

PEDRO B. LEITE NETO, OSVALDO R. SAAVEDRA, LUIZ A. S. RIBEIRO

*Núcleo de Energias Alternativas
Instituto de Energia Elétrica
Universidade Federal do Maranhão
Av. dos Portugueses, s/n. Campus do Bacanga, CEP 65040-080, São Luís, Brasil
E-mails: pedroblneto@yahoo.com.br, o.saavedra@iee.org,
luiz_ribeiro@dee.ufma.br*

Abstract— In this paper a methodology to estimating the energetic performance of a tidal power plant on the estuary of Bacanga is presented. By modeling components and tidal cycle several generation scenarios were simulated and analyzed considering single-effect and double-effect operation over one year of operation. From results obtained, it can be concluded that although some restrictions to the full exploitation of the potential of the estuary, it is still possible to exploit a significant energy. This is due to improvements in efficiency of electromechanical equipments currently available that allow the exploitation of energy in very low falls, as is the case of Bacanga.

Keywords— Tidal Energy, Renewable Energies, Small Hydro-Electric Plants, Energetic Planning.

Resumo— Em este artigo é apresentada uma metodologia para a estimação de indicadores energéticos de uma usina maré-motriz no estuário do Bacanga. Através da modelagem de componentes e do ciclo de mares, foram simulados e analisados cenários de geração em *efeito-simples* e *efeito-duplo* para um ano de operação. Através dos resultados, pode-se concluir que, embora algumas restrições impeçam o pleno aproveitamento do potencial do estuário, ainda é possível um aproveitamento significativo do mesmo. Isto se deve em grande parte às melhorias, em termos de eficiência, dos equipamentos eletromecânicos disponíveis atualmente, que possibilitam a exploração energética de baixíssimas quedas, como é o caso do Bacanga.

Palavras-chave— Geração maré-motriz, Energias Renováveis, Pequenas Centrais hidrelétricas, Planejamento Energético.

1 Introdução

O constante aumento da demanda e as restrições relacionadas a aspectos ambientais tem desafiado o setor energético mundial a propor novas alternativas de geração de eletricidade que melhor se adequam a este cenário.

Embora seu pleno aproveitamento seja restrito a poucos locais do planeta, a geração maremotriz tem se demonstrado uma fonte bastante promissora e, portanto, alvo de diversas pesquisas inclusive no Brasil (Leite Neto, P. B. et al, 2011). Isto se deve principalmente devido ao surgimento de novas tecnologias de aproveitamento de baixas quedas que permitem a viabilidade comercial deste tipo de exploração (Leite Neto, P. B. et al, 2010).

A energia maremotriz possui algumas vantagens tanto de natureza técnica quanto de natureza ambiental: uma delas é a previsibilidade, ou seja, a possibilidade de se prever de forma bastante precisa o comportamento das marés e, conseqüentemente, a energia produzida. Outra vantagem é que não há necessidade de se alagar novas áreas além daquelas anteriormente alagadas, como geralmente ocorre nas hidroelétricas convencionais (Leite Neto, P. B. et al, 2009).

Estudos encomendados pela ELETROBRÁS na década de 80 (Sondotécnica, 1981) revelaram que o Brasil apresenta um potencial energético maremotriz bastante significativo principalmente na costa do Maranhão, Pará e Amapá. Tal potencial seria da ordem de 72 TWh. Embora sejam valores bastante

relevantes, o seu completo aproveitamento é, no contexto atual, inviável sob o ponto de vista ambiental e econômico. Por outro lado, tem-se demonstrado que no Brasil a exploração maremotriz através de projetos em escala reduzida apresentam chances bem maiores de viabilidade técnica e econômica (Leite Neto, P. B. et al, 2009).

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o potencial energético maremotriz no estuário do Bacanga, em São Luís. Tais estudo foram realizados através da modelagem dos principais componentes envolvidos na geração maremotriz tais como a modelagem das marés, estuário e turbo-geradores, além de simulações computacionais da operação anual da usina. Desta forma, é possível estimar os principais indicadores energéticos relacionados à operação da usina, como por exemplo: geração energética anual, potência média e máxima gerada e fator de carga.

Destaca-se ainda que um das principais vantagens das técnicas utilizadas nesse trabalho é o fato de que as simulações são de natureza cronológica. Desta forma, é possível se obter uma análise mais detalhada sobre a operação da usina ao longo de um dado período de tempo que, neste caso, considerou-se todo o ano de 2012.

Inicialmente é apresentado um breve histórico da barragem do Bacanga e suas restrições operacionais. Em seguida são apresentadas as metodologias para a modelagem das marés, do estuário e turbo-geradores. Posteriormente são apresentados os resultados de diferentes cenários de geração. Finalmente são feitas algumas considerações e conclusões do trabalho.

2 Descrição do Estuário e Barragem do Bacanga

Situado na cidade de São Luís – MA, o estuário do Bacanga está sendo considerado como o local bastante favorável para estudos estratégicos sobre a viabilidade de exploração competitiva de baixa queda, como é o caso de aproveitamentos maremotrizes. Na Figura 1 é apresentada uma vista aérea do estuário alvo onde se observa a barragem existente.



