

Energia de maremotriz: Análise da viabilidade de instalação de energia de maremotriz na região do litoral maranhense

Kassio Lucas Do Nascimento Amauro ¹, Maria Claudia Costa de Oliveira Botan* ¹, Andrea Cressoni de Conti ¹, Antonio Carlos Barkett Botan ¹,

Resumo

As problemáticas associadas a utilização de combustíveis com a alta demanda por energia, trouxe a sociedade a necessidade de implementar fontes renováveis em sua matriz energética, a fim de suprir as necessidades energéticas, econômicas e ambientais, nesse cenário a energia de maremotriz, instaladas em estuários ou baías, se destaca por ser uma fonte limpa de emissão de gases do efeito estufa, inesgotável e com alta potencial de geração no Brasil. No entanto, essa fonte encontra-se num cenário de baixo aproveitamento e falta de políticas públicas de investimento governamental que impede sua incorporação na matriz. Entretanto alguns estudos estimam o potencial de geração de energia de regiões estuárias, divulgando os dados sobre potencial de geração em vários locais da região litorânea. O objetivo desse trabalho é apurar os dados das regiões das estuárias verificando seu favorabilidade para instalação de uma usina de maremotriz, analisando previamente os desafios enfrentados por essa fonte.

Palavras-chave

Energia da Marés — Matriz Energética — Estudo de Viabilidade — Transição Energética.

¹ Departamento de Engenharia, Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. Dos Barrageiros, 1881, Centro, ZIP Code: 19272-100 – Rosana/SP, Brazil

*Autor Correspondente: maria.botan@unesp.br

Submissão: 22 / Fevereiro / 2024 — Revisado: 30 / Abril / 2024 — Aceito: 12 / Março / 2025 — Publicado: 28 / Maio / 2025

1. Introduction

O exponencial crescimento populacional nos últimos anos, criou uma alta demanda de energia para manutenção de uma melhor qualidade de vida, o que aumenta significativamente a utilização de recursos naturais para a manutenção da vida dos seres humanos [1]. Especialmente no caso da energia elétrica, que independente do seu uso seja ele: Residencial, Industrial, Rural ou Estatal tem tido um potencial crescimento, na finalidade de suprir as demandas da população mundial [2].

Quando o consumo não acompanha a produção, ocasiona déficits energéticos que geram crises pelo globo, afetando os

diversos setores da sociedade de forma que fica necessário a implementação de fontes renováveis na matriz energética mundial, e que possuam alta eficiência, e custo-benefício agradável [2].

Apesar do carvão ser uns dos combustíveis mais utilizados, o petróleo consolidou o mercado global que conhecemos, seu alto poder calorífico permitiu produção em larga escala integralizando suas linhas de produção. O baixo custo petróleo com seu alto poder de geração de energia fomentou o desenvolvimento de vários setores da indústria como a automobilísticas, têxtil etc. consequentemente a alta produção gerou o aumento significativo de empregos que possibilitou o

acesso aos produtos produzidos, gerando uma poderosa rede de distribuição e comercialização [3].

Os combustíveis fósseis são compostos a base de hidrocarbonetos que em reações de combustão formam gases do efeito estufa (CO₂, CH₄) que contribuem para formação do buraco da camada de ozônio, responsável pela manutenção da temperatura global. Esse problema aumenta a recorrência de problemas ambientais como aquecimento global, chuvas ácidas e as neblinas de resíduos industriais popularmente conhecido como “Smog”. Tais fatores são resultados diretos da utilização desenfreada dos combustíveis fósseis, como fonte primária de energia aproveitável [4].

As dimensões continentais da faixa litorânea Brasileira e as diversas ramificações fluviais presente pelo país, torna promissor para geração de energia elétrica através da hidrocinética. Cerca de 20 % da eletricidade do mundo é proveniente das hidroelétricas nessa fonte, a energia é obtida por meio do represamento das águas do rio em barragens que direcionam o fluxo fluvial para as turbinas. No âmbito nacional a matriz elétrica compõe cerca de 92 % de origem hídrica [5].

Nesse cenário, a energia maremotriz se apresenta como uma alternativa promissora e sustentável para a geração de energia, oferecendo diversos benefícios à sociedade e ao meio ambiente. Com o aprimoramento da tecnologia e a superação dos desafios, essa fonte de energia renovável tem tudo para desempenhar um papel fundamental na construção de um futuro mais verde e sustentável [6].

No entanto, a energia de maremotriz é praticamente inexplorada no Brasil visto que não existe políticas públicas de promoção desta energia no Brasil, evidenciando não só a falta de investimento em recursos naturais próprios que independem de importação, mas também a má gestão do planejamento energético do Brasil.

Os principais empecilhos encontrados pela energia de maremotriz são o custo inicial da construção da barragem e sua capacidade geracional de produção. Dessa forma, se faz necessária uma análise de viabilidade da energia de maremotriz no Brasil, bem como os desafios encontrados no caminho de sua implementação no território.

2. Objetivo

2.1 Geral

O objetivo geral deste estudo é analisar a viabilidade da implementação da energia de maremotriz em determinadas regiões litorâneas, compreendendo seu processo de funcionamento e os desafios encontrados na inserção dessa matriz energética no Brasil.

2.2 Específico

1. Analisar o panorama geral da energia de maremotriz no Brasil;

2. Compreender os desafios enfrentados pela energia de maremotriz no Brasil.
3. Verificar os dados de potencial de produção de energia no litoral do Maranhão;
4. Com base nos dados obtidos discutir as perspectivas futuras dessa fonte no Brasil.

3. Revisão de Literatura

3.1 Método de funcionamento

As formas mais convencionais de energia de maremotriz se baseiam na exploração da energia das marés por meio das turbinas instaladas em barragens. Desta forma, o desnível criado entre os lados da barragem é eficientemente grande, isso gera a rotação da turbina que vai converter a energia cinética em elétrica, esse modo operandi utiliza o mesmo princípio das hidrelétricas [7].

O aproveitamento do potencial energético da energia de maremotriz se desenvolve a partir de duas formas essenciais, a primeira delas é definida como maré vazante na qual o reservatório, ao se completar no período de maré cheia, tem suas comportas fechadas e inicia-se seu funcionamento quando a queda d'água é metade da amplitude da maré, isto torna o funcionamento da turbina possível para geração de eletricidade. O processo permanece até que a altura mínima do fluxo de água permitir a geração de energia, após isso as comportas são fechadas até a altura da queda d'água se torne favorável para repetição do processo [7].

