

Eixo Temático ET-06-019 - Energia

## **EXPERIÊNCIAS EXITOSAS NO USO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS: ENERGIA DE MARÉS**

Amanda Gondim Cabral Quirino, Shara Sonally Oliveira de Sousa,  
Raqueline Caldas do Nascimento

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Paraíba, Brasil.

### **RESUMO**

Desde a Revolução Industrial, a demanda por fontes de energia tem aumentado. Esse processo se intensifica devido ao crescimento populacional mundial acelerado, tendo como consequência os impactos ambientais e o risco de esgotamento das fontes de energia não-renováveis. Considerando esse panorama, têm-se as energias renováveis e “limpas” como alternativa para o problema. Neste trabalho, há uma explanação a respeito da energia maremotriz, as vantagens e desvantagens da sua utilização, experiências exitosas da utilização dessa fonte de energia, bem como dois estudos de caso no Brasil, onde é possível notar as principais dificuldades para a incorporação dessa forma de energia na matriz energética brasileira.

**Palavras-chave:** Energia maremotriz; Marés; Usina de La Rance; Porto do Pecém; Barragem do Bacanga.

### **INTRODUÇÃO**

Nos primórdios, o homem buscava seus recursos em diferentes locais, fazendo longas trajetórias para obtê-los, ou seja, era nômade. Esse modo de vida não permitiu que o meio ambiente fosse impactado de maneira significativa. Com a descoberta da agricultura e da pecuária, iniciou-se a sedentarização dos grupos humanos e, conseqüentemente, a alteração do ambiente em pequenas escalas.

Ao passar dos anos descobriu-se a possibilidade de utilizar combustíveis fósseis como fonte de energia, intensificando a produção. Ao passo que a população mundial aumentava, mesmo com o aparecimento de epidemias, aumentava-se também a demanda por alimentos e por energia. Porém, o ambiente não foi alterado tão significativamente quanto o foi no período pós Revolução Industrial, onde passou-se a utilizar mais energia originada de combustíveis fósseis para produção.

No entanto, é sabido que os combustíveis fósseis são esgotáveis e não irão atender demandas futuras se continuarem sendo utilizadas desenfreadamente. Além da alta demanda de energia e o fato de serem esgotáveis, é importante destacar os impactos ambientais causados por esses combustíveis, desde os processos envolvidos na extração até a utilização e descarte de resíduos em ambos os níveis de mercado. Os impactos ambientais mais preocupantes são a emissão de gases poluentes intensificadores do efeito estufa, o risco de contaminação devido ao derramamento de petróleo, a geração de resíduos entre outras inúmeras consequências maléficas ao meio ambiente.

No ano de 2003, quando a população mundial era de 6,27 bilhões de habitantes, o consumo médio total de energia era de 1,69 tonelada equivalentes de petróleo (tep) per capita. Uma tonelada de petróleo equivale a 10 milhões de quilocalorias (kcal), e o consumo diário médio de energia é de 46.300 kcal por pessoa. Como comparação, vale a pena mencionar que 2.000 kcal é a energia que obtemos dos alimentos e que permite que nos mantenhamos vivos e funcionando plenamente. O restante é usado em transporte, gastos residenciais e industriais e perdas nos processos de transformação energética. (GOLDEMBERG, 2007).

Havendo a necessidade de mudar o padrão da utilização de energia, surgem as chamadas “energias limpas” ou renováveis, tornando possível a utilização de energias que não se esgotam e que agridem em menor nível o meio ambiente. Dentre as energias renováveis mais conhecidas estão a energia solar, eólica, geotérmica, hidrelétrica e energia das ondas e marés.

