

Marine energy in Brazil: technical, economic, environmental and management aspects

Energia marinha no Brasil: aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de gestão

Diunay Mantegazini¹
Emerson Cararo²
Samuel Franco³
Gisele L. D. Chaves⁴
Wanderley Celeste⁵

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

¹diunaymantegazini@gmail.com

²emersoncanzian@hotmail.com

³samuvit@yahoo.com.br

⁴gisele.chaves@ufes.br

⁵cawander@gmail.com

Abstract: The concern for security in energy supply in Brazil has several factors of attention, such as: low degree of diversification of the energy matrix, the predominance of hydraulics generation, the dependence on fossil fuel, geopolitics, economic problems and environmental issues. In this context, marine energy can be strategic in relation to the progressive demand for energy since it is renewable, clean and reliable. Although this source is more costly and has no commercial history, the learning curve and technological development can moderate the initial investments in the construction and installation of a plant. The country is committed to the exploration of alternative energies and, therefore, a national plan of marine energy that contemplates partnerships with the private sector is more feasible than a public plan in the face of the national budgetary reality.

Keywords: Renewable energy, tidal energy, tidal current, power generation, planning, electricity generation.

Resumo: A preocupação por segurança no fornecimento energético no Brasil tem como fatores relevantes de atenção a pouca diversificação da matriz, a predominância hídrica para gerar eletricidade, a dependência de

combustíveis não renováveis, a geopolítica, os desafios socioeconômicos e as questões ambientais. Neste contexto, a energia do mar pode ser estratégica em relação à demanda progressiva por energia por ser renovável, limpa e confiável. Embora essa fonte seja de maior custo e sem histórico comercial, a curva de aprendizagem e o desenvolvimento tecnológico podem moderar os investimentos iniciais de construção e instalação de uma planta. O país se mostra comprometido com exploração de energias alternativas e, portanto, um plano nacional de energia do mar que contemple parcerias com o setor privado é mais factível do que um plano público diante da realidade orçamentária nacional.

Palavras-Chave: Energias renováveis, energia maremotriz, correntes de marés, geração de energia elétrica, energia de ondas, planejamento.

1 Introdução

Há uma forte preocupação com a segurança energética devido à progressiva demanda por eletricidade e à questão ambiental [1]. Para que a sustentabilidade se prolongue, é importante que haja investimento em energias limpas e renováveis, tais como a solar, eólica e a do mar [2]. Neste contexto, a expansão de energias renováveis diminui a dependência e diversifica a matriz de energia do país. Diante disso, a produção de eletricidade pode ser proveniente da amplitude de marés, além das correntes e ondas, isto é, utilizando a energia cinética e potencial do mar [3].

A energia do mar pode contribuir para o desenvolvimento sustentável de uma nação [4]. Ela reduz a dependência e a exposição relacionadas à volatilidade de preços, à disponibilidade de fornecimento de combustíveis fósseis e à importação de energia. Assim, uma nação deve tomar consciência dos potenciais energéticos e passar por um processo de diversificação das fontes de energia, sendo que a energia marítima é uma opção renovável plausível e interessante [5].

Pesquisas sobre geração de eletricidade provinda das marés exploram as peculiaridades de cada local e avançaram mundialmente nos últimos trinta anos, visto que as marés representam uma grande quantidade de energia. Contudo, o uso das marés para atividades humanas é muito antigo, como no caso da sociedade romana, que as usava para a moagem de milho [6].

Existem cinco fontes de energia marinha: ondas, correntes, marés, gradiente termal e gradiente salino. A exploração desses recursos depende de estudos detalhados e de informações locais [5] sobre as várias questões que um empreendimento bem sucedido deve contemplar: interação com outras atividades no local (pesqueira, de exploração de petróleo, de proteção ambiental, turismo e naval), geografia, oceanografia, clima, físico-bioquímico e potencial.

É interessante avaliar recursos energéticos por meio de correntes marítimas devido ao possível caráter multimodal [5]. Por exemplo, turbinas acopladas não apenas para extrair recursos das ondas, mas também para extrair energia eólica em alto mar, podem possibilitar a redução de

custos e a extração de energia de fluxos de baixa velocidade. Porém, deve haver atenção, quando da instalação de plantas desse tipo, quanto às várias espécies marítimas e costeiras que habitam a área de projeto inclusive as migratórias, bem como aos ciclos de vida dos animais, à população e aos processos de determinado ecossistema [7].

Segundo Energy Information Administration (EIA) [85], no relatório AEO2018, o consumo de energia crescerá de aproximadamente 100 quatrilhões de BTU em 2017 para 120 quatrilhões de BTU em 2050, o que posiciona as fontes de energia renováveis como importantes para o futuro, sobretudo no que tange à sustentabilidade [8]. Vale lembrar que o Brasil e o Reino Unido assinaram declaração de cooperação mútua em energia, incluindo as renováveis, entre elas a maremotriz, visando a benefícios mútuos quanto à segurança e à eficiência energética, o que demonstra interesse governamental sobre o tema [9].

Para Camelo et al [10], “a exploração da energia das marés tem se tornado cada vez mais atrativa em diversos aspectos”. Alguns projetos já sinalizam que se pode levar em conta essa tecnologia. O aumento gradual por demanda de energia, incertezas em relação aos combustíveis fósseis no longo prazo e as questões ambientais incentivam o ramo energético mundial a investir em fontes renováveis. O potencial mundial da energia extraída dos mares é de 500 a 1.000 TWh/ano [11]. Porém, poucos lugares no mundo possuem amplitude de marés e geografia propícia para a exploração [10], conforme mostrado na Figura 1. Observa-se na figura que a costa norte brasileira apresenta grande potencial [11].

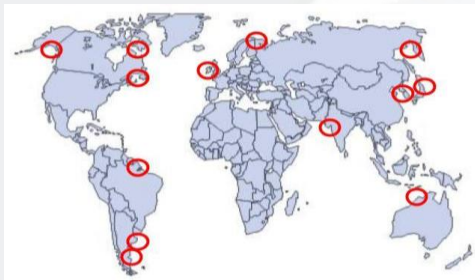


Figura 1: Principais locais no mundo onde as marés são mais adequadas para a sua exploração. Adaptado de [11].

Este artigo tem o objetivo de avaliar os aspectos técnicos, ambientais, econômicos e de gestão da energia do mar no Brasil. A metodologia consiste em acessar e analisar artigos científicos, relatórios, documentos governamentais, dissertações, sites de organizações renomadas da área e comunicação por e-mail com especialistas. Na seção 2 são apresentados os conceitos da exploração e conversão das energias provindas do mar. Na seção 3 são mostradas as principais tecnologias aplicadas atualmente na produção de energia elétrica através da energia marítima. Um apanhado sobre a Usina de Ondas no Brasil é apresentado na seção 4. Aspectos ambientais e econômicos são abordados de uma maneira sucinta nas seções 5 e 6 respectivamente. A viabilização em planejamento, gestão e política é tratada na seção 7. As conclusões são expostas na seção 8.

2 Princípios básicos de exploração da energia do mar

Intermitência e imprevisibilidade constituem problemas comuns das energias alternativas, segundo [10], ou seja, não se sabe ao certo em que momento, como e em que quantidade a fonte primária estará disponível. Em contrapartida, a energia oceânica apresenta previsibilidade. Apesar de intermitente, “é possível conhecer em que momento e em que quantidade uma usina maremotriz poderá produzir energia” [10], devido ao fato de as marés estarem associadas a fenômenos astronômicos, que são complexos, porém previsíveis (não no longo prazo), como a força gravitacional da Lua e o Sol sobre a Terra [10]. A energia oceânica se distingue, portanto, das fontes solar e eólica, que dependem do clima.

As marés e o calor dos oceanos abrigam reservas energéticas inesgotáveis: a energia térmica (gradiente de temperatura), a energia cinética (ondas de velocidade até 18m/min - movimento) e a energia potencial (sobe e desce de gigantescas massas - altura) dos oceanos e marés (originadas pela atração lunar) proporcionam mais energia do que o necessário para a humanidade [12]. A primeira central maremotriz, de 1967, foi a do rio francês Rance de 240MW [12]. Com o aperfeiçoamento de turbinas tipo Straflo, reduziram-se “em um terço os custos de uma usina maremotriz” [12].

