UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

JOÃO BOSCO JOSÉ BARBOSA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MAREGRÁFICO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NO LITORAL NORTE DO BRASIL

RECIFE

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA

JOÃO BOSCO JOSÉ BARBOSA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MAREGRÁFICO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NO LITORAL NORTE DO BRASIL

TCC apresentado ao Curso de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Oceanografia.

Orientador(a): Marcus André Silva
Coorientador(a):

RECIFE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Barbosa, João Bosco José.
Avaliação do potencial maregráfico para a produção de energia renovável no litoral norte do brasil / João Bosco José Barbosa. - Recife, 2025.
62 p. : il., tab.

Orientador(a): Marcus André Silva
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Oceanografia - Bacharelado, 2025.
Inclui referências, apêndices.

1. energias renováveis. 2. energias marinhas. 3. correntes de marés. I. Silva, Marcus André. (Orientação). II. Título.

550 CDD (22.ed.)

JOÃO BOSCO JOSÉ BARBOSA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MAREGRÁFICO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NO LITORAL NORTE DO BRASIL.

TCC apresentado ao Curso de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Oceanografia.

Aprovado em: 18/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

_____
Profº. Dr. Marcus André Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Profª. Drª. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Profº. Me. Paulo Estevão Lemos de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

“Aos que se foram cedo demais”

“Estes viram as obras de YHWH
e suas maravilhas no oceano”

Salmos 107, 24

RESUMO

O estudo para avaliação do potencial energético das correntes de maré é uma área ainda em ascensão no setor das energias renováveis. Essa fonte de energia tem a seu favor o fato de ser altamente previsível, inesgotável e livre de emissão de gases do efeito estufa. O objetivo deste estudo visa estimar a conversão de energia cinética das correntes de marés em eletricidade. Este estudo utilizou diferente tipos de dados para analisar a hidrodinâmica na área estudada, incluindo uma série temporal de velocidades de correntes de superfície, produto da combinação de modelos que descrevem a circulação da maré. Em seguida esses dados foram aplicados aos parâmetros de um conversor de energia para simular a produção de eletricidade. Os resultados integrados de toda a área de estudo apontaram um potencial de 54 GWh anuais. Esse potencial representou o equivalente a 7,63% do total de energia elétrica gerada Brasil em 2023. Em se tratando de energia renováveis, esse potencial correspondeu a 12,69% da geração de energia hidrelétrica daquele mesmo ano. Além disso, este estudo apontou as áreas mais propicias para a geração de energia a partir das correntes de marés no Brasil, sendo a costa do Amapá e a Baia de São Marcos no Maranhão as regiões com maiores potenciais de geração. Esse resultado destaca também a importância estratégica que essa fonte de energia pode ter para a diversificação da matriz energética brasileira. Essa fonte de energia pode ser utilizada em diversas aplicações. No contexto offshore, uma possibilidade é a utilização dessa energia para alimentar as novas plataformas de petróleo e gás natural com tecnologia all electric, reduzindo a dependência de geradores movidos a combustíveis fósseis e aumentando a sustentabilidade das operações.

Palavras-chave: energias renováveis; energias marinhas; correntes de marés.

ABSTRACT

Study of the potential energy of tidal currents is still an up-and-coming area in the renewable energy sector. This energy source has the advantage of being highly predictable, inexhaustible and free of greenhouse gas emissions. The objective of this study is to estimate the conversion of kinetic energy from currents into electricity. This study used different types of data to analyze the hydrodynamics in the study area, including a time series of surface current speeds, the product of combining models that describe tidal circulation. This data was applied to the parameters of an energy converter to simulate electricity production. The integrated results for the entire study area showed a potential of 54 GWh per year. This potential represented 7.63% of the total electricity generated in Brazil in 2023. In terms of renewable energy, this potential corresponded to 12.69% of hydroelectric power generation in the same year. In addition, this study pointed out the most favorable areas for generating energy from tidal currents in Brazil, being the coast of Amapá and São Marcos Bay in Maranhão regions with greatest potential for generation. This result also highlights strategic importance that this energy source can have in diversifying the Brazilian energy matrix. This energy source can be used in a variety of applications. indeed, in offshore context, a possibility is to use this kind of energy as power source on new oil and natural gas platforms reducing depedence of fossil fuel generators and incresing sustainable operations offshore.

Keywords: renewable energies; marine energies; tidal currents.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Curva de variação da altura de maré 16
Figura 2 — Curva de corrente de maré 17
Figura 3 — Sistema Lua -Terra 21
Figura 4 — Forças geradoras de maré 22
Figura 5 — Principais constituintes harmônicas 24
Figura 6 — Elementos básicos de uma elipse de maré 26
Figura 7— Sistema anfidrômico (constituinte M2) 28
Figura 8 — Área de estudo 31
Figura 9 — Batimetria da área de estudo 32
Figura 10 — Plataforma continental da área de estudo 33
Figura 11 — Relevo do fundo da plataforma continental da área estudada 33
Figura 12 — Bacias sedimentares que integram a área de estudo 34
Figura 13 — Blocos exploratórios 35
Figura 14 — Grade de dados (Resolução 1/12) 36
Figura 15 — Modelo de referência do conversor de energia (RM2) 38
Figura 16 — Ilustração de um conversor em operação 39
Figura 17 — Sistema anfidrômico na bacia do Atlântico para M2 e S2 44
Figura 18 — Linhas cotidais de fase M2 45
Figura 19 — Linhas cotidais de fase S2 45
Figura 20 — Amplitudes de maré na área de estudo 46
Figura 21 — Amplitude de maré M2 47
Figura 22 — Amplitude de maré S2 47
Figura 23 — Ilustração conceitual de um ciclo de corrente de maré semidiurna 48
Figura 24 — Elipses de maré M2 48
Figura 25 — Elipses de maré S2 48
Figura 26 — Média das Velocidades 47
Figura 27 — Densidade de potência cinética 48
Figura 28 — Potencial Energético 48
Figura 29 — Potencial Energético (Destaque Amapá) 48
Figura 30 — Potencial Energético (Destaque Maranhão) 48
Figura 31 — Potencial Energético (Destaque Pará) 48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 — Etapas da modelagem 41
Gráfico 2 — Curva da potência elétrica 50
Gráfico 3 — Curva de geração de energia 50
Gráfico 4 — Comparação da produção de energia elétrica a partir de diferentes fontes 54
Gráfico 5 — Percentual do valor simulado em relação a cada fonte de energia 54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

2 OBJETIVOS 15

2.1 Objetivo Geral 15

2.2 Objetivos Específicos 15

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16

3.1 Forças Geradoras das Marés 18

3.2Análise Harmônica 22

3.2.1 Equação de Previsão da Altura da Maré Harmônica 23

3.2.2 Equação de Previsão da Corrente de Maré Harmônica 25

3.2.3 Elipses de marés 26

3.4 Sistema Anfidrômico 27

3.5 Conversores de Energia Hidrocinética (HKECs) 27

3.5.1 Turbinas de Eixo Horizontal (HAHTs) 23

3.5.2 Turbinas de Eixo Vertical (VAHTs) 25

4 ÁREA DE ESTUDO 31

5 METODOLOGIA 36

5.1 Descrição do conversor de energia 37

5.1.1 Especificações do converso de energia 38

5.2 Modelagem 39

5.3 Cálculo dos elementos da elipse de maré 42

6 RESULTADOS 43

6.1 Análise da onda de maré 43

6.2 Análise da amplitude de maré 46

6.3 Análise da corrente de maré 47

6.4 Análise do potencial energético.....50

7 CONCLUSÃO 55

REFERÊNCIAS.....56

APÊNDICE A– CÓDIGO PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO.....61

APÊNDICE B– CÓDIGO PARA O CÁLCULO DAS ELIPSES DE MARÉ 62

1 INTRODUÇÃO

As alterações no clima percebidas recentemente são uma consequência de mais de duzentos anos de emissões líquidas de gases do efeito estufa (GEE) devido às atividades humanas, como queima de combustíveis fósseis, desmatamento e agricultura intensiva (Friedlingstein *et al*., 2023). Essas mudanças, causadas pelo aumento das concentrações desses gases, têm impactos generalizados no clima, incluindo alterações nos padrões de precipitação (Madakumbura *et al.* , 2021), aumento do nível do mar, derretimento de geleiras e eventos climáticos extremos (Oppenheimer *et al.*, 2019). O dióxido de carbono (CO2) é um dos principais gases do efeito estufa, representando aproximadamente 73,5% do total de emissões, e sua concentração na atmosfera tem aumentado significativamente ao longo dos anos, com um acentuado aumento de emissões após os anos 2000 (Filonchyk *et al.*, 2024). Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climática (IPCC, 2023), a elevação das concentrações de CO2 e outros GEE tem levado a um aumento da temperatura em cerca de 1,1 ^{0}C desde 1850-1900. Ainda de acordo com o IPCC (2023), as projeções para o aumento da temperatura global indicam que, se medidas significativas não forem tomadas para reduzir as emissões de GEE, a terra continuará a aquecer a taxas alarmantes. Os cenários mais otimistas, gerados por modelos que preveem as possíveis trajetórias de emissões de GEE, apresentam uma limitação de aumento da temperatura global de 1,5°C ou 2,0°C acima dos níveis pré-industrial. Devido a isto, ações para mitigar o lançamento desses gases na atmosfera mostraram-se necessárias e urgentes.

Para enfrentar as alterações climáticas de forma eficaz, formuladores de políticas públicas podem considerar ações potenciais alinhadas com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável sugeridos pela Nações Unidas em 2015 como: (i) desenvolver e implementar políticas que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa em setores-chave, como energia, transporte e indústria; (ii) incentivar a transição de fontes de energia fósseis para energias renováveis e de baixo carbono, como solar, eólica e hidrelétrica. Diante deste contexto, iniciou-se uma verdadeira busca por novas soluções de geração de energia limpa, em especial, a energia elétrica de origem renovável. O Brasil já se destaca por possuir uma matriz elétrica bastante limpa, com participação de 89,2% de origem renovável, conforme publicado no Balança Energético Nacional 2024. Além disso, o setor elétrico nacional emitiu 55,1

KgCO2/Mwh, índice muito abaixo comparado com países da OCDE, EUA e China (BEN, 2024).

Apesar de números positivos de emissões de gases na geração de eletricidade, o Brasil possui ainda fronteiras energéticas pouco exploradas que podem melhorar ainda mais esses índices. Neste sentido, os oceanos podem contribuir como uma fonte de energia bastante promissora. A hipótese levantada neste trabalho é que há a disponibilidade de energia oceânica que pode ser extraída a partir das correntes de marés na área estudada.

De acordo com Wiegel (2005), o conceito de maré astronômica é amplamente descrito como o movimento vertical e periódico do nível do mar resultante da força de atração gravitacional exercida por corpos celestes sobre a Terra (Lua e Sol). Por outro lado, o movimento horizontal causado pelo mesmo fenômeno é chamado de correntes de marés. Graças a natureza periódica, as marés astronômicas se destacam por sua alta previsibilidade, o que se torna uma vantagem ante a outras fontes de energia renováveis como, por exemplo, a eólica e solar (Rusu e Venugopal, 2019). Ainda segundo Wiegel (2005), as correntes de marés seguem um padrão de repetição associado à periodicidade das marés correspondentes a sua localidade e é fortemente influenciada pelo tipo de maré, pela profundidade da água e pela morfologia da costa. As correntes de marés mais intensas, assim como as maiores amplitudes de marés, podem ser observadas em áreas de águas costeiras rasas, especialmente ao longo de costas com plataformas continentais extensas (Parker, 2007), como é o caso da área estudada neste trabalho.

Embora a participação de fontes de geração renováveis de origem hidráulica na matriz elétrica brasileira tenha representado 60,2% em 2023 (BEN, 2024), a energia de origem maremotriz sequer é mencionada no Balanço Energético Nacional, indicando ser uma fonte de energia ainda pouco explorada pelo país. Portanto, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa, foi realizar uma análise do regime hidrodinâmico causado pelas marés astronômicas existente na região costeira norte do Brasil, compreendida entre os estados do Amapá, Pará e Maranhão, visando estimar o potencial energético proveniente das correntes de marés para a geração de eletricidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é realizar uma investigação do regime hidrodinâmico existente na região costeira norte do Brasil, compreendida entre os estados do Amapá, Pará e Maranhão, visando estimar o potencial energético proveniente das correntes de marés para a produção de energia renovável.

2.2 Objetivos Específicos

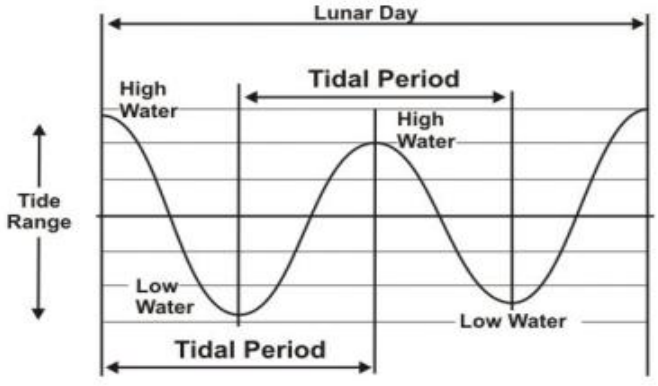
- Caracterizar a dinâmica das marés astronômicas na área de estudo;
- Indicar e analisar as correntes de marés a partir das principais constituintes harmônicas atuantes na área de estudo;
- Quantificar o potencial energético com base em uma série temporal de velocidades de correntes de marés aplicado a um conversor de energia utilizado como modelo de referência.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito de maré é comumente descrito como o movimento periódico de subida e descida do nível do mar em determinada região, geralmente nas regiões costeiras, resultante da combinação da força de atração gravitacional exercida pela lua e o sol sobre a terra durante o movimento de rotação (Wiegel, 2005; Garrison e Ellis, 2016). Por outro lado, o movimento horizontal causado pelo mesmo fenômeno é chamado de correntes de marés (Wiegel, 2005; Parker, 2007). As marés nos oceanos são ondas extremamente longas, com comprimento de onda na ordem de centenas ou até mesmo milhares de quilômetros de extensão, sendo as maiores ondas encontradas no oceano (Trujillo e Thurman, 2018; Garrison e Ellis, 2016). Embora sejam produzidas por forças astronômicas, seu comportamento é fundamentalmente determinado pela física que governa o movimento das águas, ou seja, a hidrodinâmica (Parker, 2007). Assim, para uma compreensão mais abrangente das marés é necessário abordar não só o seu forçamento astronômico, mas também a complexidade da hidrodinâmica associadas aos oceanos e áreas costeiras (Parker, 2007).

De maneira simplificada, a variação da altura da maré pode ser graficamente representada como uma onda senoidal, com altura máxima atingida pela superfície da água sendo denominada maré alta (ou preamar) e a altura mínima chamada de maré baixa (ou baixa-mar) (Figura 1) (Sverdrup e Kudela, 2017; Parker, 2007). Nesta representação, a curva senoidal oscila acima e abaixo do nível médio do mar (MSL) é a diferença entre a maré alta e a maré baixa é denominada amplitude de maré (Parker, 2007).

Figura 1 — Curva de variação da altura de maré

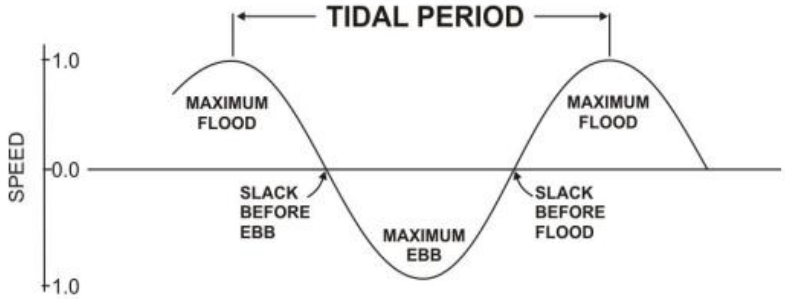


Fonte: (Parker, 2007)

O período de oscilação da maré é o tempo que leva entre uma maré alta e a próxima ou, de maneira similar, de uma maré baixa até a próxima maré baixa (Garrison e Ellis, 2016; Parker, 2007). Geralmente esse período é de 12 horas e 25 minutos para a grande maioria dos corpos d'águas do planeta terra, entretanto esse período pode ser de 24 horas e 50 minutos em algumas outras regiões do mundo (Trujillo e Thurman, 2018). No primeiro caso, denomina-se maré semidiurna, com dois ciclos de marés diárias. Já no segundo caso, recebe o nome de maré diurna com apenas um ciclo de maré ao dia (Sverdrup e Kudela, 2017). Assim, a frequência da maré é o inverso do seu período, resultando em um ciclo completo a cada 12,42 horas, ou 1,932 ciclo por dia solar, ou ainda, 2,0 ciclos por dia lunar (um dia lunar possui 24,84 horas de duração) (Pugh, 1987; Parker, 2007).

De maneira semelhante à curva de maré acima, o gráfico que ilustra a mudança na corrente de maré em uma baía ou canal também pode ser representado por uma curva senoidal. Porém, nesse caso, a senóide está acima e abaixo de uma linha de velocidade zero, que desempenha o mesmo papel da linha de referência do nível para a maré (Parker, 2007) (Figura 2). O fluxo da corrente de maré em direção a uma baía ou canal, distingue-se entre o seu movimento de entrada e saída. Onde o movimento de entrada é conhecido como corrente de enchente (flood current) e o movimento de saída é denominado de corrente de vazante (ebb current) (Trujillo e Thurman, 2018). Dessa maneira, ao longo de um ciclo de maré, a corrente de maré tem início no seu valor positivo máximo, atingindo a enchente máxima, vai até a velocidade zero (conhecido como água parada ou estofo), atinge o valor máximo negativo (vazante máxima), passa pela velocidade zero mais uma vez até alcançar a enchente máxima novamente (Parker, 2007; Pugh, 1987).

Figura 2 — Curva de corrente de maré



Fonte: (Parker, 2007)

Entretanto, para corpos d'água mais amplos, com o oceano aberto, a corrente de maré se apresenta como uma propriedade vetorial bidimensional. Tornando-se uma corrente rotativa onde a direção do fluxo da corrente gira como um ponteiro de relógio e a ponta do vetor traça uma elipse, ou um círculo quando em mar aberto (Parker, 2007). Essa rotação é causada pela combinação da rotação da terra e outras condições geográficas específicas (Parker, 2007; Pugh, 1987).

Diferentemente da previsão do tempo e do clima, as marés astronômicas se destacam por sua alta previsibilidade (Rusu e Venugopal, 2019). Isso se dá graças à sua natureza periódica e ao conhecimento aprofundado que a humanidade adquiriu sobre as forças astronômicas que dão origem às marés (White, 2017; Bowers e Roberts, 2019). O movimento de rotação e translação da terra, assim como a órbita da terra em torno da lua, são movimentos periódicos caracterizados por períodos precisos, estáveis e bastante conhecidos e (Garrison e Ellis, 2016; Sverdrup e Kudela, 2017), Apesar da previsibilidade das marés serem baseadas nas forças astronômicas, a hidrodinâmica é a responsável pela variação da amplitude da maré, pelo tempo de maré alta e baixa, pelo tipo de maré e pela velocidade das correntes de marés (Parker, 2007). A hidrodinâmica, por sua vez, é controlada pelas características geomorfológicas das baías, canais, rios e plataformas continentais como a largura, comprimento e profundidade (Parker, 2007; Bowers e Roberts, 2019). Em águas rasas, a hidrodinâmica transfere a energia das marés para novas frequências, causando distorções na forma da curva de maré, tornando-a distinta de uma curva senoidal perfeita (White, 2017; Parker, 2007). As maiores amplitudes de marés são encontradas em áreas de águas costeiras rasas, especialmente ao longo de costas com plataformas continentais extensas (Parker, 2007).