Segundo a ANEEL, o Brasil tem 1273 empreendimentos de fonte hidrelétrica em operação e 41 em construção, sendo o maior número empreendimentos de uma fonte energética, constituindo assim a matriz energética brasileira. Contudo, a construção de hidrelétrica gera impactos ambientais e sociais gigantes, além do seu alto custo. Dessa maneira, buscam-se alternativas como fonte de energia, sendo uma delas a energia oriunda das marés. Ainda de acordo com a ANEEL, no Brasil só há apenas um empreendimento com fonte de energia das marés, e o mesmo encontra-se em fase de construção. Dessa maneira, torna-se importante discutir sobre essa fonte de energia pouco aplicada e entender os processos que envolvem a geração da energia das marés, bem como a transformação dessa forma de energia em energia elétrica.

As marés são movimentos oscilatórios do nível do mar, observados tanto na linha da costa quanto na região oceânica, resultantes da oscilação da maré astronômica e da maré meteorológica. A componente principal observada é a maré astronômica, causada pelas forças gravitacionais do sistema Sol-Lua-Terra, o qual depende diretamente das massas dos corpos celestes e são inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre eles (TOMALSQUIM, 2016). Portanto, quanto maiores forem as massas dos corpos celestes e menor a distância entre eles, maior a força gravitacional. Por outro lado, se as distâncias aumentam a força gravitacional diminui. Dessa forma, um ponto na superfície da terra posicionado mais perto da lua apresentará maior força gravitacional, por outro lado, um ponto situado mais distante da lua resultará em uma força gravitacional menor.

Outra componente observada entre os corpos celestes é a força centrípeta, onde a força necessária para manter todas as partículas que formam a terra em uma órbita igualmente circular deve ser igual em todas as partes do planeta. Esta força é a resultante da interação entre as partículas da terra, lua e sol. Através do princípio da superposição, tem-se a resultante entre as componentes das forças gravitacionais e da força centrípeta, gerando assim as marés (CORDEIRO, 2016).

Além das forças componentes apresentadas, é importante destacar as altas e baixas marés. Nas luas nova e cheia, as forças gravitacionais do sol estão na mesma direção da lua, resultando em marés máximas e mínimas, chamadas marés de sizígia. Por outro lado, na chamada maré de quadratura, as luas minguante e crescente têm o seu vetor força gravitacional a 90° do sol, anulando parte da força e produzindo pouca variação das marés. Este ciclo influencia o aumento e diminuição das marés, o que se mostra um ponto interessante para utilização de tecnologias que aproveitem esse movimento (CORDEIRO, 2016).

## **OBJETIVO**

O trabalho tem por objetivo mostrar o funcionamento de uma usina maremotriz, apresentando suas vantagens e desvantagens, experiências exitosas da utilização dessa fonte de energia, bem como dois estudos de caso no Brasil.

## **METODOLOGIA**

Para proceder a realização desse trabalho, demonstrou ser necessário uma revisão bibliográfica buscando experiências exitosas na utilização dessa fonte de energia, assim como estudos de caso realizados no Brasil.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Funcionamento de uma usina maremotriz**

Um fator que vai de encontro à exploração da energia dos mares, é a amplitude das marés, pois poucos lugares do mundo possuem valores de amplitude de marés relevantes.

A principal maneira de se aproveitar a energia maremotriz é através de turbinas instaladas em barragens. Com a presença dessas barragens, as marés criam um desnível elevado entre os dois lados, fazendo com que turbinas sejam acionadas. Para que a experiência na utilização da energia maremotriz seja exitosa, é necessário que a amplitude das marés seja elevada e também que as condições geomorfológicas do local sejam favoráveis ao represamento da água, havendo a possibilidade de serem criados reservatórios.

Existem três formas de se aproveitar a energia potencial e cinética das marés: a) geração em maré vazante (efeito simples); b) geração em maré enchente (efeito simples) e c) a combinação das duas gerações anteriores (efeito duplo).

A potência extraída das correntes de marés é dada pela Eq. 1:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 (1)$$

Onde: P é a potência extraível em Watt (W);  $\rho$  é a densidade da água do mar em  $\text{kg/m}^3$ ; A é a área da seção transversal da turbina, em  $\text{m}^2$ ; V é a velocidade da corrente de maré, em m/s.