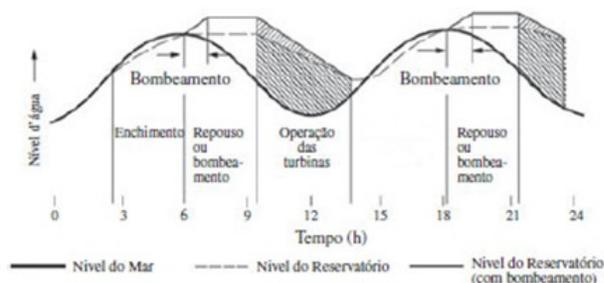


Figura 1. Representação da geração em maré vazante em uma usina maremotriz. Fonte: Leite Neto et al., 2011 [7].

Ainda é possível a geração em efeito reverso ao anterior chamado de maré enchente nesse caso o processo ocorre no sentido mar-reservatório, além disso é possível a fusão dos dois processos de aproveitamento, que é chamado geração em efeito duplo [7].

3.2 Aspectos Econômicos

A viabilidade econômica de um projeto de usina de maremotriz deve considerar em sua análise todas as singularidades

concatenadas a construção da usina, indo desde os impactos diretos, como por exemplo, a manutenção da usina, o capital investido na construção, e sua rentabilidade aos longos anos, até os impactos indiretos que estão intimamente relacionados com os aspectos ambientais [8].

Ao contrário de outras fontes de energia, a geração maremotriz não enfrenta problemas como emissões de gases poluentes, poluição da água, derramamentos de óleo e produção de resíduos. Embora esses aspectos sejam principalmente ambientais, eles também têm implicações econômicas que devem ser consideradas em qualquer projeto de geração de energia. Além disso, a vida útil de uma usina maremotriz pode ser de duas a três vezes maior do que a de uma usina térmica ou nuclear [9].

A energia de maremotriz ainda possui a vantagem da abundância, pois o efeito das marés é contínuo e previsível, além disso as despesas de operação da usina são mínimas, ou seja, o custo inicial da construção entra em equilíbrio com o custo de operação. Em outras palavras é dizer que o dinheiro retorna em forma de investimento, ademais a barragem pode ser implementada como acesso rodoviário, ou como espaço turístico [7].

A viabilidade econômica de uma planta maremotriz depende significativamente das demais fontes de energética disponíveis na região. A energia maremotriz se mostra bastante competitiva em relação às usinas a carvão, no entanto sua competitividade reduz quando comparada às tradicionais hidrelétricas. Assim, o custo de geração maremotriz e sua viabilidade variam de um país para o outro, conforme as condições energéticas, sociais e ambientais locais. No Japão, por exemplo, a eletricidade é produzida a baixos custos a partir de fontes nucleares e térmicas a gás e óleo. Nessa situação, uma usina maremotriz produziria eletricidade a um custo de 3 a 4 vezes maior, o que a tornaria economicamente inviável [9].

3.3 Aspectos Ambientais

Apesar do uso da energia das marés não causar nenhuma poluição direta ao meio-ambiente, é necessário salientar que os impactos desse tipo de construção nos estuários devem ser minuciosamente analisados e ponderados, pois sua instalação pode ocasionar alterações biofísicas no local. As implicações diretas da estruturação da usina alteram o ecossistema local, isso torna importante o correto planejamento de projeto para verificação deles [7].

Uns dos principais fatores que devem ser ponderados para instalação de um projeto maremotriz diz respeito sobre os impactos na biodiversidade do estuário, tais perturbações ambientais são singulares para cada região, porém existe um série de fatores padrão que servem, de um modo geral, para todos os futuros projetos de barragem de maremotriz e são eles: Alteração na disposição das espécies no estuário, Modificação dos ciclos de vida (taxa natalidade), Alteração na formação

do grupos de espécies (extinção de uma espécie ou migração forçada) [8].

Nesse contexto de análise de impactos ambientais, alguns efeitos tomam destaque como alterações nas propriedades químicas das águas como salinização e oxigenação, além de alterar a própria geografia do estuário, ocasionadas principalmente através dos processos de erosão e sedimentação do solo [7].

Embora esses aspectos devam ser cuidadosamente avaliados, é importante destacar que a intensidade dos impactos pode variar de um local para outro. Usando a usina maremotriz de La Rance como exemplo, os impactos mais significativos ocorreram durante a construção, quando o fluxo natural do estuário foi interrompido por ensecadeiras para permitir a construção a seco da barragem. Após essa fase, os impactos foram substancialmente reduzidos. Quanto ao ecossistema do estuário de La Rance, foram observadas algumas modificações ao longo dos anos até que um novo equilíbrio ecológico fosse alcançado [10].

3.4 Fenômeno Associados às Marés

As marés são regidas pela força gravitacional que a lua exerce sobre o sol, por isso fator é necessário compreender esse fenômeno para uma melhor compreensão da energia de maremotriz. As marés são variações periódicas na altura da superfície do oceano em um dado local, causando oscilações no nível do mar tanto acima quanto abaixo da média. Essas alterações são causadas pela atração gravitacional da Lua e, em menor grau, do Sol sobre a Terra. Apesar de a Lua ter uma massa consideravelmente menor que a do Sol, sua proximidade à Terra faz com que ela tenha uma influência maior nas marés [11].

Desse modo, a força gravitacional da lua atrai os oceanos em sua direção se opõe a força centrífuga originária da rotação da terra, criando uma força oposta gerando os fenômenos denominados bulbos das marés. Conforme a teoria do equilíbrio, os bulbos tendem a se alinhar com a lua, conforme a rotação da terra em torno do seu próprio eixo. As marés altas se localizam nas regiões dos bulbos e as marés baixas se encontram no intermédio das regiões dos bulbos e são denominadas cavas [11]. A Figura 2 ilustra tal fenômeno

É importante lembrar que um dia lunar dura 24 horas e 50 minutos. Portanto, a Lua passa pelo mesmo ponto de referência na Terra 50 minutos mais tarde a cada dia, resultando em marés altas que ocorrem 50 minutos mais tarde diariamente. Além disso, tanto a Lua quanto o Sol não permanecem fixos sobre a linha do Equador, movendo-se 28,5° acima e abaixo do Equador ao longo do mês. Isso faz com que tanto as marés lunares quanto as solares apresentem algumas variações, conforme ilustrado pela Figura 3 marés [11].

