



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS DE BALSAS**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MILLENA MARINHO ROCHA**

**AVALIAÇÃO DO USO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM  
PLANTAS DE GERAÇÃO MAREMOTRIZ**

**BALSAS – MA**  
**2025**

MILLENA MARINHO ROCHA

AVALIAÇÃO DO USO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM  
PLANTAS DE GERAÇÃO MAREMOTRIZ

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Maranhão, Centro de Ciências  
de Balsas, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Pedro Bezerra Leite Neto

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

Marinho Rocha, Millena.

AVALIAÇÃO DO USO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA EM PLANTAS DE GERAÇÃO MAREMOTRIZ / Millena  
Marinho Rocha. - 2025.

61 p.

Orientador(a): Pedro Bezerra Leite Neto.

Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do  
Maranhão, Balsas, 2025.

1. Energia Maremotriz. 2. Sistemas de Armazenamento.  
3. Métricas de Confiabilidade Energética. 4. Geração  
Renovável. I. Bezerra Leite Neto, Pedro. II. Título.

MILLENA MARINHO ROCHA

AVALIAÇÃO DO USO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM  
PLANTAS DE GERAÇÃO MAREMOTRIZ

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Maranhão, Centro de Ciências  
de Balsas, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto  
Universidade Federal do Maranhão

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho  
Universidade Federal do Maranhão

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Tatiane Carlyne Carneiro  
Universidade Federal do Maranhão

Aos meus queridos avós,

Que vieram da simplicidade da roça e me ensinaram, com sua sabedoria e trabalho árduo, o verdadeiro significado de força, resiliência e amor.

Este trabalho é uma homenagem à herança de valores que vocês me transmitiram, e que sempre guiaram meus passos.

Com todo o meu carinho e gratidão, dedico esta conquista a vocês.

*Pedro e Irene, Maria Marta e Bernardino*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força e saúde para chegar até aqui. Sua presença em minha vida foi essencial em todos os momentos, especialmente nos mais desafiadores.

Aos meus pais, José Nilson e Aurileth, pelo amor incondicional, pelo apoio em todas as minhas escolhas e pelo exemplo de dedicação e coragem. Vocês são a base de tudo que sou e tudo que conquisto. Obrigada por tanto e por tudo que fazem por mim e por nossa família.

Aos meus irmãos, Hellen e Hudson, por serem os melhores irmãos do mundo e por compartilharem a vida comigo, obrigada por serem além de irmãos, meus amigos. Agradeço a Deus pela vida de vocês e torço sempre pelo bem de vocês.

Aos meus avós, que, com sua simplicidade e sabedoria, sempre acreditaram no meu potencial. Mesmo sem terem tido a oportunidade de cursar o ensino superior, são minha maior inspiração e estão aqui para celebrar comigo esta vitória.

Ao meu grande amor, Rodrigo, pelo carinho, compreensão e incentivo durante esta jornada. Sua presença tornou os dias mais leves e me deu forças para seguir em frente.

Aos meus professores, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação acadêmica. Em especial, agradeço meu orientador, pelo suporte, paciência e orientações valiosas ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela parceria, pelas trocas de aprendizado e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais agradável.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra de incentivo, gesto de apoio e confiança depositada em mim foram fundamentais para que este momento se tornasse realidade.

À UFMA, pela qualidade de ensino.

“A persistência é o caminho do êxito.”  
**(Charles Chaplin)**

## RESUMO

A transição energética global tem impulsionado o desenvolvimento de fontes renováveis, entre as quais a energia maremotriz se destaca pela previsibilidade dos ciclos de maré. No entanto, a variabilidade da geração ainda representa um desafio para a estabilidade do sistema elétrico. Neste estudo, analisou-se a viabilidade da integração de sistemas de armazenamento de energia (SAE) em plantas maremotrizes, utilizando como referência um modelo fictício baseado no estuário do Bacanga. Por meio de simulações computacionais através do *software MATLAB*, avaliou-se o impacto do armazenamento na confiabilidade da geração, na Garantia Física Diária (DPG) e na Capacidade de Carga Efetiva (ELCC). Os resultados indicaram que a integração de SAE reduz oscilações na geração e aumenta a confiabilidade do fornecimento de energia, tornando a tecnologia mais atrativa para a matriz elétrica. Conclui-se que o armazenamento pode desempenhar um papel fundamental na viabilização da energia maremotriz, e estudos futuros devem aprofundar sua análise econômica e operacional, considerando diferentes tecnologias de armazenamento e estratégias de otimização.

**Palavras-chave:** Energia maremotriz, Sistemas de Armazenamento, Métricas de Confiabilidade Energética, Geração renovável.



## **ABSTRACT**

The global energy transition has driven the development of renewable sources, among which tidal energy stands out for the predictability of tidal cycles. However, generation variability remains a challenge for power system stability. This study analyzed the feasibility of integrating energy storage systems (ESS) into tidal power plants, using a fictitious model based on the Bacanga estuary. Through computational simulations, the impact of storage on generation confiability, Daily Production Guarantee (DPG), and Effective Load Carrying Capability (ELCC) was evaluated. The results indicated that ESS integration reduces generation fluctuations and increases supply reliability, making the technology more attractive for the electrical grid. It is concluded that energy storage can play a fundamental role in making tidal energy viable, and future studies should deepen the economic and operational analysis, considering different storage technologies and optimization strategies

**Keywords:** Tidal energy, Energy storage systems, Energy reliability, Renewable generation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Amplitude da componente harmônica M2 da variação de marés.....                                                     | 14 |
| <b>Figura 2.</b> Vista aérea do estuário do Bacanga.....                                                                            | 15 |
| <b>Figura 3.</b> Perfil típico de geração de uma planta maremotriz fictícia no estuário do Bacanga .....                            | 16 |
| <b>Figura 4.</b> Representação das marés de sizígia que ocorrem na lua cheia. ....                                                  | 20 |
| <b>Figura 5.</b> Representação das marés de sizígia que ocorrem na lua nova. ....                                                   | 21 |
| <b>Figura 6.</b> Marés de quadraturas que acontecem na fase da lua quarto minguante. .                                              | 21 |
| <b>Figura 7.</b> Marés de quadraturas que acontecem na fase da lua quarto crescente. .                                              | 22 |
| <b>Figura 8.</b> Esquema de geração de uma usina maremotriz. ....                                                                   | 23 |
| <b>Figura 9.</b> Distribuição dos ciclos de marés .....                                                                             | 25 |
| <b>Figura 10.</b> Zona costeira brasileira .....                                                                                    | 27 |
| <b>Figura 11.</b> Aplicações de sistemas de armazenamento .....                                                                     | 32 |
| <b>Figura 12.</b> Ilustração esquemática de uma bateria de íon-lítio. ....                                                          | 33 |
| <b>Figura 13.</b> Diagrama de uma planta fictícia no estuário do Bacanga .....                                                      | 39 |
| <b>Figura 14.</b> Relação entre a vazão nominal da usina, número de turbinas e diâmetro dos rotores .....                           | 41 |
| <b>Figura 15.</b> Produção de energia anual em função do diâmetro do rotor.....                                                     | 42 |
| <b>Figura 16.</b> Geração de energia anual em função do diâmetro do rotor e das turbinas instaladas .....                           | 43 |
| <b>Figura 17.</b> Garantia Física Diária (DPG) - Estuário do Bacanga .....                                                          | 44 |
| <b>Figura 18.</b> Magnitude Média das Flutuações (AFM) .....                                                                        | 45 |
| <b>Figura 19.</b> Relação entre a autonomia do Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) e Capacidade de Carga Efetiva (ELCC)..... | 46 |
| <b>Figura 20.</b> Relação entre a autonomia do BESS e a Perda de Carga Esperada (LOLE) .....                                        | 47 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Países com o maior potencial energético anual associado às variações das marés .....                                    | 26 |
| <b>Tabela 2.</b> Impactos socioambientais e mitigações associadas à construção e operação de empreendimentos de energia maremotriz. .... | 28 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                                       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|
| AFM   | <i>Average Fluctuation Magnitude</i> (Magnitude Média das Flutuações) |
| BESS  | <i>Battery Energy Storage System</i>                                  |
| DPG   | <i>Daily Production Guarantee</i> (Garantia Física Diária)            |
| ELCC  | Effective Load Carrying Capability (Capacidade Efetiva de Carga)      |
| EPE   | Empresa de Pesquisa Energética                                        |
| IRENA | <i>International Renewable Energy Agency</i>                          |
| LCOE  | <i>Levelized Cost of Energy</i> (Custo Nivelado de Energia)           |
| LOLE  | <i>Loss of Load Expectation</i> (Expectativa de Perda de Carga)       |
| LOLP  | <i>Loss of Load Probability</i> (Probabilidade de Perda de Carga)     |
| MMA   | Ministério do Meio Ambiente                                           |
| MME   | Ministério de Minas e Energia                                         |
| PNE   | Plano Nacional de Energia                                             |
| SAE   | Sistema de Armazenamento de Energia                                   |
| SOC   | State of Charge (Estado da Carga)                                     |

## SUMÁRIO

|              |                                                                                                              |           |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                                            | <b>10</b> |
| 1.1          | Justificativa                                                                                                | 13        |
| 1.2          | Objetivo Geral                                                                                               | 16        |
| 1.3          | Objetivos Específicos                                                                                        | 16        |
| <b>2</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>                                                                                    | <b>17</b> |
| <b>3</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                                                                 | <b>20</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>Energia Maremotriz</b>                                                                                    | <b>20</b> |
| 3.1.1        | <i>Fenômenos Associados ao Comportamento das Marés</i>                                                       | 20        |
| 3.1.2        | <i>Formas de Aproveitamento de Energia das Marés</i>                                                         | 23        |
| 3.1.3        | <i>Ciclos das Marés e Previsibilidade</i>                                                                    | 24        |
| 3.1.4        | <i>Contexto Energético Mundial</i>                                                                           | 25        |
| 3.1.5        | <i>Contexto Energético Brasileiro</i>                                                                        | 27        |
| <b>3.2</b>   | <b>Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE)</b>                                                            | <b>30</b> |
| 3.2.1        | <i>Armazenamento na Geração Renovável</i>                                                                    | 31        |
| <b>3.2.2</b> | <b>Tecnologias de Armazenamento – Baterias</b>                                                               | <b>33</b> |
| 3.2.3        | <i>Aplicação em Plantas Maremotrizes</i>                                                                     | 35        |
| <b>3.3</b>   | <b>Avaliação da Confiabilidade do Sistema Elétrico</b>                                                       | <b>35</b> |
| 3.3.1        | <i>Conceitos e Métricas de Confiabilidade</i>                                                                | 35        |
| 3.3.2        | <i>Uso de Indicadores na Análise de Sistemas Renováveis</i>                                                  | 37        |
| <b>3.4</b>   | <b>Estudo de Caso: Estuário do Bacanga</b>                                                                   | <b>38</b> |
| 3.4.1        | <i>Descrição do Sistema e Modelo Fictício</i>                                                                | 38        |
| 3.4.2        | <i>Problemas e soluções propostas</i>                                                                        | 39        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                                                               | <b>41</b> |
| <b>4.1.</b>  | <b>Influência do Número de Turbinas e do Diâmetro do Rotor na Vazão da Usina.</b>                            | <b>41</b> |
| 4.2.         | <i>Diâmetro do Rotor e Produção de Energia</i>                                                               | 42        |
| 4.3.         | <i>Análise de Sensibilidade do Diâmetro do Rotor e Números de Turbinas Relacionadas à Geração de Energia</i> | 43        |
| 4.4.         | <i>Garantia Física Diária (DPG)</i>                                                                          | 44        |
| 4.4.         | <i>Variação da Geração e Qualidade do Sistema</i>                                                            | 45        |
| 4.5.         | <i>Autonomia do Sistema de Armazenamento e Confiabilidade Energética</i>                                     | 46        |
| 4.6.         | <i>Redução da Probabilidade de Falha no Fornecimento</i>                                                     | 46        |

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                          | <b>48</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                   | <b>50</b> |
|          | <b>ANEXOS</b>                                                        | <b>56</b> |
|          | <b>ANEXO A – DADOS MEDIDOS DAS FONTES SOLAR, EÓLICA E MAREMOTRIZ</b> |           |
|          | <b>NO ESTADO DO MARANHÃO</b>                                         | <b>56</b> |
|          | <b>ANEXOS B – ESTUDO SOBRE MODELAGEM E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL</b>    |           |
|          | <b>TÉCNICO DE MARÉS NO ESTUÁRIO DO BACANGA</b>                       | <b>56</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A transição para sistemas elétricos baseados em fontes renováveis é uma prioridade global diante das crescentes preocupações com as mudanças climáticas e a necessidade de descarbonização do setor energético. Nesse contexto, o uso em larga escala de fontes limpas tornou-se indispensável nesse cenário, representando uma peça-chave para mitigar os impactos ambientais associados aos combustíveis fósseis. Além disso, fatores econômicos têm impulsionado essa transição, uma vez que, segundo IRENA (2023), os custos de produção associados às fontes renováveis têm diminuído significativamente, tornando-as competitivas frente às fontes tradicionais que fazem uso de combustíveis fósseis.

No entanto, embora o uso em larga escala de fontes renováveis de eletricidade represente um avanço significativo, ele ainda enfrenta diversos desafios. Entre eles, destaca-se a necessidade de garantir maior flexibilidade ao sistema elétrico, lidar adequadamente com a variabilidade da fonte primária, aprimorar técnicas mais robustas para previsão da geração e garantir manter o balanço de potência entre geração e carga no sistema (Impram, Nese, & Oral, 2020). Além disso, a natureza altamente variável da maioria das fontes renováveis está modificando a dinâmica temporal no gerenciamento dos sistemas elétricos, uma vez que estas incertezas podem resultar em ameaças à segurança energética e estabilidade do sistema de potência (Babatunde, Munda, & Hamam, 2019).

A crescente necessidade de descarbonização do setor energético tem impulsionado o desenvolvimento de fontes renováveis, entre as quais se destacam a energia solar e eólica. Essas tecnologias apresentam vantagens ambientais e econômicas em relação aos combustíveis fósseis, mas também possuem desafios específicos que impactam sua integração ao sistema elétrico (Al Alahmadi et. Al, 2021).