Uma usina maremotriz é composta por: barragem, turbogeradores e um ou mais reservatórios. Os custos totais de implantação de uma usina maremotriz são relacionados à implantação da barragem, por isso, muitas vezes, a sua construção é um dos fatores mais relevantes. Na construção de uma barragem, existem aspectos importantes a serem considerados, como a) os efeitos das ondas que se chocam contra a barragem, levando em conta a variação de pressão em ambos os lados, e b) o formato e a localização da barragem, pois podem alterar os fenômenos de ressonância e reflexão que ocorrem dentro dos estuários, ou seja, a amplitude das marés pode ser aumentada ou diminuída.

A utilidade das comportas em uma barragem de uma usina maremotriz é controlar o nível da água dos reservatórios. A frequência de abertura e fechamento das comportas está relacionada ao tipo de maré e ao modo de operação da usina.

A principal função do reservatório em uma usina maremotriz é o armazenamento de água, de modo a gerar a queda d'água necessária para geração de eletricidade através dos turbogeradores. Estes reservatórios podem ser reentrâncias costeiras, enseadas, corpos de águas entre ilhas e continentes, ou estuários (CHARLIER, 2009).

Os equipamentos destinados à conversão de energia são uma das principais parcelas que compõem o custo total de uma usina maremotriz, podendo ser responsáveis por cerca de 45% a 55% destes custos (CLARK, 2007).

#### **Vantagens da Energia de Marés**

- Apesar de ser intermitente, a energia maremotriz pode ser prevista porque as marés estão associadas aos fenômenos astronômicos, que embora sejam complexos, demonstram ser bastante conhecidos e previsíveis;
- A exploração da energia maremotriz não produz nenhuma poluição direta ao meio ambiente: está livre de emissões de gases poluidores, derramamentos de óleo, produção de resíduos;
- Os custos associados à operação da usina são mínimos, portanto, os investimentos em construção e operação podem ser facilmente recuperados, já que a matéria prima para o funcionamento da usina é gratuita;
- A vida útil de uma usina maremotriz é duas a três vezes maior que a de uma usina térmica ou nuclear.

#### **Desvantagens da Energia de Marés**

- Assim como as outras fontes renováveis de energia, a energia das marés exibe a propriedade da intermitência, onde a fonte primária não é constante;

- As marés podem ser afetadas pelas condições meteorológicas do local, onde o aumento da pressão atmosférica ou os ventos na direção terra-mar podem reduzir os níveis das marés; a dinâmica das marés também é influenciada pelas características geomorfológicas da costa;
- A instalação de uma usina maremotriz pode modificar as características naturais do ecossistema local, como a distribuição, composição e ciclo de vida das espécies dentro do estuário;
- Interferências nas atividades humanas locais, como a pesca, por exemplo;
- Alterações químicas na qualidade da água: salinização e oxigenação e alterações na morfologia do estuário: erosão e sedimentação;
- Elevados custos na construção da barragem.

### **Estudos de Caso**

- **La Rance - A maior usina maremotriz**

A maior usina maremotriz construída é a La Rance, localizada na França, no estuário do rio francês de mesmo nome. Vem operando desde 1966, com uma capacidade instalada de 240 megawatts (MW), distribuída por 24 turbinas tipo bulbo, com potência de 10 MW cada uma delas. Sua barragem possui um comprimento de 330 metros por uma largura de 8 metros. As marés possuem uma amplitude de até 14 metros, e permitem a geração de energia anual de cerca de 540 GWh (LEITE, 2011).

Em La Rance, os impactos mais expressivos ocorreram durante a sua construção, pois o fluxo natural do estuário foi interrompido, para a construção a seco da barragem. Para isso, foram utilizadas ensecadeiras. Foi observado que, após a construção, os impactos foram consideravelmente reduzidos. O modelo de turbina utilizado para conversão da energia maremotriz na usina de La Rance é o tipo bulbo.