3.1 Forças Geradoras das Marés

As leis do movimento de Newton e o seu princípio de conservação de massas são fundamentos essenciais para compreender a física da dinâmica das marés. Conforme a primeira lei de Newton, um corpo em equilíbrio permanece em equilíbrio, ou um corpo em movimento permanece em movimento com a mesma velocidade e mesma direção até que uma força externa seja aplicada (Junior, Ferraro, e Soares, 2007). No nosso contexto, esse corpo pode ser um corpo d'água como os oceanos,

mares, lagos e rios. Já a segunda lei de Newton diz que a aceleração de um objeto é proporcional a magnitude da força aplicada a ele e inversamente proporcional à sua massa. Por outro lado, a Lei da Gravitação Universal de Newton descreve a atração que dois corpos massivos exercem um sobre o outro (Pugh, 1987; Junior, Ferraro, e Soares, 2007). Essa lei pode ser matematicamente expressa pela equação 1:

$$Fg = G\frac{m1\ m2}{R^2} \qquad (1)$$

onde:

Fg é a força gravitacional entre os dois corpos massivos;

G é a constante universal gravitacional (com valor igual a 6.672 x 10-11 N.m2 .kg-2);

$m1$ e $m2$ são as massas dos dois corpos envolvidos;

R é a distância entre os centros de massas dos dois corpos.

As principais forças que exercem um papel primordial nas marés oceânicas são as forças gravitacionais da lua e do sol, a força centrífuga (decorrente da órbita da terra), a força de coriolis (devido à rotação da terra em torno do seu próprio eixo), e a força de atrito gerada pelo movimento da água em relação a suas bordas (Wiegel, 2005). Entretanto, outros astros também exercem força gravitacional sobre a Terra, mas essas são consideradas insignificantes devido a suas longas distâncias e/ou massa relativamente menores (Trujillo e Thurman, 2018). Sobre isto, o melhor exemplo é a relação entre a força gravitacional da lua e do sol, embora o sol tenha uma massa cerca de 27 milhões de vezes maior que a lua, seu efeito gerador de maré é menor, pois o sol está a uma distância de aproximadamente 390 milhões de quilômetros (Garrison e Ellis, 2016; Trujillo e Thurman, 2018). Isso se dá devido à influência dos astros nas marés da terra ser diretamente proporcional à massa desse astro e inversamente proporcional ao cubo da sua distância em relação à terra (Parker, 2007; Pugh, 1987; University, 1999; Trujillo e Thurman, 2018). Essa relação é expressa pela equação 2:

$$TPFp = G\frac{m1\ m2\ 2a}{R^3} \qquad (2)$$

onde:

$TPFp$ é a força produtora de maré em um ponto p;

a é a distância do raio da terra;

G é a constante universal gravitacional (com valor igual a 6.672 x 10-11 N.m2 .kg-2);

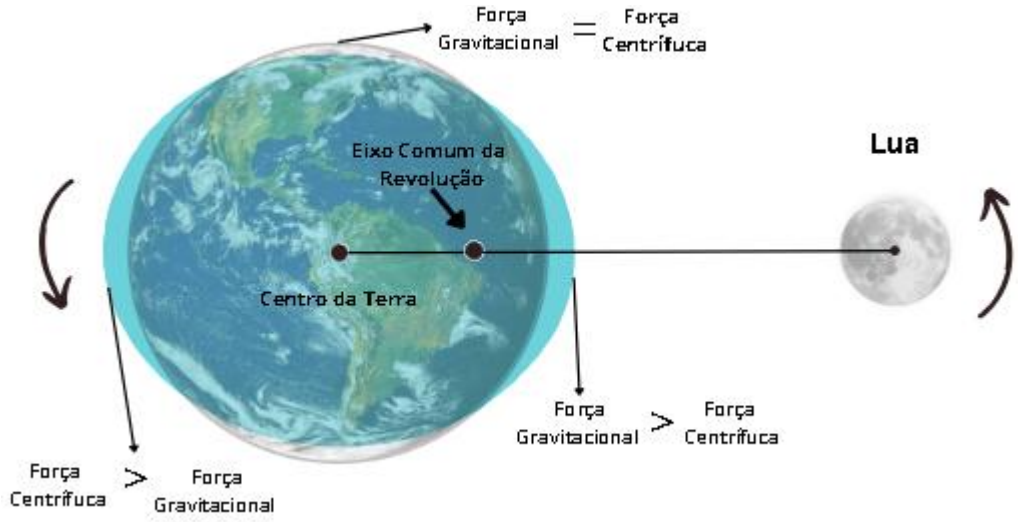
$m1$ e $m2$ são as massas dos dois corpos envolvidos;

R é a distância entre os centros de massas dos dois corpos.

No sistema Terra-Lua, as marés estão intrinsecamente ligadas ao movimento conjunto da Terra e da Lua (Harari, 2021). Embora a órbita aparente da Lua ao redor da Terra seja evidente, na realidade, ambos os corpos celestes orbitam em torno de um ponto comum (Parker, 2007). Esse ponto, conhecido como Centro de Massa, está localizado dentro da Terra, mas não em seu centro, devido à disparidade de massas entre a Terra e a Lua (Garrison e Ellis, 2016). No centro da Terra, há um equilíbrio entre a atração gravitacional, que busca unir Terra e Lua, e a força centrífuga, que tenta separá-las enquanto giram em torno desse ponto comum (Sverdrup e Kudela, 2017; Harari, 2021).

Em um oceano hipotético, desconsiderando os continentes, esse movimento resulta em dois bulbos diametralmente em oposição em relação ao centro da Terra, um no quadrante da Lua e outro no quadrante oposto à Lua (Figura 3). Durante esse processo, as forças gravitacionais e centrífugas desempenham papéis essenciais no desenvolvimento das marés e uma configuração análoga pode ser atribuída ao sistema Sol-Terra (Parker, 2007; Harari, 2021).

Figura 3 — Sistema Lua -Terra

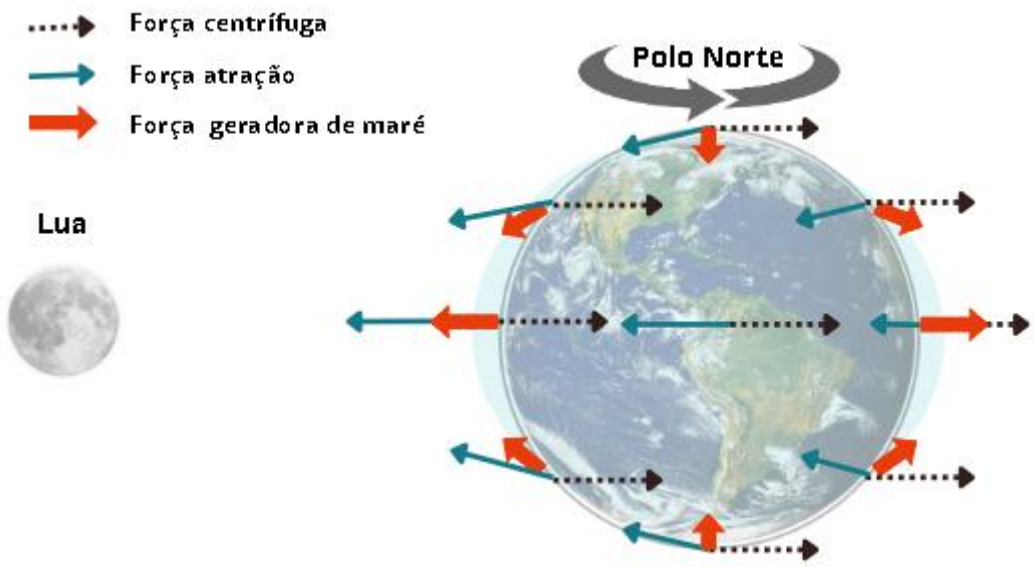


Fonte: Adaptado de (Parker, 2007)

No entanto, as forças geradoras de maré decorrentes da diferença entre a atração gravitacional da lua e a força centrífuga resultante da revolução da Terra em torno do centro do sistema Terra-Lua são, na verdade, pequenas, sendo muito menores do que a própria força gravitacional da Terra (Parker, 2007). Assim, na face da Terra que fica oposta à lua, na região do equatorial, a força geradora de maré (que se manifesta verticalmente, ascendendo da Terra em direção à lua) é tão insignificante em comparação com a força gravitacional da terrestre que não seria capaz de causar elevação (bulbos) de maré (Trujillo e Thurman, 2018; Parker, 2007). No entanto, em regiões de altas latitudes, ao norte ou ao sul do equador, em pontos da Terra que não estão diretamente abaixo da lua, uma pequena força geradora de maré menor ainda atua em direção à lua, mas já não é mais perfeitamente vertical em relação à superfície da Terra (Figura 4) (Bowers e Roberts, 2019; Garrison e Ellis, 2016; Parker, 2007). Nesse ponto, a força em direção à lua pode ser decomposta em um componente vertical e um componente horizontal, sendo esta última tangencial à superfície da Terra (Wiegel, 2005). Essa componente horizontal da força geradora de maré, embora pequena, não encontra oposição e, portanto, consegue movimentar a água no oceano. Todas as componentes horizontais tendem a deslocar a água em direção ao equador, provocando uma orientação focada no ponto diretamente abaixo

da lua. Da mesma forma, do outro lado da Terra, surge outro bulbo (Parker, 2007; Wiegel, 2005).

Figura 4 — Forças geradoras de maré



Fonte: Adaptado de (Wiegel, 2005)

3.2Análise Harmônica

O método para extrair constituintes harmônicas de maré de uma série de dados temporais, pode ser obtido, de maneira simplificada, isolando a contribuição de um constituinte específico, por exemplo, o M2 (principal constituinte lunar semidiurna), que possui um período de aproximadamente 12,42 horas (Parker, 2007). Para isso, é preciso dividir uma série temporal de níveis de água em segmentos, cada um desses segmentos com 12,42 horas de duração. Em seguida, esses segmentos são somados e calculados a média. Para a constituinte M2, cada segmento terá suas contribuições sincronizadas, ou seja, a contribuição máxima de M2 acontecerá simultaneamente em cada segmento da série temporal (Parker, 2007). Já para o constituinte S2 (principal constituinte solar semidiurna), que possui um período de 12,00 horas, a contribuição máxima para a maré, em cada seguimento de 12,42 horas, sofrerá uma alteração gradual ao deslocar-se de um segmento para outro. Ao somar todos os segmentos de 12,42 horas da série temporal, a contribuição do constituinte S2 é anulada, restando

a contribuição do M2 apenas. O mesmo ocorre para os outros constituintes de maré (Parker, 2007).

3.2.1 Equação de Previsão da Altura da Maré Harmônica

A análise harmônica de um registro de maré em determinado local tem a finalidade de prever a elevação da maré nessa região específica do oceano (Sverdrup e Kudela, 2017; Harari, 2021). Para atingir esse objetivo, o registro local é submetido a uma análise de Fourier para identificar constituintes em frequências específicas. Além disso, também são utilizados resultados da teoria do equilíbrio, a partir dos quais são determinados uma amplitude $\mathbf{H_j}$ e uma fase $\mathbf{G_j}$ para cada uma das constituintes de maré (Harari, 2021). Dessa forma, $\mathbf{H_j}$ e $\mathbf{G_j}$ são denominadas de constantes harmônicas relacionadas a uma constituinte que representa características de posição do mar naquele local. Assim, a altura da maré pode ser prevista em qualquer momento naquele ponto do oceano (Harari, 2021; Parker, 2007). Isso pode ser matematicamente expresso pela equação a seguir:

$$h(t) = H_0 + \sum_{j=1\ até\ n} f_j\, H_j\, cos\,(a_j t + \{V_{0j} + u_j\} - G_j\,) \qquad (3)$$

onde:

$h(t)$ = altura da maré em um instante *t* qualquer;

H_0 = altura média do nível da água acima do datum;

n = número de constituintes de maré usados para fazer a previsão;

f_j= fator de nó para o constituinte de maré *j*;

H_j= amplitude do constituinte de maré *j*;

a_j= velocidade angular do constituinte de maré *j* (em graus por hora);

t = tempo, contado a partir de algum ponto inicial (em horas);

V_{0j} + u_j = argumento de equilíbrio para o constituinte de maré *j* em t=0. (em graus);

G_j = fase do constituinte de maré *j.*

Portanto, a Teoria do Equilíbrio fornece os valores de a_j, f_j, V_{0j} e u_j; enquanto a análise harmônica da maré de um local, fundamentada na análise de Fourier de um

registro, explica como a geometria dos continentes, a topografia do leito oceânico, a progressão das ondas de maré, a força de Coriolis e os modos naturais de oscilação alteram a maré de equilíbrio naquele local, fornecendo os valores de H_j e G_j para cada constituinte (Harari, 2021).

Na Figura 5 são mostradas as principais constituintes harmônicas de marés. Além delas, há uma grande quantidade de outras constituintes não listadas. Vários autores como Doodson (1921) dentre outros, cita ou usa, por exemplo, mais de 300 sendo classificadas entre diurna, semidiurna, ter-diurna e de longos períodos. As constituintes diurnas têm período T_j de aproximadamente 24 horas e velocidade angular $\boldsymbol{a_j}$ = 360^0/ T_j (cerca de 15^0/h). Já as constituintes semidiurnas têm períodos em torno de 12 horas e velocidade angular de 30^0/h; as ter-diurnas possuem T_j = 8h e $\boldsymbol{a_j}$ = 45^0/h e as de longo período apresentam períodos superiores a 1 dia (Harari, 2021).

As amplitudes de equilíbrio das componentes de maré são usualmente relacionadas com a amplitude de equilíbrio da principal componente lunar semidiurna M2 (Harari, 2021; Parker, 2007; Pugh, 1987).

Figura 5 — Principais constituintes harmônicas

Componente	Símbolo	Frequência angular (°/hora)	Período (d ou h)	Amplitude de equilíbrio
Solar anual	Sa	0,04110	364,96 d	1,27
Solar semi anual	Ssa	0,08210	182,70 d	8,02
Lunar mensal	Mm	0,54446	27,55 d	9,09
Lunar quinzenal	Mf	1,09810	13,66 d	17,23
Maior elíptica lunar diurna	Q_1	13,39866	26,87 h	7,90
Principal lunar diurna	O_1	13,94304	25,82 h	41,50
Principal solar diurna	P_1	14,95893	24,07 h	19,40
Luni-solar diurna	K_1	15,04107	23,93 h	58,04
Maior elíptica lunar semi-diurna	N_2	28,43973	12,66 h	19,20
Principal lunar	M_2	28,98410	12,42 h	100,0
Principal solar	S_2	30,00000	12,00 h	46,60
Luni-solar semi-diurna	K_2	30,08214	11,97 h	12,70
Lunar ter-diurna	M_3	43,47616	8,28 h	1,31

Fonte: (Harari, 2021)

3.2.2 Equação de Previsão da Corrente de Maré Harmônica

A corrente de maré é uma grandeza vetorial dada pela magnitude da velocidade e sua direção. Seu registro é analisado de maneira semelhante à elevação da maré, levando-se em conta os componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da corrente (Harari, 2021; Bowers e Roberts, 2019). Dessa forma, para avaliar harmonicamente os dados de corrente, é fundamental, inicialmente, converter cada par de velocidade e direção em dois componentes ortogonais (Norte e Leste) (Parker, 2007).

As correntes são comumente medidas como uma velocidade $\boldsymbol{q}$ e uma direção $\boldsymbol{\theta}$ no sentido horário em relação ao Norte. Assim, tradicionalmente, utiliza-se coordenadas cartesianas e componentes de correntes na direção positiva Norte ($\boldsymbol{v}$) e positiva Leste ($\boldsymbol{u}$) (Pugh, 1987; Parker, 2007). Então, se $\boldsymbol{q}$ e $\boldsymbol{\theta}$ for, respectivamente, a velocidade e direção da corrente a partir do norte, as componentes norte e leste serão:

$$\boldsymbol{v = q\ cos\ \theta}$$

$$\boldsymbol{u = q\ sen\ \theta}$$

Com isso, para prever a corrente de maré, a equação 3 (vista na seção 3.2.1) será utilizada duas vezes, uma para cada componente ortogonal, substituindo h por v e u.

$$v(t) = V_0 + \sum_{j=1\ até\ n} \quad f_j\ V_j\ cos\ (a_j t + \{V_{0j} + u_j\} - Gv_j) \qquad (4)$$

$$u(t) = U_0 + \sum_{j=1\ até\ n} \quad f_j\ U_j\ cos\ (a_j t + \{V_{0j} + u_j\} - Gu_j) \qquad (5)$$

Assim, os parâmetros a serem determinados pela análise são os componentes médios da corrente (V_0 e U_0) e os dois pares de amplitude e fase da corrente (V_j, Gv_j) e (U_j, Gu_j) (Pugh, 1987). A partir desses parâmetros, pode-se definir várias propriedades importantes das elipses de maré para cada constituinte como: excentricidade, semieixos e inclinação (Harari, 2021).

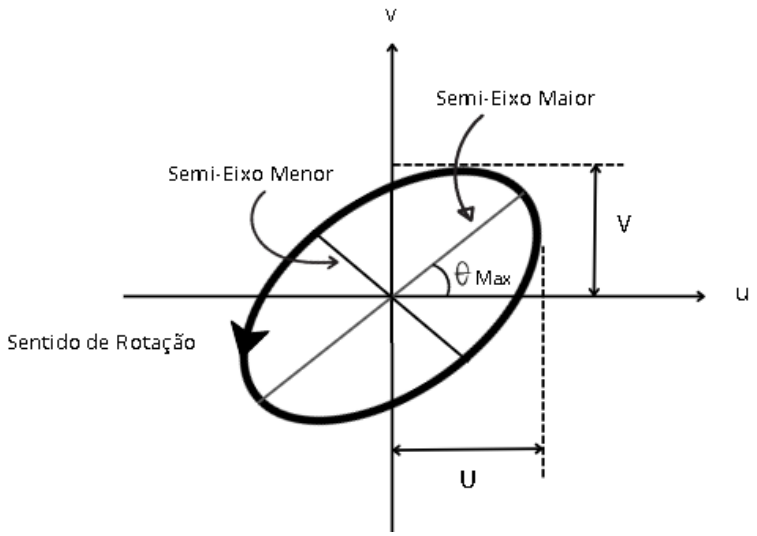
3.2.3 Elipses de marés

As elipses de maré são representações gráficas comumente utilizadas para descrever as variações das correntes de maré no tempo (Mesquita, 1997; Harari e Camargo, 1994). Essas elipses facilitam a visualização e a interpretação das mudanças na intensidade e direção das correntes de marés em um determinado local.

Com os dois pares de amplitudes (V, U) e fases (Gv, Gu) da corrente de maré, resultante da análise das equações 4 e 5 (mencionadas na seção 3.2.2), é possível obter os parâmetros necessários para traçar uma elipse de marés de uma constituinte harmônica qualquer.

Os parâmetros das elipses derivados das amplitudes e fases dos componentes u e v são: (semieixo maior, semieixo menor, excentricidade, inclinação e fase) esses parâmetros são características que descrevem a forma e a orientação de uma elipse (Parker, 2007; Pugh, 1987)(ver figura 6).

