

ESTUDO DA EXPLORAÇÃO, GERAÇÃO DE ELETRICIDADE, IMPACTOS AMBIENTAIS E VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS DA ENERGIA DE MAREMOTRIZ

Antônio Derick Ribeiro Bispo¹
Jean Marcelo Santana Bonfim
José Raimundo de Souza Pereira Júnior
Leticia Carvalho Machado
Murilo Matos Oliveira Gama
Túlio Aguiar de Almeida



RESUMO

A energia das marés, embora conhecida e explorada desde a Idade Média, configura-se hoje como uma fonte alternativa para a geração de energia elétrica. A energia das marés é um tipo de energia renovável, não poluente e têm seus custos comparáveis aos de uma hidroelétrica. O aproveitamento do comprovado potencial energético dos oceanos configura, atualmente, uma possibilidade promissora para produzir energia limpa e sem impactos ao meio ambiente. Marés, ondas e correntes marinhas são recursos renováveis cujo aproveitamento para a geração de eletricidade registra significativos avanços tecnológicos, encontrando respaldo nos princípios de acessibilidade, disponibilidade e aceitabilidade, propalados pelo Conselho Mundial de Energia para o desenvolvimento de alternativas energéticas (FERREIRA, 2007). O objetivo deste trabalho é não só apresentar a fonte de energia limpa e sustentável, através de marés, como também mostrar como ocorre a geração, seus impactos ambientais, sua viabilidade econômica, como também buscar e observar a necessidade de que o tema seja melhor abordado, conhecido, estudado e posto em prática.

PALAVRAS-CHAVE

Energia. Marés. Meio Ambiente. Renovável. Maremotriz.

ABSTRACT

Tidal energy, although known and exploited since the Middle Ages, appears today as an alternative source for generating electricity. Tidal energy is a type of renewable energy, clean and have their costs comparable to those of a hydroelectric. The use of proven energy potential of the oceans sets currently a promising possibility to produce clean energy with no impact to the environment. Tides, waves and ocean currents are renewable resources whose use for electricity generation records significant technological advances, finding support on the principles of accessibility, availability and acceptability, touted by World Energy Council for the development of alternative energy sources (FERREIRA, 2007). The objective is not only present source of clean and sustainable energy through tides, as the generation occurs, environmental impact, economic viability, as well as search and respects the need for the topic is best addressed, known, studied and implemented.

KEYWORDS

Energy. Tides. Environment. Renewable. Tidal.

1 INTRODUÇÃO

A conversão de energia para as atividades humanas configura-se em uma das mais importantes buscas ao longo da história. As tecnologias associadas à conversão e à utilização de energia têm marcado profundamente a evolução das sociedades (FERREIRA, 2007).

As fontes de energia renováveis ainda são pouco utilizadas devido aos custos de instalação, à inexistência de tecnologias e redes de distribuição experimentadas e, em geral, ao desconhecimento e falta de sensibilização para o assunto por parte dos consumidores e dos municípios (SOUSA, 2007).

Ao ritmo que cresce o consumo dos combustíveis fósseis, e tendo em conta que se prevê um aumento ainda maior a curto/médio prazo, colocam-se dois importantes problemas: questões de ordem ambiental e o fato dos recursos energéticos fósseis serem finitos, ou seja, esgotáveis. As fontes de energia renováveis surgem como uma alternativa ou complemento às convencionais (SOUSA, 2007).

A crescente demanda por energia associada ao curto horizonte dos combustíveis fósseis, bem como os aspectos ambientais relacionados ao consumo destes, tem desafiado o setor energético mundial a buscar novas fontes energéticas, sendo algumas destas bastante promissoras e relativamente recentes.

Os mares constituem uma fonte energética bastante promissora e, portanto, sua exploração não é recente. Registros históricos apontam o uso de moinhos movidos a marés (ou maremotrizes) por habitantes da costa do Atlântico Norte até, pelo menos, durante o início da Idade Média (CLARK, 2007).