De acordo com R.H. Charlier e C.W. Finkl (2009), as atividades pesqueiras na região não foram prejudicadas com a presença da usina. Segundo J. Pierre Frau (1993), o ecossistema do estuário de La Rance sofreu algumas modificações, mas ao longo dos anos, o novo equilíbrio ecológico foi atingido, já que o mesmo é dinâmico.

A geração de eletricidade é o principal benefício observado pela construção da usina maremotriz de La Rance, mas atrelado a isso, vieram outros fatores positivos, como a intensificação do turismo, pois a usina tornou-se um atrativo turístico na região.

- **Porto do Pecém - CE**

O Brasil possui um litoral de quase 8 mil quilômetros de extensão, apresentando assim muitas possibilidades de explorar o oceano como fonte de energia limpa e renovável.

O conceito desenvolvido pela COPPE/UFRJ é o uso de um sistema de alta pressão para movimentar a turbina e o gerador. O conjunto consiste em um flutuador e um braço mecânico que, movimentados pelas ondas, acionam uma bomba para pressurizar água doce e armazená-la num acumulador conectado a uma câmara hiperbárica ( $P = 200$  e  $400$  mca). A água altamente pressurizada forma um jato que movimenta a turbina que, por sua vez, aciona o gerador responsável pela produção da energia elétrica. Sua principal vantagem é possibilitar a simulação de elevadas quedas d'água sem que para isso seja necessário ocupar áreas de grande extensão, como exigem as hidrelétricas. O potencial energético de ondas no Brasil é estimado em 87 GW. Testes realizados na Coppe indicam que é possível converter cerca de 20% desse potencial em energia elétrica, o que equivale a 17% da capacidade total instalada no país. Um protótipo em escala real foi instalado no porto de Pecém, em 2011 (SILVA *et al.*, 2013).

A análise realizada pelos estudos apresentou valores de potência média mensal variando de 6KW/m a 11KW/m e potência média anual da ordem de 7,7 KW/m. Considerando a potência média anual da onda de 7,5 KW/m, e um rendimento da usina de 35%, vinte módulos seriam capazes de gerar 500 KW, o suficiente para abastecer com iluminação e força motriz 200 famílias (SILVA *et al.*, 2013).

Segundo o pesquisador do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, o Doutor em Engenharia Oceânica Eliab Ricarte Beserra, esse projeto não conseguiu gerar energia de forma contínua ou em quantidade prometida e foi abandonado após a quebra de um componente estrutural, pelo fim do contrato de pesquisa com a Tractebel, multinacional que investiu R\$ 15 milhões no empreendimento, e por necessitar de melhorias tecnológicas.

- **Barragem do Bacanga - MA**

No Brasil, a região Norte apresenta grande possibilidade de aproveitamento da energia das marés, onde são encontradas grandes amplitudes. Na década de 1970, uma barragem construída no estuário do Rio Bacanga – MA, foi planejada para ser a primeira usina de marés brasileira. As condições favoráveis associadas com as alturas de marés consideráveis, podendo chegar a 6,5 m, fez deste um local ideal para a construção de uma planta-piloto. (LIMA *et al.*, 2003).

De acordo com Lima *et al.* (2003), o projeto de barramento do Rio Bacanga foi esquematizado no intuito de servir de ligação entre São Luís e o Porto do Itaqui, reduzindo a distância de 36 km para 9 km, além de propiciar o crescimento urbano em direção ao Porto e a formação do lago artificial que auxiliaria no processo de urbanização e de saneamento da cidade. Tendo em vista a grande importância de pesquisa sobre geração maremotriz, a Eletrobrás deu início a primeira fase de estudos do aproveitamento hidroenergético do estuário (1977-1978), que aproveitaria as estruturas já existentes da Barragem. Outro aspecto que influenciou esta motivação foi o projeto de La Rance, na França.

