distribution. *Ocean Dynamics*, Springer, p. 1–16, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 30.

DELTARES, D. Delft3d-flow simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. *Delft Hydraulics, Delft*, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 41, 44 e 45.

DIAS, E. F.; SILVA, S. C. G. J.; RODRIGUES, K. D.; PAULA, A. A. de. Um estudo sobre o aproveitamento da energia dos oceanos-energia das ondas: Renovável, economicamente viável e limpa. 2014. Citado na página 15.

DILLENBURG, S. R.; HESP, P. A. *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. v. 107. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 39.

DRONKERS, J. *Dynamics of coastal systems*. [S.l.]: World Scientific, 2005. v. 25. Citado na página 22.

ELGHALI, S. B.; CHARPENTIER, J.; BENBOUZID, M. *Resource to wire modelling for tidal turbines*. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.

ENCARNACION, J. I.; JOHNSTONE, C.; ORDONEZ-SANCHEZ, S. Design of a horizontal axis tidal turbine for less energetic current velocity profiles. *Journal of Marine Science and Engineering*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 7, p. 197, 2019. Citado na página 37.

EPE. *European Power Electronics and Drives Association*. 2020. Disponível em: <https://www.epe-association.org/wordpress>. Acesso em: 06 jul. 2020. Citado na página 29.

ESTEFEN, S. F.; COSTA, P. R. da; RICARTE, E.; PINHEIRO, M. M. Wave energy hyperbaric device for electricity production. In: *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 42711, p. 627–633. Citado na página 32.

FABIO ROQUES. *Ficheiro: Usina de energia de Maremotriz de Annápolis, Escócia.* 2016. Disponível em: <https://www.tripadvisor.com.br/Attraction_Review-g187099-d3484163-Reviews-Barrage_de_la_Rance-Dinard_Ille_et_Vilaine_Brittany.html>. Acesso em: 23 jan. 2022. Citado na página 25.

FLEMING, F. P. Avaliação do potencial de energias oceânicas no brasil. *Universidade Federal do Rio de Janeiro–UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro*, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 19, 23, 29 e 31.

GOMES, T. L. C.; SAAVEDRA, O. R.; BEZERRA, P. L.; Sá, B. G.; JUNIOR, A. R. T.; DIAS, F. J. d. S.; LIMA, S. L. d. Performance analysis of dual-storage system for isolated microgrids based on tidal stream source. In: *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado na página 16.

GONZáLEZ, M.; GUTIéRREZ, O. G.; CáNOVAS, V.; ESPEJO, A.; NICOLODI, J. L. Processos costeiros brasileiros: Ventos, clima de ondas e nÍvel do mar com base em reanÁlises de dados. In: _____. [S.l.: s.n.], 2018. ISBN 978-85-328-0835-6. Citado na página 29.

IBGE. *IBGE em parceria com a Marinha do Brasil lança o Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. 2017. Citado na página 28.

JOHNSTONE, C.; PRATT, D.; CLARKE, J.; GRANT, A. A techno-economic analysis of tidal energy technology. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 49, p. 101–106, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.

JUNIOR, J. V. P.; OLIVEIRA, C. B. M.; PARENTE, N. V.; SAAVEDRA, O. R. Analysis of the potential of wind and ocean energy in the state of maranhão. In: *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 509–516. Citado na página 16.

KIM, G.; LEE, M. E.; LEE, K. S.; PARK, J.-S.; JEONG, W. M.; KANG, S. K.; SOH, J.-G.; KIM, H. An overview of ocean renewable energy resources in korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 2278–2288, 2012. Citado na página 25.

LEITE, P. B. N. et al. Otimização da geração de eletricidade a partir de fonte maremotriz. Universidade Federal do Maranhão, 2012. Citado na página 30.

LEITE, P. B. N.; SAAVEDRA, O. R.; RIBEIRO, L. A. de S. Analysis of a tidal power plant in the estuary of bacanga in brazil taking into account the current conditions and constraints. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 8, n. 3, p. 1187–1194, 2017. Citado na página 16.

LEITE, P. N. B.; SAAVEDRA, O. R.; CAMELO, N. J.; RIBEIRO, L. A. de S.; FERREIRA, R. M. Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, Universidad de Tarapacá, v. 19, n. 2, p. 219–232, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 29.

LOBO, R. V.; REIS, G. S.; GUIMARÃES, T. F.; BATISTA, S. V. Energia oceânica das ondas: Uma alternativa de energia renovável. *PARAMÉTRICA*, v. 13, n. 14, 2021. Citado na página 19.

MADEBRAVE®., S. A. E. . S. by. *TURBINES & ENGINEERING SERVICES: TECHNOLOGY HISTORY| SEAFLOW — 300KW (2003)*. 2021. Citado na página 27.

MARQUES, V. *Maâmar El-Robrini*. Tese (Doutorado) — DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO, 2007. Citado na página 40.

MELO, E. F. *Maré meteorológica na costa brasileira*. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

MILLAR, D.; SMITH, H.; REEVE, D. Modelling analysis of the sensitivity of shoreline change to a wave farm. *Ocean Engineering*, v. 34, n. 5, p. 884–901, 2007. ISSN 0029-8018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801806001272>. Citado na página 43.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. d. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro^ eRJ RJ, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 39.

MONTEIRO, L. H. A. *Sistemas dinâmicos*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2002. Citado na página 20.