Figura 1. Vista aérea do estuário e barragem do Bacanga (ZEEMA, 1999).

Desde a época da construção da barragem, diversos estudos foram realizados sobre as possibilidades de aproveitamento desta para a geração de eletricidade (Lima, 2003).

Embora fosse bastante promissora, a proposta inicial tornou-se inviável devido a uma série de fatos posteriores: ocupação urbana desordenada em áreas do reservatório e a criação de uma avenida que também margeia o reservatório obrigaram que este fosse mantido, através do controle das comportas da barragem, a uma cota máxima bem inferior ao previsto no projeto inicial. Entretanto, as propostas mais atuais se concentram na proposta de aproveitamento em pequena escala, visando-se as seguintes premissas (Ferreira, 2009):

- Possibilitar a geração de energia elétrica dentro de uma grande área urbana de consumo, com destaque ao campus da Universidade Federal do Maranhão;
- Configurar-se como uma usina laboratório para o desenvolvimento de pesquisa, tecnologia e recursos humanos em projetos que utilizem as marés como fonte de energia;
- Inserir o Brasil no grupo de países que desenvolvem pesquisas aplicadas ao aproveitamento da energia das marés;
- Revitalização da área através da recuperação ambiental e paisagística, transformando-a em atrativo turísticos que resultaria na inserção da população local, criação de empregos e geração de renda.

3 Metodologia

Diversas metodologias tem sido apresentadas para a realização de estimativas de geração maremotriz. Geralmente tais métodos utilizam modelos bastante simplificados tanto da modelagem das marés quanto da modelagem do estuário. (Nag, 2011) (Prandle, 1984).

A metodologia apresentada neste trabalho utiliza modelos mais precisos tanto das marés quanto das características do estuário, em outras palavras, considera-se um série temporal que representa a variação das marés em sincroniza com a hora local e também a variação da área da superfície do reservatório em função de sua cota.

3.1 Modelagem da Marés

Uma das principais vantagens da geração maremotriz é a alta previsibilidade da fonte primária. Isto se deve ao fato de que as marés estão relacionadas principalmente as fenômenos astronômicos bastante conhecidos e previsíveis.

As variações da altura de maré podem ser representadas pela soma de um número finito de termos harmônicos aos quais se chamam constituintes harmônicas da maré. Cada constituinte representa um determinado movimento astronômico relacionado com o movimento da Terra, Lua e/ou Sol e que pode ter desde uma periodicidade diária até, por exemplo, um período de 18,6 anos correspondente à regressão dos nodos lunares (pontos onde a Lua cruza o plano da elíptica) (Martins, 2007).

Em (Ferreira, 2007) é apresentado um estudo detalhado das marés no terminal Ponta da Madeira, próximo ao estuário do Bacanga. Além disso, são apresentadas as principais componentes harmônicas que constituem as marés da Ponta da Madeira.

A partir das constituintes harmônicas é possível recriar a série de marés a partir da equação 1 (Ferreira, 2007).

$$h(t) = h_o + \sum_{i=1}^n H_i \cos(V_i - K_i) \quad (1)$$

Onde:

h é a altura da maré no instante t ;

H_i é a amplitude da componente harmônica i ;

V_i é o argumento da componente harmônica i ;

K_i é a fase da componente harmônica i .

Através da equação 1 é possível recriar uma série temporal de variações de marés para o período de tempo desejado. Isto é possível graças ao fato de que as marés apresentam uma variação anual inferior a 5 % (Charlier, 2009). Através de um processo iterativo, a série criada foi sincronizada com os dados de marés previstas para o ano de 2012 disponíveis nas Tábuas de Marés (DHN, 2012). Desta forma pretende-se

realizar simulações de operação da usina de forma sincronizada com a hora local.

Na Figura 2 observa-se o grau de semelhança entre a série gerada a partir da equação 1 e os pontos máximos e mínimos disponibilizados pela Tábua de Marés (DHN, 2012).

O uso da modelagem das marés da Ponta da Madeira para simulações no estuário do Bacanga se justifica pelo fato de que a mesma onda de maré se propaga por toda a baía de São Marcos, com poucas perdas de amplitude, apresentado pouca defasagem (Ferreira, 2007).

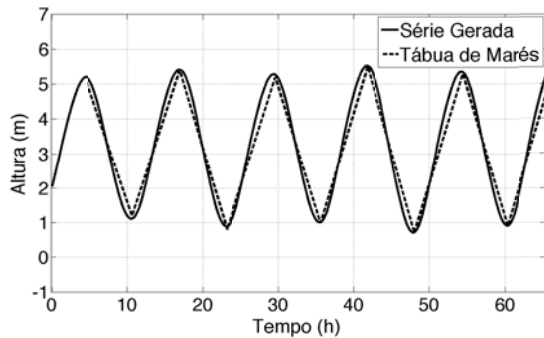


Figura 2. Semelhança entre a série de marés gerada e dados da Tábua de Marés.