O projeto executivo previa construção de uma eclusa junto ao vertedouro, bem como o alargamento do coroamento da obra que era inicialmente de 10m para 20 m. Com vista nas visitas feitas a usinas em operação e em fábricas de equipamentos, ficou decidida a utilização de duas alternativas: 1. grupo turbogerador bulbo; 2. grupo com gerador periférico. A usina seria implantada à margem esquerda do estuário por razões geotecnológicas e construtivas, pois teria que ser construída a "seco", com o mínimo de interferência ao tráfego local, além de utilizar geradores da mesma potência. O anteprojeto definia para a alternativa 1, o uso de 6 turbogeradores bulbo de 4,5 MW funcionando em simples (geração de 56,3 GWh/ano); e para alternativa 2, três grupos periféricos de 11,34 MW em simples efeito (geração de 59,6 GWh/ano), por contar com a possibilidade da fabricação Nacional (LIMA *et al.*, 2003).

Foi quantificada em primeira ordem a potencialidade hidroenergética do estuário do Bacanga, no qual foram definidos os parâmetros de geração em simples efeito, sem bombeamento auxiliar e no sentido reservatório-mar. Através da curva de frequência e com base no registro maregráfico, foi obtida a maré média teórica de 4,5 m (com frequência de 50%) e feitas as seguintes considerações: a) não são viáveis tecnicamente operações da usina para cotas inferiores a 4,50m; b) a elevação do nível máximo de operação de 4,50m para 5,50m representa um ganho de energia de aproximadamente 15 GWh/ano; c) a realização da obra para geração maremotriz é realizável e produzirá 60 GWh/ano, a 4,94 Cr\$/kWh; d) os custos associados são da ordem de 250milhões de cruzeiros (à época) para utilização da barragem e do vertedouro e 270 milhões para as obras de proteção da Avenida e dos bairros marginais (LIMA *et al.*, 2003).

Ainda segundo Lima *et al.* (2003), a ideia original de aproveitamento da barragem do Bacanga para a implantação de uma usina de maremotriz era utilizar a estrutura hidráulica da comporta para implantação de um gerador em pelo menos um dos vãos. No entanto, a análise mais detalhada do projeto da Barragem mostrava que este aproveitamento não era aconselhável, tendo em vista uma série de motivos que podem ser classificados em técnicos e físicos.

Com a inauguração da Avenida Médice em 1973, que margeava o reservatório, obrigou-se a manter o nível da barragem em uma cota de +2,5m para que os bairros não fossem inundados, o que favoreceu também a ocupação das áreas anteriormente alagadas na preamar; A falta de manutenção dos equipamentos e uso descontrolado das comportas proporcionou um acidente envolvendo a comporta de vão central em 1976, ocasionando a entrada e saída de água de forma irregular no reservatório; Em 1980, ainda em decorrência do acidente na comporta, as cotas da barragem fixaram-se entre três a quatro metros, causando alagamentos eventuais nas

áreas ocupadas; A implantação da usina teria que ser feita na cota próxima da alcançada pela maré máxima (6.5 m), de modo a obter uma boa relação entre a potência instalada, energia gerada e custos associados. Contudo, o pavimento da Avenida Médici apresenta em alguns trechos cota inferior a 6.0 m, o mesmo acontecendo nos bairros marginais (Areinha, Coroado e Coroadinho), tornando-se necessária a execução de obras de proteção para que a Avenida e os bairros não fiquem submersos. A utilização do vão central das comportas existentes para a instalação de um gerador apenas conduzirá a uma potência máxima instalada pouco superior a 5MW (LIMA et al., 2003).

Um gerador com capacidade de 7MW, por exemplo, possui um diâmetro aproximado de 5,0 m, o que implica em uma cota de fundação da ordem de -8,00m. As escavações necessárias para atingir esta cota comprometeriam a estabilidade do restante da obra; O arranjo da entrada e saída do gerador tipo bulbo, como também pontes rolantes e acessórios necessários para a usina, são incompatíveis com o atual esquema da obra do vertedouro; A instalação de um gerador bulbo provocaria trepidações inerentes a esse tipo de obra, causando solicitações para as quais as fundações da obra existente não foram dimensionadas; O aproveitamento da estrutura atual do vertedouro irá condicionar o aproveitamento do estuário às dimensões existentes, sem possibilidade de expansão futura e por consequência sem o aproveitamento total do seu potencial energético (LIMA et al., 2003).