O movimento do boneco na Terra corresponde a um dia solar, com duração de 24 horas. Ao completar esse ciclo, ele

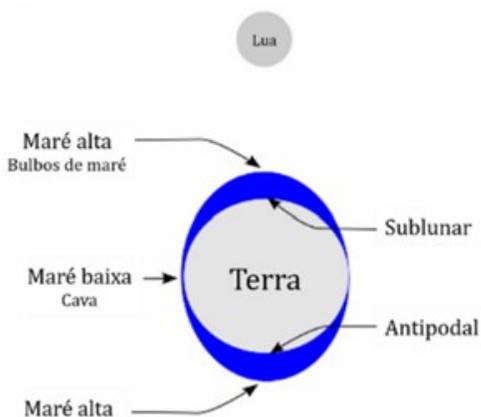


Figura 2. Demonstração dos fenômenos bulbo das marés. Fonte: Duarte et al, 2018 [11].

já não está mais sob a influência direta da Lua. Todos os dias, a Lua se desloca cerca de 50 minutos para leste. Por isso, um dia lunar totaliza 24 horas e 50 minutos, resultando em marés lunares que chegam 50 minutos mais tarde a cada dia [11].

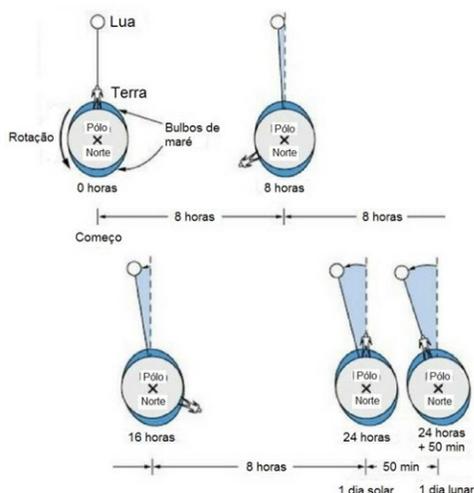


Figura 3. Esquematização da rotação da terra e a posição referente a lua em dia lunar. Fonte: Duarte et al, 2018 [11].

3.5 Componentes de uma usina de maremotriz

Os elementos principais de uma usina maremotriz são divididos em: barragem, turbogeradores, além de um ou mais reservatórios. Na Figura 4 são esquematizados os principais componentes de uma usina maremotriz [7].

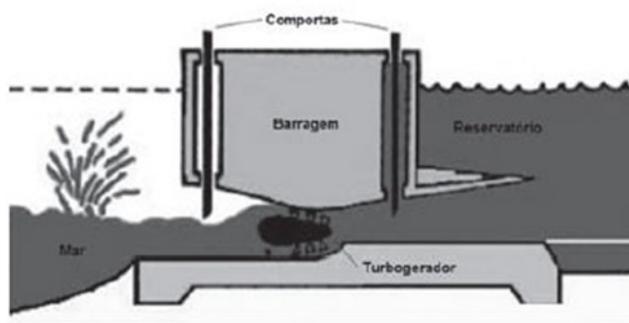


Figura 4. Componentes de uma usina de maremotriz. Fonte: Massoud et al., 2001 [12].

3.5.1 Barragem

A construção da barragem é um dos fatores mais relevantes em uma usina maremotriz, principalmente por estar significativamente relacionada aos custos totais de implantação. O projeto da barragem em uma usina maremotriz deve considerar várias condições específicas para esse tipo de aproveitamento [8]:

- A projeção da barragem deve ser baseada em resistir aos efeitos do atrito das ondas que se chocam em seu sentido, o efeito do choque de ondas tende a ser bem intensos devido a constante oscilação da pressão entre os dois lados.
- A localização e o formato da barragem podem alterar os fenômenos de ressonância e reflexão que ocorrem dentro de um estuário, o que pode elevar ou atenuar a amplitude da maré e, conseqüentemente, a energia produzida pela usina. Portanto, este fator deve ser analisado cuidadosamente.

3.5.2 Comportas

A função principal das comportas de uma barragem de usina de maremotriz é controlar o fluxo de água que atravessa o reservatório, na qual a frequência na qual elas são abertas varia de acordo com o modus operandi e com o tipo de maré da usina. A demanda de funcionamento que as comportas são utilizadas são maiores em comparação com as hidroelétricas convencionais. Portanto, é fundamental que essas usinas funcionam com altíssimo grau de confiabilidade e desempenho com a finalidade de diminuir a recorrências de problemas no processo de operação e de manutenções frequente. Outro fato relevante que deve ser considerado é o local geográfico das operações das comportas, o frequente choque das ondas e a corrosão pela salinidade da água, ocasionalmente acarretará futuros problemas operacionais as comportas, e devem ser ponderados na instalação [7].

3.5.3 Reservatórios

A principal função do reservatório em uma usina maremotriz é armazenar água para criar a queda d'água necessária à geração de eletricidade por meio dos turbogeradores. Esses reservatórios podem ser reentrâncias costeiras, enseadas, corpos de água entre ilhas e continentes, ou estuários [13].

O projeto de uma usina maremotriz pode incluir um ou mais reservatórios. A utilização de um único reservatório é a alternativa mais comum e econômica, embora ofereça menor flexibilidade. Um dos principais projetos maremotrizes que propõem o uso de múltiplos reservatórios (ou múltiplos lagos) é o estuário de Severn, no Reino Unido [14]. Na Figura 5 é apresentada uma destas propostas.

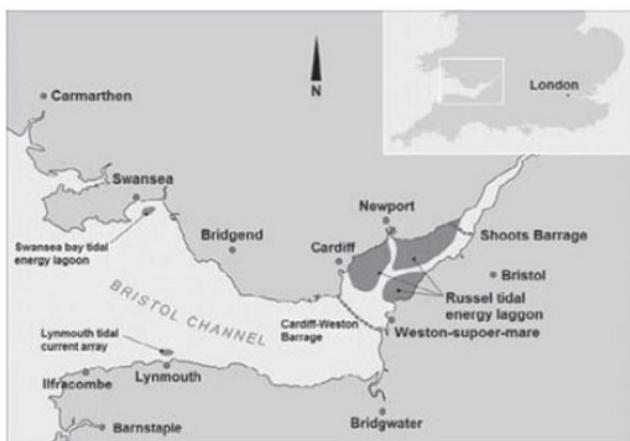


Figura 5. Representação de uma das propostas de utilização de múltiplos lagos no estuário de Severn, Reino Unido. Fonte: sustainable Development Commision, 2007 [14].

3.5.4 Equipamentos eletromecânicos

Os equipamentos destinados à transformação da energia cinética em elétrica correspondem a uma parcela significativa dos custos totais da usina, podendo corresponder entre um intervalo de 45 a 55% destes custos. Nas usinas de maremotriz os equipamentos eletromecânicos levam em consideração os seguintes fatores [8]:

- Devido à baixa queda, é necessário um grande volume de água passando pelas turbinas, o que resulta em passagens de água de grandes dimensões físicas.
- A operação cíclica (início e parada da geração conforme as marés) impõe maiores fadigas nos equipamentos geradores do que na geração convencional em hidrelétricas.
- As dimensões físicas de cada unidade geradora devem ser minimizadas, pois afetam diretamente os custos das obras civis.