MORAIS, J. O. d. Processos de sedimentação na baía de são marcos, estado do maranhão, brasil. Arquivos de Ciências do Mar, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 41.

MUEHE, D. et al. Erosão e progradação do litoral brasileiro. *Brasília: Ministério do Meio Ambiente*, v. 1, p. 475, 2006. Citado na página 29.

MULUGETTA, Y.; HAGAN, E. B.; KAMMEN, D. Energy access for sustainable development. *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, v. 14, n. 2, p. 020201, 2019. Citado na página 15.

OLIVEIRA, K. F. de S.; SARAIVA, M. d. F. O. Astronomia e astrofisica. *Rio Grande do Sul: Livraria da Fısica*, 2004. Citado na página 20.

OLIVEIRA, R. M. et al. Energias oceânicas: arcabouço legal e entraves a serem superados para o desenvolvimento no brasil. Universidade Federal do Maranhão, 2016. Citado na página 28.

REDDY, A. K.; ANNECKE, W.; BLOK, K.; BLOOM, D.; BOARDMAN, B.; EBERHARD, A.; RAMAKRISHNA, J. Energy and social issues. *World energy assessment*, Citeseer, p. 39–60, 2000. Citado na página 15.

REIS, L. B. dos; SANTOS, E. C. *Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais*. [S.l.]: Editora Manole, 2006. Citado na página 15.

RIBEIRO, E. M.; PAIVA, S.; LUCAS, C.; VILLAVICENCIO, C.; SOARES, M. Unidades de conservação costeiras e marinhas no brasil. In: _____. [S.l.: s.n.], 2020. p. 402–438. ISBN 978-65-992571-0-0. Citado na página 28.

ROCHA, J. P. P. d. *Potencial Energético das Marés na Ria de Aveiro*. Tese (Doutorado) — ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2020. Citado na página 28.

SANTOS, V. F. d. et al. Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha, 2006. Citado na página 30.

SEGAR, D. A. Introduction to ocean sciences. Wadsworth Publ. Co., 1998. Citado na página 22.

SELIN, N. Tidal power. *Encyclopaedia Britannica,[Online]. Available:<http://www.britannica.com/science/tidal-power> .[Accessed 19 January 2018]*, 2019. Citado na página 23.

SIFFERT, J. R. R. *Aspectos Regulatórios de Energia Renovável de Fontes Oceânicas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.

SIMÕES, T.; GARCIA, G.; JUSTINO, P. A.; ESTANQUEIRO, A. O projeto offhoreplan: planeamento da instalação de energias renováveis offshore em portugal. *BVT: Energias Oceânicas*, p. 13–16, 2017. Citado na página 19.

SIMPSON, M. R. *Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler*. [S.l.]: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, CA, USA, 2001. Citado na página 36.

SOARES, R. d. A. *Modelagem do transporte de ictioplâncton no complexo estuarino de São Marcos, Maranhão-Brasil*. Tese (Doutorado) — UEMA, 2015. Citado na página 34.

STEWART, R. *Introduction to physical oceanography, Robert H.* [S.l.]: Stewart, 2008. Citado na página 37.

TAKENOUCHI, K.; OKUMA, K.; FURUKAWA, A.; SETOGUCHI, T. On applicability of reciprocating flow turbines developed for wave power to tidal power conversion. *Renewable Energy*, v. 31, n. 2, p. 209–223, 2006. ISSN 0960-1481. Marine Energy. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105002284>. Citado na página 23.

TAWIL, T. E.; CHARPENTIER, J. F.; BENBOUZID, M. Tidal energy site characterization for marine turbine optimal installation: Case of the ouessant island in france. *International journal of marine energy*, Elsevier, v. 18, p. 57–64, 2017. Citado na página 27.

THURMAN, H.; TRUJILLO, A. Introductory oceanography, (upper saddle river). 2004. Citado na página 29.

TRIPADVISOR. *Barrage de la Rance - Dinarde*. 2018. Disponível em: <https://www.tripadvisor.com.br/Attraction_Review-g187099-d3484163-Reviews-Barrage_de_la_Rance-Dinard_Ille_et_Vilaine_Brittany.html>. Acesso em: 23 jan. 2022. Citado na página 24.

TURNER, J. F.; ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K.; JONES, C. Global Ocean Tide Models: Assessment and Use within a Surface Model of Lowest Astronomical Tide. *Marine Geodesy*, v. 36, n. 2, p. 123–137, jan. 2013. ISSN 0149-0419, 1521-060X. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01490419.2013.771717>. Citado na página 43.

UIHLEIN, A.; MAGAGNA, D. Wave and tidal current energy–a review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 58, p. 1070–1081, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 27, 31 e 32.

VECTEEZY. *Conceito da ilustração da energia das marés*. 2016. Disponível em: <https://pt.vecteezy.com/vetor-gratis/natureza>. Acesso em: 23 jan. 2022. Citado na página 26.

VIANA, J. Estudo da morfodinâmica da praia de são marcos são luís–maranhão. *Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Geografia. UFMA: 91p*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 41.

WERLANG, A. B. C.; GELLER, I. Uma análise da relação entre o consumo de energia elétrica e o crescimento econômico no mundo. *Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de janeiro*, 2018. Citado na página 15.

WESTWOOD, A. Ocean power: Wave and tidal energy review. *Refocus*, Elsevier, v. 5, n. 5, p. 50–55, 2004. Citado na página 26.