Atualmente, entretanto, existem propostas da criação de uma usina-piloto para fins de pesquisa apenas, tendo em vista que este conhecimento possa ser revertido para outras regiões do Brasil que possuam potencial mais significativo. (NETO et al., 2011).

## CONCLUSÕES

Grande parte do potencial energético maremotriz global se encontra ainda inexplorado. A causa dessa pequena exploração se revela na baixa amplitude de marés que alguns locais exibem. O aproveitamento de marés onde a queda é baixa é viável tecnicamente, mas não se revela viável economicamente, já que os custos das obras civis associados a produção energética em menor escala são elevados.

Apesar da energia maremotriz ser livre de emissões de gases de efeito estufa e livre da geração de resíduos, os possíveis impactos ambientais devem ser estudados de maneira detalhada, pois, se o projeto da barragem de um estuário, por exemplo, for feito de maneira irresponsável, os impactos causados podem ser significativos.

Vale salientar que uma usina maremotriz pode alavancar a economia de uma região, tornando-se ponto turístico, e pode, ainda, se adequar às necessidades da população, onde podem ser construídas rodovias sobre as barragens interligando áreas.

No tocante à pesquisa e ao desenvolvimento de equipamentos eletromecânicos utilizados nessas usinas, o cenário é favorável, pois esses equipamentos estão cada vez mais eficientes na conversão da energia das marés, inclusive em locais onde a amplitude das marés é baixa.

Pode-se concluir, portanto, que as principais dificuldades para a incorporação da energia maremotriz na matriz energética brasileira são: a baixa viabilidade econômica dessa forma de geração de energia elétrica frente aos preços dos combustíveis fósseis e o fato do Brasil não ser um país onde as marés são mais adequadas para a exploração, comparando-se com outras regiões do mundo, que exibem alto potencial, como é o caso do Reino Unido e da França. Na América do Sul, onde existe o maior potencial extraível é a costa norte do Brasil e o Chile.

## REFERÊNCIAS

- BANCO DE INFORMAÇÃO DA GERAÇÃO. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: 30 nov. 2017.
- CHARLIER, R.H.; FINKL, C.W. **Ocean Energy**. Tide and Tidal Power. 1. ed. Springer, 2009.
- CLARK, R.H. **Elements of Tidal-Electric Engineering**. Wiley-IEEE Press, 2007.
- CORDEIRO, T. **Oceanografia**: Ondas e Marés. 20 Fev. 2016, 26 Jun. 2016. 36 p. Notas de Aula.

FERREIRA, R.M.; ESTEFEN, S.F. Alternative Concept for Tidal Power Plant with Reservoir Restrictions. **Renewable Energy**, v. 34, n. 4. p. 1151-1157. 2009.

FRAU, J. P. Tidal Energy: Promising Projects - La Rance: a succesful industrial-scale experiment. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 8, n. 3, p. 552-558, 1993.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

LIMA S. L; SAAVEDRA, O.R.; BARROS, A.K; CAMELO, N. J. Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas. 5th Latin-American Congress Electriciy Generation and Transmission. UNESP. Vol. 1, pp. 1-6. 2003.

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. **Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería**, v. 19, n. 2, p. 219-232, 2011.

SILVA, D. L.; BORDON, G. M.; SILVA, M. **Energia sustentável, um enfoque na energia marítima: caso usina de ondas do Porto do Pecém, Ceará**. Monografia. 45 p. Centro Universitário Metropolitano de São Paulo. Guarulhos, SP. Novembro, 2013.

TOMALSQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar e Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.