Essas turbinas são do tipo axial e caracterizadas pelo escoamento retilíneo, cuja vantagem é de não ser necessário colocar o gerador no interior de um bulbo, pois isso criaria problemas de limitação das dimensões do gerador e de resfriamento. Dessa maneira, a turbina tipo Straflo possibilita uma instalação compacta e a obtenção de fator de potência maior, além de poderem ser instaladas com eixo horizontal ou inclinado [86]. Os canadenses as usaram para produzir 20 MW em 1984 na baía de Fundy, que é a de maior desnível entre marés (20 metros).

Além de tudo, “no Brasil, que não prima por marés de grande desnível, há três lugares adequados à construção dessas usinas: na foz do rio Mearim, no Maranhão, na foz do Tocantins, no Pará, e na foz da margem esquerda do Amazonas, no Amapá” [12]. O desafio é aproveitar todo esse potencial. Afinal, os dispositivos são de baixo rendimento e não contínuos. “O ciclo de marés de doze horas e meia e o ciclo quinzenal de amplitudes máximas e mínimas apresentam problemas para que seja mantido um fornecimento regular de energia” [12].

Para isso, necessita-se de instalações que não interfiram com a navegação e têm que ser robustas para poder resistir às tempestades, já que os locais de instalação são as áreas costeiras onde ocorrem grandes amplitudes de maré. Há amplitudes de marés, como São Luís – Baía de São Marcos, no Maranhão, no Brasil – com 6,8 metros, e em Tutóia, com 5,6 metros, nas quais “a topografia do litoral não favorece a construção econômica de reservatórios, o que impede seu aproveitamento” [12].

3 Principais tecnologias utilizadas

A energia oceânica pode ser aproveitada de quatro formas. A primeira é por barragens construídas “em locais de grande amplitude de maré, onde a passagem da água gira uma turbina, transformando a energia cinética em eletricidade” [13]. Na segunda forma, análoga à modalidade eólica, a corrente marinha gira a turbina. A terceira aproveita o movimento das ondas que provoca oscilação de cilindros internos. “Esses cilindros pressionam óleo a passar por motores. A rotação desses motores aciona geradores elétricos, produzindo eletricidade” [13]. A última forma, que é a adotada na usina de ondas existente no Brasil, aproveita o movimento das ondas, o qual empurra “os flutuadores para cima e para baixo e permite acumular água sob alta pressão numa câmara interna. Essa câmara libera jatos d’água sobre uma turbina ligada a um gerador de eletricidade” [13].

3.1 Barragens de Maré

As barragens de maré (Figura 2) utilizam a energia potencial das variações das marés. As forças gravitacionais da lua, do sol e das forças centrífugas de rotação da Terra afetam os oceanos e dão origem a ondas globais. As marés seguem um padrão previsível, isto é, sobe (inundação) e desce (maré baixa) em períodos bem conhecidos em cada região costeira do globo terrestre. Além do mais, a magnitude das ondas de maré é aumentada duas vezes por mês, resultando em marés mais fortes e marés mais fracas. Embora a magnitude das marés seja baixa no oceano aberto, pode ser amplificada pela posição das massas terrestres e pela batimetria oceânica, como as encostas levemente elevadas [14].

O princípio de funcionamento das barragens de maré é capturar uma parte da maré e mantê-la fora de contato com a maré natural, criando uma diferença entre o nível da água apreendida e o do mar. Os níveis de água são uniformes, passando por turbinas. A energia pode ser gerada durante a vazante (operação unidirecional) ou durante a vazante e a cheia (operação bidirecional) [15].



Figura 2: Figura esquemática de uma barragem de maré. Fonte: [13].

3.2 Turbinas de corrente de maré

As turbinas de corrente de maré produzem eletricidade por meio da energia cinética das correntes marítimas que se desenvolvem em torno de penínsulas ou estreitamentos em canais [16]. Assim como acontece com as barragens de marés, a produção de eletricidade nas turbinas de corrente marítimas é facilmente previsível, mas com uma variância

ao longo de horas e semanas completamente distintas dos hábitos de consumo do ser humano [17].

Ademais, as turbinas de corrente marinha (Figura 3) exigem adequações menos severas do regime de marés naturais do que as barragens. Porém, não proporcionam soluções para o proveito da energia no período noturno. Em aspectos gerais, é fundamental que as correntes sejam da regularidade de 2 a 2,5 m/s para que as turbinas de corrente de maré sejam viáveis economicamente [18] [19] [20], embora seja possível adequar a velocidade da água sobre o rotor e a triagem de recursos de energia das marés [21].

3.3 Energia das Ondas

As usinas de ondas convertem a energia das ondas em eletricidade. Os padrões dos ventos são a principal fonte geradora das ondas, tendo assim uma maior propensão de energia principalmente nas costas ocidentais em altas latitudes e nas costas orientais a baixas latitudes [22]. Como é formada pelo vento, o recurso de energia das ondas é extremamente variável e sofre mudanças sazonais e diárias [23].

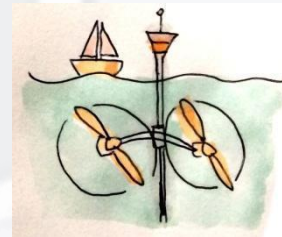


Figura 3: Figura esquemática de Turbinas de corrente de maré. Fonte: [13].

Contudo, as ondulações de baixa latitude conseguem equilibrar a maior parte da variação de curto prazo. Com isso, a energia das ondas é mais estável e se consegue prever com mais facilidade que a energia eólica [22].

Além disso, a energia das ondas é extraída de várias maneiras para utilizar o movimento da água para gerar energia. Alguns aparatos são construídos para operar como matrizes flutuantes em águas costeiras mais profundas; outras serão amarradas ao fundo em águas rasas ou instaladas como disjuntores na costa (Figura 4). Embora as usinas de energia de ondas em terra sejam grandes, os dispositivos flutuantes geralmente consistem em pequenas unidades (20–1000 kW) [24]. A maioria das instalações projetadas de energia das ondas são grandes matrizes com várias unidades funcionando em conjunto.



Figura 4: Figura esquemática de uma usina de ondas. Fonte: [13].

4 Usina de ondas no Brasil

Apesar de as emissões de CO₂ no Brasil serem baixas em relação ao restante dos países chamados “BRICS”, o montante de emissões, levando em consideração o produto interno bruto (PIB), é o segundo mais alto desse grupo de países. Por isso há o interesse por fontes renováveis que possam gerar segurança no abastecimento com atendimento às questões ambientais [25]. O Brasil dispõe de consideráveis recursos energéticos renováveis. O país ainda explora e aplica tais tipos de fontes de energias de forma consideravelmente amadurecida quando comparado com os demais países da América do Sul [26].

No litoral brasileiro, a maior parte dos estados apresenta amplitudes de marés inferiores a 1,5 metros, que são as micromarés [27]. Os estados do Maranhão, Pará e Amapá possuem amplitudes chamadas de macromarés, que são superiores a 3,5 metros (Figura 5). O restante do litoral e alguns trechos do litoral da Bahia e Sergipe apresentam mesomarés, com amplitudes entre 1,5 e 3 m [38]. Portanto, a costa norte brasileira é a que apresenta maiores amplitudes de marés no país [10].

Estima-se que no Maranhão haja potencial de 8GW [28]. E no estuário da Bacanga, São Luís - MA, foi construído, na década de 1970, a barragem para interligar a cidade ao porto, com planos para geração de eletricidade [10], estimada, na época, em 56,3 GWh [29]. Todavia, foi inviável economicamente e dificultada pela ocupação urbana. Lima et al [29] detalharam o que provocou a inviabilidade e propuseram uma usina piloto de pesquisa para aproveitar as condições lá presentes e impulsionar o desenvolvimento humano-tecnológico. Cepa [12] detalhou a morfologia do estuário e propôs uma viável utilização da barragem e das comportas existentes.

A usina de energia das marés proposta aproveitaria os componentes existentes, como a barragem, a abertura da eclusa e outras instalações, aos quais serão adicionados sistemas de captação de água e turbinas para geração de energia, fazendo com que a operação possibilite a geração de energia tanto na maré vazante quanto na maré enchente, ou seja, haverá produção de energia fazendo com que o modelo operacional adotado seja o de duplo efeito, garantindo, assim, maior tempo de geração. A energia teórica a ser produzida usando esse conceito de planta está na faixa de 7.000 a 47.000 kWh/dia, dependendo da maré predominante, da vazão permitida e da eficiência do equipamento eletromecânico [31].