Diante de um contexto mundial, a energia solar fotovoltaica tem registrado uma expansão significativa em escala global, impulsionada principalmente pela redução dos custos associados aos painéis solares e pelos avanços contínuos em eficiência tecnológica. Estudos recentes indicam que o custo nivelado da energia solar fotovoltaica (LCOE, *Levelized Cost of Energy*) tem apresentado uma tendência

decrecente consistente, consolidando-a como uma das fontes renováveis mais competitivas (IEA, 2023). No entanto, a geração de energia fotovoltaica é intrinsecamente dependente da incidência da radiação solar, o que a caracteriza como uma fonte de energia intermitente, e também a ausência de geração durante períodos noturnos e as flutuações na intensidade da radiação e das nuvens ao longo do dia representam desafios significativos para a estabilidade e confiabilidade dos sistemas elétricos. Para mitigar esses efeitos, estratégias como a implementação de sistemas de armazenamento com bateria (BESS, Battery Energy Storage System) e a integração com fontes complementares, como energia eólica ou hidrelétrica, têm sido amplamente investigadas e adotadas.

A energia eólica, por sua vez, consiste na conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica por meio do acionamento de geradores elétricos, consolidando-se como uma das principais fontes renováveis em escala global. Segundo a IRENA (2023), a capacidade instalada de energia eólica atingiu mais de 900 GW em 2023, destacando sua relevância na transição energética global. No entanto, essa tecnologia, embora considerada madura e amplamente adotada, enfrenta desafios significativos relacionados à variabilidade intrínseca do recurso eólico. A intensidade dos ventos está sujeita a flutuações sazonais, diárias e até mesmo horárias, o que resulta em uma geração de energia intermitente e imprevisível. Dessa forma, para mitigar esses efeitos, estratégias como a implementação de sistemas de armazenamento com uso de baterias (BESS) e o uso de técnicas avançadas de previsão meteorológica têm sido amplamente investigadas e adotadas, visando garantir maior estabilidade e confiabilidade na operação da rede elétrica.

Diferentemente dessas fontes, a energia maremotriz se destaca pela sua previsibilidade. Como a geração está diretamente associada aos ciclos das marés, que podem ser calculados com alta precisão, a energia das marés apresenta um comportamento menos intermitente do que a solar e a eólica. No entanto, sua disponibilidade geográfica é mais restrita, limitando sua aplicação a regiões costeiras que possuem amplitudes de maré significativas.

Dessa forma, a integração dessas fontes renováveis ao sistema elétrico exige soluções eficientes para garantir estabilidade e confiabilidade na geração de energia. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento desempenham um papel



fundamental, permitindo o armazenamento do excesso de energia gerado em momentos de alta produção e sua liberação nos períodos de baixa geração. Ao longo deste trabalho, será analisado de que forma os sistemas de armazenamento podem ser utilizados para otimizar a geração maremotriz, além de compará-la com a geração solar e eólica em termos de métricas de confiabilidade e capacidade firme, e para isso entender os princípios de funcionamento dessa fonte é crucial.

A geração maremotriz surge como uma promissora fonte de energia renovável e, devido a sua disponibilidade, representa uma alternativa para atender à crescente demanda por energia. Essa fonte de energia renovável pode ser explorada principalmente através de dois métodos, que são as usinas de energia das marés do tipo corrente e do tipo barragem (Grabbe et. al, 2009), que seguem os seguintes princípios de funcionamento:

- **Usinas de Energia das Marés do Tipo Corrente:**

Este método aproveita a energia cinética gerada pelo movimento das correntes de maré. Dessa forma, turbinas subaquáticas são instaladas em locais com correntes de maré fortes e à medida que a água passa pelas turbinas é gerado energia elétrica. Uma das principais vantagens deste método é que ele possui um impacto ambiental relativamente baixo, visto que não requer a construção de grandes estruturas físicas. Além disso, a energia gerada é bastante previsível, dada a regularidade das marés.

- **Usinas de Energia das Marés do Tipo Barragem:**

Funcionam através da construção de barragens ou diques que criam um reservatório para capturar a água advinda da maré alta. Dessa maneira, quando a maré é baixa, a água é liberada de volta ao mar através de turbinas, gerando energia elétrica. Este método pode gerar uma quantidade significativa de energia, mas envolve desafios e impactos ambientais consideráveis, incluindo a alteração de ecossistemas locais e potencial deslocamento de comunidades. Além disso, o custo de construção das barragens pode ser bastante significativo (Uihlein & Magagna, 2016).

Porém, apesar dos desafios, a fonte de energia maremotriz está intrinsecamente ligada à sua capacidade de fornecer energia de forma constante e previsível, e por apresentar essa característica desejável, é interessante avaliar o uso

de sistemas de armazenamento de energia em plantas de geração maremotriz (Takenouchi et. al, 2006).

Os sistemas de armazenamento de energia (SAE) oferecem a possibilidade de armazenar energia produzida durante períodos de alta geração de energia e disponibilizando-a posteriormente durante os momentos de baixa ou nenhuma geração. Essa capacidade não só garante uma oferta de energia mais estável e confiável, como também pode melhorar significativamente a eficiência e a viabilidade econômica das plantas de geração maremotriz (Giannini, 2019).

Como forma de garantir maior flexibilidade aos sistemas elétricos, diversas estratégias têm sido investigadas. Dentre elas, destaca-se o uso de sistemas de armazenamento de energia (SAE) em larga escala. No entanto, os impactos decorrentes da operação destes SAEs, bem como os potenciais benefícios aos sistemas elétricos ainda precisam ser melhor investigados.

### 1.1 Justificativa

A transição energética e descarbonização do setor elétrico somente é possível através do aproveitamento em larga escala das fontes renováveis de energia. Para tanto, é necessária a exploração estratégica de diferentes recursos energéticos disponíveis. Os recursos energéticos oceânicos são vistos como uma parte indispensável neste desafio do setor elétrico. Atualmente, a agenda chamada de *década azul*, promovida pela ONU e UNESCO, reconhece que os oceanos possuem as chaves para um planeta sustentável. Nesta agenda, dez desafios relacionados ao uso dos oceanos são lançados, dentre estes, o desafio 5 diz respeito ao destravamento de soluções baseadas nos oceanos para enfrentamento às mudanças climáticas (UNESCO, 2024).

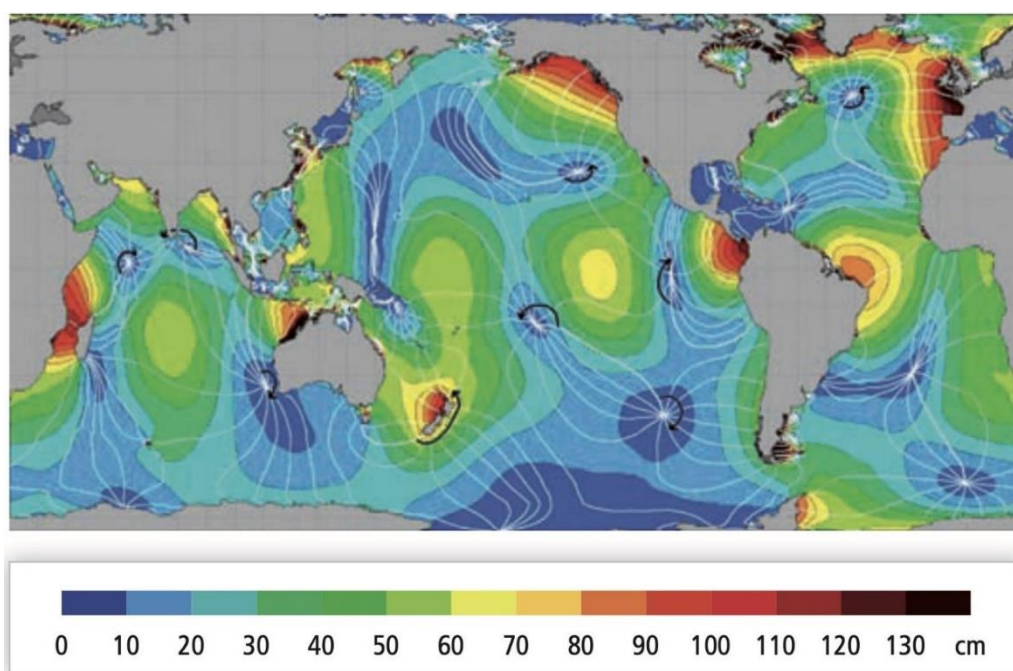
No que se refere à geração de eletricidade, os oceanos podem contribuir diretamente através de ao menos sete formas diferentes (IPCC, 2012):

- **Ondas:** Derivadas da transferência da energia cinética do vento à superfície do oceano;
- **Variação de marés:** Derivada da interação gravitacional no sistema terra-sol-lua;

- **Correntes de marés:** Derivada do fluxo hidráulico proveniente do enchimento e esvaziamento das regiões costeiras, como resultado da variação de marés;
- **Conversão da energia térmica:** Derivada da diferença de temperatura entre a energia solar armazenada na forma de calor na superfície do oceânica e a temperatura mais fria das massas de água em regiões mais profundas;
- **Gradiente de salinidade:** Derivada da diferença de salinidade entre a água doce dos rios e a água salgada do oceano;
- **Energia eólica off-shore:** Derivada da energia cinética do vento sobre a superfície do oceano.

O litoral norte do Brasil, especialmente na região do Maranhão, Pará e Amapá, possui potencial significativo para geração oceânica a partir de variação de marés, conforme a Figura 1. Desde a década de 60, vários estudos preliminares foram feitos para avaliar o potencial de exploração deste recurso energético (Neto et. al, 2009) (Neto et. al, 2010). Dentre estes locais, destaca-se o estuário do Bacanga, localizado na região metropolitana de São Luís.

**Figura 1.** Amplitude da componente harmônica M2 da variação de marés.



Fonte: IPCC, 2012.

O estuário do Bacanga é considerado um local bastante favorável para estudos estratégicos relacionados à geração maremotriz em baixas quedas d'água. A variação de marés é da ordem de 4,4 m, sendo os valores mínimo e máximo iguais a 2,4 m e 6,2 m, respectivamente (Neto & Saavedra, 2017).

Estudos preliminares realizados por (Neto, Amaral, & Saavedra, 2014), indicam um potencial energético teórico da ordem de 145 GWh ao ano no estuário. Este potencial é significativo principalmente pelo fato de se tratar de um projeto pioneiro no contexto brasileiro. A Figura 2 mostra a vista aérea do estuário do Bacanga.

**Figura 2.** Vista aérea do estuário do Bacanga.

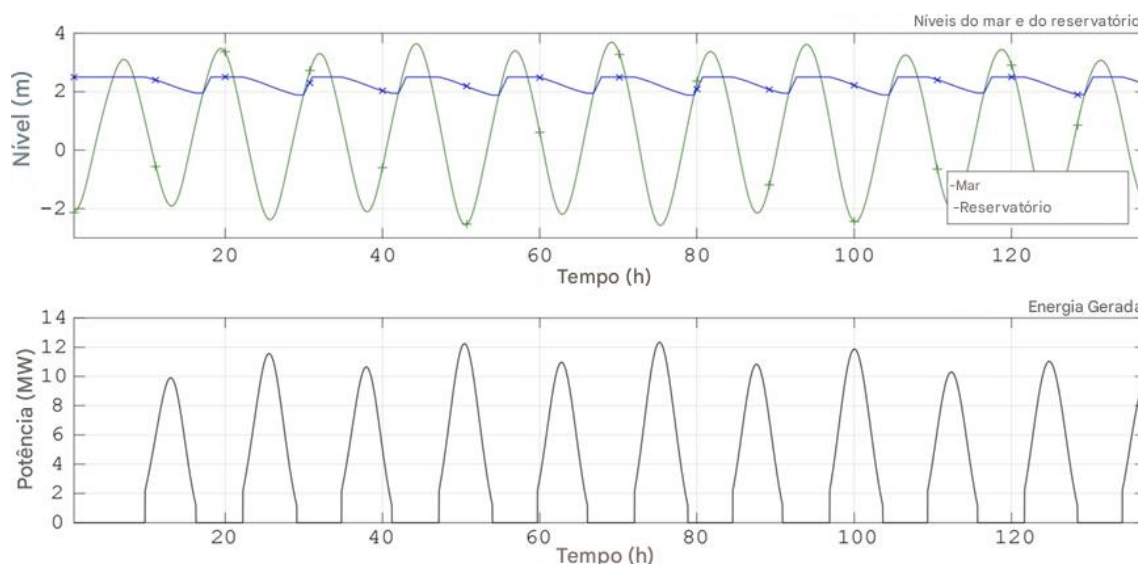


Fonte: Neto, Amaral, & Saavedra, 2014.

A Figura 3 apresenta o perfil típico da potência gerada por uma plana maremotriz fictícia no estuário do Bacanga. Observa-se que, ao contrário de outras fontes renováveis tais como eólica ou fotovoltaica, a geração maremotriz segue um padrão muito mais previsível. Isso pode ser uma característica bastante positiva para a integração deste recurso energético ao sistema elétrico. Especificamente, espera-se que este perfil de geração seja mais propício a promover capacidade firme (*firming capacity*) do que os perfis de geração de outras fontes. Para tanto, sistemas de armazenamento de energia podem ser uma peça fundamental, uma vez que podem

ser operados de modo a garantir o balanço entre geração e carga, mesmo diante das flutuações e incertezas das fontes renováveis.

**Figura 3.** Perfil típico de geração de uma planta maremotriz fictícia no estuário do Bacanga



Fonte: Neto & Saavedra, 2017.