Figura 6 — Elementos básicos de uma elipse de maré



Fonte: Adaptada de (Pugh, 1987)

onde:

Semieixo Maior = indica a velocidade máxima da corrente representada pela metade do eixo maior da elipse;

Semieixo Menor = indica a velocidade mínima da corrente representada pela metade do eixo menor da elipse;

Inclinação = indica a orientação da elipse em relação ao eixo Leste-Oeste;

Excentricidade = é a razão entre o semieixo menor e o semieixo maior. quando essa razão é um valor negativo, então a elipse é traçada no sentido horário;

Ângulo de Fase = Representa o tempo em que a velocidade máxima da corrente ocorre em relação a um ponto de referência no tempo (por exemplo, horário de Greenwich).

3.4 Sistema Anfidrômico

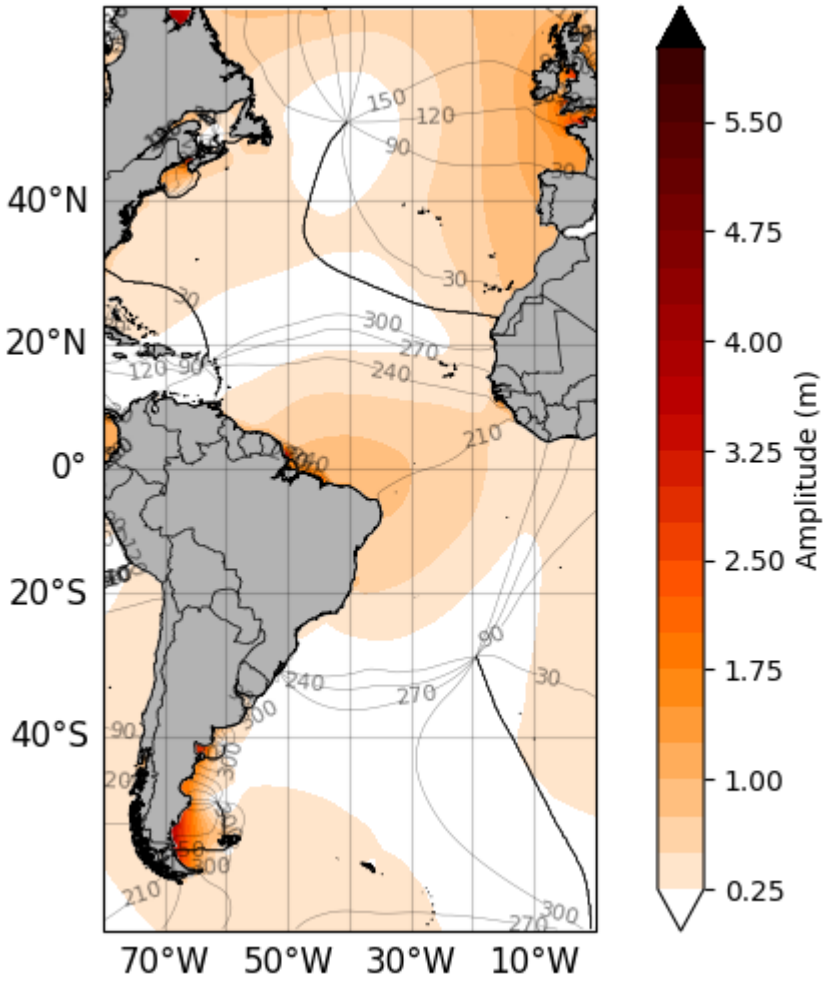
As ondas são um fenômeno da natureza que se manifesta com bastante frequência no meio marinho, sendo a sua propagação e quebra na praia a característica mais visível pelo homem. Essas ondas, comumente observadas na superfície do mar, são causadas devido a ação dos ventos e possuem periodicidade com variação de poucos segundos (Pugh, 1987). Por outro lado, as ondas de marés têm períodos de aproximadamente 24 e 12 horas, o que corresponde às marés diurnas e semidiurnas respectivamente (Garrison e Ellis, 2016; Pugh, 1987). Embora apresentem características similares de propagação, a onda de maré possui comprimento de onda que pode chegar a centenas de quilômetros, tornando-as com propriedades distintas das ondas de superfície (Garrison e Ellis, 2016; Trujillo e Thurman, 2018). Assim, ondas que possuem comprimento de onda superior a profundidade da água são chamadas de ondas longas (Pugh, 1987; Sverdrup e Kudela, 2017).

A propagação de uma onda de maré no oceano ocorre a partir da criação de um sistema anfídrômico. Esse sistema surge da combinação entre os efeitos geradores de marés, o movimento de rotação da terra e as condições geomorfológicas das bacias oceânicas (Harari, 2021). A presença do continente exerce forte influência no comportamento das ondas de maré, devido a restrições ao livre deslocamento das águas nas bacias oceânicas (Garrison e Ellis, 2016). Além disso, a variação da profundidade, a forma do continente e a extensão da plataforma continental também

desempenha um papel importante nas características das ondas de maré. Consequentemente, cada região apresenta um comportamento específico de maré (Harari, 2021; Trujillo e Thurman, 2018).

Os sistemas anfidrômicos são compostos por cristas de ondas que circulam em torno de um ponto central denominado ponto anfidrômico (Harari, 2021; Garrison e Ellis, 2016). Neste ponto não há maré, ou seja, a variação da maré é nula, significando que a amplitude é zero ou quase zero e vai aumentando à medida que se afasta do ponto anfidrômico (Garrison e Ellis, 2016). Assim, as linhas de mesma amplitude são concêntricas, originando-se do ponto anfidrômico. Enquanto as linhas de mesma fase, resultante da propagação em volta desse ponto, são radiais (Figura 7) (Garrison e Ellis, 2016; Sverdrup e Kudela, 2017; Harari, 2021).

Figura 7 — Sistema anfidrômico (constituinte M2)



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Conversores de Energia Hidrocinética (HKECs)

Os conversores de energia hidrocinética (Hydrokinetic Energy Converters – HKECs) representam uma tecnologia emergente voltada à captação da energia cinética presente em massas de água em movimento, como rios, correntes de maré e canais artificiais (Yuce & Muratoglu, 2015; Khan et al., 2009). Esses sistemas têm o potencial de contribuir significativamente para a matriz energética renovável ao gerarem eletricidade sem a necessidade de barragens ou represamentos, o que os diferencia das usinas hidrelétricas convencionais (Yuce & Muratoglu, 2015). A pesquisa e o desenvolvimento de HKECs abrange uma variedade de tecnologias e abordagens, com o objetivo de otimizar a eficiência, reduzir custos e mitigar os impactos ambientais (Laws & Epps, 2016). Os desafios incluem a variabilidade do recurso hídrico, as condições ambientais adversas e a necessidade de projetos robustos e confiáveis (Ibrahim et al., 2021).

Dentro das tecnologias de HKEC, as turbinas de eixo horizontal (HAHTs) e de eixo vertical (VAHTs) são duas das principais categorias de dispositivos para extração de energia de correntes hídricas (Khan et al., 2009).

3.5.1 Turbinas de Eixo Horizontal (HAHTs):

As HAHTs são semelhantes às turbinas eólicas, com um rotor que gira em um plano perpendicular ao fluxo da água. São consideradas uma tecnologia relativamente madura para extração de energia hidrocinética (Laws & Epps, 2016). Estudos têm se concentrado na otimização do design das pás, no controle do passo e em outras estratégias para melhorar a eficiência e o desempenho em diferentes condições de fluxo (Ibrahim et al., 2021).

- **Vantagens:** As HAHTs podem alcançar alta eficiência em fluxos de alta velocidade e unidirecionais, aproveitando a experiência da tecnologia de turbinas eólicas (Khan et al., 2009).

- **Desvantagens:** A sensibilidade à direção do fluxo requer mecanismos de orientação em correntes de maré com fluxo reverso (Khan et al., 2009), e designs complexos podem aumentar os custos (Laws & Epps, 2016).

3.5.2 Turbinas de Eixo Vertical (VAHTs):

As VAHTs têm um eixo de rotação vertical em relação à superfície da água. As turbinas de eixo vertical são valorizadas por sua capacidade de operar em fluxos multidirecionais, como as correntes de maré em estuários e zonas costeiras complexas (Khan et al., 2009). A pesquisa desta tecnologia busca melhorar a eficiência, que geralmente é menor do que a das HAHTs, e otimizar o design para diferentes condições de fluxo (Ibrahim et al., 2021).

- **Vantagens:** Dispensam a necessidade de sistemas de orientação, uma vez que seu funcionamento é independente da direção do fluxo. Além disso, certos projetos apresentam construção mais simples e maior robustez estrutural (Khan et al., 2009; Ibrahim et al., 2021).

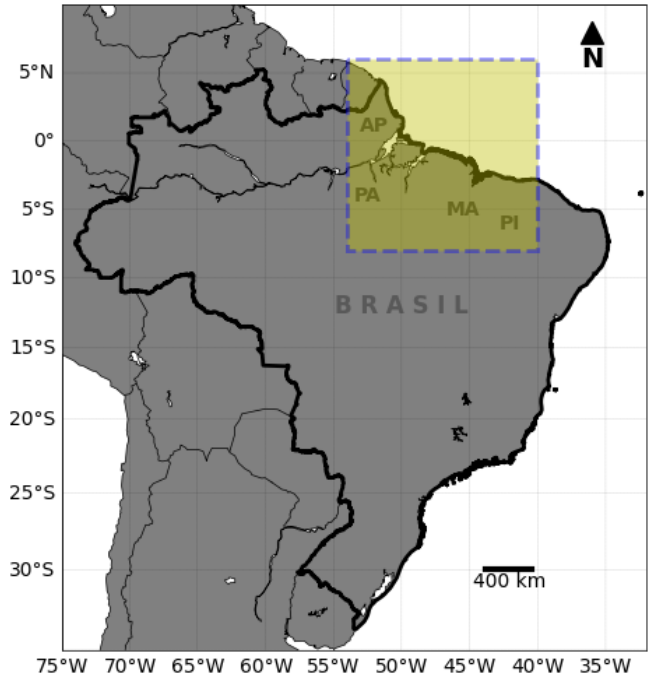
- **Desvantagens:** A eficiência das VAHTs tende a ser inferior à das HAHTs, especialmente em correntes de alta velocidade. Além disso, seu desempenho pode ser afetado por turbulência e variações abruptas de fluxo (Khan et al., 2009; Laws & Epps, 2016).

Os conversores de energia hidrocinética apresentam-se como uma alternativa em acessão promissora na comtribuição para a diversificação da matriz energética renovável. A escolha entre HAHTs e VAHTs deve considerar fatores como o regime de corrente do local de instalação, as necessidades energéticas da aplicação e as restrições ambientais e técnicas envolvidas na sua implementação (Khan et al., 2009).

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, compreendida na costa da região Norte do Brasil, abrange os estados do Amapá, Pará e Maranhão (Figura 8). Essa região apresenta um ecossistema vasto e diversificado com uma importância significativa na área econômica, social e ambiental (IBGE, 2024). Para compreender essa complexa região costeira é necessário a exploração de diversos aspectos que envolvem, desde a geomorfologia das plataformas continentais até questões socioeconômicas que caracterizam as populações locais dos estados que compõem essa região.

Figura 8 — Área de estudo

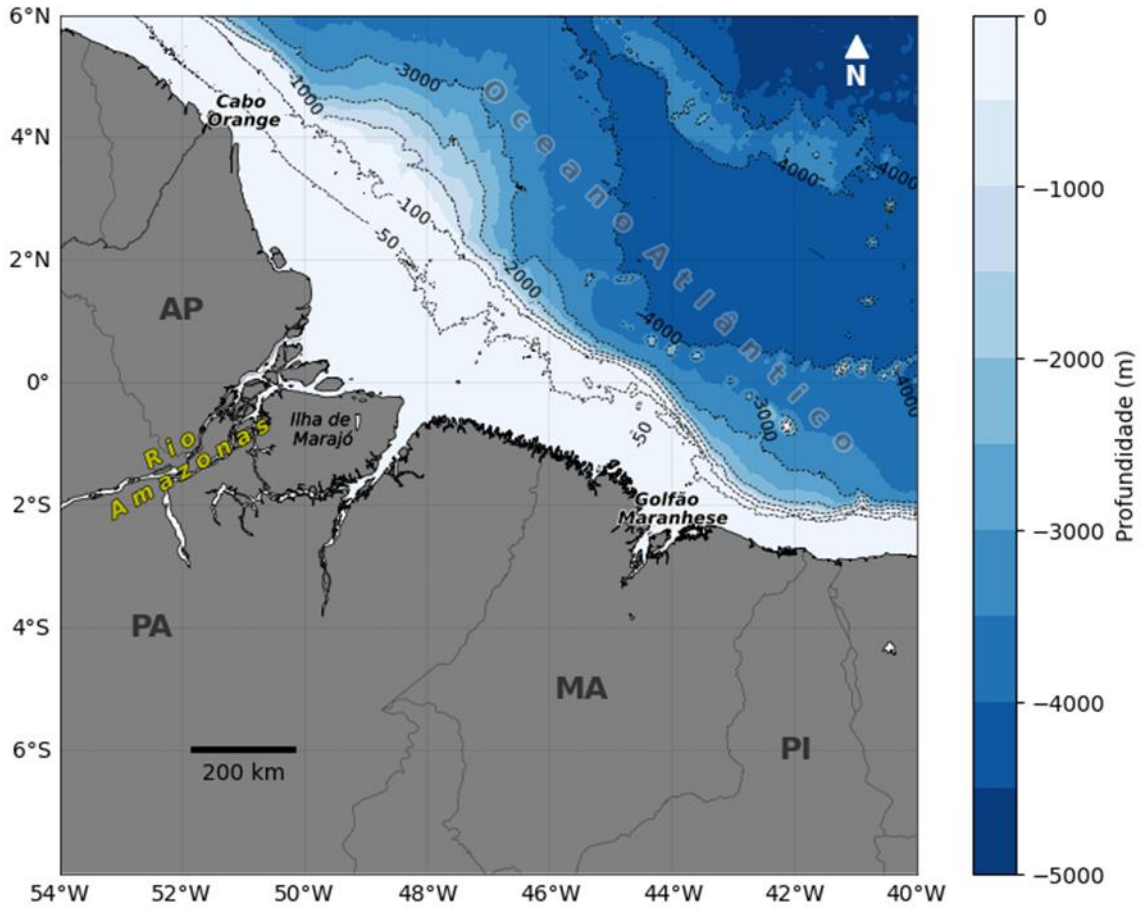


Fonte: Elaborado pelo autor

Os estados do Amapá, Pará e Maranhão possuem em comum plataformas continentais extensas, que exercem uma função determinante na dinâmica costeira. Essas plataformas continentais se caracterizam por possuírem a parte mais larga da margem continental brasileira (Figura 9), com média que varia de 133 km, no extremo norte da região, chegando a cerca de 300 km de largura em frente da ilha de Marajó, na foz do rio Amazonas, e vai diminuindo de largura gradativamente, acentuando o estreitamento a partir do golfão maranhense (Muehe e Garcez, 2005; Palma, 1979).

Essa progradação se deu em decorrência do grande aporte de sedimentos das descargas fluviais, principalmente do rio amazonas (Muehe e Garcez, 2005). Ainda de acordo com Palma (1979), a inclinação da plataforma diminui à medida que há um aumento da sua largura, passando a registrar proporções de 1:1267 no cabo Orange e 1:3143 na foz do rio amazonas.

Figura 9 — Batimetria da área de estudo



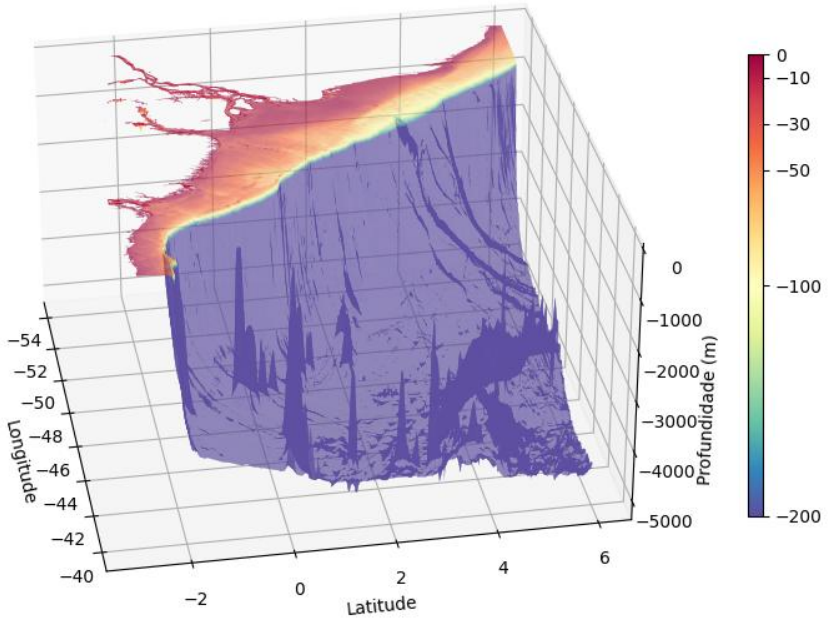
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do GEBCO - 2023 (resolução de 15 segundos)

Ademais, a profundidade da quebra da plataforma nesta região atinge aproximadamente 100 m (Figuras 10 e 11).

A zona costeira da região Norte brasileira, que abrange a área de estudo, apresenta características climáticas específicas típicas de regiões equatoriais, como altas temperaturas, altas taxas de precipitação anual, elevada amplitude de marés e extensas áreas de manguezais (Pereira *et al.*,2009). Além disso, essa região se destaca pela alta dinâmica costeira, onde há forte influência dos ventos alísios, do

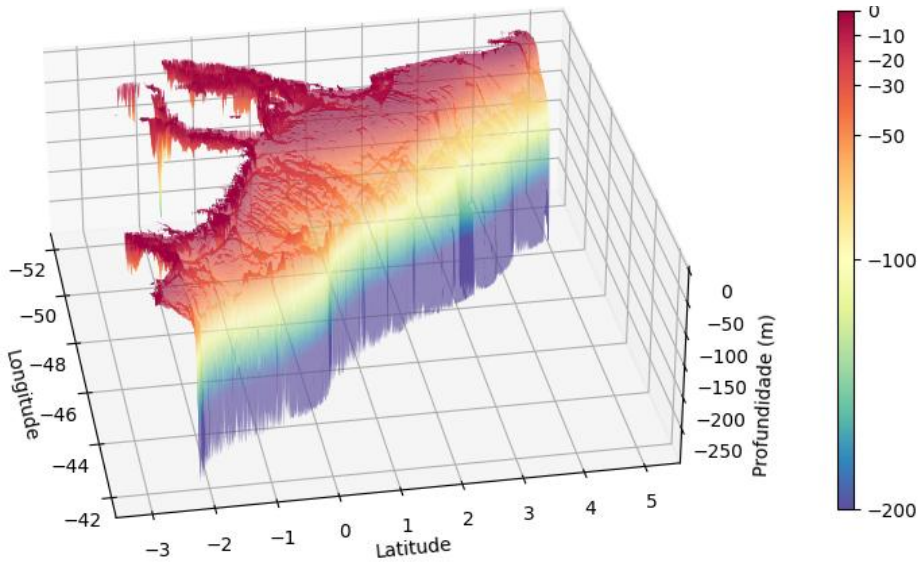
regime de marés e do transporte de sedimentos, notadamente pelo rio Amazonas, cuja descarga forma uma extensa pluma de água de baixa salinidade, atingindo milhares de quilômetros em direção ao mar aberto afetando não só a dinâmica costeira, mas também a biodiversidade marinha (Pereira, 2007).