- Os materiais estão expostos à corrosão pela água do mar e, portanto, devem ser cuidadosamente selecionados e protegidos.
- A eficiência global da geração pode ter prioridade menor devido à abundância de água utilizada no processo.

3.5.5 Tipos de turbinas

As categorias de turbinas frequentemente utilizadas nas usinas de barragens de maremotriz são turbinas do tipo: Kaplan e Bulbo. As quais são turbinas de reação, do tipo hélice aplicadas em fluxo axial. Geralmente turbinas axiais são utilizadas em ocasiões de quedas baixas e altas vazões [15].

A turbina Kaplan é uma turbina de reação axial, onde o escoamento de água se direciona radialmente no distribuidor e quase axial na entrada do rotor [16]. É um tipo de turbina helicoidal que permite a variação do ângulo de suas pás de acordo com a vazão, sem uma variação significativa no rendimento. Esse mecanismo está alojado dentro de sua ogiva e é controlado pelo regulador automático de velocidade. A Figura 6 ilustra uma turbina tipo Kaplan de eixo vertical com seus componentes mecânicos, sendo cada um deles: 1- eixo da turbina; 2- mancal de escora; 3- revestimento do poço; 4- mancal de guia; 5- mecanismo de acionamento das palhetas diretrizes; 6- tampa da turbina; 7- rotor Kaplan; 8- palheta diretriz; 9- pré-distribuidor; 10- anel inferior; 11- aro da câmara do rotor; 12- tubo de sucção; caixa semi-espiral; 14- servomotor e 15- anel de regulação [15].

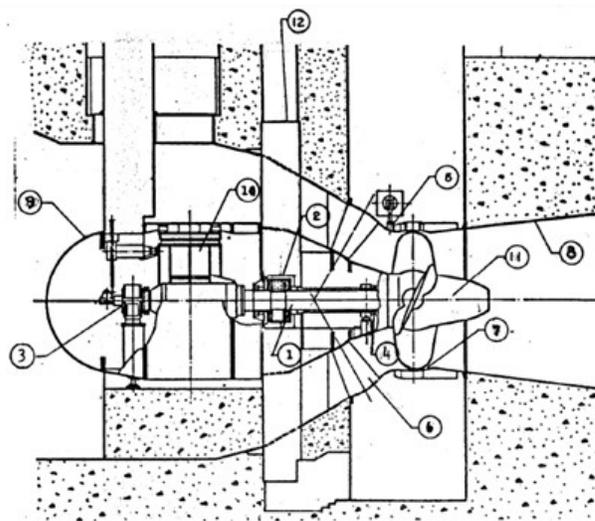


Figura 6. Turbinas do tipo Kaplan. Fonte: (NBR6445, 1987) [16].

O acionamento das pás é sincronizado com as palhetas do distribuidor, de modo que para uma determinada abertura do distribuidor, corresponde um valor específico de inclinação

das pás do rotor. Devido à sua complexidade, a turbina Kaplan é uma das mais caras do mercado. Exemplos de usinas que utilizam turbinas Kaplan incluem a UHE Porto Estrela (120 MW) e a UHE Risoleta Neves (140 MW). As usinas do Complexo Hidrelétrico de Tapajós (10.682 MW) também empregarão este tipo de turbina. A grande vantagem da regulação das pás motrizes, além de ajustar a vazão, é permitir que as turbinas Kaplan mantenham uma curva de rendimento "plana", garantindo bom desempenho em uma ampla faixa de operação. O gráfico da Figura 7 ilustra que, em comparação com outras turbinas, a Kaplan oferece o maior rendimento em uma faixa de operação mais extensa [17].

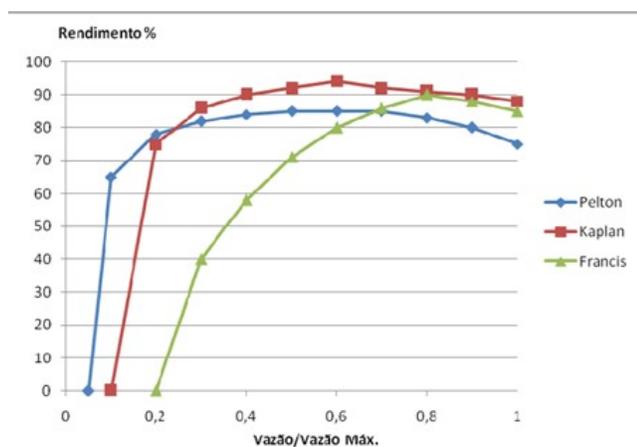


Figura 7. Rendimentos de alguns tipos de turbinas com variações de vazões. Fonte: Botan, 2014 [15].

A Figura 7 mostra a eficiência que as turbinas do tipo Kaplan desempenham em relação a outros tipos de turbinas em vazões baixas, vemos que as mediadas que as vazões aumentam ambas as três perdem parcialmente a eficiência embora as do tipo Kaplan ainda se sobressaem em relação as demais.

A turbina do tipo Bulbo é uma turbina de reação em que o fluxo de água entra axialmente no distribuidor e no rotor, com o gerador contido em um bulbo diretamente imerso no fluxo (NBR 6445, 1987). O rotor é similar ao da turbina Kaplan, enquanto o gerador é resguardado no interior de um bulbo de aço para proteção contra a ação da água [8].

Uma ilustração da turbina bulbo é apresentada na Figura 8, onde se pode observar a presença de um bulbo, que é uma câmara blindada onde fica o gerador, dando origem ao nome da turbina. Nas máquinas mais recentes, esse bulbo é instalado a montante do rotor, situado no eixo da corrente líquida. Tanto o distribuidor quanto o rotor possuem pás orientáveis, e o controle de vazão é efetuado pelas pás do estator [18].

A turbina bulbo é uma máquina de reação (ou de escoamento total), na qual a energia de pressão diminui desde a entrada do distribuidor até a saída do rotor, aumentando no

tubo de sucção [19]. A água sai do rotor com uma significativa reserva de energia cinética, que é em grande parte recuperada pelo tubo de sucção, tornando este componente indispensável para esse tipo de máquina [coelho].