Diante disso, propõe-se a seguinte investigação: de que forma a integração de um sistema de armazenamento de energia a uma planta maremotriz pode promover maior capacidade firme? De que forma o perfil típico de geração maremotriz pode ser vantajoso neste contexto, em detrimento de outras fontes renováveis mais comuns tais como solar e eólica? O presente trabalho busca investigar e propor contribuições para responder a estas perguntas.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar de que forma o uso de sistemas de armazenamento de energia podem ser integrados ao perfil de geração de uma planta maremotriz.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão crítica na literatura sobre os aspectos relacionados ao uso de sistemas de armazenamento integrados a plantas de geração maremotriz;

- Realizar análises de sensibilidade entre a capacidade do sistema de armazenamento e a capacidade firme de uma planta de geração maremotriz;
- Avaliar comparativamente a relação de custo-benefício da inserção de sistemas de armazenamento em plantas de geração maremotriz.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais**

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dados secundários obtidos a partir de estudos existentes sobre o estuário do Bacanga e sistemas de armazenamento de energia. Os dados medidos foram tirados do estudo sobre complementariedade de (Neto; Saavedra; Oliveira, 2020) e está disponível no Anexo A desta pesquisa.

As ferramentas que foram utilizadas para a realização dessa pesquisa incluem:

- Software de simulação computacional, MATLAB, para modelagem do sistema de geração maremotriz, análise do armazenamento de energia e comparação com outras fontes de geração (eólica e solar);
- Dados batimétricos do estuário do Bacanga;
- Dados medidos de energia eólica e solar no Maranhão;
- Métodos estatísticos para análise comparativa e avaliação de desempenho dos sistemas.

### **2.2 Caracterização do Objeto de Estudo**

O objeto de estudo é a integração de sistemas de armazenamento de energia a uma planta de geração maremotriz fictícia baseada no estuário do Bacanga, localizado na região metropolitana de São Luís, Maranhão. Esse estuário apresenta variações de maré significativas, com amplitude média de 4,4 m, sendo ideal para exploração maremotriz. A planta fictícia foi modelada para representar cenários de geração típicos dessa região.

## 2.3 Caracterização da Área

O estuário do Bacanga, situado no Maranhão, é conhecido por sua alta amplitude de marés, variando entre 2,4 m e 6,2 m. A região possui características favoráveis à geração de energia maremotriz, além de um histórico de estudos preliminares que demonstram seu potencial energético.

## 2.4 Metodologia da Pesquisa

Este trabalho segue uma abordagem quantitativa, com etapas organizadas conforme descrito abaixo:

### 1. Pesquisa Bibliográfica:

- Revisão de literatura sobre geração maremotriz e sistemas de armazenamento de energia, e outras fontes como solar e eólica;
- Pesquisa na literatura sobre métricas de confiabilidade.

### 2. Coleta e Processamento de Dados:

- Dados sobre a variação de marés do estuário do Bacanga que foram obtidos de artigos científicos que possuem bancos de dados reais;
- Características de diferentes tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de lítio serão analisadas.

### 3. Simulações Computacionais:

- Desenvolvimento de um modelo da planta maremotriz fictícia no estuário do Bacanga utilizando *software MATLAB*;
- Integração de sistemas de armazenamento ao modelo de geração;
- Análise de cenários de geração para avaliar a viabilidade técnica.

### 4. Análise Estatística:

- Comparação da previsibilidade e eficiência energética da fonte maremotriz em relação à solar e eólica;

### 5. Discussão dos Resultados:

- Interpretação dos dados obtidos nas simulações;
- Comparação com estudos anteriores de integração de fontes renováveis e armazenamento.

### **3.3 Procedimentos Metodológicos**

A metodologia deste trabalho consiste inicialmente em uma pesquisa bibliográfica da literatura acerca da integração de sistemas de armazenamento a uma planta maremotriz fictícia. Para tanto, o estuário do Bacanga foi utilizado como estudo de caso neste trabalho. A partir de dados e medições sobre o estuário do Bacanga contidos em publicações e artigos existentes na literatura, foi possível realizar simulações computacionais da planta maremotriz fictícia no estuário do Bacanga. Além disso, pesquisas sobre modelos computacionais de sistemas de armazenamento de energia complementaram a etapa de revisão bibliográfica sobre o tema.

A partir das informações levantadas em etapa anterior, uma pesquisa quantitativa foi realizada a partir de análises e simulações computacionais para avaliar de que forma estes recursos energéticos podem ser combinados entre si (geração + armazenamento), com vistas a benefícios técnicos e econômicos.

Os resultados obtidos a partir de análises e simulações computacionais permitiu dar subsídios a uma avaliação descritiva sobre os benefícios em potencial desta integração de recursos energéticos.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

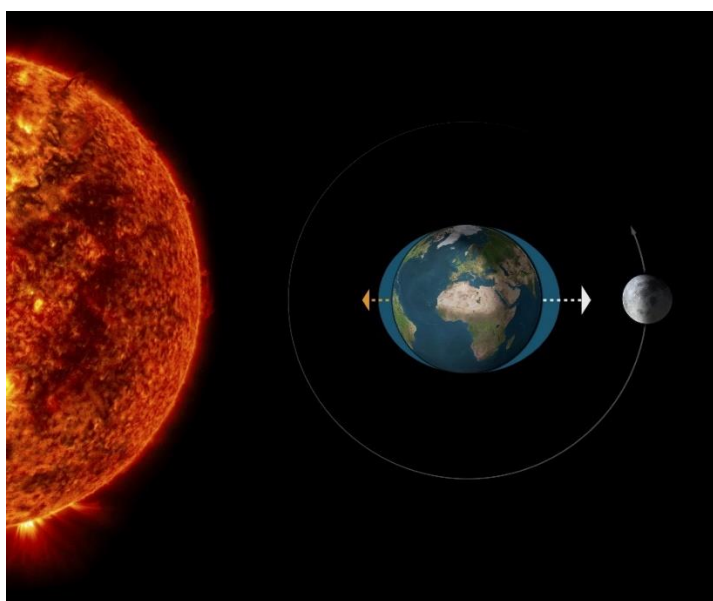
#### 3.1 Energia Maremotriz

##### 3.1.1 Fenômenos Associados ao Comportamento das Marés

A maré é o movimento vertical periódico de subida e descida da superfície do oceano, causado principalmente pela força gravitacional exercida pelo Sol e pela Lua sobre a Terra. Esse fenômeno, por sua vez, está diretamente relacionado ao posicionamento desses astros, resultando em variações cíclicas na amplitude das marés (Mazumder e Arima, 2005).

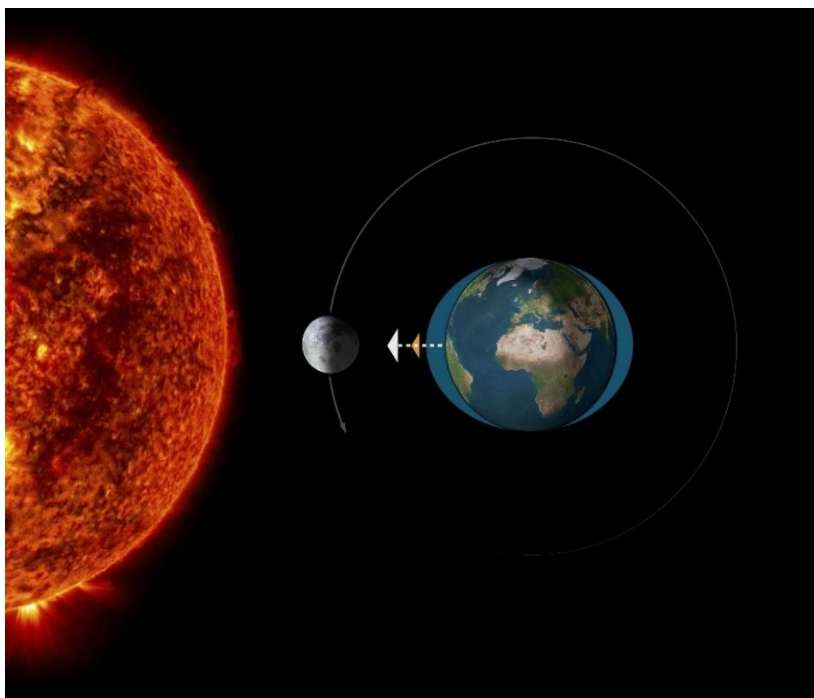
Nesse contexto, a amplitude máxima é alcançada nas marés de sizígia, que ocorrem quando os astros estão alinhados durante a lua cheia e a lua nova, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5 (CHM, 2019). Por outro lado, a amplitude mínima ocorre nas marés de quadratura, também chamadas de marés mortas, que acontecem quando a Lua está nas fases de quarto crescente e quarto minguante, como representado nas Figuras 6 e 7 (CHM, 2019). Esses quatro fenômenos são influenciados principalmente pela força gravitacional da Lua, que, por estar mais próxima da Terra, exerce uma atração 2,17 vezes maior que a do Sol (Hammons, 1993).

**Figura 4.** Representação das marés de sizígia que ocorrem na lua cheia.



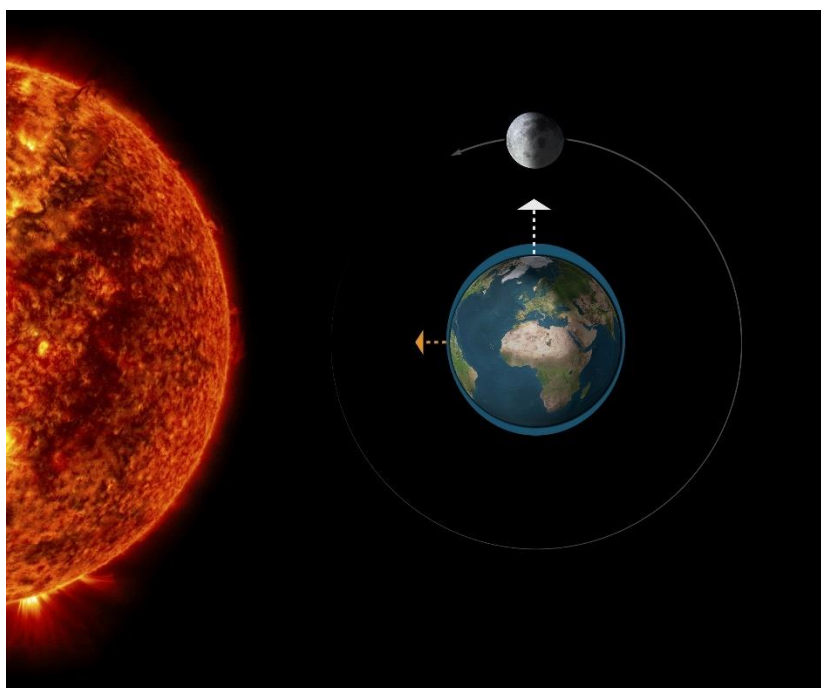
Fonte: CHM - Centro de Hidrografia da Marinha – Marinha do Brasil, 2019.

**Figura 5.** Representação das marés de sizígia que ocorrem na lua nova.



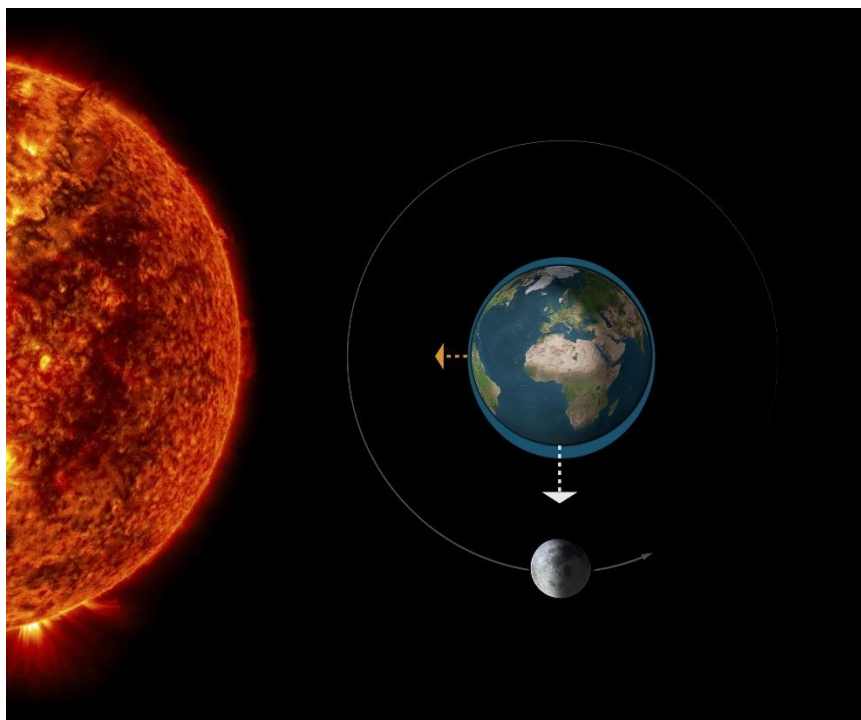
Fonte: CHM - Centro de Hidrografia da Marinha – Marinha do Brasil, 2019.

**Figura 6.** Marés de quadraturas que acontecem na fase da lua quarto minguante.



Fonte: CHM - Centro de Hidrografia da Marinha – Marinha do Brasil, 2019.

**Figura 7.** Marés de quadraturas que acontecem na fase da lua quarto crescente.



Fonte: CHM - Centro de Hidrografia da Marinha – Marinha do Brasil, 2019.

A amplitude das marés também é influenciada pela maior ou menor proximidade dos astros. Diante disso, as marés atingem valores mais elevados quando a Lua está mais próxima da Terra (perigeu) ou quando a Terra se aproxima do Sol (periélio).

Além da influência astronômica, em estuários, as marés também podem ser moduladas por diversos fatores locais. Diante disso, elementos como a geometria estuarina (por exemplo, comprimento, profundidade e condição de entrada), a rugosidade do leito e das margens (como a distribuição da vegetação), outras forças motrizes (como a interação com ondas e fluxos de rios) e atividades antropogênicas (como dragagem e construção de paredes de proteção) podem alterar significativamente o comportamento das marés. Dessa forma, quaisquer modificações nesses fatores físicos e ambientais podem impactar as marés, resultando em mudanças nas correntes de maré e na distribuição da energia dos fluxos dentro dos estuários (Talke; Jay, 2020) (Khojasteh, D. et al, 2021).