A Baía de Turiaçu, também no Maranhão, apresenta potencial de mais de 3,4 GW [15]. Apesar das marés de até sete metros, é inviabilizada pela dificuldade de acesso e pela área de mangue com bastante vegetação [10]. Oliveira et al [33] detalharam essas inviabilidades, bem como propuseram a exploração de pequenos estuários via tecnologia de aproveitamento de baixas quedas. Camelo et al [34] fizeram uma análise de um pequeno estuário dentro da baía de Turiaçu sobre ponto ótimo entre produção energética e proteção ambiental.

É possível afirmar que, com relação ao potencial de energia das marés, observa-se, na Figura 5, que o Brasil possui

localidades nas regiões Norte e Nordeste que atendem ao requisito teórico de variações de altura de maré superiores a cinco metros. Existem potenciais no Maranhão, com variações de seis metros, no Amapá, mais especificamente na estação de Santa Maria do Cocal, na foz do Igarapé do Cocal, com variações de oito metros, e na estação de Igarapé do Inferno, na Ilha de Maracá, com variações de até onze metros [35]. A viabilidade econômica de projetos dessa tecnologia no Brasil deve ser avaliada por meio de estudos detalhados e pelo mapeamento de áreas em potencial antes de se decidir pela sua implantação [36].

Até o momento, existe no Brasil um único projeto piloto de utilização de energia do movimento das ondas, sendo o primeiro da América Latina. O projeto está localizado em Pecém, a 60 km de Fortaleza – CE, e foi desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), órgão vinculado à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A usina conta com duas unidades geradoras de 50 kW de potência cada. Contudo, não há viabilidade econômica, o retorno financeiro é inviável, há baixa oportunidade de comercialização e é elevado o custo das plantas [32]. Ela foi desativada em 2015, quando finalizou o projeto de P&D com a empresa Tractebel. Há uma previsão de construção de outra usina no Rio de Janeiro com parceria com Furnas.

5 Aspectos ambientais

Uma usina maremotriz pode alterar as características naturais do local e as respectivas atividades humanas como, por exemplo, a pesca [10]. Dentre os aspectos que devem ser analisados estão a qualidade da água via alteração química, oxigenação, salinização, sedimentação e erosão. Devido às prováveis alterações nos regimes de sedimentação e erosão, é possível que haja alteração na morfologia do estuário [37].

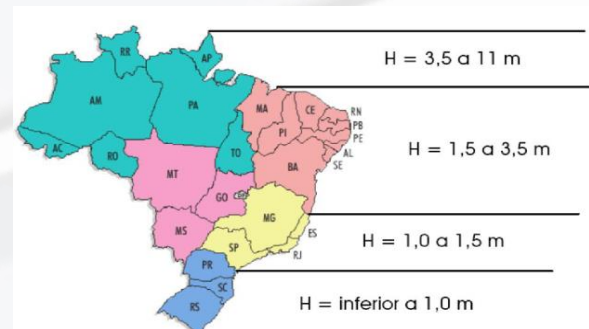


Figura 5: Valores médios de variação da maré no litoral brasileiro. Fonte: [38].

Com a construção da barragem, a redução da salinidade pode estimular espécies de água doce para áreas mais ao mar [44]. As correntes podem erodir e transportar sedimentos e, assim, modificar a turbidez da água e favorecer organismos nos depósitos lamacentos que servem de alimento para aves; e isso pode ser estudado por modelos computacionais de movimento da água [43-44].

A retenção de água também altera significativamente os ecossistemas das planícies de maré e modifica a

alimentação de aves. Há uma diferença horária entre a alimentação dos peixes que são opostas à das aves, gerando, assim, maiores períodos de procura por alimentos disponíveis devido à retenção ou elevação dos níveis de água nas barragens. Quanto mais robusta a barragem, maior a chance de não haver locais de alimentação alternativos nas redondezas. Com a diminuição das áreas de alimentação, os aumentos da dificuldade de os animais encontrarem alimento ou a menor qualidade dos alimentos afetarão diretamente o tamanho da população [48] [49] [50] [51].

Sabe-se que muitas espécies de peixes dependem, em parte, das correntes marinhas para que estas transportem seu alimento, de modo que os dispositivos de energia das ondas que alteram as correntes marinhas entre os locais de desova e áreas de alimentação também podem ser prejudiciais às populações de peixes [55].

As alterações no ecossistema consistem, também, em mudanças na distribuição de espécies, na composição de espécies (umas desaparecem e outras surgem) e no ciclo de vida (reprodução e crescimento) [39]. Porém, consta-se que o equilíbrio ecológico foi restabelecido depois de anos após o impacto da construção da usina de La Rance [40].

Os impactos em relação aos mamíferos marinhos são referentes à fase inicial da construção dos conversores de energia [41]. Isso altera o padrão de vida das espécies e o regime de ondas [46]. Como se trata de seres móveis, eles podem retornar ao habitat quando a normalidade estiver restabelecida. Entretanto, é comum que tartarugas e mamíferos marinhos se enrosquem nas hélices das turbinas [45].

Durante a construção, o ruído e as vibrações afetam diferentes espécies de diferentes maneiras [56]. O ruído pode prejudicar os sistemas de navegação e a comunicação dos animais marinhos [46]. Além do mais, no caso das explorações de maré, o ruído operacional de um pequeno número de unidades não pode exceder os níveis padrões, mas a produção acumulada de ruído de muitas unidades tem o potencial de mascarar os sons de comunicação produzidos por seres vivos aquáticos nas proximidades das estruturas [48].

Além disso, os impactos visuais, devido à sinalização luminosa e à modificação da paisagem [46], ocorrem de acordo com o dispositivo utilizado, de maneira que os totalmente submersos possuem impacto zero, os semi-submersos dependem da distância da costa para a necessidade de minimização dos impactos, e já os próximos a costa devem ser minimizados por meio da integração com estruturas de proteção costeira [42].

Atualmente está disponível uma quantidade limitada de informação a respeito dos efeitos que novas tecnologias para produção de eletricidade podem causar ao ambiente marinho. Mesmo assim, é importante ressaltar que a construção de barragem de maré acarrete mudança no antigo habitat natural e influencie os habitats a montante e a jusante da instalação [47].

Já que as aplicações de modelos comerciais de conversão de energia das ondas são limitadas, os estudos sobre mudanças nos ecossistemas ficam restritos. Um estudo sueco detalha os efeitos ambientais ao longo de um período de cinco anos após a construção de uma usina das ondas, onde se conclui que os conversores de energia das ondas tiveram apenas efeitos diretos menores em relação à alta variabilidade natural [52]. Boias contaminadas podem ter efeitos sobre algumas espécies, o que, consequentemente, atrai e gera a presença de grandes predadores, embora estruturas submarinas complexas possam fornecer refúgios a espécies. Por outro lado, linhas em estruturas podem causar o emaranhamento de mamíferos marinhos, tartarugas, peixes maiores e aves marinhas. Com uma visão mais crítica, o amortecimento das ondas pode reduzir a erosão na costa e causar mudanças ecológicas [52] [53] [54] [55].

A construção de uma barragem perto de um viveiro ou área de desova terá claramente um impacto na reprodução. Segregação ou restrição de acesso à desova e berçário tem um potencial de efeito negativo ao nível populacional das espécies. As barreiras aos mamíferos marinhos e o acesso a áreas de alimentação, extração, reprodução e criação de filhotes têm potencial para efeitos adversos no ciclo reprodutivo, impactando nas migrações de espécies [48].

Considera-se que a eletricidade gerada pelas instalações de barragem de maré existentes é levada por cabos que correm no topo da barragem e, portanto, não tem impacto ambiental marinho. Dado o importante papel da informação magnética nos movimentos das tartarugas marinhas, os impactos da ruptura do campo magnético podem variar de mínima a significativa [83]. A sobrevivência e a reprodução de vários organismos marinhos não são afetadas pela exposição de longo prazo a campos magnéticos estáticos [55].