Há milhares de anos os homens sabem que a lua tem alguma relação com as marés. Antes do ano 100 a.C., o naturalista romano Plínio escreveu sobre a influência da lua nas marés. Mas as leis físicas desse fenômeno não foram estudadas até que o cientista inglês Isaac Newton descobriu a lei da gravitação no século XVII (DANDOLINI, 2000).

As marés são oscilações rítmicas do nível do mar, causadas pela atração gravitacional do sol e da lua e rotação da Terra, e eventualmente, por eventos meteorológicos. A onda de maré carrega consigo grande quantidade de energia, sendo potencialmente uma fonte de energia para as atividades humanas (FERREIRA, 2007).

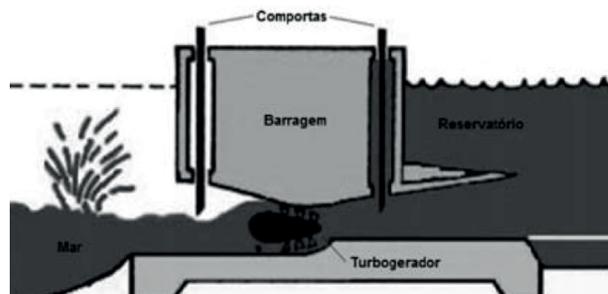
As massas oceânicas que estão mais próximas da lua sofrem uma alteração de intensidade significativamente superior às massas oceânicas mais afastadas da lua. É esse diferencial que provoca as alterações da altura das massas de água à superfície da Terra (DANDOLINI, 2000).

2 CARACTERÍSTICAS DA ENERGIA

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a energia maremotriz é uma forma de produção de energia proveniente da movimentação das águas dos oceanos, por meio da utilização da energia contida no movimento de massas de água devido às marés. Dois tipos de energia maremotriz podem ser obtidas: energia cinética das correntes devido às marés; e energia potencial pela diferença de altura entre as marés alta e baixa.

Os principais componentes de uma usina maremotriz são: barragem, turbogeradores, além de um ou mais reservatórios. Na Figura 1 são esquematizados os principais componentes de uma usina maremotriz.

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos componentes de uma usina maremotriz



Fonte: Massoud (2001).

A energia maremotriz possui características próprias, que variam enormemente de um projeto para outro, em função de suas condições de obtenção: características do local de exploração, sazonalidade e influência das condições de tempo e clima, método de exploração (diretamente relacionado com a tecnologia utilizada), entre outras condições.

As ondas possuem algumas características relevantes para definição da energia que transporta. Segundo Planeta COPPE (2004), a energia disponível nas ondas é maior quanto mais ao largo, ou seja, mais longe da costa. A sua intensidade diminui proporcionalmente à profundidade, devido à interação com o leito marinho. A energia contida nas águas profundas é de três a oito vezes maior que a existente em águas rasas, próximas à costa. Observa-se que ondas são classificadas quanto à profundidade da lâmina d'água do local aonde se encontra: *nearshore* (para regiões com profundidade variando de 8 a 20m) e *offshore* (para profundidades normalmente acima de 25m).

3 POTENCIAL

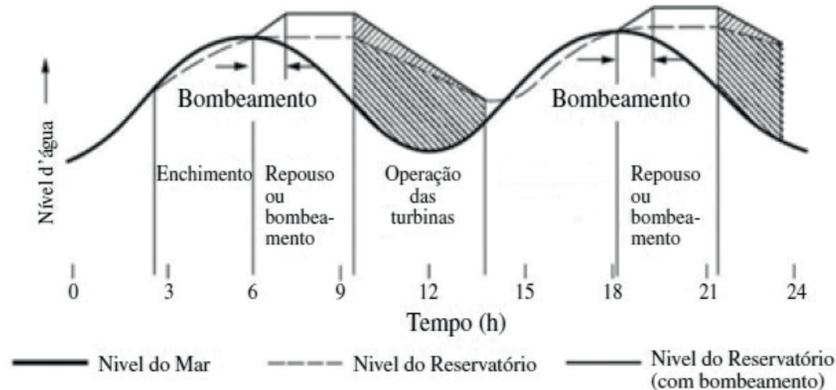
Segundo Domingos (2013), a energia proveniente do fluxo de corrente de marés, maremotriz, é uma das fontes alternativas de geração de eletricidade com grande potencial energético, porém, ainda pouco estudada e inexplorada no Brasil. Sistemas maremotrizes usam a energia proveniente das oscilações marítimas para transformar energia cinética e/ou potencial em eletricidade. Tais oscilações podem ser provocadas por influência de fenômenos naturais como fases da lua, movimentação de placas tectônicas e fenômenos climáticos em geral.