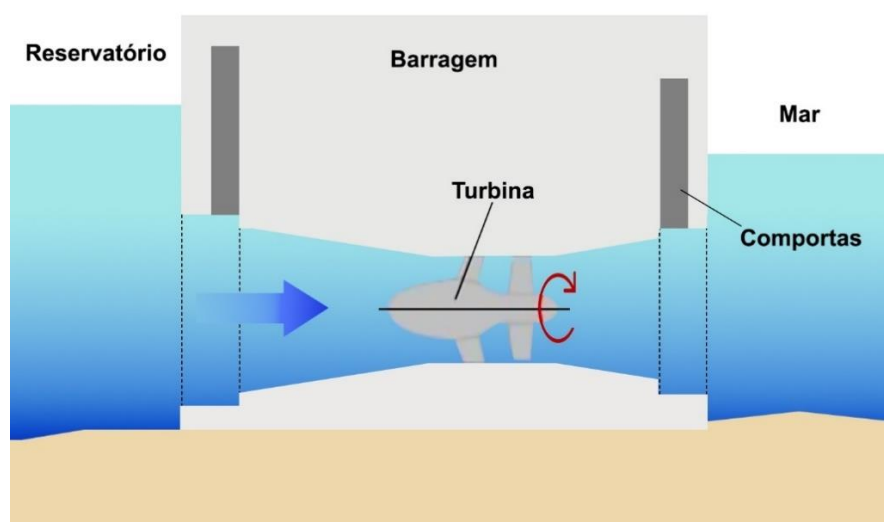
### 3.1.2 Formas de Aproveitamento de Energia das Marés

A energia das marés pode ser aproveitada através de dois principais sistemas: as usinas maremotrizes ou barragens de marés, que captam a energia potencial gerada pela variação do nível da água, e as turbinas de corrente de maré, que exploram a energia cinética do fluxo das correntes marítimas (Khan et al., 2017).

Dentre os diversos sistemas e métodos de geração de energia das marés, as usinas maremotrizes destacam-se por serem a única tecnologia desse ramo que alcançou o estágio de implementação comercial em larga escala. Um dos fatores que contribuíram para esse sucesso é o seu princípio de funcionamento, que é semelhante ao de uma usina hidrelétrica, uma tecnologia já consolidada e amplamente utilizada nos sistemas elétricos atuais (Lewis et al., 2017).

A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento de uma usina maremotriz, detalhando o processo de conversão da energia das marés em eletricidade. Esse sistema aproveita a subida e a descida das marés para criar um desnível hidráulico entre o reservatório e o mar, armazenando energia potencial. Essa energia é então convertida em energia mecânica por meio de turbinas, que, acopladas a geradores, a transformam em eletricidade. Graças à previsibilidade das marés e à eficiência desse mecanismo, a tecnologia maremotriz se consolida como uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia em áreas costeiras.

**Figura 8.** Esquema de geração de uma usina maremotriz.



Fonte: Adaptado de Lemonis, 2004.

Uma das principais vantagens desse sistema é a maturidade tecnológica das usinas maremotrizes, que já foram amplamente testadas e validadas ao longo do tempo, uma vez que a primeira usina de barragem de maré comercial em grande escala, La Rance (França), começou a operar em 1966 (Charlier, 2007) e abriu o pontapé inicial para a exploração da geração através das energias oceânicas, que será visto nas sessões posteriores.

### 3.1.3 Ciclos das Marés e Previsibilidade

Devido à regularidade dos movimentos celestes, as marés podem ser previstas com alta precisão. Essa previsão é realizada por meio de modelos matemáticos que consideram componentes harmônicos e fatores locais, como a topografia do fundo do mar, o formato da costa e a profundidade da água. Dessa forma, para garantir a confiabilidade desses modelos, eles são calibrados com dados históricos obtidos por marégrafos e satélites (Twidell, 2021). A previsão das marés é essencial para diversas atividades, incluindo navegação, construção costeira, geração de energia maremotriz e gestão de ecossistemas. Sua precisão depende diretamente da qualidade dos dados históricos e da capacidade do modelo de representar variações locais (Baker, 1991).

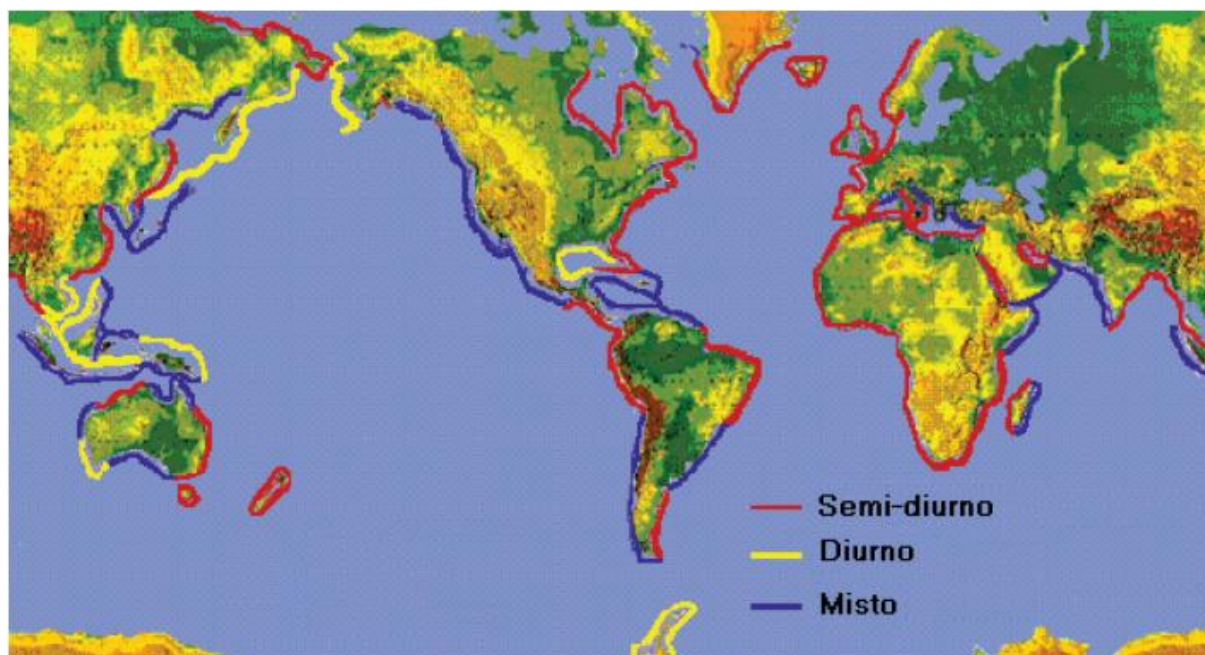
O princípio por trás dessas previsões está na análise dos componentes harmônicos, que representam oscilações periódicas causadas pelos movimentos orbitais da Lua e da Terra. Derivados de séries temporais de observações, esses componentes são descritos por funções senoidais e incluem:

- Componente principal lunar (**M2**): Período de aproximadamente 12 horas e 25 minutos, correspondente ao ciclo semidiurno da Lua.
- Componente principal solar (**S2**): Período de 12 horas, relacionado ao ciclo semidiurno do Sol.
- Componente lunar diurno (**K1**): Período de aproximadamente 23,93 horas, associado à inclinação da órbita lunar.
- Componente solar diurno (**O1**): Período de aproximadamente 25,82 horas.

A combinação desses componentes permite modelar com precisão o comportamento das marés em diferentes regiões, resultando em previsões confiáveis para diversas aplicações (Prandle, 1984).

A Figura 9 ilustra a distribuição dos ciclos de marés ao redor do mundo. No Brasil, predominam dois tipos: o ciclo semidiurno, presente do Amapá ao Espírito Santo, e o ciclo misto, que se estende do Espírito Santo ao Rio Grande do Sul (MME, 2007).

**Figura 9.** Distribuição dos ciclos de marés



Fonte: Ministério de Minas e Energia – MME, 2007.

### 3.1.4 Contexto Energético Mundial

O setor energético mundial está se movendo em direção a fontes limpas e renováveis, impulsionado pela crescente preocupação com o impacto ambiental e a volatilidade econômica dos combustíveis fósseis. Algumas tecnologias, como a eólica e a solar, atingiram um alto nível de maturidade comercial e econômica e são atualmente consideradas investimentos seguros. No entanto, a intermitência dessas fontes impõe desafios significativos às redes elétricas, especialmente com o aumento de sua participação no sistema. Em particular, a energia das marés é mais previsível e menos intermitente do que a solar ou eólica, pois o recurso tem um comportamento periódico que pode ser previsto com precisão com anos de antecedência (Rizwan, 2021).

A energia oceânica, por outro lado, teve um desenvolvimento mais lento em comparação com outras fontes renováveis. No entanto, apresenta um potencial considerável para acelerar a transição energética, devido à sua vasta disponibilidade. Estima-se que o potencial teórico de geração a partir das marés e correntes oceânicas seja de aproximadamente 26.000 TWh, mas, considerando o aproveitamento tecnicamente viável, esse valor se reduz consideravelmente (EPE, 2007). A Tabela 1 apresenta os países com o maior potencial energético anual associado às variações das marés.

**Tabela 1.** Países com o maior potencial energético anual associado às variações das marés

| <b>País</b>                          | <b>Energia Potencial Anual<br/>[TWh]</b> |
|--------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Austrália</b>                     | 1760                                     |
| <b>Canadá (Fundy)</b>                | 1357                                     |
| <b>Reino Unido</b>                   | 734                                      |
| <b>França</b>                        | 732                                      |
| <b>EUA (gelo marinho parcial)</b>    | 619                                      |
| <b>Brasil</b>                        | 298                                      |
| <b>Coreia do Sul</b>                 | 107                                      |
| <b>Rússia (gelo marinho parcial)</b> | 75                                       |
| <b>Argentina</b>                     | 62                                       |
| <b>Índia</b>                         | 19                                       |
| <b>China</b>                         | 12                                       |

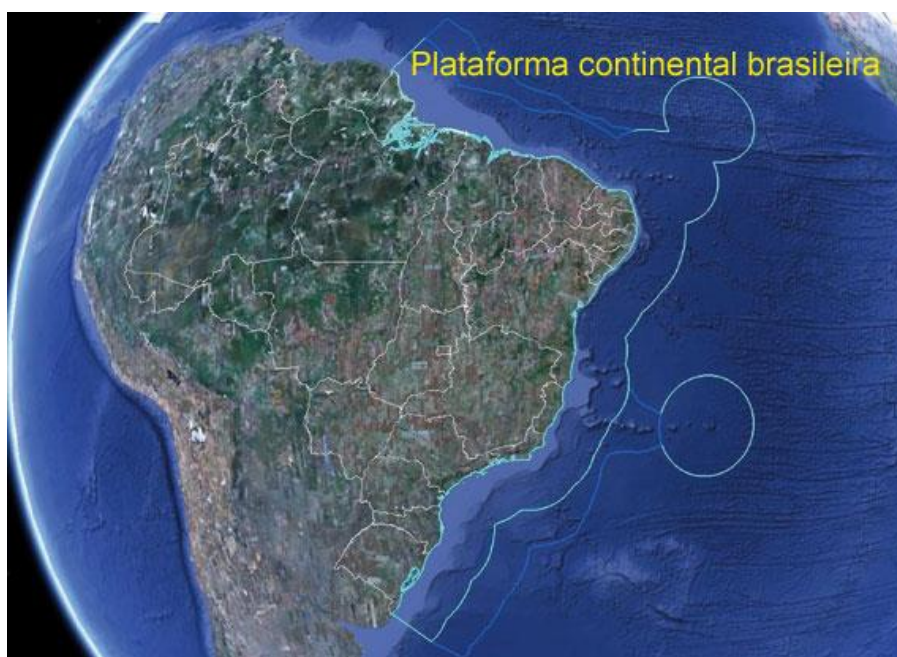
Fonte: (NEILL, 2018).



### 3.1.5 Contexto Energético Brasileiro

O contexto energético brasileiro em relação à geração de energia maremotriz é um tema que apresenta oportunidades e desafios significativos. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a costa brasileira possui mais de 8.500 km, abrangendo 17 estados, essa vasta área é apresentada na Figura 10.

**Figura 10.** Zona costeira brasileira



Fonte: MMA, 2020.

Um dos principais fatores que favorecem o potencial da energia maremotriz no Brasil é a significativa amplitude das marés em determinadas regiões do litoral. De acordo com um relatório preliminar da Eletrobrás, elaborado em 1981, os estados do Amapá, Maranhão e Pará, situados no Norte e Nordeste do país, apresentam marés que podem atingir até 6 metros de altura — um patamar considerado ideal para a instalação de usinas maremotrizes (Eletrobrás, 1981). Essas regiões, portanto, são apontadas como as mais promissoras para futuros projetos uma vez que estudos preliminares apontaram que para um bom funcionamento de uma usina maremotriz tem que se atingir no mínimo uma média de 5 metros de altura (Khan, 2018).

No entanto, o aproveitamento da energia maremotriz no Brasil enfrenta uma série de desafios. Um dos principais é o custo elevado associado à instalação e manutenção das infraestruturas necessárias, pois as tecnologias para geração de



energia a partir das marés ainda são caras, principalmente devido à complexidade de operar em ambientes marinhos, que exigem equipamentos resistentes à corrosão e às condições adversas do oceano (Bhatia, 2014).

Além disso, a falta de incentivos governamentais e políticas públicas específicas para essa fonte de energia dificulta o avanço de projetos e pesquisas na área. Além desses desafios econômicos e regulatórios, outro desafio significativo é o impacto ambiental que a instalação de usinas maremotrizes pode causar, uma vez que construção de barragens ou a instalação de turbinas submersas pode alterar correntes marinhas, afetar ecossistemas costeiros e interferir na vida de espécies aquáticas (Rahman; Farrok; Haque, 2022).