Assim, algumas soluções usadas para diminuição do impacto socioambiental são o uso de elementos pré-fabricados em terra (usina de Kislaya Guba-Rússia) e de eclusas para conciliar com o tráfego de embarcações (usina de La Rance). Vale lembrar que, constatado por a geração maremotriz não emite gases poluentes, não polui a água, não derrama óleo e não produz resíduos [10]. Na fase de construção, deve-se tratar os resíduos gerados e evitar zonas de pesca comercial e recreio ou de valor turístico. Como há geração de campo eletromagnético de cabos submarinos, eles podem ser enterrados no fundo do mar para minimizar esse efeito. Além do mais, existe a possibilidade de criar recifes artificiais (fator positivo) [46].

6 Aspectos econômicos

O avanço tecnológico torna o aproveitamento da energia maremotriz mais atrativa economicamente com o passar do tempo [10]. A avaliação econômica de uma usina contém custos de construção, operação e manutenção; impactos ambientais e socioeconômicos; e os benefícios tais como turismo e geração de eletricidade [39]. A energia marítima possui fonte inesgotável e os custos de operação são mínimos [10].

Ressalta-se que uma usina maremotriz pode ter uma vida útil até três vezes maior do que uma térmica ou nuclear [57]. Contudo, a viabilidade econômica daquela está ligada às demais fontes e às condições do país. No Brasil há possibilidades de aproveitamento em pequena escala na barragem do Bacanga e na baía de Turiaçu, Brasil. [29] [30] [33] [34].

O potencial global de amplitudes de marés menores está inexplorado. Embora se saiba que tal potencial é viável tecnicamente, ele ainda não é economicamente viável. Todavia, o emprego de novas tecnologias como a VLH (Very Low Head) e a HYDROMATRIX® tendem a reduzir os custos de implantação de tais tipos de empreendimentos [10].

Dessa forma, o custo da geração maremotriz e, conseqüentemente, a sua viabilidade, variam de um país para outro, de acordo com as condições energéticas, sociais e ambientais diversas [58]. Os grandes projetos são mais econômicos do que os pequenos, pois o custo de implantação por kWh produzido tende a reduzir. Assim, para uma usina de 100 MW, por exemplo, o custo de operação mínimo seria de 0,019 R\$ por kWh produzido. Com isso, o capital investido é estimado em 4660 a 5820 R\$/kWh [59].

Considera-se que as tecnologias de energia das marés ainda não têm um viés comercial em grande escala [45], mas os benefícios a longo prazo deste recurso estimulam a construção de fontes que gerem informação para tomada de decisões pelos governos. Geralmente, com base no menor custo e de menor risco, a avaliação econômica torna-se um dos pontos cruciais no desenvolvimento, construção e manutenção de um projeto [47]. Os custos podem ser divididos em dois principais grupos: custos de instalação e custos de operação de usinas de energia das marés [47].

Os desenvolvedores de novas tecnologias devem levar em consideração a grande importância dos *designers*. Pois esses projetos são uma possível solução para comunidades com pouca informação e com difícil acesso a eletricidade. Tendo isso em vista, deve-se trabalhar em conjunto com a comunidade, podendo, até mesmo incentivar a criação de emprego, proporcionando, desse modo, retornos significativos para as comunidades locais [47].

Apesar do desenvolvimento de protótipos, equipamentos e pesquisas sobre energia marítima, o crescimento comercial é lento. Como na Baía de Fundy, Escócia e Canadá, que de nove possibilidades de projetos, apenas um foi de fato implantado. Esses atrasos se devem à falta de financiamento, incertezas, riscos relacionados à tecnologia, infraestrutura, suprimentos, aceitação da comunidade, impacto ambiental e política governamental. Isso é comum em casos de inovação com alto custo de capital, pois não se possui um histórico operacional para reduzir incertezas para os investidores, seguradoras e futuros desenvolvedores [60].

Às vezes, quando a incerteza é alta, é melhor esperar do que realizar o empreendimento. Isso por ser provável que nesse tempo de espera algum risco seja resolvido e o custo do projeto reduzido [60]. Essa decisão de atraso pode ser feita por meio de um modelo de avaliação e precificação

adaptado de Black e Scholes [61]. Uma planta maremotriz exige grande investimento e conseqüentes escolhas: investir ou não, atrasar, alterar escala, construir em etapas e abandonar [62]. Há nisso duas opções para viabilizar o empreendimento: a operacional (melhorar as operações e fluxo de caixa ao longo do projeto) e a estratégica (por meio de projeto-piloto, aprendizagem, nova tecnologia) [62].

Além disso, Santos et al [63] comparam o valor presente líquido de investir em uma pequena central hidrelétrica com a opção de atrasá-la (esta foi mais vantajosa), atentando-se para a variabilidade dos preços de eletricidade. Porém, isso é mais fácil para tecnologias mais maduras em que os custos são mais previsíveis [60], diferentemente da de ondas e marés. Já Venetsanos et al e Kumbaroglu et al [64 e 65] fizeram essa análise para energia eólica e concluíram que é melhor atrasar o investimento por motivos econômicos e por impacto da curva de aprendizagem sobre os custos. Essa avaliação foi feita também na energia de ondas e marés por Shelley [60], lembrando que há muitas incertezas (políticas de governo, por exemplo) nessa modalidade e que podem ser atenuadas por construção em etapas ou redimensionar o projeto.

Shelley [60] aplicou o modelo de avaliação de opções reais [61] nos 10 MW em Fundy, Escócia, para decisão de atraso em investimento de energia maremotriz e para discutir a influência do governo. Percebeu que, dentre os fatores relevantes, estão o valor presente líquido, a taxa de retorno, a depreciação, a concorrência no mercado, os riscos, a aprendizagem adquirida, as taxas de juros, e a oportunidade de lucro que expira com o tempo. As políticas adotadas em Nova Escócia - Canadá são o plano de eletricidade renovável e o programa de compromisso de preço por 15-18 anos para até 20MW. Porém, as incertezas são muitas: grande capital inicial de investimento, possibilidade de atrasos, difícil cadeia de suprimentos, atrasos na construção, custo e desempenho da tecnologia, políticas governamentais incertas para além de 20 MW, rede de transmissão, contratos de compra de energia, clima, mudanças no mercado, efeitos ambientais e aceitação da população [60].

Consta-se que, para 10 MW de geração com quinze anos de duração e inflação de 2,1%, o custo total é de aproximadamente R\$ 334,5 milhões. E quando adepto ao programa governamental canadense de incentivo, o valor presente líquido é de R\$ 7,8 milhões e a taxa interna de retorno é de 11,42%. Ou seja, embora viável, é ainda muito arriscado e, assim, prevalece a decisão de atrasar, na expectativa que o valor de investimento e as incertezas diminuam com o tempo, visto que o valor da volatilidade de uma tecnologia inovadora (sem histórico operacional) é alto [66].

Estima-se que o custo da energia oceânica atingirá similitude com outras fontes limpas em 2040 [67]. Até lá, é necessário o apoio do governo ou as tarifas de eletricidade mais altas. O surgimento de uma indústria global de energia de marés para desenvolver conhecimento, produtos e serviços de ponta para o setor é um ponto interessante. O apoio do governo pode se dar por reduzir a incerteza e o custo de capital (financiamento), subsídios e bolsas para pesquisa, tarifas, licenças exclusivas, simplificação de

processos, suporte na caracterização de locais, educação da comunidade, avaliação ambiental e infraestrutura [60]. Além disso, as políticas governamentais precisam ser de longo prazo, não confusas e de valor suficiente [68].

Sabe-se que a implantação dessa nova indústria gera desenvolvimento econômico, conhecimento e tecnologia que podem transformar socialmente a comunidade na qual foi instalada, e isso pode ser uma motivação governamental. Uma barragem de maré pode ser usada para recreação e turismo, como La Rance [44].

Ademais, a fonte de energia de ondas e marés pode ser explorada por componentes que outras fontes já usam e isso daria confiança na previsão de custo. É necessário que haja marés de cinco metros ou mais para competir com plantas térmicas e, também, subsídios que tornem o custo atrativo. Todavia, este subsídio é difícil para uma vida útil longa de 60 anos que barragem possui [44].