Figura 10 — Plataforma continental da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do GEBCO - 2023 (Resolução de 15s)

Figura 11 — Relevo do fundo da plataforma continental da área estudada

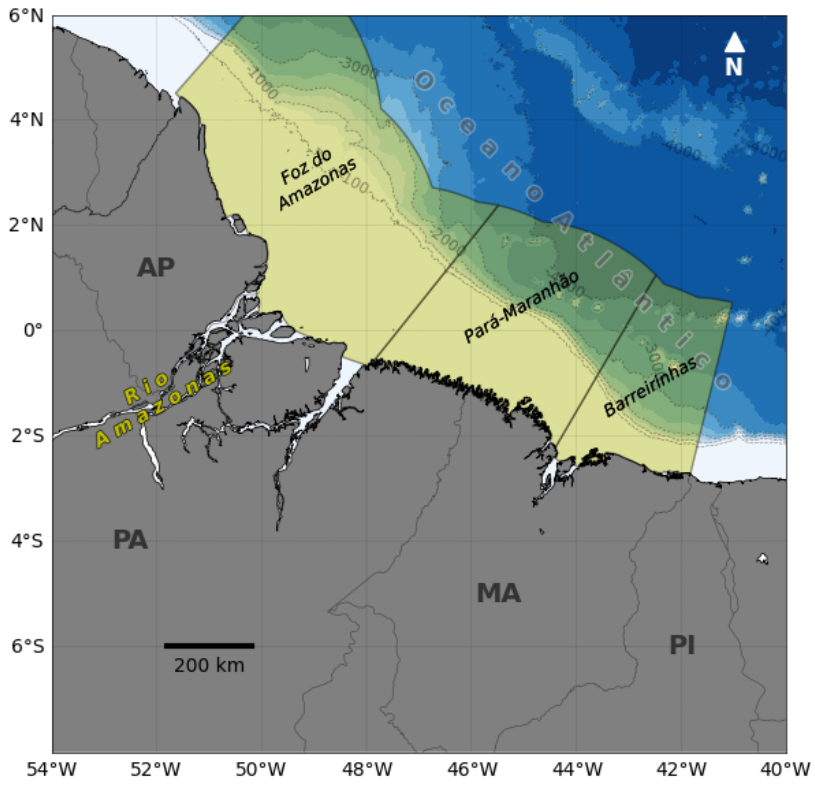


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do GEBCO - 2023 (Resolução de 15s)

A área estudada também está inserida no contexto da margem equatorial e abrange três bacias sedimentares sendo elas: Bacia da Foz do Amazonas, Bacia Pará-Maranhão e Barreirinhas (Figura 12).

A bacia da Foz do Amazonas está situada no extremo noroeste da margem equatorial brasileira, fazendo fronteira com a Guiana Francesa e estendendo-se ao longo do litoral dos estados do Amapá e parte do Pará. Essa bacia abrange aproximadamente uma extensão territorial de 283.000 km2, incluindo não apenas a plataforma continental, mas também o talude e a região de águas profundas e ultra profundas (Travassos e Freitas, 2021).

Figura 12 — Bacias sedimentares que integram a área de estudo



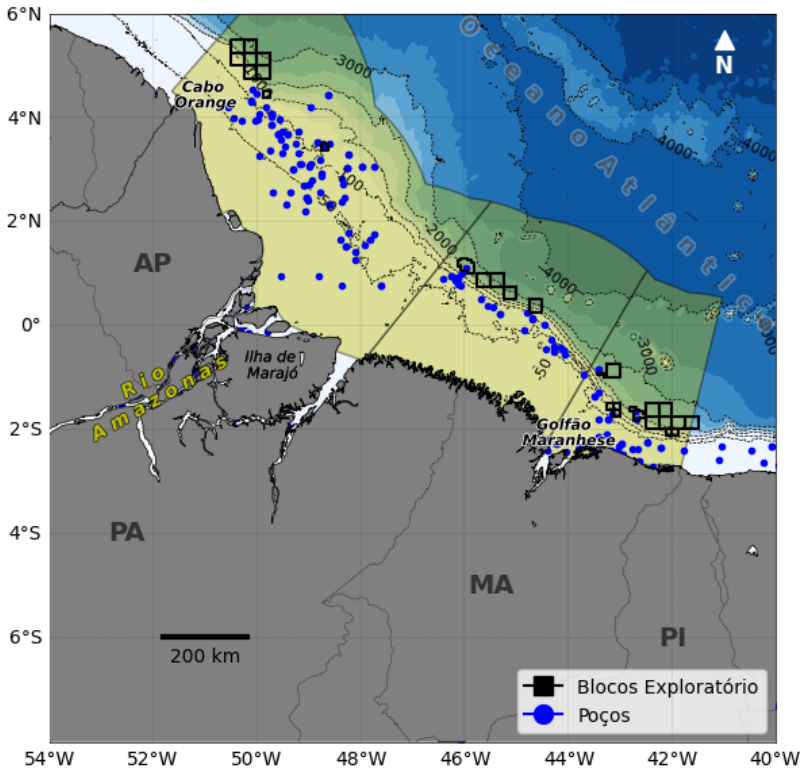
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da ANP (https://geomaps.anp.gov.br/geoanp)

A formação da Bacia da Foz do Amazonas remonta à Faixa Móvel Rockelides que teve sua origem durante a aglutinação do antigo supercontinente Gondwana, devido à junção das faixas Araguaia e Gurupi (Figueiredo, Zalán e Soares, 2007).

A Bacia Pará-Maranhão encontra-se assentada sobre o Cráton de São Luís. O limite norte desta bacia corresponde, em grande parte, com a projeção da crosta continental da Zona de Fratura Oceânica São Paulo, que se originou no ponto de contato entre a Faixa Móvel Araguaia/Gurupi, de idade neoproterozóica, e a parte paleoproterozóica do Cráton de São Luís (Soares *et al.*, 2007). Já a Bacia Barreirinhas foi implantada no embasamento compartimentado do Cráton de São Luiz, da Faixa Gurupi e da província de Borborema (Cordani, Neves e Filho, 2009).

Economicamente, as principais atividade na região estão relacionadas com a pesca e o turismo. Além disso, essa região tem recebido bastante atenção devido às recentes descobertas de reservas de hidrocarbonetos e à exploração bem-sucedida nos países vizinhos, como Guiana e Suriname. A exploração de petróleo e gás nesta região vem sendo estudada, em águas rasas, desde décadas anteriores, mas só recentemente, em águas profundas nas bacias da margem equatorial, especialmente na bacia da foz do amazonas (Figura 13), que os estudos mostraram potencial exploratório. Pelo relevante potencial petrolífero, essa região deve receber investimentos na ordem de US$ 3,0 bi nos próximos cinco anos, como previsto pela Petrobras no seu plano de negócios (2025-2029).

Figura 13 — Blocos exploratórios

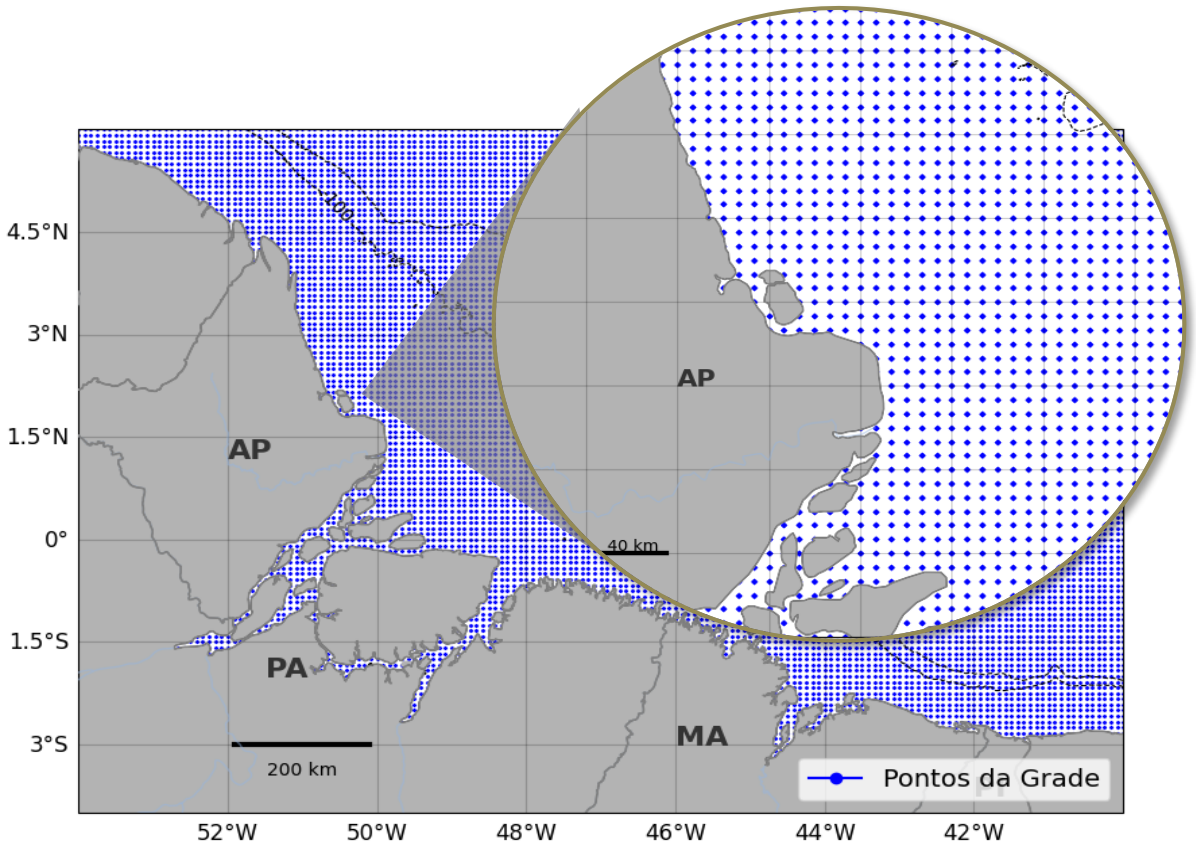


Fonte: Elaborado pelo autor com dados da ANP (https://www.gov.br/anp)

5 METODOLOGIA

A metodologia aplicada consistiu na utilização de dados do modelo global de maré barotrópica (TPXO9.v5a), disponibilizado pela Universidade de Oregon e implementados com métodos descrito em detalhes por Egbert e Erofeeva (2002), para analisar as características hidrodinâmicas em diferentes pontos da plataforma continental na área de interesse. A metodologia envolveu o uso desses dados para estudar as linhas cotidais de fase, as elipses de marés e a amplitude de maré, indicando a propagação da onda de maré, a trajetória das correntes e a elevação das marés respectivamente, com foco especial nos principais constituintes harmônicos de marés M2 e S2 (principais componentes semidiurnas lunar e solar respectivamente). Essa abordagem permitiu uma compreensão mais detalhada dos padrões de maré sob a plataforma continental, contribuindo para estudos mais amplos sobre o comportamento hidrodinâmico da região.

Figura 14 — Grade de dados (Resolução 1/12)



Fonte: Elaborado pelo autor

Já para a análise do potencial energético das correntes de marés, foi empregado uma abordagem analítica e computacional, em linguagem python (ver APÊNDICE A), utilizando dados de uma série temporal abrangendo aproximadamente 30 dias de dados de correntes de marés que distribui campos de velocidade de superfície zonal (u) e meridional (v) com escala de tempo horária, totalizando 745 horas de observações, em uma grade regular com resolução de 1/12° (aprox. 8km) (Figura 14). Esses dados são um produto da combinação de modelos assimilados por dados que descrevem a circulação da maré e fazem parte do escopo do sistema Copernicus Marine/ Mercator Ocean. Além disso, como modelo de referência de conversor de energia, foi utilizado um dos projetos de tecnologia hidro cinética marinha de eixo vertical (RM2) que faz parte do *Reference Model Project* (RMP), liderada pelos Laboratórios Nacionais Sandia (SNL) e patrocinado pelo departamento de energia dos EUA (DoE), conforme Neary *et al.* (2014).

A metodologia para simular a geração de energia incluiu uma distribuição de frequência para representar a variabilidade da velocidade das correntes ao longo do tempo em cada ponto da grade de dados, seguida pela aplicação desses dados aos parâmetros do converso de energia. É importante salientar que o modelo de referência de conversor de energia foi utilizado exclusivamente para modelar matematicamente a conversão de energia cinética em eletricidade e quantificar os potenciais elétricos em cada faixa de velocidade, sem que tenha sido elaborado qualquer estudo de previsão técnica e financeira para sua implementação local.

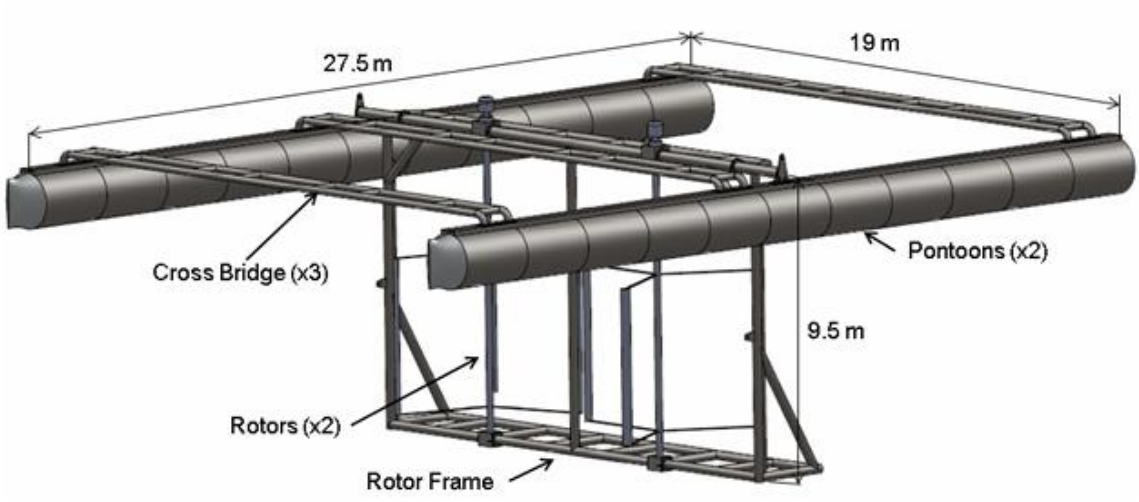
5.1 Descrição do conversor de energia

Por possuírem geralmente características multidirecionais, as correntes de marés podem ser melhor aproveitadas utilizando turbinas capazes de gerar energia de forma eficiente nessas condições. Por isso, este estudo utilizou os parâmetros de um conversor de energia flutuante (RM2) com turbina de eixo vertical, que é ideal para operar em ambientes com correntes de superfícies multidirecionais (Figuras 15 e 16). Os parâmetros do converso de energia utilizado neste estudo foi obtido de uma palhinha conforme Previsic (2012). A seguir são apresentados os parâmetros do sistema de energia detalhadamente.

5.1.1 Especificações do converso de energia

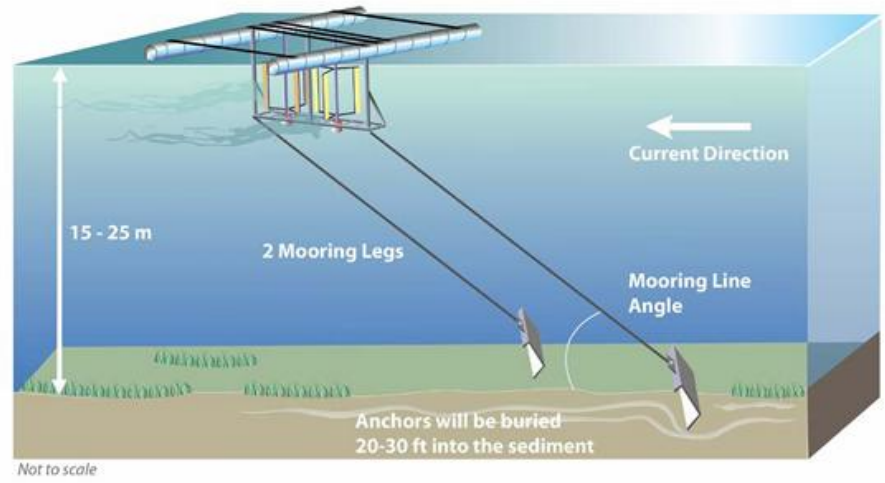
- Diâmetro do Rotor: **6,45 m**
- Altura do Rotor: **4,84 m**
- Número de Rotores por Turbina: **2**
- Profundidade do média do Rotor: **4,84 m**
- Área do Rotor: **62,4 m²**
- Velocidade de corte: **0,7 m/s**
- Capacidade Nominal do Gerador: **89,5 kW**
- Eficiência da Caixa de Engrenagens: **94,0%**
- Eficiência do Gerador: **88,9%**
- Eficiência do Transformador: **96,0%**
- Eficiência do Inversor de Potência: **97,0%**
- Disponibilidade do Arranjo/Turbina: **95%**
- Eficiência da Transmissão: **98%**

Figura 15 — Modelo de referência do conversor de energia (RM2)



Fonte: (Neary, et al., 2014)

Figura 16 — Ilustração de um conversor em operação



Fonte: (Neary, et al., 2014)

5.2 Modelagem

A modelagem matemática adotada para o cálculo do potencial energético aplicado ao modelo de referência de conversor de energia pode ser vista detalhadamente no Quadro 1 e resumidamente no Gráfico 1 integrando diversas etapas, destacando-se:

I. Combinação das componentes zonal (u) e meridional (v) para calcular a velocidade total de superfície em cada ponto da grade.
II. Estabelecimento de limites para classes de velocidade, delimitando uma faixa de 0.0 a 3.0 m/s com variação de 0.1 m/s.
III. Utilização de ferramentas computacionais em linguagem python para criar estruturas de dados que armazenam resultados, incluindo a distribuição de frequência para cada classe de velocidade em cada ponto da grade.
IV. Cálculo da potência teórica do fluido disponível em cada faixa de velocidade em cada ponto da grade, levando em consideração a área do rotor (Ar) do modelo de referência do conversor de energia e a velocidade ajustada à profundidade (Va) de acordo com a Equação 6.

$$P_{fluid} = \frac{1}{2}.Va^3.Ar \qquad (6)$$

V. Utilização dos coeficientes de desempenho (CP), eficiências de caixa de velocidade (GBE), gerador (EG), transformador (ET) e inversor de energia (EIE) para estimar a potência do rotor e a potência elétrica de acordo com as Equações 7 e 8.

$$P_{rotor} = P_{fluid} . CP \qquad (7)$$

$$P_{elétrica} = P_{rotor} . GBE. EG. ET. EIE \qquad (8)$$

VI. Multiplicação da potência elétrica ajustada pela frequência de ocorrência das velocidades (FO), considerando a disponibilidade da turbina (DT) e eficiência de transmissão (Et), para calcular a energia anual em KWh de acordo com a Equação 9.