Todos esses impactos precisam ser cuidadosamente avaliados e mitigados para que a energia maremotriz seja uma opção verdadeiramente sustentável. Nesse sentido, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) elaborou uma tabela que detalha os principais impactos socioambientais associados à construção e operação de empreendimentos de energia maremotriz. Esses impactos estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Impactos socioambientais e mitigações associadas à construção e operação de empreendimentos de energia maremotriz.

| Aspectos                                       | Impactos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | TO | Medidas mitigadoras ou compensatórias / Projetos / Programas                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ocupação do solo pelo canteiro de obras</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interferência com população local</li> <li>- Interferência com flora e fauna</li> <li>- Produção de ruído e poeira</li> <li>- Erosão do solo</li> <li>- Alteração do uso do solo</li> <li>- Deposição ácida pelas máquinas e caminhões utilizando derivados de petróleo</li> </ul> | C  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compensação monetária ou permuta de áreas</li> <li>- Utilização de sistemas anti-poeiras</li> <li>- Recuperação de áreas degradadas</li> <li>- Regulação das máquinas utilizando abafadores de ruídos e emissões dessulfuradas</li> </ul> |

|                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Transporte de equipamento pesado</b>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Poluição sonora</li> <li>- Perturbação do trânsito local</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                           | C   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Planejamento do sistema de tráfego de modo a se evitar os horários de pico</li> </ul>                                                                                   |
| <b>Movimentos migratórios causados pela construção da usina</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento da demanda por serviços públicos, habitação e infraestrutura de transporte</li> <li>- Alteração da organização socio-cultural e política da região</li> <li>- Aumento das atividades econômicas na região com possível posterior retração após o término do empreendimento</li> </ul> | C/O | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Apoio na construção do Plano Diretor do Município</li> <li>- Adequação das infraestruturas de habitação, educação e transporte</li> <li>- Gestão sustentável</li> </ul> |
| <b>Distorção estética</b>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Poluição visual</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                    | C/O | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Projetos paisagísticos e arquitetônicos para redução do impacto visual</li> </ul>                                                                                       |
| <b>Construção e operação da usina</b>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteração e/ou destruição de ecossistemas dos estuários</li> <li>- Interferência com flora e fauna</li> <li>- Alteração na movimentação da água</li> <li>- Mudança no regime de transporte de sedimentos</li> </ul>                                                                           | C/O | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compensação monetária</li> <li>- Recuperação de áreas degradadas</li> <li>- Criação de Unidades de Conservação</li> </ul>                                               |

Legenda:

TO - Tempo de Ocorrência; C - Construção; O - Operação; PO - Pós-operação.

Fonte: EPE, 2007.

Entretanto, apesar dos desafios, existem iniciativas e estudos em andamento que buscam explorar o potencial da energia maremotriz no Brasil. Universidades e centros de pesquisa, como a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) têm desenvolvido projetos piloto para avaliar a viabilidade técnica e econômica dessa tecnologia. Esses estudos são fundamentais para entender as particularidades do litoral brasileiro e desenvolver soluções adaptadas às condições locais do estuário do Bacanga, localizado na cidade de São Luís – MA.

Nesse contexto, também é importante destacar o papel do Governo Brasileiro no planejamento energético de longo prazo. Conforme mencionado pelo Ministério do Meio Ambiente, uma ação pioneira do governo foi a elaboração do Plano Nacional de Energia – PNE 2030. Os estudos do PNE 2030 foram conduzidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o Ministério de Minas e Energia (MME), com o objetivo de formular uma estratégia de expansão da oferta de energia de forma econômica e sustentável, visando atender à evolução da demanda em uma perspectiva de longo prazo. Esse plano inclui a avaliação de diversas fontes de energia, incluindo renováveis, e pode servir como base para futuras iniciativas relacionadas à energia maremotriz. Com investimentos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e políticas de incentivo, como as previstas no PNE 2030, a energia maremotriz pode se tornar uma opção viável e sustentável para o Brasil no futuro, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a transição para uma economia de baixo carbono.

Com investimentos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e políticas de incentivo, como as previstas no PNE 2030, a energia maremotriz pode se tornar uma opção viável e sustentável para o Brasil no futuro, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a transição para uma economia de baixo carbono.

No entanto, para que a energia maremotriz seja efetivamente incorporada ao sistema elétrico, é fundamental superar desafios técnicos relacionados à sua variabilidade. Embora a previsibilidade das marés seja uma vantagem em comparação com outras fontes renováveis, a geração nem sempre coincide com os períodos de maior demanda energética. Assim, torna-se essencial a adoção de estratégias para garantir um suprimento contínuo.

Nesse cenário, os sistemas de armazenamento de energia (SAE) surgem como uma solução crucial, permitindo a compensação das oscilações na geração e aumentando a confiabilidade desse recurso na matriz elétrica.

### **3.2 Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE)**

Os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) desempenham um papel crucial em um cenário de crescente adoção de fontes renováveis, pois além de armazenar o excedente energético, os SAE permitem maior flexibilidade operacional,

auxiliam na regulação da frequência e tensão da rede, possibilitam a resposta rápida a variações na carga e também ajudam a reduzir sobrecargas que ocorrem nas linhas de transmissão (Koirala; Hakvoort, 2017). Dessa forma, os sistemas de armazenamento são essenciais para garantir um suprimento de energia de forma mais confiável e eficiente, especialmente com a crescente inserção de fontes renováveis nos sistemas elétricos.

### **3.2.1 Armazenamento na Geração Renovável**

As fontes renováveis, como solar e eólica, são intermitentes por natureza, ou seja, sua geração depende das condições climáticas e elas sofrem variações ao longo do tempo, essa característica intrínseca dessas fontes pode causar desequilíbrios na rede elétrica (Naraindath; Bansal; Naidoo, 2024). Dessa forma, os sistemas de armazenamento de energia surgem como uma solução para mitigar esses problemas, armazenando o excedente de energia gerado em períodos de alta produção e liberando-a quando a geração é insuficiente para suprir a demanda.

Além de mitigar os efeitos da intermitência, os sistemas de armazenamento também reduzem a necessidade de acionamento de usinas termelétricas para suprir a demanda nos períodos de baixa geração, diminuindo custos e emissões de carbono (Cabeza, 2022). Dessa forma, os SAE não apenas tornam o sistema mais confiável, mas também aumentam a previsibilidade da oferta de energia, um fator essencial e desejável para o planejamento e operação dos sistemas elétricos.

Os sistemas de armazenamento de energia também desempenham um papel fundamental na modernização das redes elétricas, proporcionando maior estabilidade, confiabilidade e eficiência na distribuição de energia. Para ilustrar as principais aplicações desses sistemas e seu impacto nas redes elétricas, a Figura 11 apresenta um diagrama que destaca como o armazenamento de energia contribui para a regulação de frequência, a integração de fontes renováveis e a melhoria da resiliência da rede. Essa figura ajuda a visualizar os benefícios e o funcionamento dessas tecnologias no contexto de uma rede elétrica moderno.

**Figura 11.** Aplicações de sistemas de armazenamento



Fonte: Adaptado de PALIZBAN & KAUHANIEMI, 2016.

Além das aplicações gerais ilustradas na Figura 11, algumas funções específicas dos sistemas de armazenamento de energia merecem destaque devido ao seu impacto significativo na modernização das redes elétricas e elas são descritas a seguir:

- **Nivelamento de Carga (Load Leveling):** Essa aplicação permite que a energia seja armazenada em períodos de baixa demanda, ou seja, nos picos de consumo a energia é liberada para o consumidor, e isso traz como benefício a redução da necessidade de geração extra, diminuindo assim custos (Li et al., 2023).
- **Arbitragem de Energia:** Já nesse sistema, os operadores do sistema podem armazenar energia quando os preços estão baixos e vendê-la quando os preços aumentam, otimizando custos e contribuindo para a estabilidade do mercado de energia (Mandić; Sutlović; Modrić, 2022).
- **Backup e Continuidade do Fornecimento (Black Start):** Os sistemas de armazenamento podem fornecer energia de emergência para reativar redes após apagões, garantindo maior resiliência ao sistema elétrico (Fan et al., 2023).

- **Reserva Girante (Spinning Reserve):** Para esse caso, o armazenamento pode atuar como uma reserva instantânea de energia, sendo ativado rapidamente para substituir a geração convencional em caso de falhas na rede, diferentemente do Black Start que passa por alguns estágios antes de ser ativado (Adeyemo; Marra; Tedeschi, 2025) (Banshwar et al., 2019).

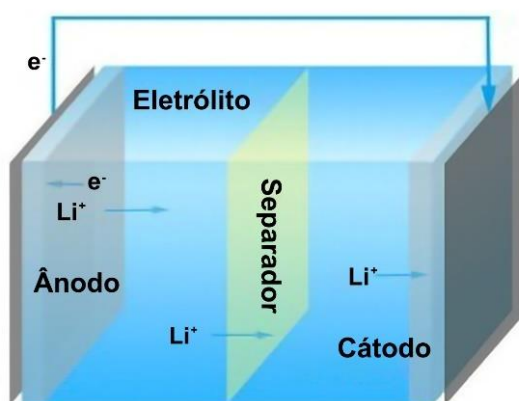
Dessa forma, os sistemas de armazenamento de energia se tornam componentes essenciais no quesito da constante evolução das redes elétricas, oferecendo maior flexibilidade, segurança e eficiência operacional, contribuindo assim para uma matriz energética mais resiliente.

### 3.2.2 Tecnologias de Armazenamento – Baterias

Existem diversas tecnologias de armazenamento de energia, cada uma com suas características, vantagens e limitações, por isso a escolha da tecnologia mais adequada depende de fatores como capacidade de armazenamento, tempo de resposta, custo e aplicação específica (Dong; Kennedy; Wu, 2011).

As baterias são amplamente utilizadas devido à sua versatilidade e eficiência. Entre as mais comuns, destacam-se as baterias de íon-lítio, que oferecem alta densidade energética, longa vida útil e rápida resposta, sendo ideais para aplicações que exigem desempenho e confiabilidade, embora tenham um custo elevado (Nzereogu, 2022). A Figura 12 mostra a ilustração esquemática de uma bateria de íon-lítio.

**Figura 12.** Ilustração esquemática de uma bateria de íon-lítio.



Fonte: Dong; Kennedy;Wu, 2011.

Por outro lado, as baterias de chumbo-ácido, apesar de representarem uma tecnologia mais antiga e de menor custo, possuem menor densidade energética e vida útil reduzida em comparação com as de íon-lítio (Yin, 2022).

Para fins de armazenamento de sistemas renováveis, a bateria de íon-lítio tem sido mais utilizada devido à sua robustez. Além da sua alta densidade energética e longa vida útil, a análise do desempenho dessas baterias leva em consideração alguns parâmetros essenciais, como o Estado da Carga (SOC - State of Charge), Garantia Física Diária (DPG - Daily Production Guarantee) e Magnitude Média das Flutuações (AFM - Average Fluctuation Magnitude).

O Estado da Carga (SOC - State of Charge), representa o nível de carga da bateria em um determinado momento, expresso em porcentagem da capacidade total. Esse parâmetro é fundamental para garantir que a energia armazenada esteja disponível nos momentos de maior demanda e para evitar descargas excessivas que possam comprometer a vida útil do sistema.

Por outro lado, a Garantia Física Diária (DPG - Daily Production Guarantee) refere-se à quantidade mínima de energia que pode ser fornecida diariamente, garantindo uma operação mais previsível e confiável do sistema de armazenamento. No contexto da energia maremotriz, uma DPG mais elevada permite que a geração acompanhe melhor a demanda, reduzindo a necessidade de complementação por fontes intermitentes.

Já a Magnitude Média das Flutuações (AFM - Average Fluctuation Magnitude) mede as variações na geração de energia ao longo do tempo. Altos valores de AFM indicam maior instabilidade no fornecimento de energia, o que pode impactar a confiabilidade da rede. A utilização de sistemas de armazenamento bem dimensionados ajuda a suavizar essas oscilações, proporcionando um fluxo energético mais estável para o sistema elétrico.

Dessa forma, a integração de baterias de íon-lítio em plantas maremotrizes, aliada ao monitoramento de parâmetros como SOC, DPG e AFM, pode aumentar significativamente a eficiência e a confiabilidade do sistema de geração, permitindo um melhor aproveitamento da energia oceânica e maior estabilidade na rede elétrica.

### **3.2.3 Aplicação em Plantas Maremotrizes**

Apesar de a geração maremotriz ser mais previsível do que outras fontes renováveis, a produção de energia dessa fonte depende fortemente das variações dos ciclos de maré, o que vez ou outra pode resultar em momentos de baixa geração. Diante desse contexto, a integração de sistemas de armazenamento permite suavizar essas oscilações, garantindo um fornecimento de energia mais estável, e além disso, os SAE também possibilitam maior flexibilidade na operação das usinas, permitindo a liberação da energia armazenada nos horários de maior demanda, maximizando o aproveitamento do recurso maremotriz (Soliman et. al, 2021). Os sistemas de armazenamento podem ser integrados às plantas maremotrizes para melhorar a capacidade firme e a eficiência.

Dessa forma, a implementação de sistemas de armazenamento não apenas melhora a estabilidade da oferta de energia renovável, mas também impacta diretamente a confiabilidade do sistema elétrico. Sendo assim, a capacidade de um SAE de armazenar e distribuir energia nos momentos de demanda reduz a intermitência e os riscos de falhas no fornecimento e para avaliar esses benefícios, métricas de confiabilidade são amplamente utilizadas na análise de desempenho de sistemas elétricos com fontes renováveis.

## **3.3 Avaliação da Confiabilidade do Sistema Elétrico**

A confiabilidade do sistema elétrico é um fator essencial para garantir a segurança e estabilidade do fornecimento de energia, especialmente em um cenário de crescente integração de fontes renováveis. Como essas fontes são intermitentes, é necessário avaliar sua capacidade de suprir a demanda em diferentes condições operacionais. Para isso, são utilizados indicadores e métricas estatísticas que quantificam a probabilidade de falhas no fornecimento e a capacidade efetiva das fontes renováveis no sistema.