Aliás, a previsibilidade da energia de marés (vantagem em relação à eólica e a de ondas) agrega valor em um futuro mercado de eletricidade. Já no presente, para aceitação comercial, precisa-se de preço competitivo em relação à eólica *offshore* [69]. O custo da eletricidade gerada, a segurança no fornecimento, os impactos ambientais, a disponibilidade de recursos e o risco de execução são fatores relevantes [69]. A variação batimétrica e as formas complexas da costa concentram energia de maré e, normalmente, nesses locais intensos a marinha mercante não atua e, portanto, não há impacto comercial pela instalação de uma geradora [69].

Sabe-se que, por exemplo, o potencial do Reino Unido é de 94 TWh/ano de eletricidade em água em profundidades de 40 m ou menos e o global é de 1100 TWh/ano [70]. Ainda não há uma produção comercial significativa de energia gerada por marés e, assim, os desafios são reduzir custo e conceber um histórico confiável de operação [69]. Além disso, reduzir custo da planta ou prolongar sua vida útil são maneiras de melhorar economicamente o projeto, visto que essa fonte renovável não consome combustível [69].

Vários dispositivos maremotrizes evoluíram para protótipos, sendo que alguns são similares a turbinas eólicas "marinizadas". No Reino Unido, os protótipos estão entre R\$ 25.250 e R\$ 40.400 por MW e entre R\$ 505 e R\$ 934 por MWh (4-7 vezes maior que a geração a gás). Porém, como são tecnologias imaturas, podem reduzir o custo com o tempo por meio de otimização do projeto detalhado, absorver aplicações de outros campos, pesquisa, economias de escala e aprendizagem em produção, instalação, construção, operação e manutenção [69].

É evidente que a viabilidade econômica de energia de ondas depende do conversor e da capacidade deste de extrair máxima energia dos diferentes estados do mar, o qual gera uma aplicação de alta força em regime de baixa velocidade que é um bom contexto para emprego de hidráulica de alta pressão [73].

O custo operacional (opex) da geração é alto, R\$ 465 por MWh, devido à manutenção complexa exigida pelos sistemas de controle, lubrificação e caixas de câmbio. Com

uma taxa de retorno de 12%, os custos de produção de eletricidade ficam em R\$ 1121 por MWh. E aí está a vulnerabilidade do projeto, pois necessitaria de uma tarifa de suporte por 25 anos ou reduzir para nível semelhante à eólica *offshore* (R\$ 252 - 429 por MWh). Isto exigiria queda do custo de opex, o que demanda alto desenvolvimento em engenharia [69].

Além do mais, as instalações eólicas e marinhas geram energia por 30% a 40% do tempo; entretanto, a vantagem competitiva da geração de maré é a previsibilidade, e a desvantagem é o custo (eólica *offshore* custa R\$72/MWh) [69]. Uma tentativa de redução de custo é o uso da tecnologia CoRMaT, que usa dois rotores espaçados de contra rotação e passo fixo, e, dessa forma, diminui as dimensões, algumas peças, o peso e o cabeamento necessários, e com maior eficiência e menor gasto com manutenção [69]. É importante comprovar isso numa escala comercial. Outro ponto é que o mercado que paga por eletricidade de baixo carbono devido a pressões internacionais, além das incertezas quanto a combustíveis e inflação, gera um ambiente favorável a energia de marés que é uma das poucas energias limpas com previsibilidade de suprimento diário contratado [69].

Dessa forma, a energia marinha não atingiu escala comercial devido à oposição pública, falta de regulação, de desenvolvimento técnico, altos custos e problemas econômicos [71]. Para quebrar esta barreira, propõe-se um acesso a fundos governamentais de energia limpa, formação de grupo de empresas para investir nessa fase pré-comercial, tarifas de suporte (fornecedor receber taxas mais altas pela eletricidade) [72].

A realidade socioeconômica brasileira impede mais tarifas, pois a carga tributária já é alta e as tarifas de energia elétrica praticadas também o são. Além disso, a realidade fiscal do país inviabiliza a implantação de fundos. Porém, a associação de empresas privadas pode funcionar bem. A COPPE e a empresa Engie fizeram parceria para usina de ondas; e o governo poderia dar incentivos fiscais a empresas que investirem nessa tecnologia.

Calcula-se o ponto de equilíbrio sobre o custo de capital de uma geradora maremotriz para produção de eletricidade em R\$ 2.279.700 por MW com base no caso da Irlanda; o que não é baixo. Isso sentencia a energia de marés como inviável neste contexto, embora tenha zero custo com combustíveis. Sabe-se que a solar (varia com intensidade fotovoltaica) e eólica (varia com velocidade dos ventos) são imprevisíveis e dependentes das condições do tempo. Já a de maré tem a vantagem de ser previsível (deriva das forças gravitacionais) [74]. Porém, a produção ao longo do dia varia, o que é um desafio para operadores do sistema e demanda reforço na rede e, portanto, significa custos extras [75]. A rotação da Terra em relação ao Sol e a Lua produzem ciclo de 12,4 horas, e, assim, gera duas alturas de marés altas e duas baixas por dia [74]; ou seja, são quatro picos por dia, pois a maré entra e sai duas vezes em um dia. Os benefícios sociais da energia maremotriz como geração de empregos locais, melhoria na infraestrutura e no padrão de vida de áreas afastadas são difíceis de mensurar [74].

O custo de uma usina de energia das ondas de 1 MW no Brasil é de R\$ 24.810.000,00 (alto custo que gera baixa oportunidade de comercialização) [76]. O fator de capacidade anual é 58% na média nacional e 70% na usina no Porto do Pecém [77]. O custo de operação e manutenção (O&M) na Usina de ondas de Pecém é estimado, pois o projeto é pré-comercial, em R\$ 698 por kW, segundo o IPCC [76]. O financiamento pelo BNDES é uma opção de taxa de juros menores. O preço de venda da energia para fazer o projeto de usina de ondas viável economicamente deve ser de R\$ 670 por MWh [76]. Este valor está bem acima do praticado no mercado conforme consta na Tabela 1 [78]. Se forem usadas políticas públicas parecidas com o PROINFA para incentivar essa modalidade energética, pode-se operar com preço de venda em R\$ 310 por MWh, graças aos respectivos incentivos que cobririam a diferença entre custo e venda. E se a fonte marinha for tratada do mesmo modo à energia eólica na questão de incentivos do governo, seria possível operar com preço de venda em R\$ 100 por MWh de acordo com o estudo de apresentado por Martín [76], de maneira que o governo arcaria com a diferença entre custo e venda.

Tabela 1: 27º Leilão de Energia Nova A-4, 2018. Fonte: [78].

Fonte	Preço referência (R\$/MWh)	Preço venda (R\$/MWh)
RIO, CGH - CENTRAL DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA	291,00	197,27
RIO, PCH - PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA	291,00	198,47
BAGACO DE CANA	329,00	198,92
VENTO	255,00	67,60
RADIACAO SOLAR GLOBAL	312,00	117,63

Portanto, fica como expectativa a possibilidade de aprendizado e, por consequência, a redução de custos, similarmente ao que ocorreu com a energia eólica [76]. Dessa maneira, considerando tudo isso, estima-se um custo de R\$ 268 por MWh em 2020. No mundo, para um fator de capacidade de 70%, o valor está entre R\$ 300 e R\$700 por MWh, o que é congruente com o cenário brasileiro [76]. Vale lembrar que fator de capacidade de uma planta de geração de energia elétrica é a razão entre a produção efetiva dela em um período e a capacidade total máxima neste mesmo período.

7 Planejamento, Gestão e Políticas

Os legisladores, já em 2001, aprovaram o Projeto de Lei 4.798/01 que oferece os mesmos benefícios das pequenas centrais hidrelétricas (PCH) à energia maremotriz de potência 5-50 MW [79]. Os benefícios são a redução de no mínimo 50% das tarifas de uso da rede de transmissão e a “permissão para comercializar energia elétrica com consumidores cuja carga seja maior ou igual a 500 quilowatts” [79]. Como o Brasil possui grande potencial maremotriz, especialmente no Amapá e Maranhão, que possuem maiores variações de maré, isso pode ser uma boa alternativa contra a crise energética. A principal vantagem é a previsibilidade e, mesmo que haja impactos ambientais e sociais (pesca), essa fonte não pode ser menosprezada [80].