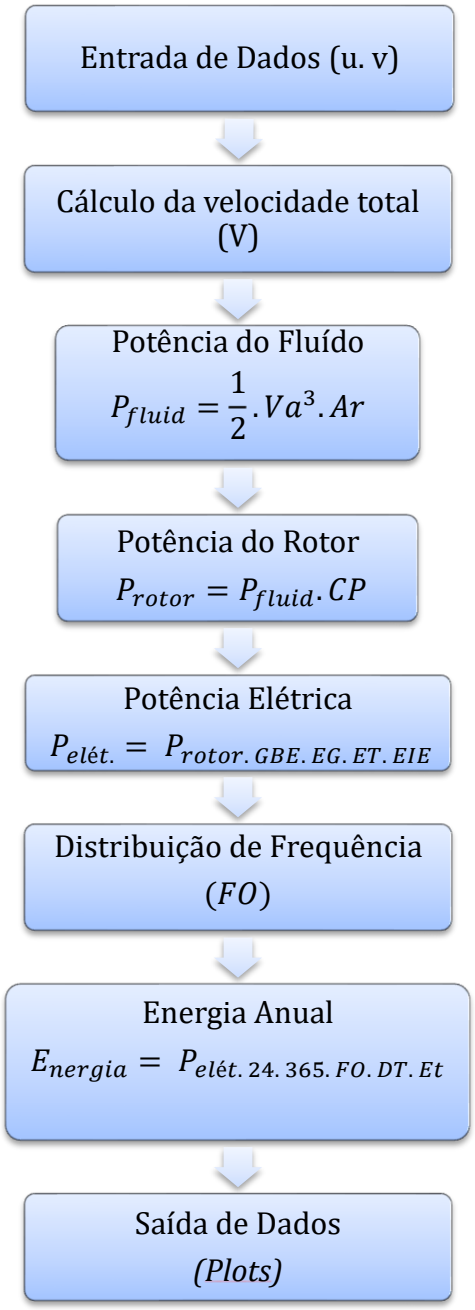
$$Energia = P_{elétrica} . 24.365. FO. DT. Et \qquad (9)$$

Quadro 1 — Exemplo do cálculo do potencial energético em um ponto da grade

Surf. Velocity m/s	Freq. Distrib.	Depth Adjusted Velocity m/s	CP	P. luid kW	P. Rotor kW	P. Electric kW	Energy kWh/year
0	0.00%	0.00	0.000	0	0	0	0
0.1	0.00%	0.00	0.000	0	0	0	0
0.2	0.00%	0.16	0.000	0	0	0	0
0.3	0.00%	0.26	0.000	0	0	0	0
0.4	0.03%	0.35	0.000	1	0	0	0
0.5	1.58%	0.45	0.000	3	0	0	0
0.6	4.37%	0.55	0.000	5	0	0	0
0.7	7.63%	0.64	0.456	8	4	3	1,841
0.8	10.69%	0.74	0.456	13	6	5	3,934
0.9	9.91%	0.84	0.466	18	9	7	5,409
1	8.23%	0.94	0.468	26	12	9	6,268
1.1	7.52%	1.03	0.474	35	16	13	7,825
1.2	6.43%	1.13	0.476	45	22	17	8,820
1.3	5.66%	1.23	0.478	58	28	22	9,979
1.4	5.45%	1.33	0.481	73	35	27	12,171
1.5	5.13%	1.43	0.483	91	44	34	14,262
1.6	4.46%	1.52	0.479	111	53	41	14,992
1.7	4.77%	1.62	0.460	133	61	48	18,584
1.8	4.12%	1.72	0.437	159	70	54	18,188
1.9	3.76%	1.82	0.422	188	79	62	18,928
2	3.42%	1.92	0.405	220	89	69	19,342
2.1	2.59%	2.02	0.383	256	98	76	16,108
2.2	1.52%	2.11	0.347	295	102	80	9,892
2.3	0.91%	2.21	0.304	338	103	80	5,930
2.4	0.57%	2.31	0.269	386	104	81	3,780
2.5	0.49%	2.41	0.235	437	103	80	3,179
2.6	0.47%	2.51	0.207	493	102	79	3,013
2.7	0.30%	2.61	0.184	553	102	79	1,942
2.8	0.00%	2.71	0.000	0	0	0	0
2.9	0.00%	2.80	0.000	0	0	0	0
3	0.00%	2.90	0.000	0	0	0	0

Fonte: **(Previsic, 2012)**

Gráfico 1 — Etapas da modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Cálculo dos elementos da elipse de maré

Este trabalho baseou-se no método descrito por Pawlowicz, Beardsley e Lentz (2002) para encontrar os parâmetros característicos da elipse de maré. Para isso, fez-se o uso de álgebra complexa utilizando as amplitudes de correntes (U, V) e fases (Gu,Gv) das duas componentes vetoriais para obter um par de amplitudes complexas (a_u, a_v) conforme equações 10 e 11 (ver APÊNDICE B).

$$a_u = Ue^{-iGu} \qquad (10)$$

$$a_v = Ve^{-iGv} \qquad (11)$$

O semieixo maior (L_k) é calculado somando as amplitudes complexas das componentes de maré a_u e a_v. Esse eixo da elipse representa a amplitude máxima da corrente horizontal. Por outro lado, o semieixo menor (l_k) é calculado subtraindo as amplitudes das componentes de maré a_u e a_v, onde representa a diferença entre as amplitudes das componentes de maré (Pawlowicz, Beardsley e Lentz, 2002). É importante destacar que, se $l_K > 0$, a corrente segue uma trajetória anti-horária ao longo da elipse. Já se $l_k < 0$, a corrente segue uma trajetória horária (Pawlowicz, Beardsley e Lentz, 2002; Mesquita, 1997). Assim, esses parâmetros rotativos da elipse são calculados conforme as equações abaixo:

$$L_k = |a_u| + |a_v| \qquad (12)$$

$$l_k = |a_u| - |a_v| \qquad (13)$$

A Inclinação da elipse θ_k (no sentido anti-horário em relação ao leste) indica a orientação da corrente horizontal em relação ao eixo de referência. A aplicação de "mod 180" é uma forma de assegurar que a inclinação da elipse seja sempre reportada dentro de um intervalo fixo (0 a 180 graus), eliminando redundâncias e simplificando a interpretação dos resultados (Pawlowicz, Beardsley e Lentz, 2002). A fórmula para calcular a inclinação é expressa na equação 14:

$$\theta_k = \frac{ang(a_u)+ang(a_v)}{2} mod\ 180 \qquad (14)$$

6 RESULTADOS

A dinâmica das marés astronômicas é predominantemente influenciada por um conjunto de constituintes harmônicas. Destacam-se, na área estudada, a constituinte M2, principal componente lunar semidiurna, representando aproximadamente 58,5% da influência total no efeito da maré. Em seguida, a constituinte S2, principal componente solar, exerce cerca de 14% de influência sobre as marés na região. Logo após, por ordem de importância, seguem as constituintes N2, M4 e K2, representando 9,5%, 5,6% e 4,8% de influência, respectivamente. Juntas, de maneira combinada, essas cinco constituintes harmônicas respondem por mais de 90% da influência sobre as marés astronômicas na área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1 — Percentual de influência no efeito da maré para cada constituinte

Constituinte Harmônca	Nome	Período (h)	Amplitude max (m)	Influência (%)
M2	Principal lunar semidiurna	12.42	3.97	58.47
S2	Principal solar semidiurna	12.00	0.96	14.14
N2	Lunar elíptica maior semidiurna	12.66	0.65	9.57
M4	Principal lunar quadiurna	6.21	0.38	5.60
K2	Luni-solar semidiurna	11.97	0.33	4.86
Outras 17	-	-	-	7.36

Fonte: Elaborado pelo autor
Nota: Cálculo baseado nas amplitudes máximas de cada constituinte harmônicas que compõem os dados do modelo global de maré TPXO9.v5a

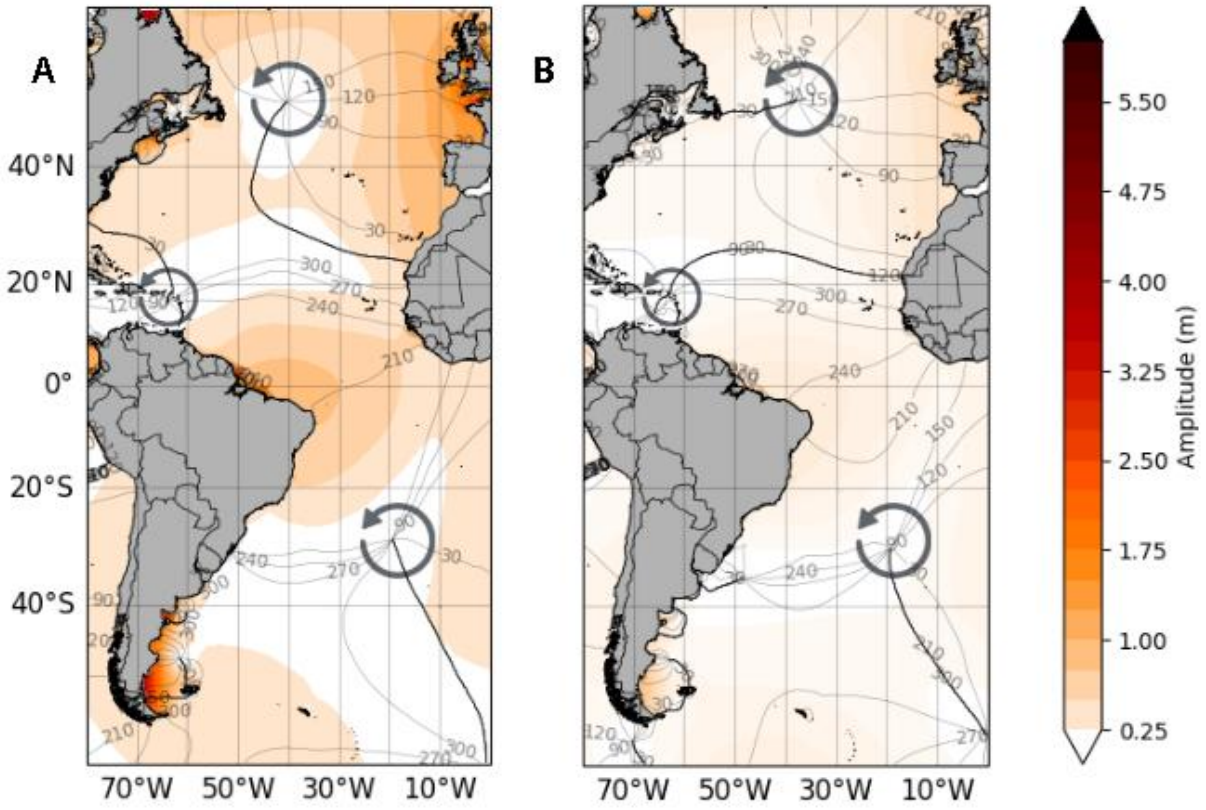
6.1 Análise da onda de maré

Como mencionado na seção 3.4, os sistemas anfidrômicos são constituídos de cristas de ondas longas de mesma fase que se propagam em volta de um ponto anfidrômico. A Figura 17 apresenta os sistemas anfidrômicos (amplitude e fase) na bacia do Oceano Atlântico, referente aos constituintes harmônicos M2 e S2 respectivamente, plotados a partir dos dados do modelo global de maré TPOX9.v5a (Egbert e Erofeeva, 2002). Geralmente, o sentido de rotação dessas ondas em volta do ponto anfidrômico é horário, para o hemisfério sul, e anti-horário, para o hemisfério norte. Contudo, os sistemas anfidrômicos no Atlântico Sul, para os constituintes M2 e

S2, apresentam rotação no sentido contrário ao que deveria indicando que existem dinâmicas de ondas mais complexas envolvidas, conforme descrito por Pugh (1987).

O tempo que a onda de maré leva para dar uma volta completa em torno do seu ponto anfidrômico é o mesmo que o período de oscilação de cada constituinte harmônica. Assim, a onda de maré realizará um ciclo completo em 12.42 horas, para o principal constituinte lunar semi-diurno M2 e 12.00 horas, para o principal constituinte solar semi-diurno S2.

Figura 17 — Sistema anfidrômico na bacia do Atlântico para M2 e S2

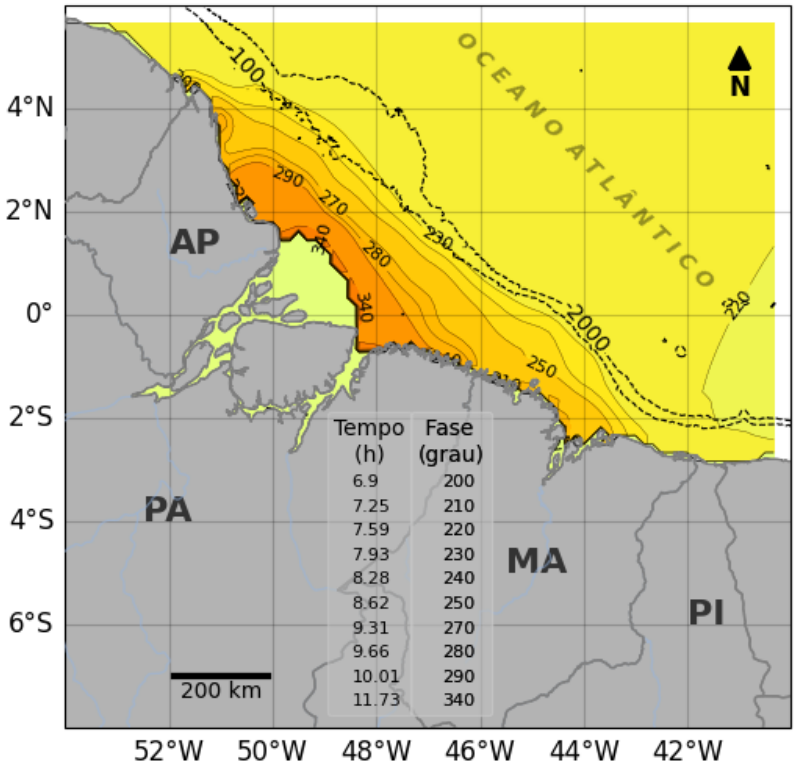


Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: **A** - Mapa cotidal referente a constituinte harmônica M2 Oceano Atlântico. **B** - Mapa cotidal da constituinte harmônica S2. Ambus obtidos a partir dos dados do modelo global de maré barotrópica TPXO9.v5a **(Egbert e Erofeeva, 2002)**, com as amplitudes H em metros (contorno preenchido) e fase G em grau (linhas). Observa-se a presença de 3 pontos anfidrômicos no Atlântico representado a propagação da onda de maré.

As figuras abaixo mostram as linhas cotidais de fase, indicando a propagação da onda de maré sobre a plataforma continental para os principais constituintes examinados. O constituinte M2 (Figura 18) se propaga perpendicularmente ao continente no sentido nordeste - sudoeste com uma frequência angular de 28,98^0/h, alcançando a plataforma continental em aproximadamente 8 horas a partir do seu ponto anfidrômico e requerendo mais 3 horas e 48 minutos acima da plataforma antes de atingir o limite da linha de costa do continente. Comportamento semelhante é observado para o constituinte S2 (Figura 19), com diferença na velocidade de propagação, sendo sua frequência angular igual a 30,00^0/h.

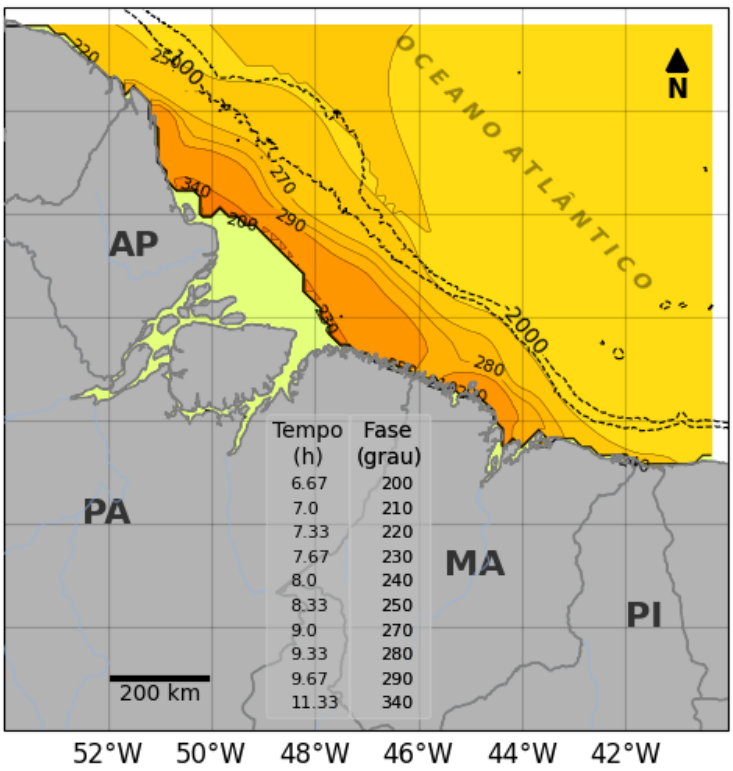
Figura 18 — Linhas cotidais de fase M2



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: Mapa produzido com dados do TPXO9.v5a

Figura 19 — Linhas cotidais de fase S2



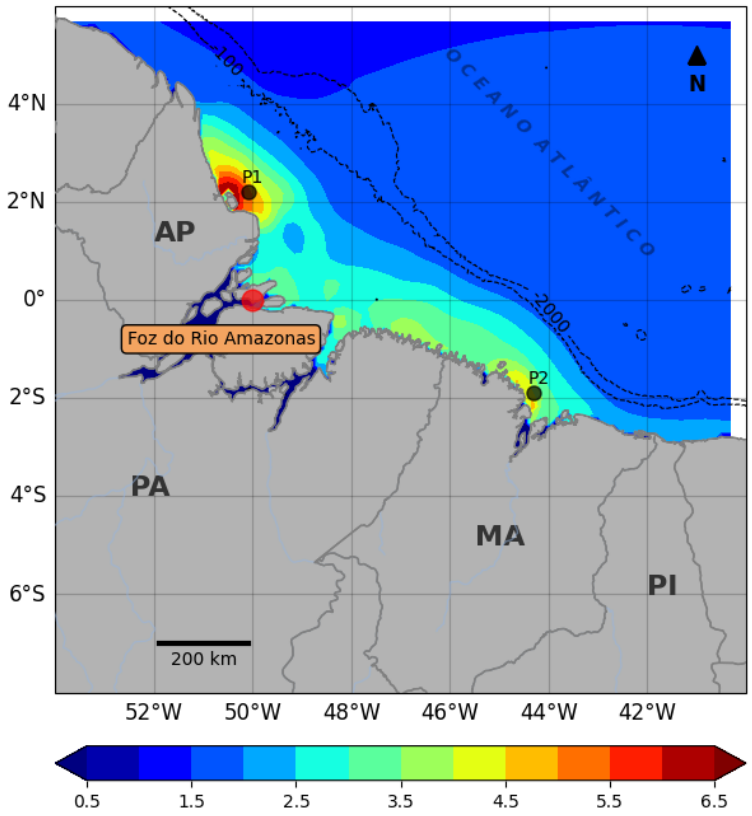
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: Mapa produzido com dados do TPXO9.v5a

6.2 Análise da amplitude de maré

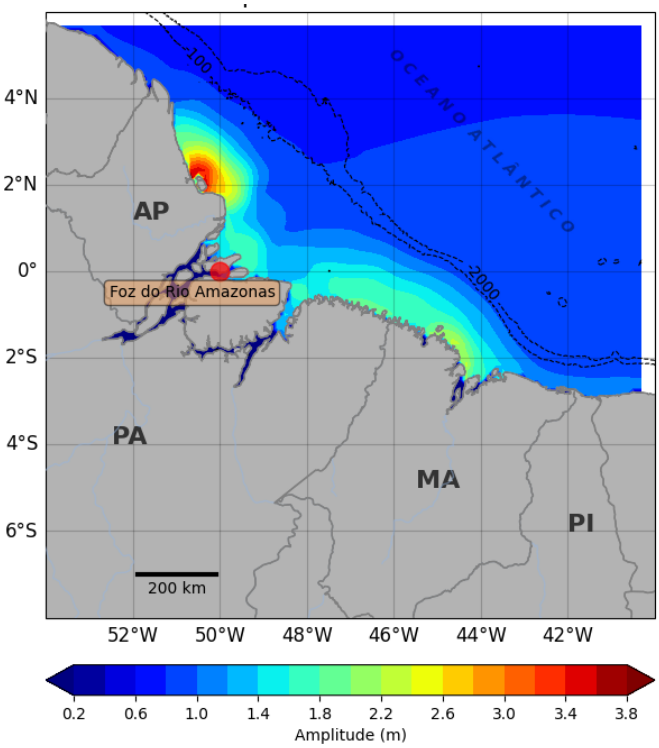
A área estudada é caracterizada por ser uma região com regime de macromarés, apresentando predominantemente amplitudes superiores a 4 metros de altura. A Figura 20 mostra a combinação das amplitudes de marés dos 22 componentes harmônicos que compõe os dados do TPOX9.v5a. As maiores amplitudes podem ser observadas nas proximidades da ilha de Maracá, na costa do estado do Amapá (P1), e de Alcântara, no estado do Maranhão (P2). Valores de amplitudes tão significativos estão de acordo com plataformas continentais extensas e condições específicas de batimetria, características condizentes com área de estudo. Já as figuras 21 e 22 apresentam a contribuição das principais constituintes harmônicas examinadas para a composição da amplitude de maré. A constituinte M2 (Figura 21) apresenta maiores amplitudes, com máxima de 3,8 metros na costa do estado do Amapá. Na Figura 22 são observadas as amplitudes do constituinte S2, com máxima amplitude de 0,95 metros na costa do estado do Maranhão.