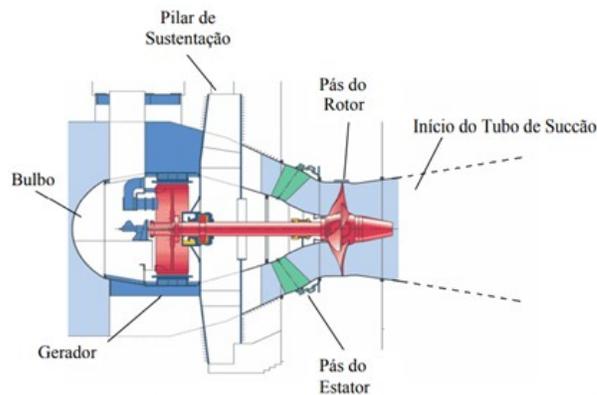


Figura 8. Principais partes das turbinas bulbo. Fonte: Coelho, 2006 [18].

4. Metodologia

4.1 Área de Estudo

A área de estudo analisado se localiza no litoral brasileiro mais especificamente nas regiões estuárias e baías no Nordeste onde estima-se um alto potencial de geração de eletricidade devido não somente pela quantidade considerável de regiões propícias para geração dessa fonte, mas também pelo potencial estimado de geração de energia que o litoral brasileiro possui.

4.2 Metodologia de Revisão Bibliográfica

A metodologia utilizada nesse trabalho se baseia na revisão exaustiva de dados obtidos a partir da literatura, vale ressaltar que há uma quantidade significativamente pequena de artigos e dados referentes ao tema, o que dificulta uma análise mais atual. Este tipo de geração ainda é pouco explorado no Brasil e os estudos mais relevantes encontram-se voltados para a região Nordeste Brasileiro.

5. Resultados

Após a introdução dos conceitos chaves para compreensão de funcionamento de uma usina de maremotriz indo desde sua forma de tratamentos, componentes eletromecânicos necessário, condições geográficas especiais. É possível analisar o panorama jurídico e ambiental que tal fonte se encontra no Brasil bem como algumas medidas alternativas que possam contribuir para sua implementação em território nacional. Usinas maremotrizes possuem custos iniciais altos e longos períodos de construção, mas baixos custos de operação e

manutenção devido à independência de combustíveis fósseis. Sua vida útil é de duas a três vezes mais longa que a de usinas nucleares ou termoelétricas. A viabilidade econômica varia conforme as alternativas energéticas locais, sendo competitiva em relação a termoelétricas, porém menos que hidrelétricas [20].

O mercado de energias oceânicas possui um considerável potencial de crescimento a longo prazo, porém enfrenta desafios significativos relacionados aos elevados custos de investimento e à dificuldade em obter financiamentos. A falta de políticas públicas específicas também restringe o progresso desse setor. Enquanto alguns países estão começando a desenvolver incentivos, o Brasil ainda não implementou políticas públicas direcionadas às energias oceânicas [21].

A falta de iniciativas direcionadas a essa fonte de energia, gera por suas outras ramificações de problemas que serão abordados aqui como a ausência de dados recentes sobre potencial geracional de energia oceânicas. Sabe-se que o Brasil possui uma faixa litorânea incrivelmente alta, e com marés considerável, porém a falta de incentivo pesquisa- muitas vezes governamental- oculta esse poderoso e considerável “Mar de ouro” em termos energéticos.

A coleta de dados sobre potencial de energia de maremotriz se apresenta de maneira vagarosa na qual onde se tem apenas dados antigos, ou armadores no que diz respeito a grandes órgãos de pesquisa energética como ANAEE e entre outras agências e órgãos de pesquisas energética.

No começo dos anos 80, a Eletrobras conduziu um estudo sobre potencial de geração de energia no litoral brasileiro, onde incluía o projeto piloto da barragem do Bacanga [22]. Neste estudo, foram identificadas 41 baías, incluindo a do Bacanga, com uma área total de 5.000 km² e um potencial de 27 GW. Este valor pode ser considerado o potencial técnico de 1980, pois a única tecnologia disponível na época eram as barragens em estuários [21]. As amplitudes de maré observadas ao longo da costa do Brasil são menores em comparação com certas regiões da Europa.

No estuário de Severn, no Reino Unido, por exemplo, a variação de altura da maré pode atingir até 14 metros, a segunda maior variação do mundo [23]. No entanto, variações de altura de maré superiores a 6 metros são observadas com maior frequência no Maranhão. No Amapá, há ainda dois picos notáveis: um de 8 metros na estação de Santa Maria do Cocal, na foz do Igarapé do Cocal, e outro de 11 metros na estação de Igarapé do Inferno, na Ilha de Maracá [24].

No entanto o projeto da barragem do Bacanga não se perdurou por muito tempo, por razões econômicas e técnicas, a infração da regulação estabelecida na usina levou a um enchimento descontrolado do reservatório por conta da ocupação urbana em áreas antes submersas, e da manutenção do nível de cota de água abaixo do permitido. Isso nos mostra as complexidades que as usinas de maremotriz operam e como é

fundamental seguir as diretrizes dos projetos e dos parâmetros que serão usados no local em questão.

Ainda vale ressaltar que as raízes da falta planos de energia voltados para essa fonte, a falta de investimento em projetos bem como a falha na fiscalização do estuário do Bacanga, estão intimamente ligados com a centralização das decisões do setor energético brasileiro, e como esse processo se tornou o que hoje conhecemos.

A estrutura de decisões do setor elétrico brasileiro sempre foi bastante centralizada, especialmente após a criação da Eletrobras em 1964, que coordenou o planejamento e a operação do setor, atuou como agente financeiro e se tornou holding das principais geradoras federais. Durante a década de 1990, essas geradoras foram responsáveis por cerca de 50% da energia do país. A reforma do setor elétrico começou em 1993 com a eliminação da equalização tarifária e a criação de contratos de suprimento entre geradores e distribuidores.

A Lei 9.074/1995 [25] introduziu o Produtor Independente de Energia e o Consumidor Livre. Em 2004, uma mudança importante foi a concessão de novos empreendimentos de geração ao investidor que oferecesse o menor preço. Foram criados dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Novas entidades como a ANEEL, ONS, CCEE e EPE foram constituídas para atuar no setor. A formulação de políticas continua sendo responsabilidade do Poder Executivo Federal, com assessoramento do CNPE e do Congresso Nacional [21]. A legislação ambiental brasileira evoluiu significativamente nas últimas três décadas. No entanto, não há menção às tecnologias de geração de energia a partir de fontes oceânicas. Assim, não existem estímulos nem regulamentações específicas para o uso dessa tecnologia. Além disso, a falta de regulamentação ambiental cria um cenário onde as lacunas legais precisam ser exploradas para o desenvolvimento, resultando em insegurança jurídica [21].