Discorre-se, por meio de estudo de caso de um conversor maremotriz instalado na Irlanda do Norte [81], que a aceitação pública de projetos de energia renovável depende da percepção da comunidade sobre impactos e melhorias. Ações políticas sobre energia de marés impulsionaram o fomento desta no Canadá [25], na França, em Portugal, no Reino Unido e nos EUA, sobretudo, com o intuito de diversificar a matriz e reduzir a dependência de combustíveis fósseis e as emissões [82].

Consta-se em Rourke et al [25] os seguintes mecanismos políticos de fomento da energia marinha, cuja possibilidade de aplicação no Brasil deve ser verificada:

- Incentivos financeiros e fiscais, isto é, créditos fiscais, redução de impostos, empréstimos, abatimentos e pagamentos de produção (subsídio aos fornecedores de eletricidade). Essas medidas trazem competitividade à energia de marés, embora se sabe que o Brasil passa por uma crise fiscal séria com grandes déficits no orçamento federal o que impediria essa adoção de maneira efetiva;
- Investimentos em P&D para as tecnologias de energia das marés e ondas realizadas em universidades, instituições públicas e empresas privadas. A COPPE, por exemplo, firmou parceria com a empresa Tractebel Energia (atual Engie) para a realização de um projeto piloto de usina de ondas *onshore* no Porto de Pecém - Ceará (por conta dos ventos alísios). O projeto de R\$ 15 milhões e capacidade de 50 kW foi, de fato, implantado, porém o contrato foi encerrado, e hoje a usina está abandonada. A COPPE também tem uma parceria com a empresa Furnas e a empresa Seahorse Wave Energy, para uma usina de ondas *offshore* de R\$ 9 milhões com capacidade instalada de 100 kW no Rio de Janeiro - Copacabana, ainda na fase de projeto [66]. No Brasil, devido às dificuldades do orçamento estatal, o caminho que parece mais factível é a parceria público-privada;
- Tarifas *feed-in* que incentivam a aplicação de energias renováveis, de maneira que os fornecedores de energia elétrica são obrigados a comprar eletricidade renovável a preços de mercado superiores aos estabelecidos no país. É o melhor método de fomento por proporcionar um mercado estável e lucrativo. O Brasil já descartou essa possibilidade e escolheu *net metering*. Além do mais, as contas de energia no Brasil já são altas, e os fornecedores, ao serem obrigados a comprar energia mais cara, poderiam repassar esses valores aos consumidores e agravariam o quadro econômico do país;
- Taxas de *carbono* e créditos de carbono estão relacionados ao compromisso ambiental em relação às emissões sob justificativa de se proteger das mudanças climáticas. Aplicá-los na sociedade e empresas brasileiras é arriscado, pois a carga tributária já é alta e o custo Brasil também, o que prejudicaria os negócios e a renda da população. Porém, é possível a venda de créditos

a outros países, em especial os desenvolvidos, que queiram investir em renováveis aqui no país caso não seja possível no território da respectiva nação. Assim, os estrangeiros cumpririam seus objetivos de redução de emissões por meio do Brasil;

- Metas obrigatórias de energia renovável, a qual é popular nos países desenvolvidos. Trata-se de requerer uma porcentagem fixa de eletricidade a ser gerada por fontes renováveis. É uma boa estratégia de longo prazo, mas para países em desenvolvimento como o Brasil pode gerar uma forte carestia no momento de aplicação e penalizar os mais pobres;
- Melhorias no processo de planejamento, onde as autoridades, conscientes da importância da energia renovável, devem conduzir um planejamento estratégico de energia em nível local, regional e nacional. Ponto indispensável ao Brasil. O processo de planejamento governamental é uma barreira.

Apesar do desenvolvimento técnico da energia de marés e ondas, não há incentivos significativos que permitam uma melhor exploração desse tipo de fonte [25]. As inseguranças no setor podem afastar os agentes privados, e por isso o governo deve definir diretrizes que proporcionem um ambiente mais estável aos investidores, já que se trata do desenvolvimento industrial do país e de possível geração de empregos [76]. Assim, baseado em estimativas de organismos internacionais, Martín [76] menciona que não haverá aplicação em escala das tecnologias marítimas para produção de energia no curto e médio prazo, mas que a partir de 2025 a expansão poderá ocorrer de forma acentuada.

Outro ponto importante para melhoria do setor é os equipamentos para construção de usinas de ondas serem ofertados pela indústria nacional, fazendo com que a licença ambiental seja de mais fácil obtenção. Aponta-se ainda que as estratégias de aproveitamento da energia oceânica passam por incentivo a P&D, crédito com prazo e taxas atraentes, otimização do Sistema Interligado Nacional e redução de custos por meio da substituição de materiais [76].

Como 80% da população vive até 80 km de distância da costa, as centrais geradoras baseadas na energia do mar, com o potencial gerador descrito na Tabela 2, estariam muito próximo do mercado de consumo, o que representaria uma redução de custo com redes de transmissão [83].

Tabela 2: Os tipos de energia do mar e potenciais. Fonte: [83].

Tipo	Fonte	Fase	Mundo [TW]	Brasil [GW]
Maré	Terra-Sol-Lua	comercial (madura)	3	15
Onda	Ventos	protótipos	10	114
Corrente	Ventos, Marés, Gradiente de Temperatura, Salinidade.	protótipos	5	-

Entretanto, visando a permitir o avanço do aproveitamento da energia maremotriz no Brasil, é necessário investir em pesquisa, de forma a identificar os potenciais de utilização da fonte, bem como para desenvolver as tecnologias necessárias para seu aproveitamento. Dessa forma, uma possibilidade seria destinar recursos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), instituído pela Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000.

Estefen [83] propôs um Plano Nacional de Energias Renováveis do Mar para desenvolver soluções e aproveitar o potencial do mar do Brasil, por meio de investimentos em pesquisa e organizados da seguinte maneira:

- Levantamento de dados de ondas nos estados CE, RJ, SC, RS;
- Levantamento de dados de correntes e marés em Estuário do Amazonas (AM), Baía de São Marcos (MA) e Estuário do Rio Bacanga (MA);
- Conversor *Onshore* no Porto de Pecém (já implantado);
- Implantação de conversor de ondas onshore em SC;
- P&D de conversor de ondas offshore.
- Laboratório Maremotriz do Bacanga - MA (Projeto);
- P&D conversor de correntes no Amapá;
- Avaliação técnico-econômica das energias do mar e respectivos impactos socioambientais;
- Promoção e incentivo para o aproveitamento das fontes renováveis do mar e identificar as questões legais.

A fonte de energia do mar pode contribuir para a segurança energética, diversificar a matriz energética e mitigar o risco hidrológico. Por isso é justificável políticas públicas para seu desenvolvimento e redução de custos [84]. Não apenas analisar sobre o vetor contábil, mas, sobretudo, também por outros vetores como o geopolítico, social e garantia de fornecimento.

Ressalta-se que existem na legislação brasileira diversos incentivos para implantação de empreendimentos de geração de energia elétrica com base em fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa. Entre os incentivos existentes na legislação, destacam-se os descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição e a possibilidade de comercialização direta da energia produzida com consumidores especiais com carga acima de 500 kW. Além disso, os leilões de compra de energia realizados pelo governo federal, considerando a compra de fontes exclusivas, como ocorre com eólica, solar e PCHs, são, no modelo do setor, fundamentais para o aumento de geração das fontes renováveis.

8 Conclusões

A energia do mar mostra-se uma alternativa de geração de energia ainda não muito divulgada no Brasil por ter sua rentabilidade contestada. Porém, a fim de diminuir a

dependência por combustíveis fósseis, aumentar a segurança energética e da preocupação com o meio ambiente e das mudanças climáticas, estima-se que a partir de 2025 a expansão poderá ocorrer de forma mais acentuada e constante, sustentada pelo avanço da tecnologia, pesquisa e curvas de aprendizagem, com foco em aumentar o rendimento e eficácia do processo.

Todas as tecnologias de geração de energia elétrica a partir do mar estão em fase de desenvolvimento, com exceção do aproveitamento da energia potencial em usina maremotriz (contida no movimento das águas). Dessa forma, nenhuma apresenta custos competitivos frente às demais. Entretanto, o Brasil atende com razoabilidade os aspectos econômicos (parceria com setor privado), técnicos (projeto piloto já instalado), ambientais (potencial maremotriz na região norte, além de grande extensão marítima-costeira) e políticos (compromisso com fontes renováveis) para explorar essa alternativa, visto que a questão geopolítica exige diversificação da matriz energética para segurança do fornecimento e da soberania do país.