Figura 20 — Amplitudes de maré na área de estudo



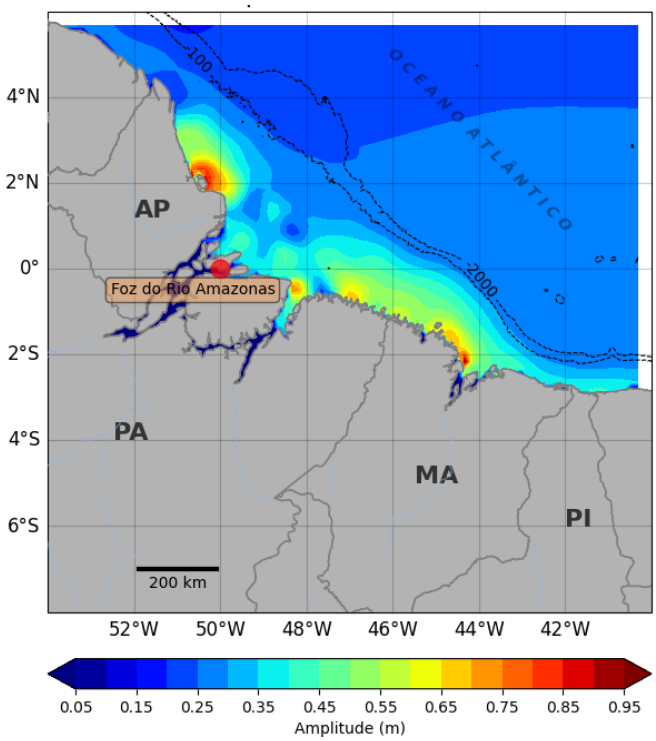
Fonte: Elaborado pelo autor com dado do TPXO9.v5a

Figura 21 — Amplitude de maré M2



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do TPXO9.v5a

Figura 22 — Amplitude de maré S2

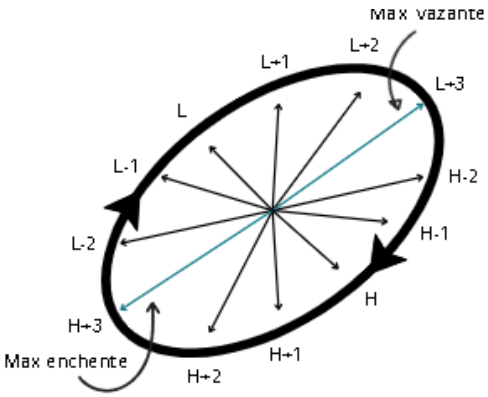


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do TPXO9.v5a

6.3 Análise da corrente de maré

A descrição da trajetória das correntes de marés é frequentemente realizada através do conceito de elipse de maré, conforme descrito por Harari e Carmargo (1994) e Mesquita (1997). As elipses de maré expressam graficamente o correspondente a um ciclo completo de corrente de maré de cada constituinte harmônico (Figura 23). Mais informações sobre elipses de maré podem ser vistas na seção 3.2.3 deste trabalho. As figuras 24 e 25 apresentam as elipses de corrente de maré associadas às principais constituintes harmônicas analisadas na área de estudo. O constituinte M2 (Figura 24) possui correntes mais intensas, com valores máximos alcançando 144,5 cm/s entre a costa dos estados do Amapá e Pará. A orientação da elipse se dá predominantemente perpendicular às costas dos estados do Amapá e do Pará e paralelas à costa do estado do Maranhão. Além disso, o acentuado achatamento das elipses indica um movimento quase de vaivém das correntes máxima de enchentes e máxima vazantes.

Figura 23 — Ilustração conceitual de um ciclo de corrente de maré semidiurna

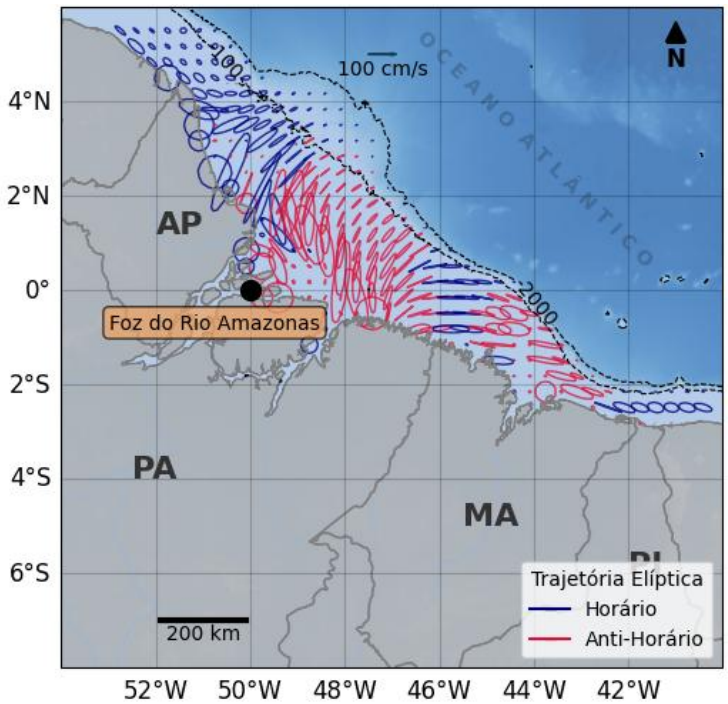


Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: Representação gráfica de uma elipse de maré com período de 12hs. as setas indicam os vetores velocidades em cada hora de um ciclo de maré (H: maré alta, L: maré baixa).

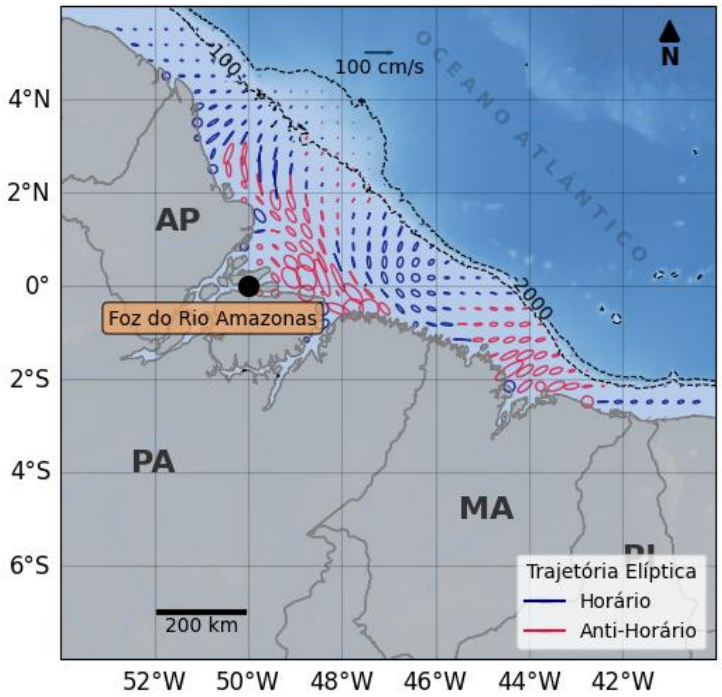
Já o constituinte S2 (Figura 25) apresenta velocidades máximas por volta de 94,7 cm/s, com elipses mais arredondadas na região em frente à ilha de marajó, no estado do Pará, e na Baía de São Marcos, no estado do Maranhão. é importante destacar que a diferença do sentido de rotação das elipses observadas nas figuras abaixo, segundo Pugh (1987), pode ser explicada pela geomorfologia da região, pela batimetria do fundo da plataforma e pelas reflexões das ondas costeiras.

Figura 24 — Elipses de maré M2



Fonte: Elaborado pelo outro com dados do TPXO9.v5a

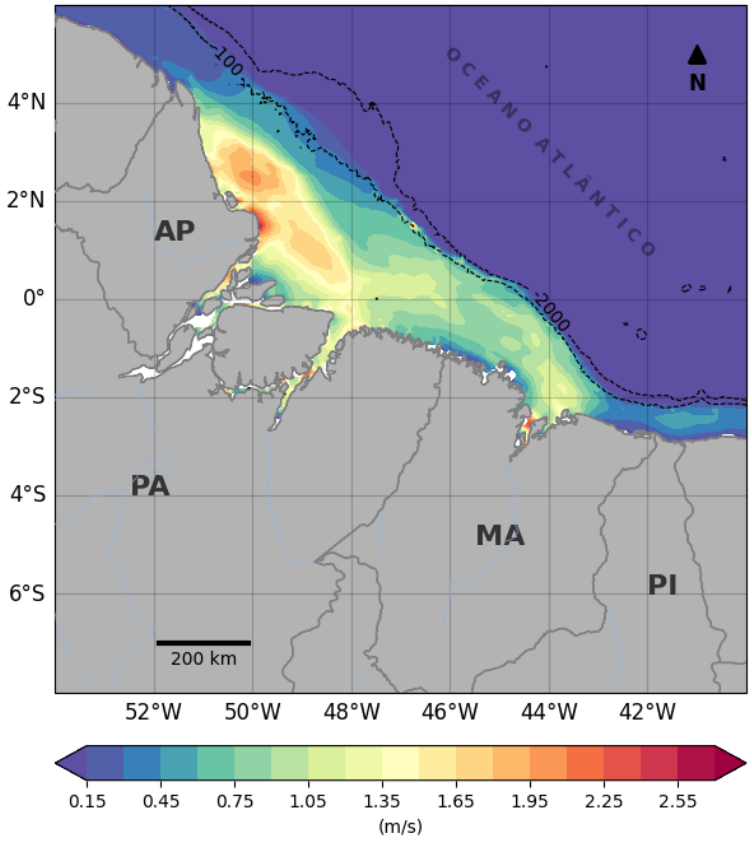
Figura 25 — Elipses de maré S2



Fonte: Elaborado pelo outro com dados do TPXO9.v5a

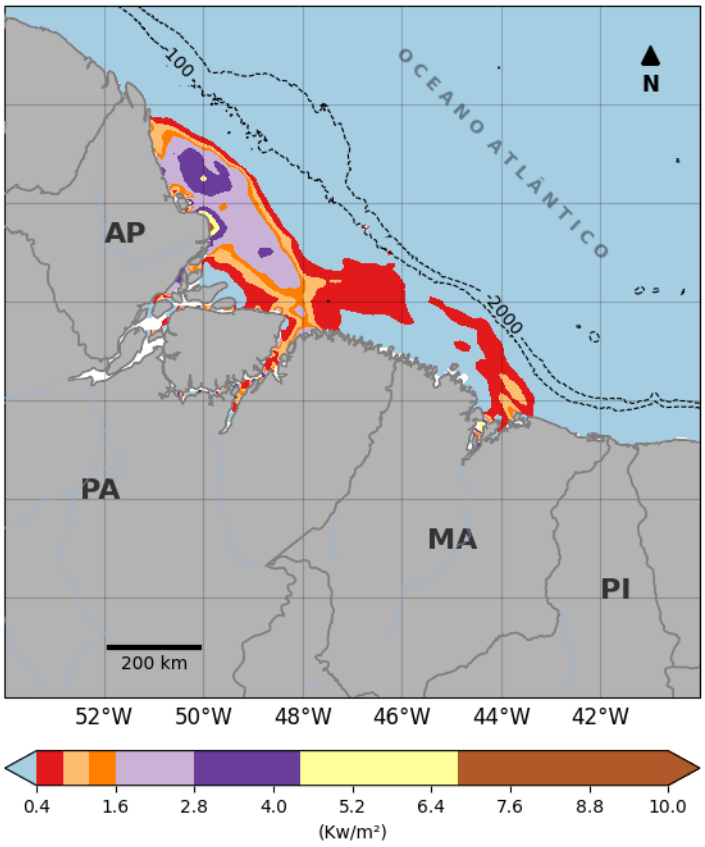
A Figura 26 apresenta a média das velocidades extraídas a partir de uma série temporal abrangendo aproximadamente 30 dias de dados de correntes de marés, totalizando 745 horas de observações (ver seção 5), fornecendo uma representação visual das condições médias de velocidade ao longo desse período. Esta análise, como esperado, indica velocidades mais intensas de corrente na região costeira do estado do Amapá, assim como na costa do Maranhão, notadamente na Baía de São Marcos.

Figura 26 — Média das Velocidades



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 — Densidade de potência cinética



Fonte: Elaborado pelo autor

Essas condições de correntes de maré refletem diretamente na capacidade de geração de energia nesses lugares, como pode ser visto na Figura 27, onde predominantemente se verifica densidades de potência superiores a 2000 w/m2 na costa Amapaense com picos pontuais ultrapassando os 6000 w/m2, especialmente na Baía de São Marcos, no Maranhão. Essas estimativas de densidades médias de potência cinética foram calculadas de acordo com a Equação 15 abaixo conforme os

trabalhos de Ali *et al.* (2023) e Novico *et al*. (2021).

$$P_{Corrente} = \frac{1}{2}.\rho.V^3 \qquad (15)$$

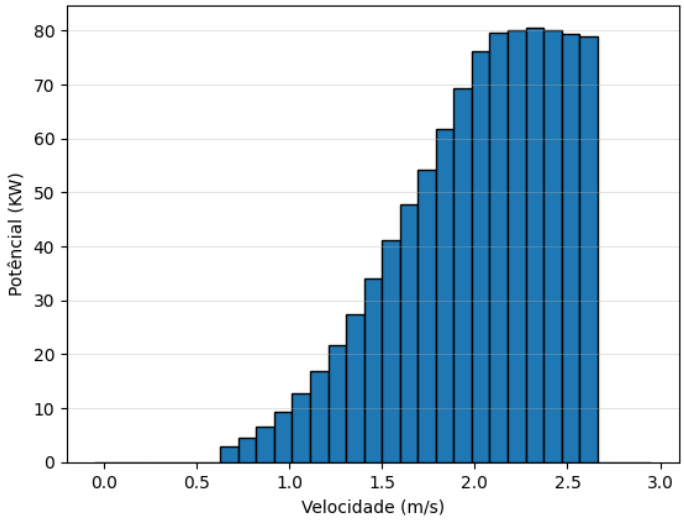
Onde:

$P_{Corrente}$ é a potência da corrente de maré em Kw/m^2, ρ é a densidade da água do mar (utilizado como padrão1025 Kg/m^3) e V é a velocidade da corrente de maré em m/s.

6.4 Análise do potencial energético.

O Gráfico 2 mostra a potência elétrica estimada do conversor de energia utilizado como modelo de referência em relação a diferentes velocidades (ver seção 5). Esse gráfico oferece uma visualização da potência disponível em cada faixa de velocidade, proporcionando uma compreensão do desempenho do conversor em condições diversas. Já o Gráfico 3 destaca a capacidade de geração de energia anual do conversor, levando em consideração os diferentes níveis de velocidade. Ambos os gráficos contribuem significativamente para a compreensão do potencial de geração de energia do conversor e oferece uma demonstração de como a variação da velocidade impacta a quantidade total de energia gerada em uma escala anual.

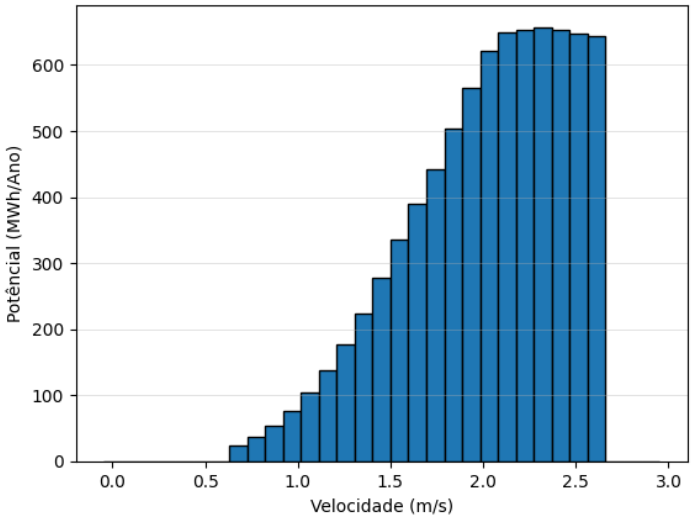
Gráfico 2 — Curva da potência elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: Potência do conversor de energia (KW) em cada faixa de velocidade.