O mercado livre especial ou incentivado foi estabelecido para permitir que consumidores com demanda contratada superior a 500 kW possam negociar diretamente a compra de energia com geradores, fora do mercado regulado. Este mercado privilegia a aquisição exclusiva de energia de fontes alternativas, como PCHs, eólica, biomassa e solar, com capacidade instalada de até 30 MW [21].

Leilões são o principal mecanismo de fomento para projetos de energia renovável, com participação nos leilões A-1, A-3 ou A-5. No entanto, o custo mais elevado das fontes renováveis em comparação às convencionais dificulta sua participação em leilões gerais, levando à realização de leilões específicos desde 2007 para expandir sua presença na matriz elétrica brasileira [26].

Os leilões de energia se mostram como principal meio de se tornar visível uma fonte renovável no cenário Brasileiro, no entanto as fontes renováveis correspondem a lances

com alto valor agregado em vista de energias tradicionais, o que corrobora para ramificação de problemas associados a implementação de energia de maremotriz onde os pequenos projetos de usinas, já se encarram um cenário alto investimento inicial pela construção da barragem, e ainda tem a probabilidade incerta de um retorno em lucro dessa energia produzida.

5.1 Direito Ambiental

No cenário vigente se faz necessário legislações que fiscalizam os recursos naturais no Brasil, uma vez que viemos de uma pegada de impacto ambiental intensa nos últimos 120 anos de intensa inovação tecnológica e globalização. Com isso criaram diversos órgãos responsáveis por fiscalizar e preservar os recursos renováveis no Brasil, cabendo a eles julgarem o uso desses recursos. No que tange a energia de maremotriz, é necessário aprovação de órgão ligados ao direito marítimo brasileiros, que estabelece normas e diretrizes sobre o uso Sustentável do ecossistema marinho, o que de certa forma pode ser um obstáculo na aprovação de um projeto maremotriz.

Outro aspecto relevante para a geração oceânica é o Direito Marítimo Brasileiro, que abrange as normas relacionadas ao meio ambiente marinho. Essas normas visam à prevenção, ao controle e à fiscalização das atividades realizadas em águas jurisdicionais brasileiras, assegurando que tais atividades se mantenham dentro dos limites de capacidade do meio ambiente, prevenindo a ocorrência de danos ambientais decorrentes de poluição marinha. Antes de iniciar o Processo de Licenciamento Ambiental para obras sobre ou sob as águas, o empreendedor deve submeter um requerimento à Capitania dos Portos, Delegacia ou Agência da área de jurisdição. Este requerimento deve solicitar um parecer sobre o ordenamento do espaço aquaviário e a segurança da navegação. As informações e documentações necessárias para o requerimento são estabelecidas pelas "Normas da Autoridade Marítima N° 11" NORMAM 11 [27].

Ou seja, antes mesmo de iniciar o processo de construção de usina de maremotriz é fundamental autorização judicial, e um acompanhamento para fins de concordância com as diretrizes marinhas. O mar nesse contexto, se torna um mercado de empreendimento burocrático e exige protocolos para atender as demandas das agencias ambientais, bem como o mercado de circulação de capital gerado pela geração de energia.

O ambiente marinho apresenta normas específicas no âmbito do direito marítimo brasileiro. Para realizar empreendimentos no mar, é indispensável obter um parecer favorável da autoridade marítima. Sem este parecer, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) não processará o pedido de licenciamento ambiental [21].

A política ambiental brasileira é regida pela Lei 6.938 de 1981, conhecida como Política Nacional do Meio Ambiente,

e é complementada pela Constituição Federal de 1988, que exige estudos de impacto ambiental para a instalação de qualquer atividade que possa causar significativa degradação ao equilíbrio ecológico, incluindo usinas geradoras de energia. Além disso, a Lei 9.605 de 1998 estabelece sanções criminais aplicáveis às atividades lesivas ao meio ambiente, permitindo que os poluidores sejam responsabilizados administrativamente, civilmente e penalmente em casos de crimes ambientais [25]. Atualmente, não existe uma legislação específica que regule as fontes de energia renováveis provenientes do mar.

No Tabela 1 são discriminados alguns agentes do licenciamento ambiental e suas possíveis atribuições no que diz respeito ao planejamento e instalação de uma usina de maremotriz.

Tabela 1. Possíveis agentes de licenciamento.

ATORES DO LICENCIAMENTO	ATRIBUIÇÕES
Ministério do Meio Ambiente	Interessado em aumentar o controle e pertinência da identificação e avaliação dos aspectos e impactos ambientais em empreendimentos impactantes.
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)	Órgão ambiental executivo responsável pelo licenciamento ambiental em mais de um estado.
Órgãos Ambientais Estaduais	Órgão ambiental executivo responsável pelo licenciamento ambiental somente em um estado.
Fundação Nacional do Índio (FUNAI)	Responsável pela fiscalização das ações em atendimento à Política Indígena brasileira (de acordo com a localização).
Fundação Cultural Palmares	Responsável pela preservação do patrimônio cultural quilombola (de acordo com a localização).
Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN)	Responsável pelo gerenciamento do patrimônio cultural arqueológico (de acordo com a localização).
Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBIO)	Responsável pelo gerenciamento de unidades de conservação federais (áreas florestadas protegidas - Lei 9.985/2000) (de acordo com a localização).
Marinha Brasileira	Responsável pelo gerenciamento e fiscalização de obras sob e sobre as águas marinhas brasileiras.
ANA – Agência Nacional de Águas	Fiscaliza e autoriza a utilização dos recursos hídricos pertencentes à União.
Empreendedores	Responsáveis pela implantação e operação dos empreendimentos. Realizam estudos ambientais, monitoramento, mitigação e compensação dos impactos ambientais.
Consumidores	Beneficiados pelos acertos (ou penalizados pelos erros) dos outros atores, pela disponibilidade e confiabilidade.

Fonte: Oliveira, 2016 [21].

A legislação ambiental brasileira tem evoluído significativamente nas últimas três décadas. No entanto, as tecnologias para geração de energia a partir de fontes oceânicas ainda não são contempladas. Dessa forma, não há estímulos nem regulamentação específicos para o uso dessas tecnologias. Além disso, a falta de regulamentação ambiental cria um cenário onde as lacunas legais necessitam ser exploradas para o desenvolvimento do setor, o que gera insegurança jurídica [21].

Estabelece no Brasil uma estrutura jurídica complexa e que em nenhum momento favorece a utilização da energia de maremotriz em águas nacionais, a implementação de no-

vas fontes energéticas se desenvolve em um processo que envolvem incentivos por políticas de desenvolvimento em pesquisa, afim de construir uma base que consolide a energia de maremotriz no mercado com investimentos iniciais, que futuramente irão culminar em um novo cenário de avanço tecnológico, projetos pilotos sobre essa fonte de energia.