No entanto, é importante destacar que não são todas as localidades que disponibilizam condições adequadas para a implantação de usinas maremotrizes. Para que seja construído este tipo de usina, são necessários estudos preliminares das condições físicas e geográficas do local desejado. Estes estudos buscam definir o tipo de usina que será implantado, posição das turbinas, o modo que irá operar o sistema e como serão atendidas as necessidades previstas, além de outros parâmetros a serem compreendidos, de modo a garantir a viabilidade técnico-econômica de implantação da usina maremotriz (DOMINGOS, 2013).

O enorme potencial energético global aliado aos avanços nas tecnologias de aproveitamentos maremotrizes, tem tornado esta alternativa energética bastante atrativa inclusive sob o ponto de vista econômico. Existem duas formas principais de aproveitamento da energia potencial das marés: geração em maré vazante e geração em maré enchente. Além disso, é possível a combinação de ambas as formas. Quando o processo de geração ocorre apenas durante a maré vazante ou na maré enchente, é chamada de geração em efeito simples; quando ambas as formas são utilizadas, é chamada de geração em efeito duplo.

A geração em maré vazante é a mais simples estratégia de operação de uma usina maremotriz. Logo após a maré cheia, as comportas de enchimento do reservatório são fechadas. O processo de geração de energia é iniciado durante a maré vazante, quando a queda d'água é aproximadamente a metade da amplitude da maré, ou seja, há queda d'água suficiente para o início do funcionamento das turbinas. Esta operação é mantida até que a altura da queda d'água se torne a mínima possível para a geração de energia. Neste ponto, bloqueiam-se as passagens de água por meio das turbinas, cessando-se a geração de energia até que a altura da queda d'água torne-se novamente suficiente para o funcionamento das turbinas, isto após a maré alta seguinte. Na Figura 2 abaixo está demonstrado o processo de operação.

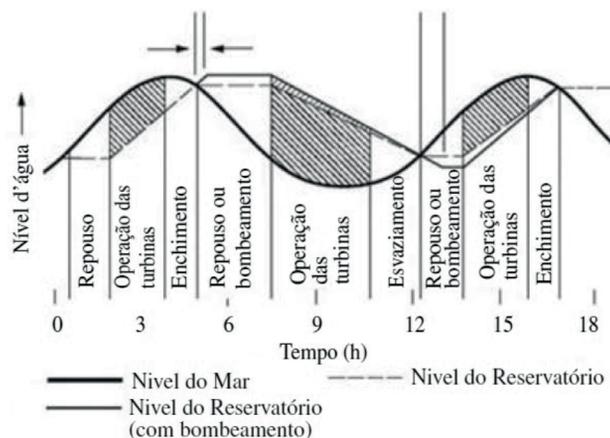
Figura 2 – Representação da geração em maré vazante em uma usina maremotriz



Fonte: Clarck (2007).

O processo de geração em maré enchente é análogo ao ilustrado na Figura 2, com a diferença de que nesse caso o processo de geração ocorre no sentido mar-reservatório. Na Figura 3 é demonstrada a combinação de ambas as formas de aproveitamento, ou seja, geração em efeito duplo.

Figura 3 – Representação da geração em efeito duplo em uma usina maremotriz



Fonte: Clarck (2007).