### **3.3.1 Conceitos e Métricas de Confiabilidade**

A confiabilidade do sistema elétrico pode ser avaliada por meio de métricas probabilísticas que quantificam o risco de déficit de energia. Conforme discutido por Saad e Singh (2022), os três dos principais índices utilizados são o LOLE (Loss of Load Expectation), LOLP (Loss of Load Probability) e ELCC (Effective Load Carrying



Capability), cada um possui uma abordagem específica para a análise do desempenho do sistema, sendo elas:

- LOLE (Loss of Load Expectation) – Essa métrica representa o número esperado em que o sistema pode não conseguir atender à demanda ao longo de um período de tempo. Esse índice é expresso em horas por ano (h/ano) ou dias por ano (d/ano) e é utilizado para determinar a necessidade de reforço na geração ou no armazenamento de energia. A formulação matemática dessa métrica é descrita a seguir:

$$LOLE = \sum_{i=1}^N P_i \cdot D_i$$

Onde:

- $P_i$  é a probabilidade de falha do sistema no instante  $i$ ;
  - $D_i$  é a duração da falha no instante  $i$ ;
  - $N$  é o número total de eventos de falha analisados.
- LOLP (Loss of Load Probability) – Esse índice mede a probabilidade de que, em um determinado momento, a carga do sistema ultrapasse a geração disponível, resultando em déficit de energia.

$$LOLP = P(D > G)$$

Onde:

- $D$  é a demanda do sistema;
- $G$  é a geração disponível;
- $P(D > G)$  representa a probabilidade de a demanda ser maior que a geração.

Diferentemente do LOLE, que expressa um valor médio esperado, o LOLP indica a chance instantânea de falha no suprimento e é utilizado para planejar a reserva de capacidade do sistema.

- ELCC (Effective Load Carrying Capability) – Mede a capacidade efetiva de uma fonte de geração contribuir para a demanda do sistema mantendo o mesmo nível de confiabilidade.

$$ELCC = P(G + R \geq D) - P(G \geq D)$$

Onde:

- **G** é a geração convencional disponível;
- **R** é a geração renovável adicional;
- **D** é a demanda do sistema.

O índice ELCC é particularmente útil para avaliar o impacto de fontes renováveis, como solar, eólica e maremotriz, indicando a quantidade de carga que pode ser atendida com segurança considerando a intermitência da geração.

Por fim, essas métricas permitem estimar o risco de falhas no fornecimento e são fundamentais para o planejamento do sistema elétrico, auxiliando na definição da necessidade de expansão da infraestrutura de geração e armazenamento.

### **3.3.2 Uso de Indicadores na Análise de Sistemas Renováveis**

A avaliação da confiabilidade de sistemas elétricos com alta participação de fontes renováveis requer uma análise detalhada dos riscos de intermitência e da necessidade de mecanismos de compensação, como o armazenamento de energia. Os índices LOLE, LOLP e ELCC desempenham um papel fundamental nesse contexto, permitindo estimar o impacto da variabilidade dessas fontes no atendimento da demanda.

Por exemplo, o índice LOLE pode ser utilizado para avaliar a necessidade de sistemas de armazenamento, determinando quantas horas ou dias por ano um sistema renovável pode falhar no suprimento e quanto armazenamento seria necessário para compensar essa intermitência, e o LOLP pode contribuir por auxiliar no dimensionamento da reserva operacional, identificando a probabilidade de momentos críticos em que a geração renovável não é suficiente para atender à carga, também é um índice útil para definir estratégias de despacho de armazenamento e integração de outras fontes de geração. E por fim, o ELCC é essencial para calcular a contribuição efetiva de uma fonte renovável ao sistema, permitindo comparar a confiabilidade da geração maremotriz com outras fontes renováveis, como solar e eólica (Ding; Xu, 2016) (Castro; Ferreira, 2001). Ao integrar sistemas de

armazenamento, esse índice pode ser otimizado, aumentando a capacidade firme da fonte renovável e reduzindo a necessidade de backup por fontes convencionais.

Em um sistema baseado em energia maremotriz com armazenamento, essas métricas permitem demonstrar o impacto positivo da tecnologia na estabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, a previsibilidade da geração maremotriz, combinada com um sistema de armazenamento eficiente, pode reduzir significativamente os valores de LOLE e LOLP, enquanto aumenta o ELCC, tornando a fonte mais competitiva e confiável para integração à matriz energética.

Diante desses desafios e oportunidades, é essencial analisar como a integração de sistemas de armazenamento pode melhorar a confiabilidade de uma planta maremotriz em um cenário real. O estuário do Bacanga, localizado no estado do Maranhão, apresenta características favoráveis para a implementação dessa tecnologia, sendo um local estratégico para avaliar os impactos e benefícios da geração maremotriz associada a sistemas de armazenamento.

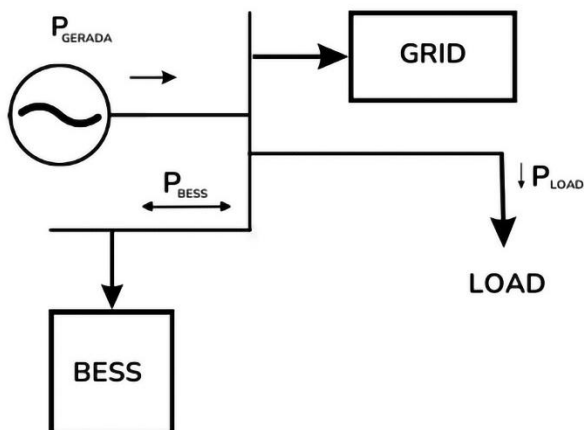
### **3.4 Estudo de Caso: Estuário do Bacanga**

A análise da viabilidade de sistemas de armazenamento de energia em plantas maremotrizes exige um estudo detalhado das condições locais e das interações entre a geração e o consumo de energia. O estuário do Bacanga, localizado na região metropolitana de São Luís – MA, apresenta características favoráveis para esse tipo de estudo, devido à sua amplitude de marés significativa e ao histórico de pesquisas na área. Este capítulo apresenta uma contextualização do problema, descreve o sistema estudado e discute os desafios e soluções propostas.

#### **3.4.1 Descrição do Sistema e Modelo Fictício**

Neste estudo, foi considerado um modelo fictício de uma planta no estuário do Bacanga, o diagrama pode ser visualizado na Figura 13.

**Figura 13.** Diagrama de uma planta fictícia no estuário do Bacanga



Fonte: Elaborado pelo Autor

A figura é composta pelos seguintes elementos principais:

- **Gerador de Energia:** Será utilizado como fim comparativo para mostrar o comportamento das fontes de energia renováveis (solar, eólica, marés, corrente de marés), considerando diferentes configurações.
- **Sistema de Armazenamento de Energia (BESS – Battery Energy Storage System):** Responsável por armazenar o excedente de energia gerado durante os períodos de alta produção e liberá-lo nos momentos de menor geração.
- **Conexão com a Rede Elétrica:** Integração com a rede externa para garantir maior confiabilidade e segurança operacional.

A análise deste sistema busca responder às seguintes questões: (i) Como a integração de um BESS pode aumentar a capacidade firme da planta maremotriz? (ii) De que forma a previsibilidade das marés pode ser vantajosa na comparação com outras fontes renováveis intermitentes?

### 3.4.2 Problemas e soluções propostas

Apesar da previsibilidade da geração maremotriz, a variação dos ciclos de maré pode resultar em momentos de baixa produção, exigindo estratégias para garantir o suprimento contínuo de energia. O presente estudo avalia a implementação de um

sistema de armazenamento de energia como solução para esse problema. Entre os desafios enfrentados, destacam-se:

- **Dependência da Rede Externa:** Quanto menos um sistema renovável depender da rede elétrica externa, mais seguro e resiliente ele se torna. A inserção do BESS pode reduzir essa dependência, garantindo maior autonomia ao sistema.
- **Oscilações na Geração:** A magnitude média das flutuações (AFM) na geração pode impactar a estabilidade do fornecimento. O BESS pode suavizar essas variações, garantindo uma entrega de energia mais constante.
- **Garantia Física Diária (DPG) e Capacidade Efetiva de Carga (ELCC):** O armazenamento pode elevar esses indicadores, tornando a planta maremotriz mais confiável para a integração à matriz energética.

A partir dessas considerações, as simulações computacionais realizadas neste estudo avaliaram diferentes cenários de operação da planta maremotriz no estuário do Bacanga, considerando variações na capacidade de armazenamento e no perfil de carga da rede elétrica. Os resultados obtidos permitiram discutir a viabilidade técnica e econômica da adoção de sistemas de armazenamento para otimizar a geração maremotriz.

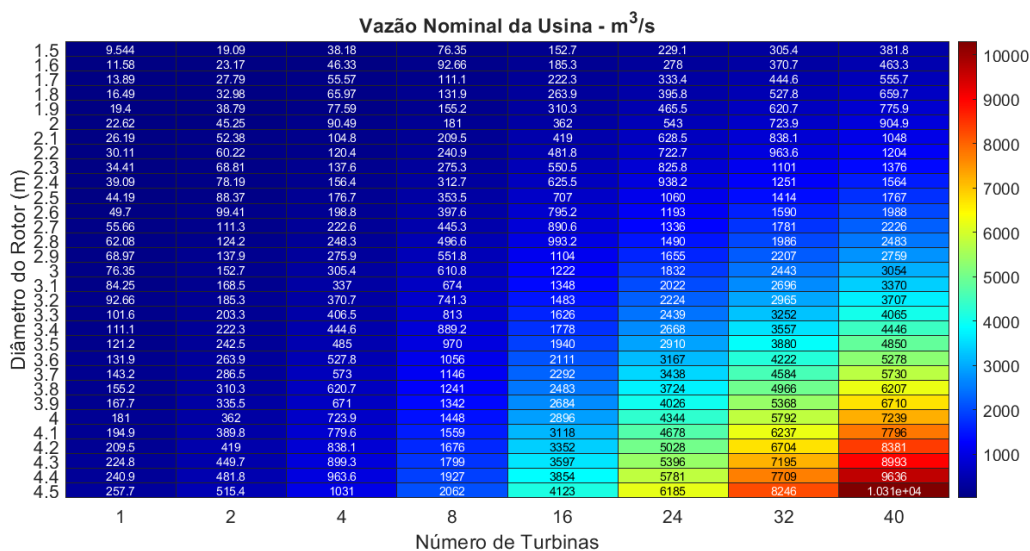
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Influência do Número de Turbinas e do Diâmetro do Rotor na Vazão da Usina.

A análise dos resultados obtidos a partir dos dados simulados no software MATLAB permite compreender a influência de diferentes parâmetros no que se diz ao desempenho de uma usina maremotriz.

A Figura 14 apresenta a relação entre a vazão nominal da usina ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), o número de turbinas e o diâmetro dos rotores. Nota-se que, à medida que essas variáveis aumentam, a vazão processada pela usina maremotriz cresce de maneira expressiva, e esse comportamento é esperado, pois rotores maiores são capazes de captar um volume de água maior e também um maior número de turbinas permite um escoamento mais eficiente.

**Figura 14.** Relação entre a vazão nominal da usina, número de turbinas e diâmetro dos rotores



Fonte: Elaborado pelo Autor

Entretanto, a análise dessa figura revela que o aumento desses parâmetros nem sempre resulta em um crescimento proporcional da vazão. Uma vez que para valores mais elevados de diâmetro do rotor e número de turbinas, observa-se que há uma tendência à saturação, onde o acréscimo de novas turbinas proporciona ganhos marginais menores. Isso é justificado devido às limitações físicas do sistema, como restrições na área útil de instalação e também perdas associadas ao fluxo de água.

Portanto, o dimensionamento adequado do sistema deve levar em conta não apenas o aumento da vazão, mas também os custos operacionais e estruturais envolvidos, pois um número excessivo de turbinas pode elevar significativamente os custos de implementação sem garantir um aumento proporcional na produção energética.

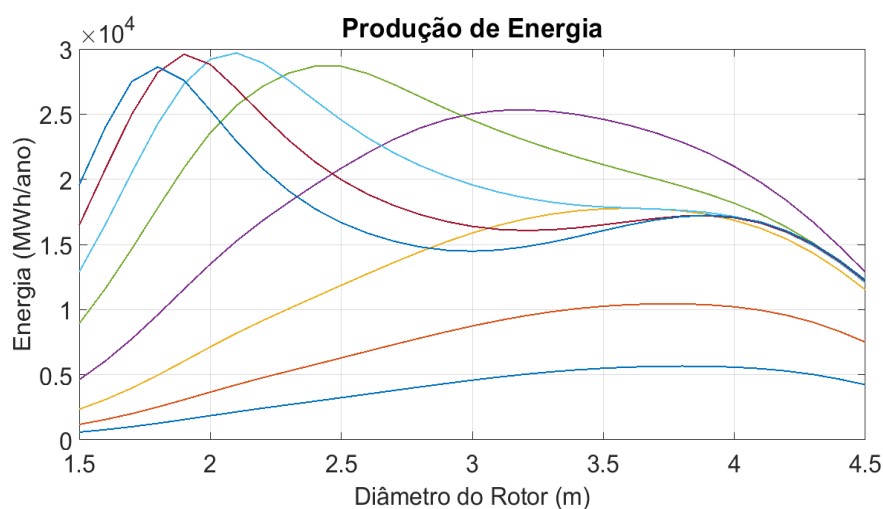
#### 4.2. Diâmetro do Rotor e Produção de Energia

A Figura 15 apresenta a produção de energia anual (MWh/ano) em função do diâmetro do rotor. Nessa figura, cada curva representa uma condição operacional distinta, observa-se que a produção de energia cresce com o aumento do diâmetro do rotor até atingindo um ponto máximo, após o qual a produção começa a declinar.

Esse comportamento indica que existe um diâmetro ótimo para os rotores, onde a extração de energia a partir das correntes marítimas é maximizada, diante desse contexto, o declínio da produção após esse ponto pode estar associado a efeitos como aumento do arrasto hidrodinâmico, redução da eficiência na conversão da energia mecânica e dificuldades operacionais causadas pelo aumento do tamanho dos equipamentos.

Dessa forma, essa análise mostra que simplesmente aumentar o tamanho das turbinas não garante maior eficiência do sistema. Por isso, a escolha do diâmetro deve ser baseada em uma análise de custo-benefício, considerando as características do local e os limites técnicos das turbinas utilizadas.