Na Tabela 2 é ilustrado a projeção para o desenvolvimento da energia de maremotriz para os próximos anos, considerando um cenário ideal.

Tabela 2. Projeção para o desenvolvimento de energia oceânicas no Brasil nos próximos 20 anos (2017-2037).

2017	2020	2023	2026	2029	2031	2034	2037
Investimento em Pesquisa e Desenvolvimento							
Inventário do potencial energético oceânico brasileiro	Desenvolvimento de equipamentos na zona de teste	Iniciar a 1ª fase comercial das energias oceânicas					
Criação da Zona Piloto com licenciamento ambiental simplificado							
RoadMap inicial	Revisão do RoadMap	Prêmio para o desenvolvedor de energia oceânica	Revisão do RoadMap				
Implementação de novas políticas para incentivar e impulsionar o mercado (ROCS)	Tarifa super incentivada para atrair investidores			2ª fase comercial, empreendimentos autossustentáveis			
Criação do Fórum para estudos jurídicos, aplicação das normas, investigação e planejamento do ordenamento marinho	Lei para o ordenamento marítimo	Estudos sobre os impactos na zona piloto para propor ações mitigadoras nos projetos já instalados	Legislação ambiental própria para o desenvolvimento de energias oceânicas	Revisão e atualização da legislação conforme evolução da tecnologia			

Fonte: Oliveira, 2016 [21].

Por fim, é evidente o cenário de indiligência da energia de maremotriz no Brasil se desenvolve por minuciosos mecanismos ligados indiretamente, que no fim fomentam um ciclo impermeável para energia de maremotriz sendo necessário uma alteração nas bases mais profundas da legislação do setor de energia nacional, para movimentar um avanço gradual na energia de maremotriz.

5.2 Análise de Viabilidade

Embora a energia de maremotriz esteja em estágio embrionário, alguns estudos recentes de viabilidade energética são conduzidos em regiões na região norte e nordeste do país, analisando as condições geográficas do local para fins educativos. Foi escolhido como base a baía do Turiaçu no Maranhão para análise de seu potencial energético, condições de relevo e viabilidade econômica.

A Figura 9 ilustra a localização geográfica de Turiaçu, no Maranhão, a 195 km da capital São Luís, situada na região da Amazônia Legal. Este município possui aproximadamente 32.491 habitantes e está inserido na Área de Proteção Ambiental (APA) das Reentrâncias Maranhenses, criada em junho

de 1991, que abrange todo o litoral ocidental do Maranhão, desde a Baía de São Marcos até o rio Gurupi. Esta área é caracterizada por reentrâncias e numerosos estuários cobertos de manguezais, os quais são berçários importantes para milhares de espécies de peixes, crustáceos, moluscos e aves. O clima é predominantemente chuvoso de dezembro a agosto, com uma precipitação média anual de 2.000 mm [28].



Figura 9. Turiaçu em vermelho. Maranhão em marrom claro. Fonte: Bezerra Neto, 2012 [29].

Inventário feito na região foi traz diversos ponto que deve ser ponderado para avaliar as condições de um local para instalação da energia de maremotriz, a região da baía e composta por uma extensa aera de manguezal que corresponde por boa parte da vegetação do estado, a avaliação do inventário simulou três barragens fictícias indicadas na Figura 10.

A Tabela 3 traz dados relativos as três propostas de barragens como altura média da maré, potencial extraível, energia anual e entre outros dados.

Tabela 3. Dados da baía de Turiaçu relativos às três propostas de barragens indicadas na Figura 10.

Local	Altura média da maré (m)	Comprimento aproximado da barragem (km)	Área da baía (km²)	Potência extraível (MW)	Distancia Cidade TURIAÇU	Energia anual (10 ⁹ MWh)
Turiaçu 29	4,7	21,5	616	3 402	37,5 km	9 114
Turiaçu 29A	4,7	17,0	494	2 728	29,5 km	7 309
Turiaçu 29B	4,7	10,5	290	1 602	20,5 km	4 209

Fonte: Sondotecnica ELETORBRAS 1981b [30].

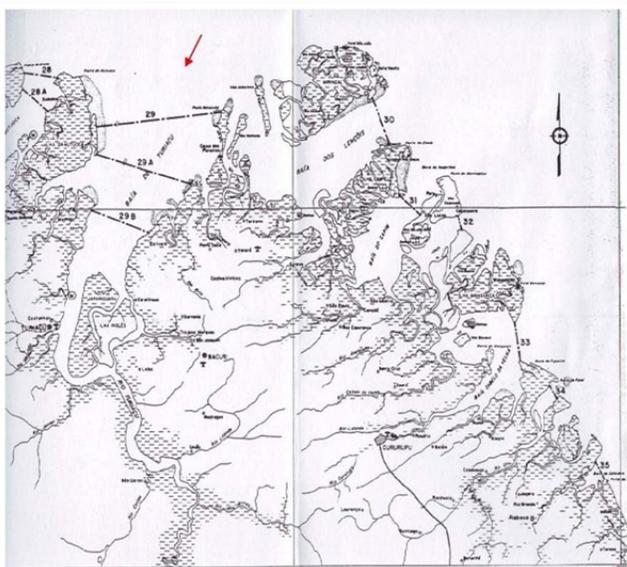


Figura 10. Baía do Turiaçu. Fonte: Sondotecnica ELETBRAS 1981b [30].

Três alternativas de barragens indicadas na Figura 10 (29, 29A, 29B) foram propostas, com comprimentos de 21,5 km, 17 km e 10,5 km, respectivamente. Todas teriam suas bases em áreas de manguezal, inadequadas para suporte devido à inundação diária e falta de estrutura geológica. O acesso terrestre é inviável, necessitando vias marítimas, e a construção de estradas através de 20 km de manguezais e reentrâncias a partir de Turiaçu seria extremamente cara e ambientalmente impactante. Durante a preamar, esses manguezais ficam submersos, limitando a capacidade de represamento e causando perda de volume de água represada [29].

Na análise ambiental, a alternância de marés – períodos de submersão e exposição – é um fator de extrema importância. O represamento de água por meio de barragens compromete essa alternância, causando impactos negativos significativos na flora e fauna dos manguezais. Este aspecto deve ser avaliado cuidadosamente para cada alternativa de aproveitamento. Em todas as três alternativas analisadas, a questão ambiental é predominante, pois envolve extensos aterros de manguezais para acessar as cabeceiras das barragens sugeridas. Além dos impactos mencionados, a construção de barragens nos locais propostos altera os regimes de correntes marítimas que penetram nos canais. Essas mudanças afetam o volume de renovação das águas dos manguezais, comprometendo a sobrevivência dos ecossistemas de mangue [29].