Gráfico 3 — Curva de geração de energia



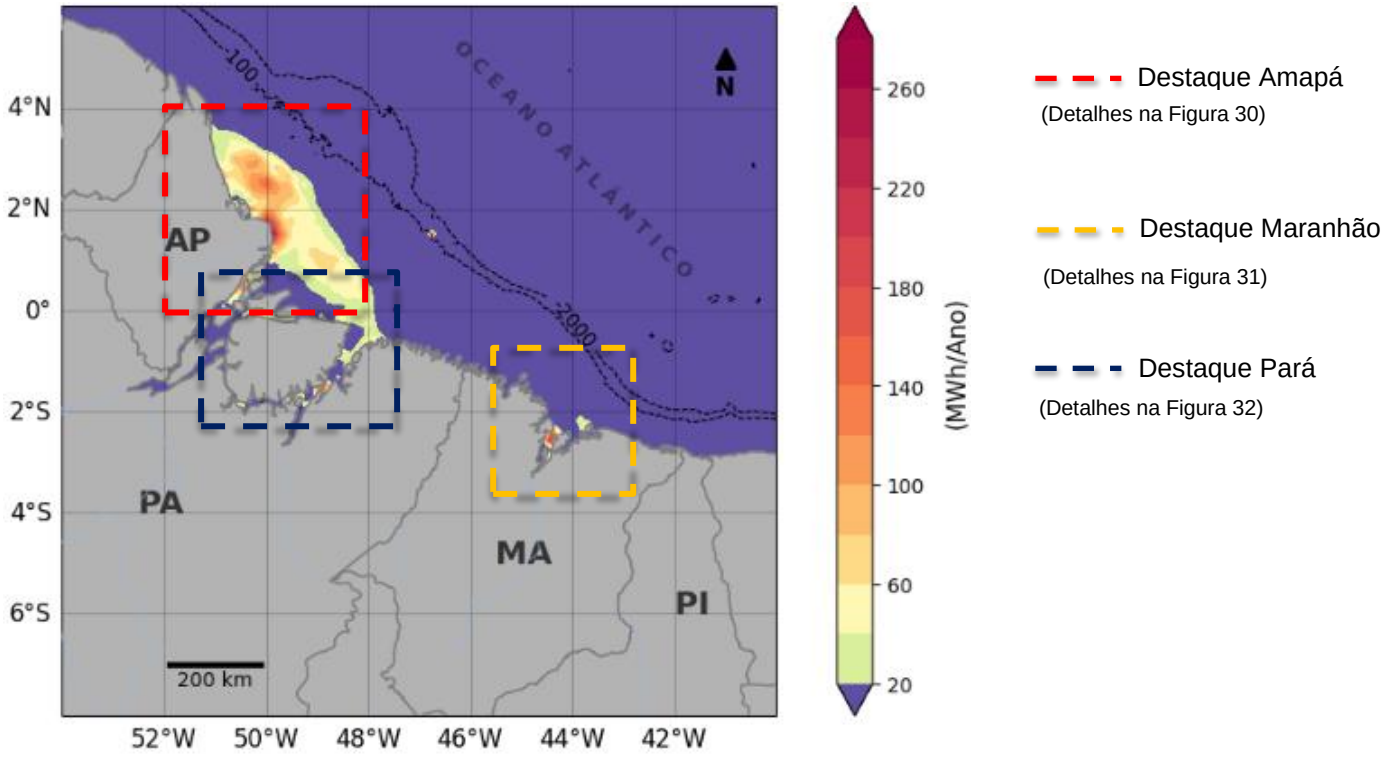
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: Capacidade de geração de energia do conversor de energia (KWh/ano) em cada faixa de velocidade.

A Figura 28 apresenta o potencial energético resultante do cálculo sobre a frequência de ocorrência das velocidades das correntes, aplicado ao modelo de referência do conversor de energia conforme Quadro 1 (ver seção 5). Essa análise estatística proporciona uma visão mais adequada do potencial elétrico, levando em consideração a distribuição das velocidades ao longo do tempo.

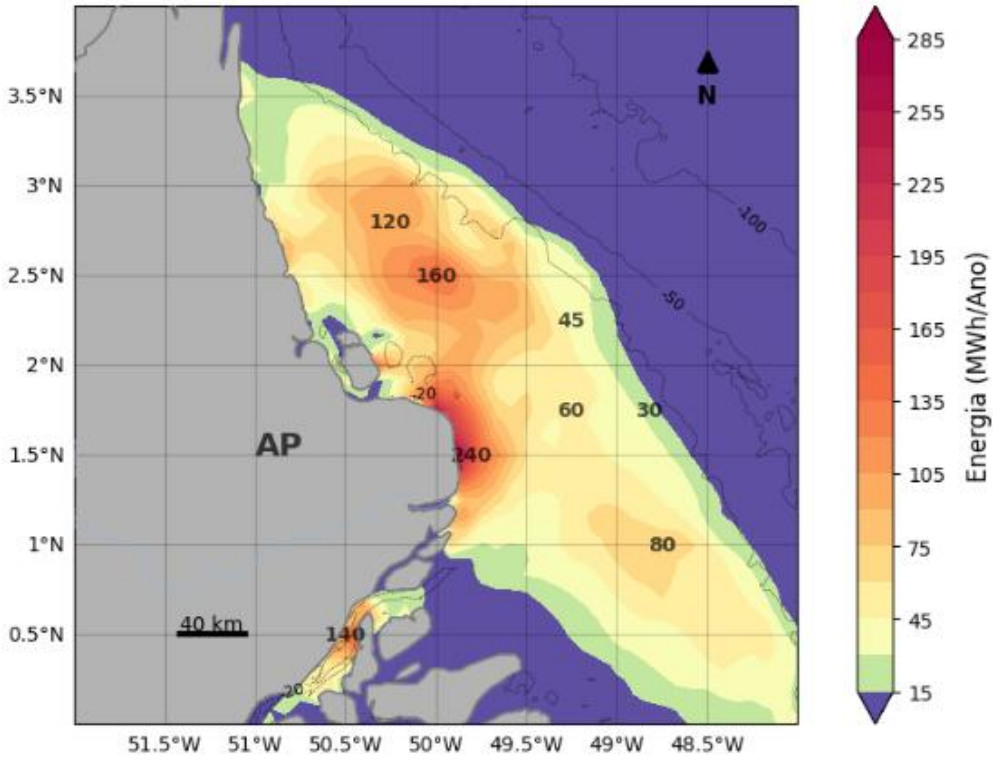
O mapa abaixo indica as áreas mais propicias para a geração de energia maremotriz a partir das correntes de marés, sendo a costa do Amapá a região que apresenta maior potencial de geração de energia (Figura 29). Já no Maranhão, pode -se observar potenciais significativos na Baia de São Marcos (Figura 30). Além disso, no estado do Pará, foi possível identificar áreas com potencias de geração de energia nos canais Norte e Sul do Delta do Rio Amazonas, bem como no Estuário do Rio Pará (Figura 31).

Figura 28 — Potencial Energético



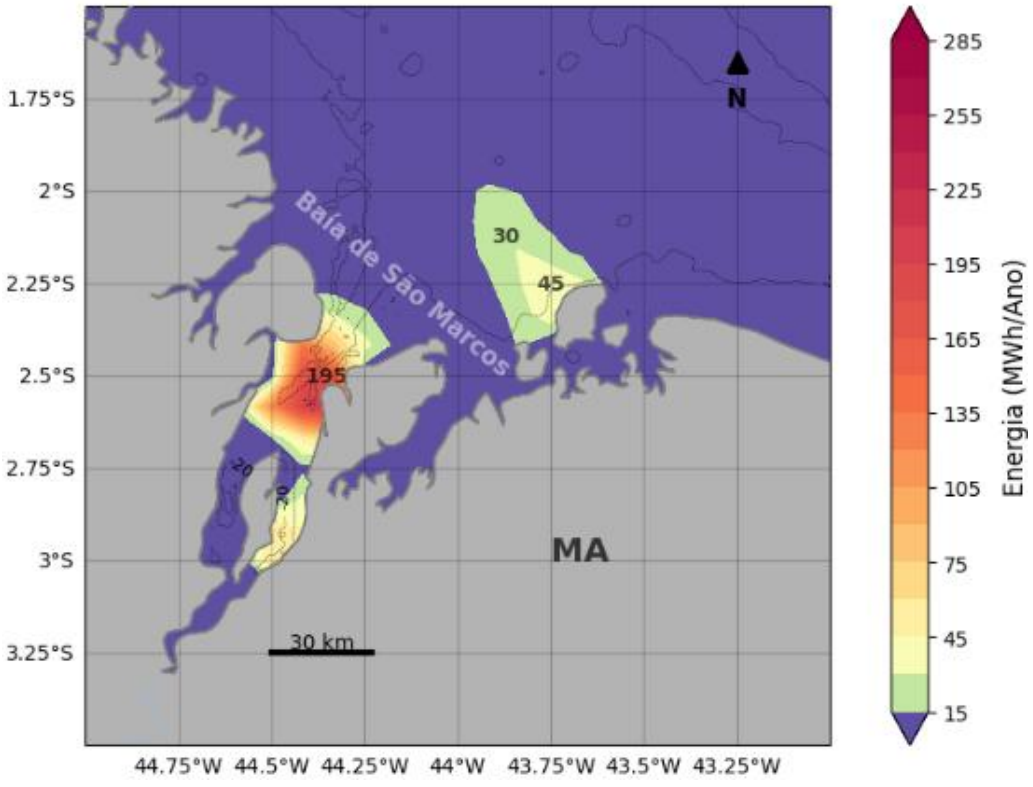
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 — Potencial Energético (Destaque Amapá)



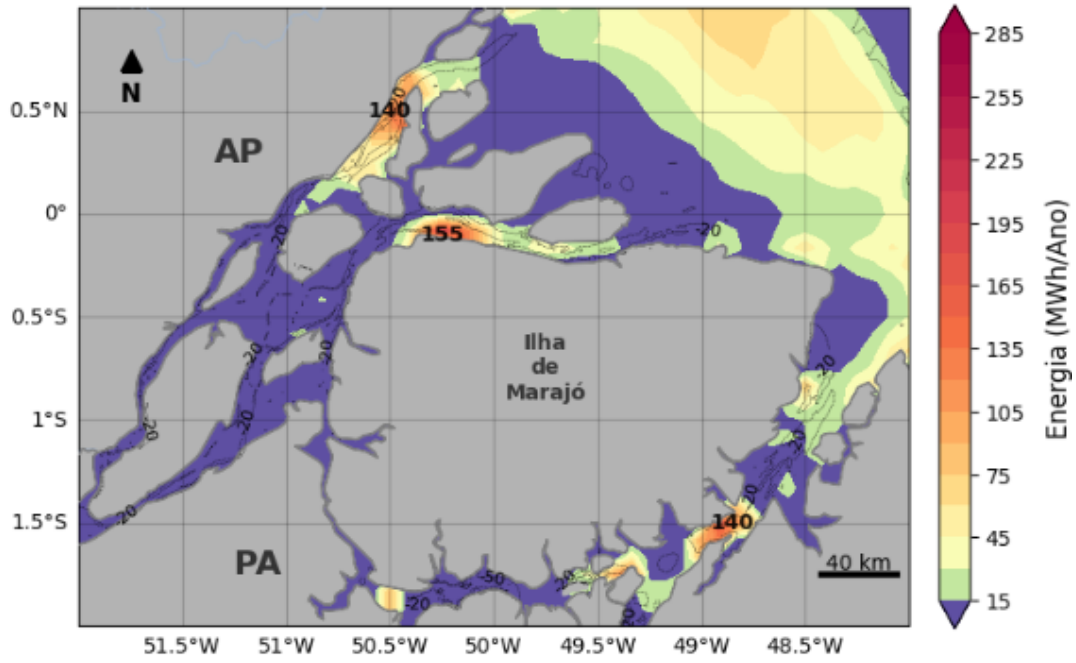
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 — Potencial Energético (Destaque Maranhão)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 — Potencial Energético (Destaque Pará)

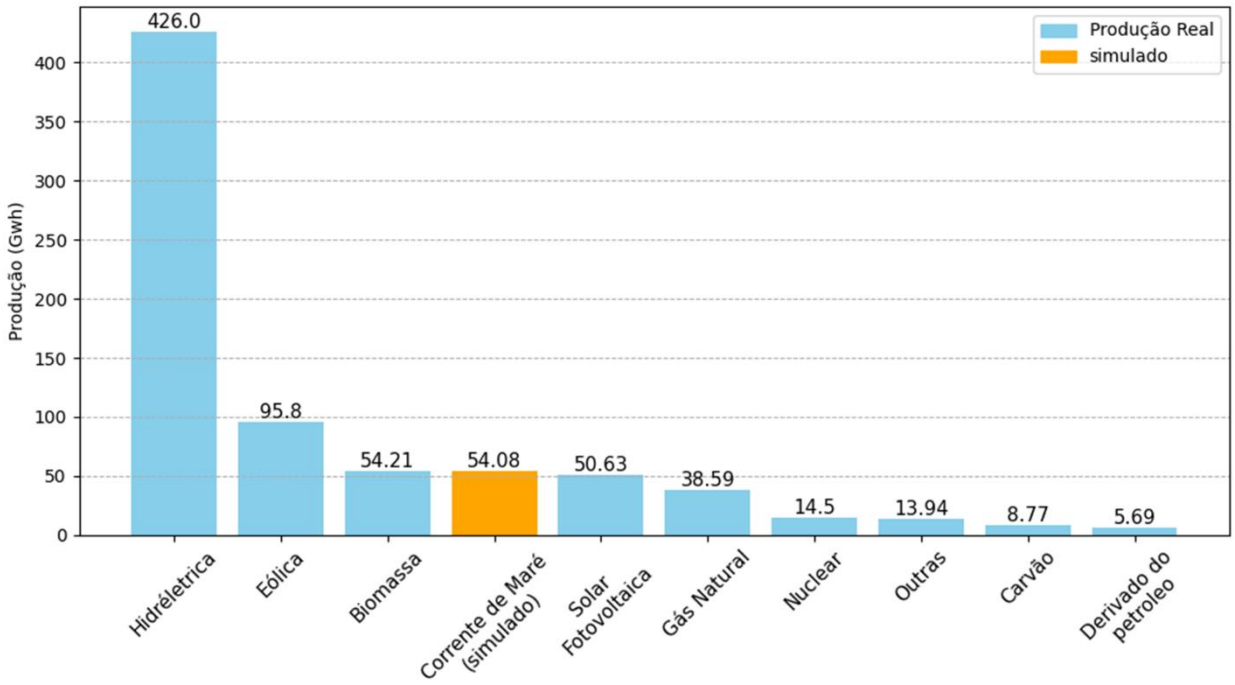


Fonte: Elaborado pelo autor

A soma total desses potenciais elétricos simulados na área de estudo atingiu uma marca de 54 GWh anuais. Para efeito de comparação, de acordo com dados oficiais do governo, a usina Itaipu binacional gerou cerca de 83,88 GWh em 2023. Se todo esse potencial pudesse ser extraído e inserido na matriz elétrica do país, essa fonte de energia ocuparia o quarto lugar na matriz elétrica brasileira (Gráfico 4).

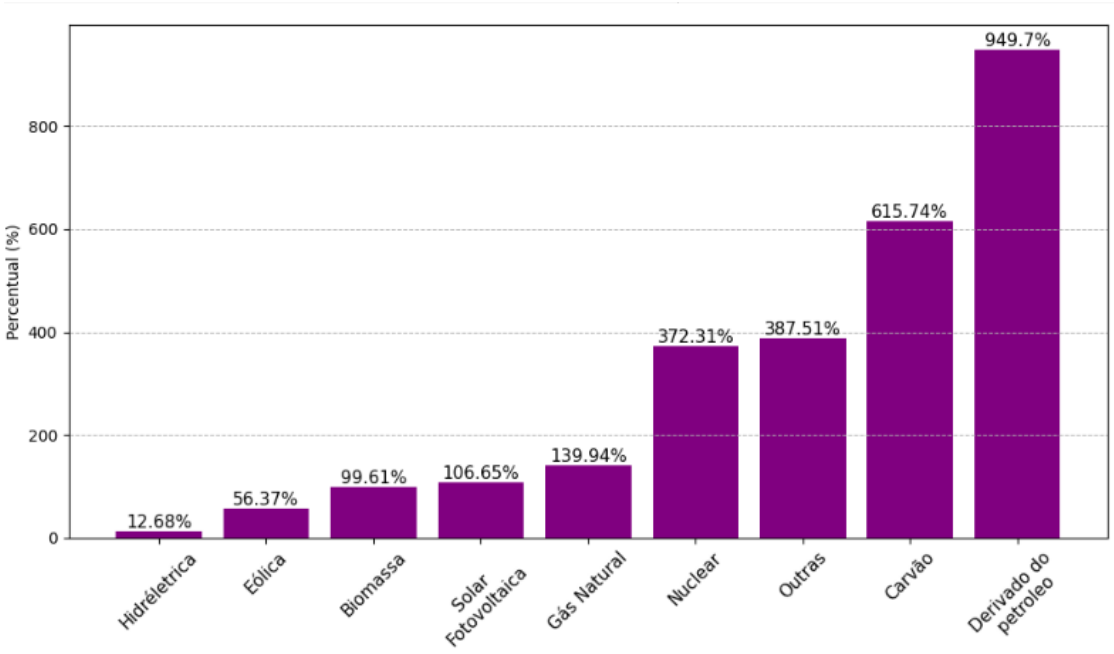
A integralidade do potencial simulado correspondeu a 7,63% do total de energia elétrica gerada no Brasil em 2023. Comparado com outras fontes de energias renováveis, o resultado apontado neste estudo representou 12,68% do total de energia de origem hidrelétrica e 56,37% do total de energia eólica gerada no país (Gráfico 5). Além disso, em se tratando de energia solar, o resultado foi ainda mais expressivo, representando 106,6% do total gerado dessa fonte de energia, cálculos baseados no Balanço Energético Nacional 2024. O resultado obtido indica ainda que as correntes de marés possuem um potencial significativo, demostrando capacidade de substituir fontes de energia mais poluente da matriz elétrica brasileira, como o carvão e os derivados de petróleo.

Gráfico 4 — Comparação da produção de energia elétrica a partir de diferentes fontes



Fonte: Elaborado pelo autor. Valores extraídos do *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*, Balanço Energético Nacional (BEN 2024), ano base 2023.

Gráfico 5 — Percentual do valor simulado em relação a cada fonte de energia



Fonte: Elaborado pelo autor. Valores extraídos do *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*, Balanço Energético Nacional (BEN 2024), ano base 2023.

7 CONCLUSÃO

A partir das correntes de marés, com o resultado da pesquisa, foi possível caracterizar a viabilidade da geração de eletricidade e indicar os locais mais apropriados para a extração dessa energia. Os resultados obtidos revelam não apenas uma expressiva capacidade de geração de energia, mas também sinalizam uma possibilidade real de transformar as correntes de maré em uma fonte sustentável de eletricidade capaz de contribuir para a descarbonização da geração de energia. Esse resultado, além de evidenciar valores significativos desse potencial, destaca também a importância estratégica que essa fonte de energia pode ter para a diversificação da matriz energética brasileira. Essa fonte renovável de energia pode ser utilizada em diversas aplicações, incluindo o setor de petróleo e energia. No contexto offshore, uma possibilidade é a utilização dessa energia para alimentar as novas plataformas de petróleo e gás natural com tecnologia *all electric*, reduzindo a dependência de geradores movidos a combustíveis fósseis e aumentando a sustentabilidade das operações. Mas para isso, são necessários mais investimentos em pesquisa que possam avaliar a viabilidade técnica, financeira e ambiental para implementação de conversores de energia hidro cinéticas na região.

REFERÊNCIAS

ALI, I.; RIGIT, A. R.; YAAKOB, O. B.; LABADIN, J.; RAJPAR, A. H. Tidal energy assessment with hydrodynamic modelling. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**,[Kota Samarahan], v. 29, n. 2, p. 1201-1212, Feb. 2023. DOI:10.11591/ijeecs.v29.i2.pp1201-1212. Disponível em: https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/27563/17073. Acesso em: set. 2024.

BEN (Brasil) BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024, Ano base 2023, **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben. Acesso em: jul. 2024.

BOWERS, D. G.; ROBERTS, E. M. ***TIDES*****:** A Very Short Introduction*.* New York: Oxford University Press, 2019. 144 p.