Ao contrário de outras fontes energéticas, a geração de energia do mar está livre de alguns problemas, tais como emissões de gases poluidores, poluição da água, derramamentos de óleo e produção de resíduos. Contudo, ainda há diversas investigações que precisam ser realizadas, para que ocorra o amadurecimento e aumento da confiabilidade dessa tecnologia, com o objetivo de obter novos aparatos de obtenção de energia elétrica cada vez mais robustos, viáveis e com boa relação custo-benefício.

Diante disso, o papel governamental é vital para o desenvolvimento dessa fonte de energia, uma vez que ela possui alto custo sem histórico comercial, além dos demais desafios já citados. Logo, um “Plano Nacional de Energia do Mar” que contemple parcerias com o setor privado é um caminho para exploração e expansão dessa geração renovável de eletricidade.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo - FAPES.

Referências

- [1] N.W. Tiwari, R.K. Mishra. *Advances Renewable Energy Source*. RSC Publishing, 2011, 586 pp.
- [2] MIRZAEI, A.; TANGANG, F.; JUNENG, L. Wave energy potential assessment in the central and southern regions of the South China Sea. Disponível em: < www.elsevier.com/locate/renene >. Acesso em: 28 set. 2015.
- [3] LOTTE, W. R.; TOMCZAK, G.V.; FERNANDES, O. F.; PEREIRA, R.; RICHOCK, B.; BUSNELLO L. D.; MARTINS, F. A *Energia das Marés*, 2008. Universidade Paranaense – UNIPAR.

Disponível

em:<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgVcMAB/maremotriz>> Acesso em: 09 set. 2015.

- [4] The Carbon Trust, *Future Marine Energy. Results of the Marine Energy Challenge: Cost Competitiveness and Growth of Wave and Tidal Stream Energy*, 2006. Report.
- [5] R. Alonso, M. Jackson, P. Santoro, M. Fossati, S. Solari, L. Teixeira, *Wave and tidal energy resource assessment in Uruguayan shelf seas*, *Renewable Energy* 114 (2017) 18-31.
- [6] Charlier RH. *Re-invention or aggiornamento? Tidal Power at 30 years. Renewable and sustainable energy reviews* 1998; 1(4): 271-89. Elsevier Science Ltd.
- [7] FREPLATA, *Análisis diagnóstico Transfronterizo del Río de la Plata y su Frente Marítimo*, Documento Técnico, Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo, 2004. Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31.
- [8] P. Moriarty, D. Honnery, *What is the global potential for renewable energy? Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 244-252.
- [9] Ministério de Minas e Energia, *Energia maremotriz*. Fonte: <http://www.mme.gov.br/>
- [10] L. Neto, P.B., O.R. Saavedra, N.J. Camelo, R. M. Ferreira e L.S.A. Ribeiro. *Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol.19 Nº 2, 2011, pp. 219-232.
- [11] Th.J. Hammons. “Tidal Power”. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 8, Issue 3, pp. 419-433. March, 1993.
- [12] Cepa, USP. *Energia das marés*. Fonte: www.cepa.if.usp.br
- [13] Empresa de Pesquisa Energética, *Fontes de energia*. Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>.
- [14] Kowalik Z. *Tide distribution and tapping into tidal energy*. *Oceanologia* 2004; 46:291-331.
- [15] Prandle D. *Simple theory for designing tidal power schemes*. *Advances in Water Resources* 1984; 7:21-7.
- [16] Fraenkel PL. *Power from marine currents*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 2002; 216:1-14.
- [17] Linus Hammar, JimmyEhnberg, AlbertoMavume, BoaventuraC.Cuamba, SverkerMolander, *Renewable ocean energy in the Western Indian Ocean*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012; 4: 4938-4951.
- [18] Khan J, Bhuyan G. *Ocean Energy: Global Technology Development Status*. Surrey: Powertech Labs; 2009.
- [19] Zabihian F, Fung AS. *Review of marine renewable energies: Case study of Iran*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15:2461-74.
- [20] Rourke OF, Boyle F, Reynolds A. *Tidal energy update* 2009. *Applied Energy*. 2010; 87:398-409.



- [21] Grabbe M, Lalander E, Lundin S, Leijon M. A review of the tidal current energy resource in Norway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13:1898–909.
- [22] Charlier R H, Justus JR. *Ocean Energies—Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources*. Elsevier; 1993.
- [23] Antonio F, de OF. Wave energy utilization: are view of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14:899–918.
- [24] Thomas G. The Theory Behind the Conversion of Ocean Wave Energy: A Review. In: Cruz J, editor. *Ocean Wave Energy—Current Status and Future Perspectives*. Heidelberg: Springer; 2008. p.41–91.
- [25] F. O. Rourke, F. Boyle, A. Reynolds. Tidal energy update 2009. *Applied Energy* 87 (2010) 398–409.
- [26] Zeng S., Liu Y., Liu C., Nan X. A review of renewable energy investment in the BRICS countries: History, models, problems and solutions *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 74:860–872.
- [27] TESSLER, M. G.; GOYA, S.C. Conditioning factors of coastal processes in the Brazilian Coastal Area. *Revista do Departamento de Geografia*, n. 17, São Paulo, 2005.
- [28] Centrais Elétricas Brasileiras S/A. “Aproveitamentos Maremotrizes na Costa do Maranhão, Pará e Amapá-Inventário Preliminar”. ELETROBRÁS. 1981.
- [29] Sh.L. Lima, O.R. Saavedra, A.K. Barros e N.J. Camelo. “Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas”. 5th Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission. UNESP. Vol.1, pp.1-6. 2003.
- [30] R.M. Ferreira and S.F. Estefen. “Alternative Concept for Tidal Power Plant with Reservoir Restrictions”. *Renewable Energy*. Vol.34, Issue 4. pp.1151-1157. 2009.
- [31] FERREIRA R. L.; ESTEFEN S. F. Alternative Concept for tidal Power plant with reservoir restrictions. *Renewable Energy*, 2009. 34, 1151-1157.
- [32] FLEMING, F.P. Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), 2012.
- [33] L. Neto, P.B., Oliveira, D.Q., N.J. Camelo e O.R. Saavedra. “Estudo do Potencial para Geração de Energia Elétrica a partir de Fonte Maremotriz”. The 8th. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission CLAGTEE. Anais do CLAGTEE 2009. Vol.1, pp.709-713. 2009.
- [34] L. Neto, P.B., O.R. Saavedra, N.J. Camelo e L.S.A. Ribeiro. “Viabilidade de Pequenos Aproveitamentos para Geração de Energia Eletromaremotriz”. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Anais do CBA 2010. Vol.1, pp. 66286-66292. 2010.
- [35] FLEMING, F.P. Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), 2012.
- [36] SESMIL, E. L. F. *Energia Maremotriz: Impactos Ambientais e Viabilidade Econômica no Brasil*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2013.
- [37] NETO, P.B.L.; SAAVEDRA, O.R.; CAMELO, N.J.; RIBEIRO, L.A.S.; FERREIRA, R.M. Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências. Instituto de Energia Elétrica. Universidade Federal do Maranhão. São Luís, Brasil, 2011.
- [38] SAVEDRA, O. R. *Potencial Energético do Maranhão: Energias Oceânicas*. São Luis: Universidade Federal do Maranhão, 2016.
- [39] R.H. Clark. “Elements of Tidal-Electric Engineering”. Wiley-IEEE Press, p. 280. 2007.
- [40] J. Pierre Frau. “Tidal Energy: Promising Projects-La Rance: a successful industrial-scale experiment”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 8, Issue 3, pp. 552-558. September, 1993.
- [41] SOERENSEN, H. C; HANSEN, L. K. & HANSEN, R. European Thematic Network on Energy. In: Final Report NNE5-1999-00438, EMU, January, Denmark, 2003. Disponível em: <<http://www.engineering.lancs.ac.uk/REGROUPS/LUREG/REPORTS/ThematicNetwork.pdf>>. Acesso em 25/04/2016.
- [42] WAVENET. Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy. European Community, 2003.
- [43] D.C. Hockin and D.M. Parker, 'The effects of development of a tidal barrage upon the water and sediment quality of the Mersey estuary (UK) and its biota', *Water Science Technology*, Vol 20, No 6/7, 1988, pp 229-233.
- [44] Baker, Clive. Tidal power. *ENERGY POLICY*. October, 1991.
- [45] LOTTE, W. R.; TOMCZAK, G.V.; FERNANDES, O. F.; PEREIRA, R.; RICHOCK, B.; BUSNELLO L. D.; MARTINS, F. A *Energia das Marés*, 2008. Universidade Paranaense – UNIPAR.
- [46] Sarmento, A. Cruz, J. *Energia das ondas introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais*. Instituto do Ambiente Alfragide. 2004.
- [47] Segura E., Morales R., Somolinos J.A., López A. Techno-economic challenges of tidal energy conversion systems: Current status and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 77 536-550.
- [48] Frid C., Andonegi E., Depestele J., Judd A., Rihan D, Rogers S. I., Kenchington E. The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices. *Environmental Impact Assessment Review*. 2012. 32 133-139.
- [49] Wolf J, Walkington IA, Holt J, Burrows R. Environmental impacts of tidal power schemes. *Proc Inst Civil Eng-Marit Eng* 2009; 162:165–77.
- [50] Burton NHK, Musgrove AJ, Rehfishch MM, Clark NA. Birds of the Severn Estuary and Bristol Channel: their current status and key environmental issues. *Mar Pollut Bull* 2010; 61:115–23.
- [51] Duriez O, Saether SA, Ens BJ, Choquet R, Pradel R, Lambeck RHD, Klaassen M. Estimating survival and movements using