As potências extraíveis de 3,402 GW superam a demanda regional, exigindo a instalação de linhas de transmissão de alta tensão através de áreas de manguezal até grandes centros de consumo. A represa precisaria ser esvaziada a cada seis horas,

resultando em geração intermitente e períodos de inatividade das linhas de transmissão. Além disso, a construção das barragens em áreas de manguezal demandaria um movimento de material significativo, não disponível na região. Assim, a exploração desse potencial energético é comprometida por questões econômicas, geográficas e ambientais [29].

Em resumo, o aproveitamento de energias maremotrizes em pequena escala se mostra mais viável e implementável. Essa conclusão reflete a realidade das regiões norte e nordeste do Brasil, onde há muitas comunidades pequenas e isoladas com acesso limitado ou baixa qualidade de energia elétrica. A energia maremotriz de pequena escala emerge como uma alternativa para reduzir a exclusão elétrica nessas áreas, promovendo melhorias nos cenários socioeconômicos das comunidades. Isso também pode ser visto como um empreendimento com foco no retorno social. Portanto, a viabilidade econômica e ambiental, bem como as melhores práticas para implementação desses projetos, devem ser objeto de estudo detalhado [29].

Portanto, os dados obtidos do inventário mostram que para o estuário específico as condições geográficas da baía impedem a instalação de uma barragem de maremotriz, o impacto ambiental causado pela degradação do manguezal, a localização geográfica do estuário que dificulta o acesso e por consequências as obras realizadas ali são fatores que inviabilizam esse projeto. Porém, o alto potencial extraível evidencia que as regiões litorâneas do Brasil possuem possibilidades de gerar energia. A falta de tecnologias que contornem as problemáticas associadas a construção propriamente dita e a localização geográfica continuarão a solidificar o avanço dessa fonte energética no Brasil.

Enquanto países de baixas proporções continentais e potencial energético como a França, Reino Unido e Japão já operam usinas de maremotrizes com pleno funcionamento utilizando de pesquisas científicas para obtenção de novas tecnologias associadas. O Brasil por sua vez é um enorme potencial no ramo de energia oceânicas porém, a invisibilidade dessa fonte, e as tímidas pesquisas acerca desta matriz ainda se faz presente no cenário energético atual.

6. Conclusion

É possível visualizar que as pautas de substituição de combustíveis fósseis por fontes energéticas sustentáveis tem direcionado a sociedade à busca por tecnologias que auxiliem a geração de novas fontes de energias limpas, surgindo nesse contexto a energia de maremotriz que se destaca no cenário atual como um caminho para este objetivo. No entanto observa-se que tal fonte se encontra em uma encruzilhada jurídica e tecnológica sendo, de certa forma, subjugada e rejeitada embora se apresente com grande potencial energético, o Brasil, país no qual se destaca com uma extensa faixa litorânea e

altos potenciais energético, se mostra indiferente em relação a tal fonte mantendo os padrões legislativos e científicos que desacreditam a energia de maremotriz. O que torna necessários a criação de programas de desenvolvimento de energia de pequenas usinas pilotos de maremotriz, assim como investimento público destinado a essa fonte pois, embora não possa se equiparar aos combustíveis fósseis, uma futura rede de centrais de usinas de maremotrizes contribuirá para uma formação de uma matriz energética consideravelmente mais limpa, garantindo o uso mais sustentável de recursos do planeta.

Referências

- [1] G.T. Miller e S.E. Spoolman. *Ecologia Sustentabilidade*. 2012.
- [2] R.A. Hinrichs, M. Kleinbach e L.B. Reis. *Energia e meio ambiente*. 2010.
- [3] J. F. Carvalho. *Combustíveis fósseis e insustentabilidade*. 2008.
- [4] D. Ribeiro. *Combustíveis fósseis*. 2014.
- [5] S. L. De Lima et al. *Projeto da usina maremotriz do Bacanga: concepção e perspectivas*. 2018.
- [6] D. Elliot. *Tidal Energy*. 2004.
- [7] P. B. Leite Neto et al. *Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências*. 2011.
- [8] R. H. Clark. *Elements of tidal-electric engineering*. 2007.
- [9] Roger Henri Charlier e Charles W. Finkl. *Ocean energy: tide and tidal power*. 2009.
- [10] J. P. Frau. *Tidal energy: promising projects: La Rance, a successful industrial-scale experiment*. 1993.
- [11] R. Duarte et al. *O incrível fenômeno das marés: uma onda oceânica*. 2018.
- [12] S. Massoud, M. Amer e M. Samir. *Tidal Power Generation Systems*. 2001.
- [13] R. H. Charlier. *Tidal Energy*. 1982.
- [14] Sustainable Development Commission. *Tidal Power in United Kingdom-Research Report 2-Severn non-barrage Options*. 2007.
- [15] A. C. B. Botan. *Desenvolvimento de uma turbina de fluxo reversível para uso em usina maremotriz com operação em duplo efeito*. 2014.
- [16] ANBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Turbinas Hidráulicas, Turbinas-Bombas e Bombas de Acumulação*. 1987.
- [17] R. C. L. Santos. *Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan*. 2013.
- [18] J. G. Coelho. *Estudo numérico de tubos de sucção de turbinas hidráulicas tipo bulbo*. 2006.
- [19] A. J. Macintyre. *Máquinas Motrizes Hidráulicas*. 1983.
- [20] R. Guerreiro et al. *A geração de energia maremotriz e suas oportunidades no Brasil*. 2012.
- [21] R. M. Oliveira. *Energias oceânicas: arcabouço legal e entraves a serem superados para o desenvolvimento no Brasil*. 2016.
- [22] Sondotécnica. *Estado da arte de projeto e operação de Usinas Maremotrizes*. 1981.
- [23] D. Kerr. *Marine energy*. 2007. URL: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1853/971.short>.
- [24] T. G. Vellozo e A. R. Alves. *Características gerais do fenômeno da maré no Brasil*. 2006.
- [25] Brasil. *Constituição da República Federativa do Brasil*. 1988. URL: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.
- [26] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resumo geral dos novos empreendimentos de geração*. 2011.
- [27] E. M. O. Martins. *Curso de direito marítimo*. 2013.
- [28] P. B. Leite Neto et al. *Estudo do Potencial para Geração de Energia Elétrica a partir de Fonte Maremotriz*. 2009.
- [29] P. Bezerra Neto et al. *A energia maremotriz no maranhão: uma análise crítica*. 2012.
- [30] Sondotécnica. *Usina Maremotriz - estuário do Bacanga, projeto conceitual: Estudo preliminar de variantes para a usina-piloto*. 1981.