CORDANI, U. G.; NEVES, B. B.; FILHO, A. T. Preliminary study of Precambrian integration with tectonic events in brazilian. **Boletim de Geociencias** - **Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 17, n.1, p. 205-219, maio 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287740334_Preliminary_integration_study_of_Precambrian_with_tectonic_events_in_brazilian_sedimentary_basins_RepublicatiRe. Acesso em: ago. 2024.

DOODSON, A. T. (01 de Dezembro de 1921). Harmonic development of the tide-generating potential. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 100, n. 704, p. 305-329, Dec. 1921. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.1921.0088. Disponível em: https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1921.0088. Acesso em: out. 2023.

EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**,[Corvallis], v.19, n. 2, p. 183-204, Feb. 2002. Disponivel em: doi:https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2. Acesso em: jul. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanço Energético Nacional**: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024, Ano base 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben. Acesso em: jul. 2024.

FIGUEIREDO, J. D.; ZALÁN, P. V.; SOARES, E. F. Foz do Amazonas basin. **Boletim de Geociencias - Petrobras**, Rio de Janeiro, v.15, n. 2, p. 299-309, maio/nov. 2007. Disponivel em: https://www.researchgate.net/publication/283780023_Foz_do_Amazonas_basin. Acesso em: ago. 2024.

FILONCHYK, M.; PETERSON, M. P.; ZHANG, L.; HURYNOVICH, V.; HE, Y. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO2, CH4, and N2O. **Science of the Total Environment**,[Lanzhou], v. 935, maio 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972403506X. Acesso em: out. 2024.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C.; HAUCK, J.; LANDSCHÜTZER, P. Global Carbon Budget 2023. **Earth Sistem Science Data**, v.15, n.12, p. 5301-5369, Dec. 2023. DOI:https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023. Disponível em: https://essd.copernicus.org/articles/15/5301/2023/essd-15-5301-2023.html. Acesso em: out. 2024.

GARRISON, T.; ELLIS, R. ***Oceanography:*** An Invitation to Marine Science. 9 ed. Boston: Cengage Learning, 2016. 606 p.

HARARI, J. **Noções de Oceanografia.** 1ª ed. São Paulo: IOUSP, 2021. 926 p.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. **Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, São Paulo, v. 42, n.1/2, p. 35-54, dec. 1994. DOI:https://doi.org/10.1590/S0373-55241994000100003. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bioce/a/3x69p55C6d8k4bHkRnfGKyp/?lang=pt. Acesso em: mar. 2023.

IBGE. *Banoc de Dados e Iformaçoes Ambientais , Brasil*. Disponível em: https://www.bdiaweb.ibge.gov.br/. Acesso em: out. 2024.

IBRAHIM, W. I.; MOHAMED, M. R.; ISMAIL, R. M. T. R.; LEUNG, P. K.; XING, W. W.; SHAH, A. A. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. **Energy Reports**, v. 7, p. 2021-2042, 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002171?via%3Dihub. Acesso em: abr. 2025.

IPCC. *In. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Geneva, p. 35-115, 2023. DOI:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em: https://www.ipcc.ch/synthesis-report/. Acesso em: out. 2024.

ITAIPU BINACIONAL (Brasil). Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao. Acesso em: out. 2024.

JUNIOR, F. R.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. **Fundamentos da Física**. 9 ed. Vol. 1. São Paulo: Moderna, 2007. 490 p.

KHAN, M. J.; BHUYAN, G.; IQBAL, M. T.; QUAICOE, J. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. **Applied Energy**, v. 86, n.10, p. 1823-1835, 2009. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.02.017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909000713. Acesso em: abr. 2025.

LAWS, N. D.; EPPS, B. P. Hydrokinetic energy conversion: technology, research, and outlook. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1245–1259, 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.042. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115015725?via%3Dihub. Acesso em: abr. 2025.

MADAKUMBURA, G. D.; THACKERAY, C. W.; NORRIS, J.; GOLDENSON, N.; HALL, A. Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets. **Nature Communications**, v.12, n. 3944, July. 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-24262-x. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41467-021-24262-x#citeas. Acesso em: out. 2024.

MESQUITA, A. R. Marés, Circulação e Nível do Mar na Costa Sudeste do Brasil. **Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, [*s. l.*], dec.1997. Dispoível em: http://www.mares.io.usp.br/sudeste/sudeste.html. Acesso em: jul. 2024.

MUEHE, D.; GARCEZ, D. S. A plataforma continental brasileira e sua relação com a zona costeira e a pesca. **Mercator** - Revista de Geografia da UFC, Fortaleza, v.4, n. 8, p. 69-88, jul./dec. 2005. Disponível em: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273620422006. Acesso em: set. 2023.

NEARY, V. S. *et al*. *Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies.* **Sandia National Laboratories**, New Mexico, 2014. Disponível em: https://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/SAND2014-9040-RMP-REPORT.pdf. Acesso em: out.2023.

NOVICO, F.; SUDJONO, E. H.; EGON, A.; MENIER D.; METHEW, M.; PRATAMA, M. B. Tidal Current Energy Resources Assessment in the Patinti Strait, Indonesia. **Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED)**, [*s. l.*], v. 10, n. 3, p. 517-525, Mar. 2021. DOI:https://doi.org/10.14710/ijred.2021.35003. Disponível em: https://ijred.cbiore.id/index.php/ijred. Acesso em: set. 2023.

OPPENHEIMER, M. *et al*. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands,Coasts and Communities. *In:* IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing, [Cambridge], p. 321-445, Set. 2019. Doi: https://doi.org/10.1017/9781009157964.006. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/books/ocean-and-cryosphere-in-a-changing-

climate/sea-level-rise-and-implications-for-lowlying-islands-coasts-and-communities/5D756335C9C3A6DDFAE0219073349E8D. Acesso em: out. 2024.

PALMA, J. Geomorfologia da Plataforma Continental Norte Brasileira. *In:* NETO, A. A.; FALCÃO, L. C.; AMARAL, P. J. T. Caracterização de ecofácies na margem continental norte brasileira – estado do conhecimento. **Revista Brasileira de Geofísica**, [Niteroi], v. 27, n. 1, p. 97-106, 2009. Disponível em: www.scielo.br/rbg. Acesso em: set. 2023.

PARKER, B. B. **Tidal Analysis and Prediction***.* Silver Spring: NOAA, 2007. 378 p.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 8, p. 929-937, Out. 2002. DOI:https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300402000134. Acesso em: set. 2023.

PETROBRAS. **Plano estratégico 2050**: Plano de negócios Petrobras 2025-2029. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2024. Disponível em: https://petrobras.com.br. Acesso em: nov. 2024.

PEREIRA, L. C. A zona costeira amazônica Brasileira: Limites e Características. *In: SIMPÓSIO ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA*, 59., 2007, Belém. [**Anais**]. Belém: Reunial Anual da SPBC, jul. 2027.

PEREIRA, L. C.; DIAS, J. A.; CARMO, J. A.; POLETTE, M. A Zona Costeira Amazônica Brasileira. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 2, p. 3-7, jan. 2009. DOI:10.5894/rgci172. Diponível em: https://www.researchgate.net/publication/236577559_A_Zona_Costeira_Amazonica_Brasileira_The_Brazilian_Amazon_Coastal_Zone. Acesso em: out. 2023.

PREVISIC, M. Cost Breakdown Structure for River Current Device. **Sandia National Laboratories**, Ago. 2012. Disponivel em: energy.sandia.gov: https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/water-power/projects/reference-model-project-rmp/. Acesso em: set. 2023.

PUGH, D. T. **Tides, surges, and mean sea level***.* Swindon: John Wiley & Sons Ltd, 1987. 472 p.

RUSU, E.; VENUGOPAL, V. Offshore Renewable Energy: Ocean Waves, Tides and Offshore Wind. **Energies**, v.12, n. 182, Jan. 2019. Disponivel em: https://doi.org/10.3390/en12010182. Acesso em: 29 out. 2024.

SOARES, E. F.; ZALÁN, P. V.; FIGUEIREDO, J.; JUNIOR, I. T. Bacia do Pará-Maranhão. **Boletim de Geociencias - Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 321-329, maio/nov. 2027. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/283603898_Bacia_do_Para-Maranhao. Acesso em: set. 2023.

SVERDRUP, K. A.; KUDELA, R. M. **Investigating Oceanography**. 2 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017. 490 p.

TRAVASSOS, R. M.; FREITAS, I. A. F. Bacia da foz do amazonas: Sumário Geológico e Setores em Oferta. **ANP,** Superintendência de Avaliação Geológica e Econômica, 2021.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. 12 ed. Boston: Pearson Education Inc, 2018. 600 p.

THE OPEN UNIVERSITY. **Waves, Tides and Shallow Water Processes**. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1999. 227 p.

WHITE, J. **TIDES:** The Science and Spirit of the Ocean. Texas: Trinity University Press, 2017. 148 p.

WIEGEL, R. L. **Oceanographycal Engineering**. New York: Dover Publication inc, 2005. 532 p.

YUCE, M. I.; MURATOGLU, A. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.43, p. 72-82, 2015. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037. Disponivel em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008624?via%3Dihub. Acesso em: abr. 2025.

APÊNDICE A– CÓDIGO PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

```
# velocidade ajustada a profundidade
VA = [0.00, 0.00, 0.16, 0.26, 0.35, 0.45, 0.55, 0.64, 0.74, 0.84, 0.94, 1.03,
      1.13, 1.23, 1.33, 1.43, 1.52, 1.62, 1.72, 1.82, 1.92, 2.02, 2.11, 2.21,
      2.31, 2.41, 2.51, 2.61, 2.71, 2.80, 2.90]
# Coeficiente de desempenho
CP = [0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.456, 0.456, 0.466,
      0.468, 0.474, 0.476, 0.478, 0.481, 0.483, 0.479, 0.460, 0.437, 0.422,
      0.405, 0.383, 0.347, 0.304, 0.269, 0.235, 0.207, 0.184, 0.000, 0.000,
      0.000]

# Convertendo 'VA' e 'CP' para um array NumPy
VA_array = np.array(VA)
CP_array = np.array(CP)

AR = 62.4       # Área do Rotor (m2)
CG = 89.51      # Capacidade Nominal do Gerador (KW)
GBE = 0.94      # Eficiaenciencia da Caixa de Velocidade
EG = 0.889       # Eficiencia do Gerador
ET = 0.96       # Eficiencia do Trasnformador
EIE = 0.97      # Eficiencia do Inversor de Energia
ETrans = 0.98   # Eficiencia da transmissão
DT = 0.95       # disponibilidade da Turbuna

# Carregando os dados do arquivo NetCDF
dataset = nc.Dataset('[redacted]/Dados Copernicus/cmems_mod_glo_phy_
dataset3 = nc.Dataset('[redacted]/Dados TPOX/gridtpxo9v5a.nc')
# Supondo que você já carregou os dados do arquivo NetCDF
v = dataset['vtide'][:, 0, :, :]
u = dataset['utide'][:, 0, :, :]
latitude = dataset['latitude'][:]
longitude = dataset['longitude'][:]
bath = dataset3['hz'][:, :]
# Calculando a velocidade da corrente para cada ponto de coordenada
velocidade_corrente = np.sqrt(u**2 + v**2)

# Definindo os limites das classes de velocidade
velocidade_limites = np.arange(0, 3.2, 0.1)

# Obtendo as dimensões
time, latitude_size, longitude_size = velocidade_corrente.shape

# Criando um DataFrame para armazenar os dados
df_list = []
df_final = []

# Iterando sobre cada ponto de coordenada
for lat_idx in range(latitude_size):
    for lon_idx in range(longitude_size):
        # Extraindo os dados para o ponto de coordenada atual
        velocidades_ponto = velocidade_corrente[:, lat_idx, lon_idx]

        # Aplicando a máscara e substituindo os valores inválidos por 0
        velocidades_ponto_validas = np.where(np.isnan(velocidades_ponto), 0,
                                             velocidades_ponto)

        # histograma para o ponto de coordenada atual com limites específicos
        hist, bins = np.histogram(velocidades_ponto_validas,
                                  bins=velocidade_limites, density=True)

        # Normalizando para obter frequência de ocorrência (%)
        frequencia_ocorrencia = hist / np.sum(hist)

        # Calculando a potência do fluído para cada valor de 'VA'
        P_Fluid = 0.5 * (VA_array**3) * AR   # Potência do fluído (KW)

        # Calculando a potência do Rotor para cada valor de 'CP'
        P_Rotor = P_Fluid * CP     # Potência do Rotor  (KW)
```

```
        # Calculando a potência eletrica para cada valor
        P_elet = P_Rotor * EG * ET * GBE * EIE       # Potência eletrica  (KW)

        # Comparando P_elet com CG e prevalecendo o menor valor
        P_elet = np.minimum(P_elet, CG)

        # Calculando a capacidade de energia anual para cada valor (KWh/Ano)
        Energia = P_elet * frequencia_ocorrencia * 24 * 365 * ETrans * DT

        # Somando os valores de 'Energia KWh/Ano'
        soma = Energia.sum()

        # Criando uma lista com os valores
        result_values = [soma, latitude[lat_idx], longitude[lon_idx]]

        # Adicionando dados à lista de resultados finais
        df_final.append(result_values)

        # Criando um DataFrame para a frequência de ocorrência atual
        df_freq = pd.DataFrame({
            'Velocidade (m/s)': bins[:-1],
            f'Frequencia_{lat_idx}_{lon_idx} (%)': frequencia_ocorrencia,
            'VA': VA, 'CP':CP, 'P_Fluid': P_Fluid,
            'P_Rotor': P_Rotor, 'P_elet': P_elet, 'Energia KWh/Ano': Energia,
            'Lat': latitude[lat_idx], 'Lon':longitude[lon_idx] })

        # Adicionando dados ao DataFrame da lista
        df_list.append(df_freq)

# Combinando todos os DataFrames em um único DataFrame
df_combined = pd.concat(df_list, axis=1)

# Criando um DataFrame a partir da lista de resultados finais
df_final = pd.DataFrame(df_final, columns=['Soma_Energia KWh/Ano',
                                           'Lat', 'Lon'])
```

APÊNDICE B– CÓDIGO PARA O CÁLCULO DAS ELIPSES DE MARÉ

```
######## Bloco 1 - Importação do arquivo com bancos de dados #########

# Carregando o arquivo com os dados de elipses.
dataset = nc.Dataset('[redacted]TPXO/u_tpxo9.v5a.nc')
# Carregando o arquivo com os dados de batimetria Gebco.
dataset2 = nc.Dataset('[redacted]/gebco_2023_n6.0_s-8.0_w
# Carregando o arquivo com os dados de batimetria TPXO.
dataset3 = nc.Dataset('[redacted]TPXO/gridtpxo9v5a.nc')
# Carregando o arquivo com os dados de elipses.
dataset4 = nc.Dataset('[redacted]TPXO/h_tpxo9.v5a.nc')

######## Bloco 2 - Parâmetros P/ visualização das elipses no mapa #########
Ft = 2        # Fator de redução de elipses.
scl = 0.006       # Escala.
Depth = 1500  # profundidade (tem que ser um valor positivo)

# constituintes de marés
con=['M2', 'S2', 'N2', 'K2', 'K1', 'O1','P1', 'Q1', 'MM', 'MF', 'M4', 'MN4',
     'MS4', '2N2', 'S1', '2Q1', 'J1', 'L2', 'M3', 'MU2', 'NU2', 'OO1' ]

######## Bloco 3 - extraindo os dados do arquivo #########

# área de estudo no banco de dados TPXO (i= inicial, f= final)
lon_i = 1835
lon_f = 1918
lat_i = 493
lat_f = 575

for c in range(11):

  ######## Bloco 4 - extraindo os dados do arquivo #########
 lon = dataset['lon_u'][lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 lat = dataset['lat_u'][lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 u =dataset['ua'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 v = dataset['va'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 URe = dataset['URe'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 UIm = dataset['UIm'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 VRe = dataset['VRe'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 VIm = dataset['VIm'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 angu = dataset['up'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 angv = dataset['vp'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 bath = dataset3['hz'][lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]
 ang = dataset['vp'][c, lon_i: lon_f: Ft, lat_i: lat_f: Ft]

# Calculando os parâmentros para traças as elipses

 a_2 = u
 a_3 = v
 phi_2 = np.radians(angu)
 phi_3= np.radians(angv)

 Rmaior = np.abs(u * np.exp(1j * phi_2)) + np.abs(v * np.exp(1j * phi_3))
 Rmenor = np.abs(u * np.exp(1j * phi_2)) - np.abs(v * np.exp(1j * phi_3))

 INC = (( angu +  angv) / 2) % 180   # inclinação

 ######## Bloco 5 - Criar o mapa #########
 # Criando uma figura do Matplotlib com projeção Cartopy Mercator
 fig = plt.figure(figsize=(8, 6))
 ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, projection=ccrs.Mercator())
 # Definir limites do mapa
 ax.set_extent([-54, -40, -8, 6], crs=ccrs.PlateCarree())
```

```
######## Bloco 6 - Configurações adicionais do mapa #########
# Adicionando feições ao mapa, como continentes, oceanos, fronteiras, rios...
ax.add_feature(cfeature.LAND, color='grey')
ax.add_feature(cfeature.OCEAN)
ax.add_feature(cfeature.COASTLINE, linewidth=0.5)
ax.add_feature(cfeature.BORDERS, linewidth=0.5, linestyle='-')
ax.add_feature(cfeature.RIVERS, alpha=0.5)
ax.add_feature(cfeature.STATES, edgecolor='gray')
# Exibir gridlines
gl = ax.gridlines(draw_labels=True, alpha=0.2, color='k')
gl.top_labels = False
gl.right_labels = False
gl.xlabel_style = {'fontsize': 12}  #  rótulos do eixo X nas gridlines
gl.ylabel_style = {'fontsize': 12}  #  rótulos do eixo Y nas gridlines

######## Bloco 7 - Plota a batimetria #########
# Extraindo os dados de batimetria do arquivo
lon_bat = dataset2['lon'][:]
lat_bat = dataset2['lat'][:]
batimetria = dataset2['elevation'][:]

# Definindo os níveis para a colormesh da batimetria
levels = np.linspace(np.min(batimetria), np.max(batimetria), 10)
# Plotando a batimetria usando a função pcolormesh
ax.pcolormesh(lon_bat, lat_bat, batimetria, cmap='Blues_r', alpha=0.5,
              transform=ccrs.PlateCarree())
# Plotando as isolinhas da batimetria usando a função contour
contour = ax.contour(lon_bat[:], lat_bat[:], batimetria[:],
                     levels=[ -2000, -100], colors='k', linewidths=0.8,
                     transform=ccrs.PlateCarree())
# Adicionando rótulos dos valores das isolinhas
plt.clabel(contour, inline=True, fontsize=10, fmt='%1.0f', use_clabeltext=True)

######## Bloco 8 - Plota as elipses #########
# Plotando as elipses para os pontos de interesse
for i in range(Rmaior.shape[0]):
  for j in range(Rmaior.shape[1]):
      if Rmaior[i, j] != 0 and Rmenor[i, j] != 0:
         ECC= Rmenor[i, j]>0
         if bath[i, j] <= Depth: # plota as elipses sobre a prof. desejada
          if ECC == False:
            ellipse = Ellipse((lon[i, j], lat[i, j]), scl * Rmaior[i, j],
                              scl * Rmenor[i, j], angle=INC[i, j],
                            facecolor='none', edgecolor='navy', alpha=0.8,
                              transform=ccrs.PlateCarree(), capstyle='round')
             ax.add_patch(ellipse)

# Exibir o mapa
plt.show()
```