- both live and dead recoveries: a case study of oystercatchers confronted with habitat change. *J Appl Ecol* 2009; 46:144–53.
- [52] Langhamer O. Effects of wave energy converters on the surrounding soft-bottom macrofauna (west coast of Sweden). *Mar Environ Res* 2010; 69:374–81.
- [53] Dempster T. Temporal variability of pelagic fish assemblages around fish aggregation devices: biological and physical influences. *J Fish Biol* 2005; 66:1237–60.
- [54] Fedoryako BI. Fish accumulations in the open ocean near stationary buoys. *J Ichthyology* 1988; 28:667–9.
- [55] Boehlert WG, McMurray GR, Tortorici CE. Ecological Effects of Wave Energy Development in the Pacific Northwest. A Scientific Workshop, October 11–12, 2007. NOAA Technical Memorandum NMFS-F/SPO-92; 2007.
- [56] DFO. Assessment of Tidal and Wave Energy Conversion Technologies in Canada. DFO Canada, Scientific Advisory Secretariat. Scientific Advisory Report 2009; 2009/064, Ottawa; 2009.
- [57] R.H. Charlier and C.W. Finkl. “Ocean Energy. Tide and Tidal Power”. First Edition. Springer, p. 262. 2009.
- [58] GONÇALVES, W.M.; FEIJÓ, F.T. ABDALLAH, P.R. Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil.
- [59] LIMA, S. L.; SAAVEDRA, O. R.; BARROS, A. K.; CAMELO, N. J. Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectiva, Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2013.
- [60] Shelley L. MacDougall, The value of delay in tidal energy development, *Energy Policy* 87 (2015) 438–446.
- [61] Black, F., Scholes, M., 1973. The pricing of options and corporate liabilities. *J. Political Econ.* 81, 637–659.
- [62] Trigeorgis, L., 1996. Real options: managerial flexibility and strategy in resource allocation. MIT Press, Cambridge, p. 1996.
- [63] Santos, L., Soares, I., Mendes, C., Ferreira, P., 2014. Real options versus traditional methods to assess renewable energy projects. *Renew. Energy.* 68, 588–594.
- [64] Venetsanos, K., Angelopoulou, P., Tsoutsos, T., 2002. Renewable energy sources project appraisal under uncertainty: the case of wind energy exploitation within a changing energy market environment. *Energy Policy* 30, 293–307.
- [65] Kumbaroglu, G., Malener, R., Demirel, M., 2008. A real options evaluation model for the diffusion prospers of new renewable energy power generation technologies. *Energy Econ.* 30, 1882–1908.
- [66] Synapse Energy Economics, 2013. Response to Undertaking U-2, Nova Scotia Utility and Review Board in the Matter of the Electricity Act and The Tidal Energy Feed-in Tariff Rate for Development Tidal Arrays, T-25. (http://nsuarb.novascotia.ca/sites/default/files/documents/electricityarchive/decision_tidal_fit.pdf) (accessed 10.11.14).
- [67] Weiss, J., Sarro, M., Berkman, M., 2013. A Learning Investment-based Analysis of the Economic Potential for Offshore Wind: The case of the United States. (<http://www.cleanenergystates.org/resource-library/resource/report-a-learning-investment-based-analysis-of-the-economic-potential-for-offshore-wind-the-case-of-the-united-states#.UxoEksuPI1I>) (accessed 22.05.15).
- [68] Leete, S., Xu, J., Wheeler, D., 2013. Investment barriers and incentives for marine renewable energy in the UK: an analysis of investor preferences. *Energy Policy* 60, 866–875.
- [69] C.M. Johnstone, D. Pratt, J.A. Clarke, A.D. Grant. A techno-economic analysis of tidal energy technology. *Renewable Energy* 49 (2013) 101-106.
- [70] IEA-OES. Ocean Energy Systems Implementing Agreement: an international collaborative programme, 2008.
- [71] Kerr, S., Watts, L., Colton, J., Conway, F., Hull, A., Johnson, K., Jude, S., Kannen, A., MacDougall, S., McLachlan, C., Potts, T., Vergunst, J., 2014. Establishing an agenda for social studies research in marine renewable energy. *Energy Policy* 67, 694–702.
- [74] E. Denny. The economics of tidal energy. *Energy Policy* 37 (2009) 1914–1924.
- [75] DCENR, 2006. Department of Communications, Energy and Natural Resources (DCENR) Ireland-all island renewable grid study. Available: <http://www.dcenr.gov.ie>
- [76] Martín, J. J. N. Avaliação Econômica dos Recursos Energéticos das Ondas do Mar. UFRJ/COPPE, 2012.
- [77] RICARTE, E., 2007. Avaliação de Sítios para o Aproveitamento dos Recursos Energéticos das Ondas do Mar. Tese de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [78] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/leiloes?_afLoop=216647681710160&_adf.ctrl-state=1af1ugm85p_1#!%40%40%3F_afLoop%3D216647681710160%26_adf.ctrl-state%3D1af1ugm85p_5
- [79] Câmara dos Deputados. Comissão aprova controle sobre energias alternativas, 2001. Fonte: <http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/NAO-INFORMADO/11168-COMISSAO-APROVA-CONTROLE-SOBRE-ENERGIAS-ALTERNATIVAS.html>
- [80] Câmara dos Deputados. Estudo analisa aproveitamento dos oceanos para produção de eletricidade. Fonte: <http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/radio/materia/s/COM-A-PALAVRA/536481-ESTUDO-ANALISA-APROVEITAMENTO-DOS-OCEANOS-PARA-PRODUCAO-DE-ELETRICIDADE-NO-BRASIL.html>
- [81] Patrick Devine-Wright. Enhancing local distinctiveness fosters public acceptance of tidal energy: A UK case study. *Energy Policy* 39 (2011) 83–93.
- [82] Ozturk M, Bezir NC, Ozek N. Hydropower-water and renewable energy in Turkey: sources and policy. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(3):605–15.



- [83] ESTEFEN, S. F. Energias Renováveis do Mar. Apresentação à Câmara dos Deputados. 2008.
- [84] CASTRO, Nivalde José; DANTAS, Guilherme de A; MARTINI, Sidnei; BRANDÃO, Roberto, TIMPONI, Raul R., 2009. A Importância das Fontes Alternativas e Renováveis na Evolução da Matriz Elétrica Brasileira. In: Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável - Fundación MAPFRE. Rio de Janeiro.
- [85] Energy Information Administration (EIA). Annual Energy Outlook 2018 - AEO2018. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>. Acessado 02/10/2018.
- [86] UNESP. Turbinas Hidráulicas. Disponível em <http://www.dem.feis.unesp.br/intranet/capitulo8.pdf>. Acesso 04/10/2018.