**Figura 15.** Produção de energia anual em função do diâmetro do rotor.



Fonte: Elaborado pelo Autor

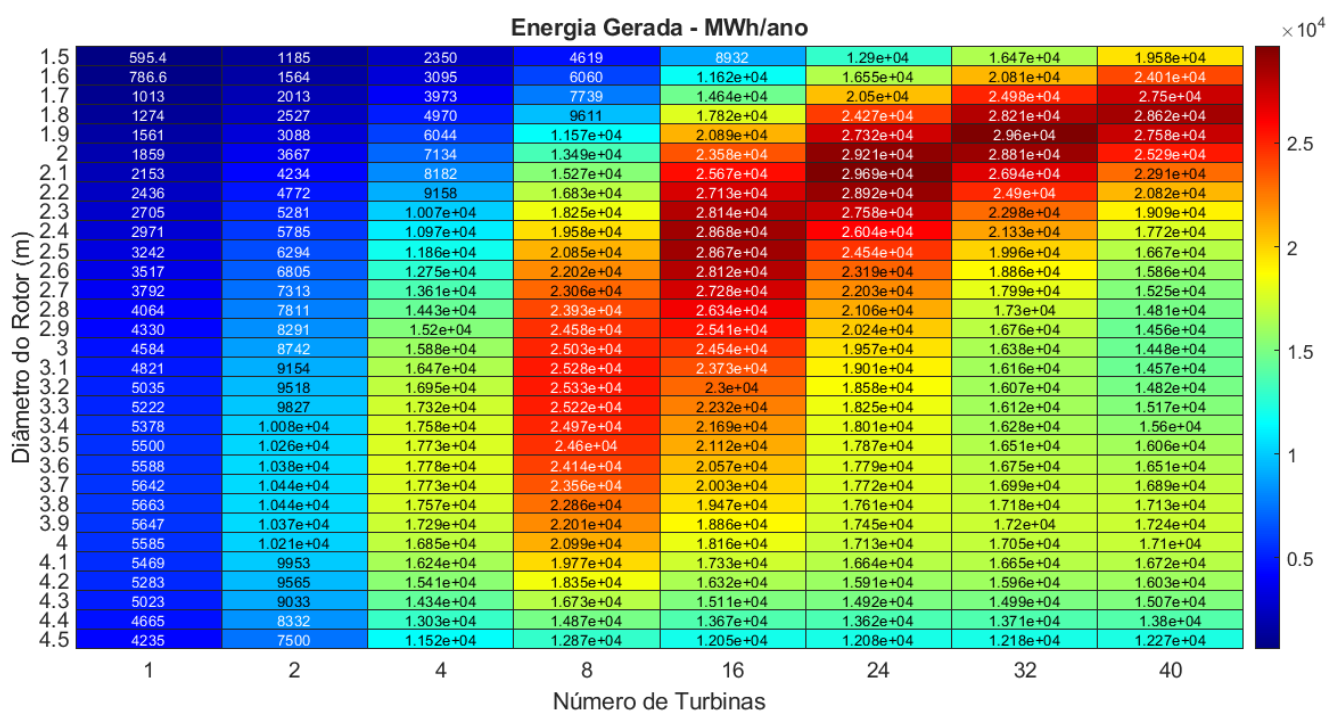
### 4.3. Análise de Sensibilidade do Diâmetro do Rotor e Números de Turbinas Relacionadas à Geração de Energia

A Figura 16 apresenta a geração de energia anual (MWh/ano) em função do diâmetro do rotor das turbinas e do número total de turbinas instaladas. Observa-se que, à medida que o diâmetro do rotor aumenta, há um crescimento significativo na energia gerada. Além disso, a quantidade de turbinas também influencia diretamente na capacidade de geração.

As regiões da matriz com cores mais quentes (vermelho) indicam configurações que resultam em uma maior geração de energia, atingindo valores superiores a  $2,9 \times 10^4$  MWh/ano. Por outro lado, áreas em azul indicam baixa produção, associadas a configurações com poucos aerogeradores ou rotores menores.

Dessa forma, é evidente que otimizar a combinação entre número de turbinas e diâmetro do rotor pode maximizar a produção energética, sendo um fator determinante para a viabilidade econômica da planta.

**Figura 16.** Geração de energia anual em função do diâmetro do rotor e das turbinas instaladas



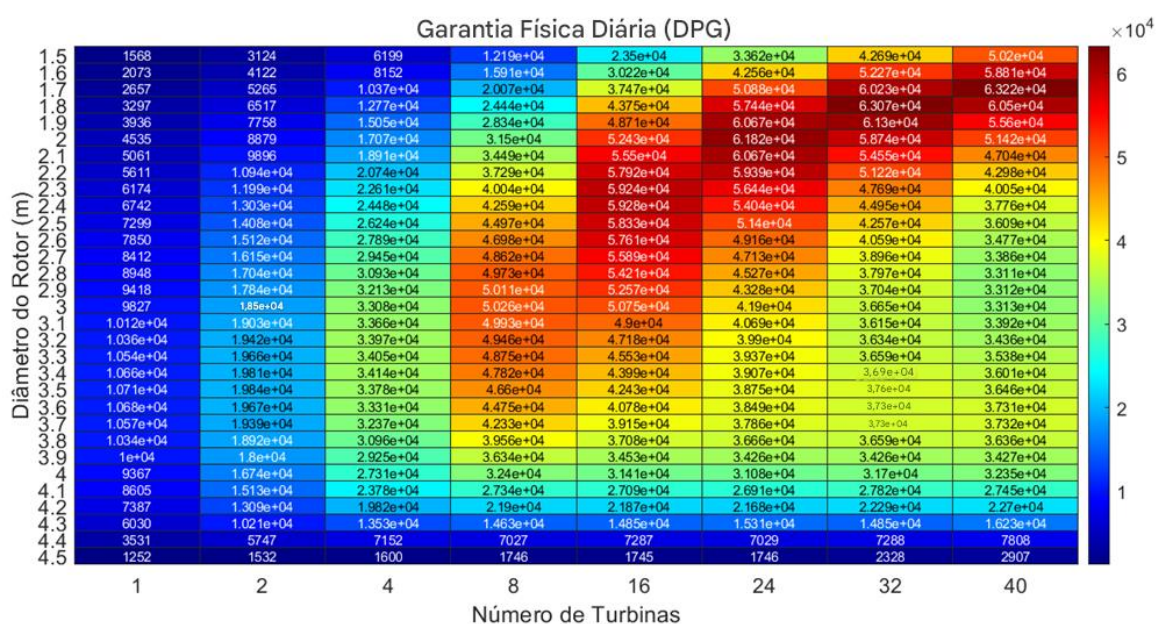
Fonte: Elaborado pelo Autor



#### 4.4. Garantia Física Diária (DPG)

A Figura 17 mostra a Garantia Física Diária (DPG), um indicador essencial para avaliar a previsibilidade da geração de energia. Como esperado, padrões semelhantes à Figura 16 são observados, onde configurações com maiores rotores e maior número de turbinas apresentam um DPG mais elevado.

**Figura 17.** Garantia Física Diária (DPG) - Estuário do Bacanga



Fonte: Elaborado pelo Autor

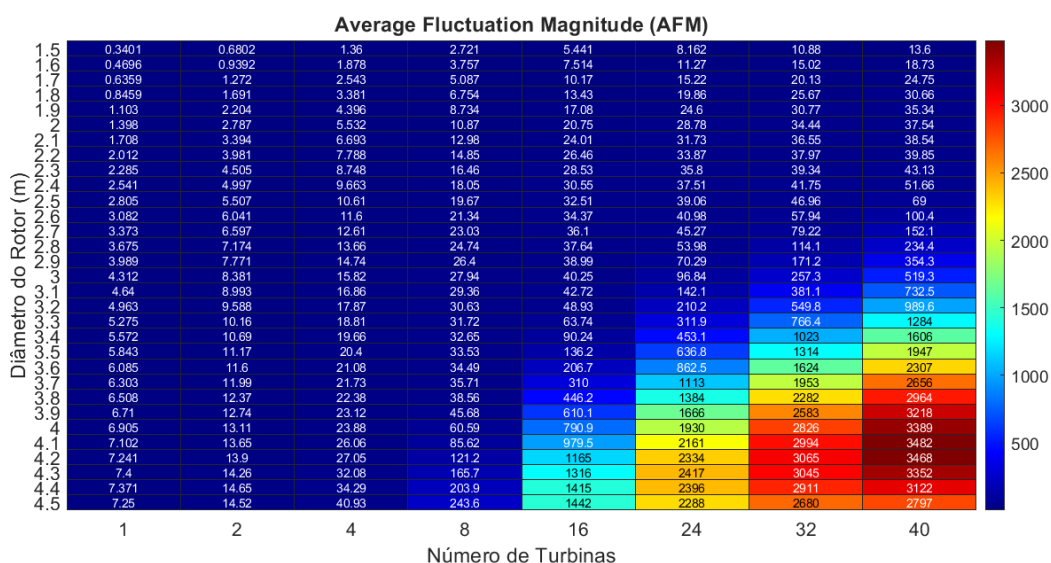
Comparando com a geração total de energia, percebe-se que, além de produzir mais energia, sistemas maiores também oferecem mais estabilidade na entrega diária, o que é crucial para integração à rede elétrica. Regiões em vermelho indicam DPG superior a  $5 \times 10^4$  MWh/dia, enquanto valores menores predominam nas áreas azuladas.

Esse comportamento sugere que projetos com menor variabilidade na produção são mais favoráveis para garantir o suprimento contínuo de energia, reduzindo a necessidade de armazenamento ou complementariedade energética de outras fontes.

#### 4.5. Variação da Geração e Qualidade do Sistema

A Figura 18 apresenta a Magnitude Média das Flutuações (AFM) na geração de energia. Diferentemente das figuras anteriores, aqui as cores quentes representam maior variabilidade na geração, o que pode indicar desafios na estabilidade do fornecimento.

**Figura 18.** Magnitude Média das Flutuações (AFM)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se que configurações com um número reduzido de turbinas apresentam variações menores (áreas azuladas), enquanto sistemas com maior quantidade de turbinas e grandes rotores apresentam oscilações mais intensas (áreas vermelhas). Esse comportamento sugere que, apesar da maior produção energética, há um custo associado a flutuações maiores, o que pode impactar a estabilidade do sistema elétrico.

Portanto, estratégias como sistemas de armazenamento de energia e controle ativo da geração podem ser necessárias para mitigar os efeitos da variabilidade na rede.

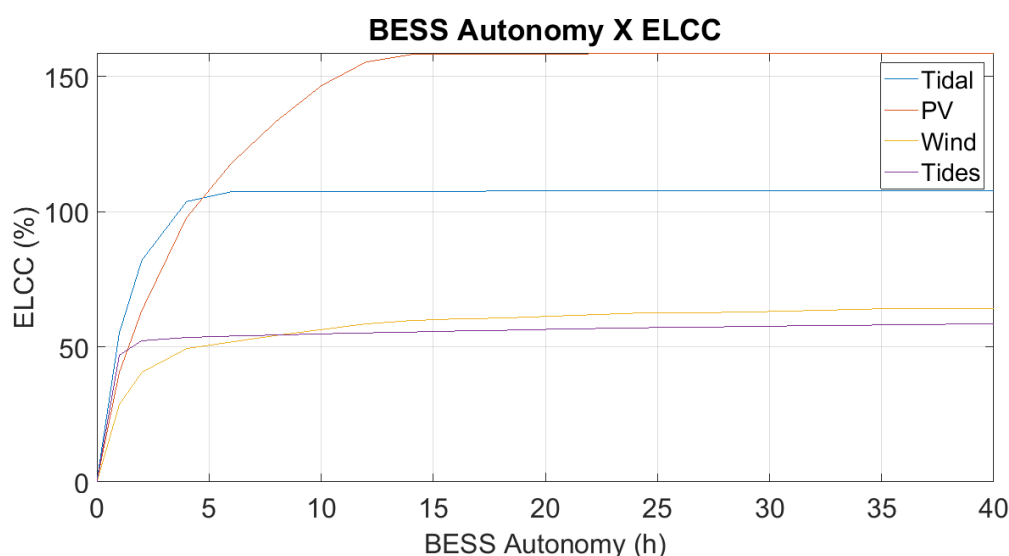
#### 4.5. Autonomia do Sistema de Armazenamento e Confiabilidade Energética

A Figura 19 ilustra a relação entre a autonomia do sistema de armazenamento de energia (BESS) e a Capacidade de Carga Efetiva (ELCC). O gráfico indica que, à medida que a autonomia do BESS aumenta, a ELCC cresce significativamente.

Entre as fontes analisadas, a energia das marés (Tidal) e a energia solar (PV) apresentam um crescimento mais acentuado da ELCC quando o armazenamento está presente. Isso sugere que o armazenamento pode tornar essas fontes mais confiáveis, reduzindo intermitências e melhorando sua participação na matriz energética.

Já a energia eólica (Wind) e corrente de marés (Tides) apresentam uma curva de crescimento mais suave, indicando que o armazenamento tem um efeito menos significativo nesses casos, possivelmente devido à maior previsibilidade da geração.

**Figura 19.** Relação entre a autonomia do Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) e Capacidade de Carga Efetiva (ELCC).



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.6. Redução da Probabilidade de Falha no Fornecimento

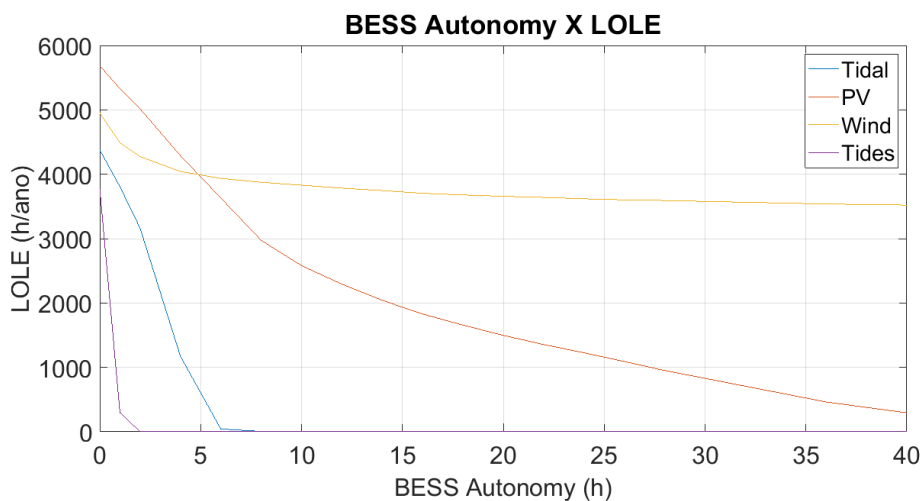
A Figura 20 mostra a relação entre a autonomia do BESS e a Perda de Carga Esperada (LOLE). Como esperado, o aumento da autonomia reduz a LOLE, demonstrando que sistemas de armazenamento são eficazes para minimizar falhas no fornecimento de energia.