Considerando as características apresentadas em Planeta COPPE (2004) consta que a energia contida nas ondas pode ser medida pela equação (1) abaixo.

$$P = 0,49 \times H^2 \times T \quad (1)$$

Onde:

P é a energia, em kW/m;

H é a amplitude da onda;

T é o período.

4 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Assim como toda fonte de geração energia, a maremotriz também apresenta vantagens e desvantagens. Na Tabela 1 abaixo são apresentados alguns desses aspectos.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da energia maremotriz.

Vantagens	Desvantagens
Não é poluente	O fornecimento da energia das ondas não é contínuo
	Apresenta baixo rendimento, cerca de 20%
Fonte renovável	É fortemente dispendiosa
	Destrói habitats naturais de diversas espécies de animais
	Impossibilita a navegação
Não requer material muito sofisticado	Fornece <i>energia</i> durante apenas dez horas por dia
	São necessárias amplitudes de marés superiores a 5 metros para que este tipo de energia seja rentável

Fonte: Adaptado de Energias Renováveis.

Planeta COPPE (2004) apresenta como vantagem a modularidade dessa forma de geração energética, pois os projetos podem ser ampliados, interligados ou separados com certa simplicidade. Porém, verifica-se que essa modularidade é real apenas para os projetos que utilizam a energia das ondas, tanto *offshore* quanto *nearshore*. Quanto aos projetos que utilizam a energia das marés, essa modularidade é muito questionável, pois exige locais com características específicas para a sua viabilidade.

Os custos de conversão e transmissão de energia são diretamente proporcionais à distância da costa. Logo, os projetos *offshore* tendem a ser menos viáveis que os projetos *nearshore* (PLANETA COPPE, 2009).

5 ASPECTOS AMBIENTAIS

Embora a exploração da energia maremotriz não produza nenhuma poluição direta ao meio ambiente, é importante ressaltar que os efeitos da construção e operação de uma usina maremotriz em um estuário devem ser cuidadosamente avaliados, pois a sua instalação pode modificar algumas características naturais do local. Além disso, as possíveis alterações nas atividades humanas locais também devem ser avaliadas.

Os estuários são ambientes que envolvem processos complexos, onde há o encontro das águas interiores com as do mar. Devido às condições de afluxo e influxo do prisma da maré, o tempo de permanência dos nutrientes é maior em relação ao rio ou ao próprio mar. Esses fatores contribuem para a diversidade ecológica existente nos estuários, que, obviamente, é rompida pela criação de um barramento artificial. Os impactos na vida silvestre, peixes e aves migratórias são evidentes. A zona de intrusão salina é alterada, contribuindo para o desaparecimento de algumas espécies e o aparecimento de outras naquele ambiente (FERREIRA, 2007).

A construção de uma barragem em um estuário pode resultar em efeitos diretos sobre o ecossistema local. Portanto, é importante ressaltar que tais efeitos devem ser considerados tanto no projeto e construção, quanto na operação da usina.

Alguns dos aspectos que devem ser analisados são as possíveis alterações na qualidade da água, ou seja, alterações nas características químicas da água, tais como oxigenação e salinização; além da própria morfologia do estuário, que pode ser alterada devido às possíveis modificações nos regimes de sedimentação e erosão.

6 PROJETOS

Embora o potencial energético global das marés seja enorme, apenas alguns poucos projetos de usinas maremotrizes se tornaram realidade até o momento. Algumas das principais referências em termos de projetos já implementados são a França (La Rance), Canadá (Annapolis Royal) e Rússia (Kislaya Guba), além de inúmeros pequenos projetos de pequeno porte em operação na China.

A usina de maremotriz de La-Rance é, atualmente, a maior do mundo em potência instalada-249MW. A estratégia de operação da usina é uma combinação de efeito duplo e bombeamento. A produção anual da usina pode chegar a 544GWh, sendo que 10% deste total é usado para fins de bombeamento. No estuário de La Rance, as marés podem alcançar até 14m, portanto o bombeamento geralmente é utilizado em marés abaixo de 9m. Além da geração de eletricidade, outros benefícios provenientes da construção da usina foram observados: a usina tornou-se um atrativo turístico na região; a indústria pesqueira não sofreu qualquer dano durante os anos de operação da usina; surgimento de novas comunidades planejadas próximas à usina (CHARLIER, 2009).

A usina maremotriz de Annapolis Royal foi construída na década de 1980, utilizando-se uma barragem já existente no Rio Annapolis. A potência instalada da usina é de 17,9MW. Devido a questões ambientais o nível do reservatório deve ser mantido a níveis abaixo do que foi inicialmente. Desta forma, a produção anual da usina é menor que os 50GWh estimados inicialmente. Apesar desta restrição operacional, a usina é despachada comercialmente e sendo, portanto, considerada um projeto bem-sucedido (CLARK, 2007).

A usina maremotriz de Kislaya Guba é considerada um caso especial de exploração da energia maremotriz. Construída na década de 1960 no mar de Barents, a usina possui 400kW de potência instalada e foi idealizada para fins experimentais apenas: condições climáticas bastante severas e pequenas amplitudes de marés (1,3 a 3,9m) tornaram a usina inviável para fins comerciais. Além disso, a usina permaneceu quase uma década fora de operação. Isto fez com que as características ambientais do estuário fossem profundamente alteradas durante aquele período (SAAVEDRA, 2011).

No Brasil, as maiores amplitudes de marés se encontram na costa norte. Estudos realizados ainda na década de 1980 revelaram alguns locais potencialmente favoráveis à exploração da energia maremotriz (ELETROBRÁS, 1981). A primeira usina da América Latina movida pela força das ondas do mar começou a funcionar no Porto de Pecém, no litoral brasileiro no Estado do Ceará, a cerca de 60km da capital Fortaleza. O sistema de captação da energia das ondas consiste em dois braços mecânicos com boias flutuadoras presas na ponta de cada um deles (FIGURA 4). A energia é gerada pela movimentação das boias, que ativa um sistema de bombas hidráulicas, reservatório interno de água doce e ambiente de alta pressão.

Figura 4 – Ilustração dos braços mecânicos flutuantes que ativam bombas hidráulicas a partir do movimento das ondas



Fonte: ECODEBATE (2012).

7 ASPECTOS ECONÔMICOS

A avaliação econômica de um projeto de usina maremotriz deve ponderar tanto aspectos diretos quanto indiretos. Entre os aspectos diretos estão os custos de construção, operação e manutenção da usina, além dos benefícios promovidos pela própria geração de eletricidade. Os aspectos indiretos estão relacionados aos impactos ambientais e socioeconômicos associados a usina (CLARCK, 2007). O desenvolvimento de atividades turísticas no entorno da usina e a utilização da barragem como via de acesso rodoviário são exemplos de benefícios indiretos.

Projetos de usinas maremotrizes possuem alto custo inicial e longos períodos de construção. As obras de construção civil representam o item mais custoso no orçamento da usina, o que conduz a um relativo aumento do custo unitário do kW instalado. No entanto, é uma fonte primária virtualmente inesgotável, os custos associados à operação da usina são mínimos, portanto os investimentos em construção e operação podem ser facilmente recuperados por meio de economia em combustíveis.

Ao contrário de outras fontes energéticas, a geração maremotriz está livre de alguns problemas tais como: emissões de gases poluidores, poluição da água, derramamentos, também, devem ser observados sob o ponto de vista econômico em quaisquer projetos de geração de energia. Além disso, a vida útil de uma usina maremotriz pode chegar de duas a três vezes a de uma térmica ou nuclear (CHARLIER, 2009).

A viabilidade econômica de uma planta maremotriz está bastante atrelada às demais fontes energéticas também disponíveis. A energia maremotriz pode ser bastante competitiva se comparada àquela proveniente de usinas a carvão, entretanto, esta competitividade é reduzida se comparada às hidrelétricas convencionais. Portanto, de acordo com as condições energéticas, sociais e ambientais diversas. O Japão, por exemplo, produz eletricidade a baixos custos a partir de fontes nucleares e térmicas a gás e a óleo. Uma usina maremotriz produziria eletricidade a um custo de 3 a 4 vezes maior, o que o tornaria não atrativa (CHARLIER, 2009).