A energia solar fotovoltaica (PV) e das marés (Tidal) apresentam uma redução mais abrupta da LOLE, indicando que seu armazenamento tem um impacto imediato na confiabilidade. Por outro lado, a energia eólica (Wind) e das correntes de marés (Tides) apresentam uma redução mais gradual, possivelmente devido à sua menor intermitência.

Além disso, ao analisar o LOLP (Loss of Load Probability), observa-se um comportamento semelhante: quanto maior a autonomia do BESS, menor a probabilidade de déficit de carga. Isso significa que a adição de sistemas de armazenamento não apenas reduz a duração dos eventos de falha (LOLE), mas também diminui sua frequência, garantindo maior segurança operacional ao sistema.

Esse resultado reforça a importância do dimensionamento adequado do BESS para garantir a segurança energética, especialmente em usinas de fontes renováveis intermitentes. Uma autonomia maior do BESS pode ser essencial para atender à demanda em períodos críticos, reduzindo tanto a duração quanto a probabilidade de falhas no suprimento.

**Figura 20.** Relação entre a autonomia do BESS e a Perda de Carga Esperada (LOLE)



Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia maremotriz apresenta-se como uma alternativa promissora no contexto das fontes renováveis, destacando-se por sua previsibilidade e menor intermitência em comparação com a energia solar e eólica. No entanto, sua aplicação enfrenta desafios técnicos e econômicos que precisam ser superados para viabilizar sua inserção em larga escala na matriz energética.

Neste estudo, analisou-se a viabilidade da integração de sistemas de armazenamento de energia (SAE) em plantas maremotrizes, utilizando como referência um modelo fictício baseado no estuário do Bacanga. Os resultados das simulações indicaram que a combinação de geração maremotriz com armazenamento pode mitigar oscilações na produção, aumentar a confiabilidade do fornecimento e reduzir a necessidade de complementação por fontes convencionais. Além disso, observou-se que o dimensionamento adequado do número de turbinas e do diâmetro dos rotores impacta diretamente a eficiência da usina, influenciando sua capacidade de suprir a demanda de maneira mais estável.

A análise conduzida neste estudo também identificou que a configuração da usina exerce uma influência significativa sobre o perfil de geração, dependendo tanto do diâmetro quanto da quantidade de turbinas instaladas, o que pode resultar em diferenças substanciais nos parâmetros de Garantia Física Diária (DPG) ou na Amplitude de Flutuação Média (AFM).

No que tange às métricas de confiabilidade, foi verificado que a autonomia do Sistema de Armazenamento de Energia por Bateria (BESS) varia em função das diferentes fontes de energia utilizadas, tais como Solar Fotovoltaica (PV), Eólica (Wind), Maremotriz (Tidal) e Corrente de Marés (Tides). Observou-se que, para distintos valores de autonomia, isto é, para diferentes configurações de dimensionamento do BESS, a Capacidade de Contribuição Equivalente de Energia (ELCC) pode apresentar variações significativas dependendo da fonte de energia. Por exemplo, no caso da fonte Solar Fotovoltaica (PV), a variação do ELCC se mostrou bastante sensível ao aumento da capacidade de armazenamento do BESS. Ademais, verificou-se que diferentes fontes de energia podem apresentar valores distintos de Expectativa de Perda de Carga (LOLE), mesmo quando consideradas para a mesma autonomia do sistema de armazenamento.

Dessa forma, a integração de um sistema de armazenamento mostrou-se eficaz para elevar a Garantia Física Diária (DPG) e a Capacidade de Carga Efetiva (ELCC), tornando a geração maremotriz mais competitiva e atrativa para investimentos. No entanto, aspectos como o custo de implementação e a análise do impacto ambiental da instalação de baterias devem ser considerados para uma avaliação mais completa da viabilidade econômica do projeto.

Portanto, conclui-se que o uso de SAE em plantas maremotrizes pode representar uma solução viável para aumentar a confiabilidade e a flexibilidade dessa fonte renovável. Futuras pesquisas podem aprofundar essa análise, explorando a implementação prática de modelos híbridos que combinem armazenamento com outras fontes renováveis e estratégias de otimização operacional.

## REFERÊNCIAS

- ADEYEMO, A. A.; MARRA, F; TEDESCHI, E. **Sizing of energy storage for spinning reserve and efficiency increase in isolated power systems within a data-driven stochastic unit commitment framework.** *Journal of Energy Storage*, v. 111, 2025.
- AL ALAHMADI, A. A et al. **Hybrid wind/PV/battery energy management-based intelligent non-integer control for smart DC-microgrid of smart university.** *IEEE Access*, v. 9, p. 98948-98961, 2021.
- BABATUNDE, O., MUNDA, J., & HAMAM, Y. **Power system flexibility: A review.** Okinawa: Energy Reports. 2019.
- BAKER, C. **Tidal power.** *Energy Policy*, v. 19, n. 8, p. 792-797, 1991.
- BANSHWAR, A; SHARMA, N. K; SOOD, Y. R; SHRIVASTAVA, R. **Market-based participation of energy storage scheme to support renewable energy sources for the procurement of energy and spinning reserve.** *Renewable Energy*, v. 135, 2019.
- BHATIA, S. C. **Energy resources and their utilisation.** Advanced Renewable Energy Systems. New Delhi: Woodhead Publishing India, 2014. p. 1-31.
- CABEZA, L. F. **Introduction to the section on thermodynamics of energy storage.** *Encyclopedia of energy storage*. 1. ed: Elsevier, 2022.
- CASTRO, R. M. G; FERREIRA, L. A. F.M. **A comparison between chronological and probabilistic methods to estimate wind power capacity credit.** *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 4, p. 904-909, 2001.

CHM - CENTRO HIDROGRÁFICO DA MARINHA. **Tábuas de Marés**, 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 12 nov. 2024.

DING, M; XU, Z. **Empirical model for capacity credit evaluation of utility-scale PV plant**. IEEE Transactions on Sustainable Energy. v. 8, n. 1, p. 94-103, 2016.

DONG, Z; KENNEDY, S. J; WU, Y. **Electrospinning materials for energy-related applications and devices**. *Journal of Power Sources*, [S. l.], v. 196, n. 11, p. 4886-4904, 2011.

FAN, J; NIU, L; LI, C; ZHANG, G; LI, H; WANG, Y; LI, J; SONG, Q; SUN, J; PAN, J; LAI, F. **Review of Black Start on New Power System Based on Energy Storage Technology**. *Energy Engineering*, v. 120, n. 12, 2023.

GIANNINI, G. **Modelling and Feasibility Study on Using Tidal Power with an Energy Storage Utility for Residential Needs**. Invent1-22. 2019.

GRABBE, M., LALANDER, E., LUNDIN, S., & LEIJON, M. (2009). **A review of the tidal currentenergy resource in Norway**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

HAMMONS, T. J. **Tidal power**. Proceedings of the IEEE. v. 81, n. 3, p. 419-433, 1993.

Impram, S., Nese, S. V., & Oral, B. (2020). **Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey**. *Energy Strategy Reviews*, 31.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em 10/02/2025.



IPCC. (2012). ***Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation***. New York: Cambridge University Press.

IRENA. (2023). ***Renewable Power Generation Costs in 2022***. IRENA.

KHAN, K. A. et al. **Wave and tidal power generation**. *Int J Adv Res Innov Ideas Educ*, v. 4, n. 6, p. 71-82, 2018.

KHAN, N. D. et al. **Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 72, p. 590-604, 2017.

KHOJASTEH, D. et al. Sea level rise impacts on estuarine dynamics: A review. **Science of The Total Environment**. v. 780, p. 146470, 2021.

KOIRALA, B; HAKVOORT, R. **Integrated community-based energy systems: aligning technology, incentives, and regulations**. In: SIOSHANSI, Fereidoon P. (Org.). **Innovation and disruption at the grid's edge**. 1. ed.: Academic Press, 2017. p. 363-387.

LEMONIS, G. **Wave and tidal energy conversion**. In: CLEVELAND, Cutler J. (Ed.). *Encyclopedia of Energy*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 385-396.

LEWIS, M. et al. **Power variability of tidal-stream energy and implications for electricity supply**. *Energy*. v. 183, p. 1061-1074, 2019.

LI, J; ZHAO, J; CHEN, Y; MAO, L; QU, K; LI, F. **Optimal sizing for a wind-photovoltaic-hydrogen hybrid system considering levelized cost of storage and source-load interaction**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 11, p. 4129-4142, 2023.

MANDIĆ, M; SUTLOVIĆ, E; MODRIĆ, T. **A general model of optimal energy storage operation in the market conditions.** *Electric Power Systems Research*, v. 209, 2022.

MAZUMDER, Rajat; ARIMA, Makoto. Tidal rhythmites and their implications. **Earth-Science Reviews**, v. 69, n. 1-2, p. 79-95, 2005.

Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030: geração de energia elétrica a partir de outras fontes.** Brasília: MME, 2007.

Ministério do Meio Ambiente. **Biodiversidade Aquática: Zona Costeira e Marinha.** Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha.html>. 2020. Acesso em: 10 dez. 2024.

NARAINDATH, N. R.; BANSAL, R. C.; NAIDOO, R. M. **Conceptual framework of microgrid and virtual power plants with renewable energy resources.** In: BANSAL, Ramesh C.; JUSTO, Jackson J.; MWASILU, Francis A. (Org.). *Modeling and Control Dynamics in Microgrid Systems with Renewable Energy Resources*. 1. ed: Academic Press, 2024. p. 19-44.

NEILL, S. P. et al. **Tidal range energy resource and optimization—Past perspectives and future challenges.** *Renewable energy*, v. 127, p. 763-778, 2018.

Neto, P. B., Amaral, O. L., & Saavedra, O. R. **Avaliação revisitada do estuário do Bacanga.** SBSE 2014.

Neto, P. B., Oliveira, D., J., C. N., & Saavedra, O. R. **Estudo do Potencial para Geração de Energia Elétrica a partir de Fonte Maremotriz.** Ubatuba: CLAGTEE 2009.

Neto, P. B., Saavedra, O. R., CAMELO, N. J., & Ribeiro, L. A. **Viabilidade de Pequenos Aproveitamentos para Geração de Energia Eletromotriz**. Bonito: CBA 2012.

NETO, P. B.; SAAVEDRA, O. R. **Analysis of a tidal power plant in the estuary of Bacangain Brazil taking into account the current conditions and constraints**. *Renewable Energy*. 2017.

NZEREUGU, P. U. et al. **Anode materials for lithium-ion batteries: A review**. *Applied Surface Science Advances*, v. 9, p. 100233, 2022.

PALIZBAN, O; KAUHANIEMI, K. **Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications**. *Journal of Energy Storage*, v. 6, p. 248-259, 2016. Acesso em: 18/02/2025.

PRANDLE, D. **Simple theory for designing tidal power schemes**. *Advances in water resources*, v. 7, n. 1, p. 21-27, 1984.

RIZWAN, et al. **Hybrid Harris Hawks optimizer for integration of renewable energy sources considering stochastic behavior of energy sources**. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. v. 31, n. 2, p. e12694, 2021.

SAAD, M; SINGH, C. **Investigating capacity credit sensitivity to reliability metrics and computational methodologies**. *Applied Energy*, v. 325, 2022.

SOLIMAN, M. S; BELKHIER, Y; ULLAH, N; ACHOUR, A; ALHARBI, Y.M.; AL ALAHMADI, A. A; ABEIDA, H; KHRAISAT, Y. S. H. **Supervisory energy management of a hybrid battery/PV/tidal/wind sources integrated in DC-microgrid energy storage system**. *Energy Reports*, v. 7, 2021.

SONDOTÉCNICA ENGENHARIA DE SOLOS. **Aproveitamentos Maremotrizes na Costa do Maranhão, Pará e Amapá - Inventário Preliminar**. Eletrobrás S/A, 1981.

TAKENOUCHI, K., OKUMA, K., FURUKAWA, A., & SETOGUCHI, T. **On applicability of reciprocating flow turbines developed for wave power to tidal power conversion**. *Renewable Energy*. *Renewable Energy*, pp. 209-223. 2006.

TALKE, Stefan A.; JAY, David A. Changing tides: The role of natural and anthropogenic factors. **Annual Review of Marine Science**. v. 12, n. 1, p. 121-151, 2020.

UIHLEIN, A., & MAGAGNA, D. **Wave and tidal current energy—A review of the current state of research beyond technology**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1070-1081. 2016.

UNESCO. (2024). **Ocean Decade**. Acesso em 2024, disponível em <https://oceandecade.org/challenges>.

YIN, Jian et al. **Lead-carbon batteries toward future energy storage: from mechanism and materials to applications**. *Electrochemical Energy Reviews*. v. 5, n. 3, p. 2, 2022.

---

## ANEXOS

### ANEXO A – DADOS MEDIDOS DAS FONTES SOLAR, EÓLICA E MAREMOTRIZ NO ESTADO DO MARANHÃO

**Artigo "The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids".**

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119313217>

Autoria:

NETO, P. B. L; SAAVEDRA, O. R; OLIVEIRA, D. Q. **The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids.** *Renewable Energy*. v. 147. Part 1., p. 339-355, 2020. ISSN 0960-1481

### ANEXOS B – ESTUDO SOBRE MODELAGEM E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TÉCNICO DE MARÉS NO ESTUÁRIO DO BACANGA

Disponível em:

<https://clagtee.fi.mdp.edu.ar/full-papers-search-engine/papers/ID041.pdf>

Autoria:

ROCHA, M. M; NETO, P. B. L; SAAVEDRA, O. R. **Modeling and Assessment of the Tidal Technical Potential in the Bacanga Estuary.** In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION (CLAGTEE), 2024, Mar del Plata, Argentina. Anais [...]. Mar del Plata: CLAGTEE, 2024.