8 CONCLUSÃO

Os grandes desafios do setor energético mundial colocam as fontes alternativas em posição de destaque, tendo em vista que a maior participação destas na matriz energética mundial será uma tendência inevitável nos próximos anos, portanto, os estudos sobre a exploração da energia maremotriz tornam-se de bastante interesse sob o ponto de vista estratégico.

Um dos principais fatores que tem impulsionado a exploração maremotriz são os avanços alcançados por parte dos equipamentos eletromecânicos usados na

conversão da energia das marés. O surgimento de novas formas de exploração da energia das marés tem sido pesquisadas e avaliadas de maneira bastante intensa e demonstram ser bastante promissoras.

A maturidade da tecnologia já usada em usinas maremotrizes, o surgimento de novas tecnologias e formas de aproveitamentos, bem como a existência de inúmeros locais adequados e ainda inexplorados, levam a concluir que a exploração maremotriz atende aos principais requisitos para que esta possa ser utilizada mais intensamente e represente uma parcela mais significativa na matriz energética mundial.

Por fim, recentemente, alguns estudos têm proposto a integração entre a geração maremotriz e geradores eólicos *offshore*. Modelos de tais sistemas híbridos tem sido implementados e simulados de modo a se prever a interação dinâmica entre ambas as fontes, bem como o sistema elétrico em que estão conectadas.

REFERÊNCIAS

BRASIL – Ministério do Meio Ambiente. **Energia maremotriz**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-maremotriz>>. Acesso em: 18 jul. 2012.

CHARLIER, R. H.; FINKL, C. W. **Ocean Energy. Tide and Tidal Power. First Edition**. Springer, 2009.

CLARK. R. H. **Elements of Tidal-Eletric Engineering**. Wiley-IEEE Press. 2007.

DANDOLINI, M. **Energia maremotriz e suas diretrizes: a reutilização da energia, de forma renovável, economicamente vantajosa e limpa**, 2003. Monografia (Graduação em Geografia – Universidade Federal de Santa Catarina, Disponível em: <<http://www.cfh.ufsc.br/~plnetar/textos/mres.htm>>. Acesso em: 14 jun. 2010.

DOMINGOS, A. M. Geração maremotriz estudo da viabilidade técnica e econômica da implantação hipotética de geradores maremotrizes no estreito entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina. **Cadernos Acadêmicos**, Palhoça-SC, 2013.

ECODEBATE Cidadania & Meio Ambiente. 2012. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2012/11/06/>>. Acesso em: 18 jul. 2012

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S/A. **Aproveitamentos Maremotrizes na Costa do Maranhão, Pará e Amapá-Inventário Preliminar**, 1981.

ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energia Maremotriz e Hidráulica**. Disponível em: <<http://energiasrenovaveis12.wordpress.com/energia-eolica/>>. Acesso em: 19 jan. 2013.

FERREIRA, R. M. da S. do A. **Aproveitamento da energia das marés: Estudo de caso Estuário do Bacanga, MA**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia naval e oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

MASSOUD, SH. AMER, M. SAMIR, M. **Tidal Power Generation Systems**, 2001.

PLANETA COPPE – UFRJ. **As múltiplas ofertas do mar**. 2004. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=1088>>. Acesso em: 16 jan. 2013.

SAAVEDRA, O. R. ET AL. Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências. **Revista chilena de ingeniería**, 2011.

SOUSA, N. **Escola Secundária**, 2007. Disponível em: <<http://www.notapositiva.com>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

Data do recebimento: 12 de janeiro de 2016

Data da avaliação: 13 de janeiro de 2016

Data de aceite: 15 de janeiro de 2016

1. Graduando do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Tiradentes – UNIT. Email: leticia_cm@hotmail.com.br