3.2 Modelagem do Estuário

Uma das principais diferenças entre aproveitamentos maremotrizes e as centrais hidroelétricas convencionais é o fato de que no primeiro caso o reservatório apresenta grandes variações de nível e volume d'água durante o processo de geração. Este regime de operação requer um modelo bastante preciso quanto a geografia do estuário. Portanto, estudos de batimetria se tornam de grande importância.

Em (Ferreira, 2007) são apresentados dados de batimetria realizada a montante e a jusante da barragem do Bacanga. Na Figura 3 é apresentada a relação Cota X Volume do estuário.

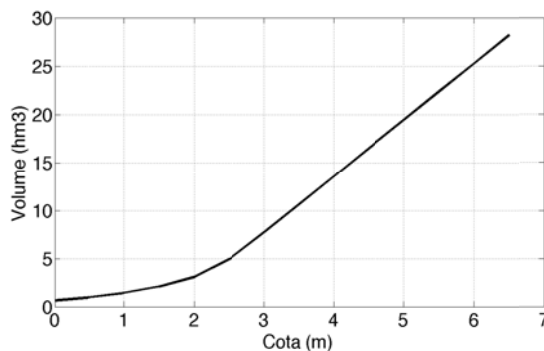


Figura 3. Relação entre cota e volume do estuário do Bacanga (Ferreira, 2007).

Uma importante característica do estuário do Bacanga são as restrições de cotas mínima e máxima. Devido às ocupações urbanas no entorno do estuário, e também as atividades socioeconômicas existentes no local, tais como atividades pesqueiras, o estuário não deve ser completamente cheio até a conta máxima de

preamar, bem como não deve ser completamente seco até a cota mínima da baixa-mar. Estima-se que as cotas mínima e máxima do estuário devem permanecer entre 2,5 m e 4,5 m (Ferreira, 2007).

3.3 Modelo das Turbinas

Neste estudo energético foram considerados alguns parâmetros típicos de turbinas do tipo *Kaplan*, com eficiência operacional da ordem de 90 %, vazão máxima de 82,5 m³/s e potência nominal de 2,1 MW (Castro, 2008). A queda mínima de operação da turbina é de 1 m. Na Figura 4 é apresentada a curva típica de rendimento do modelo de turbina utilizado.

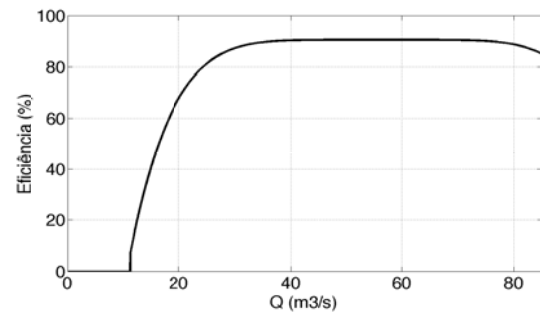


Figura 4. Curva de rendimento do modelo de turbina utilizado (Castro, 2008).

Na Figura 5 são apresentadas algumas curvas características de geração do modelo de turbina utilizado.

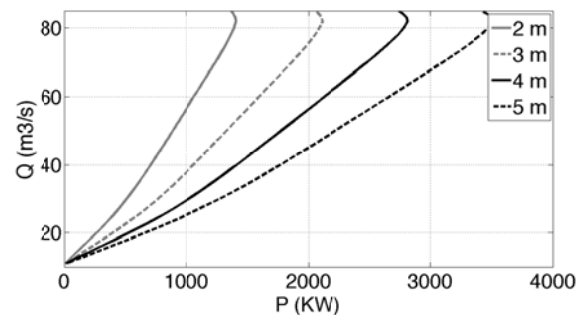


Figura 5. Curvas características de geração do modelo de turbina utilizado (Castro, 2008).

Além da modelagem dos elementos mencionados anteriormente, a equação 2 é usada para calcular a vazão através das comportas da usina durante o reenchimento do reservatório.

$$q(t) = h_2(t) * b * \sqrt{\frac{2 * g * (h_1(t) - h_2(t))}{1 - \frac{h_2(t)}{h_1(t)}}} \quad (2)$$

Onde:

$q(t)$ é a vazão instantânea através da comporta;

$h_2(t)$ é a cota a montante;
 b é o comprimento da comporta (12,5 m);
 g é a aceleração gravitacional ($9,8 \text{ m/s}^2$);
 $h_1(t)$ é a cota a jusante.

4 Simulações e Resultados

Com base nos modelos descritos na sessão anterior e através do algoritmo representado no fluxograma da Figura 6, é possível estimar a potência gerada pela usina em intervalos discretos de um minuto durante cada ciclo de maré e por um período de um ano.

A partir do perfil anual de potência gerada, estima-se outras grandezas elétricas e indicadores de desempenho da usina, como por exemplo a energia anual gerada e fator de carga da usina.

4.1 Geração Efeito-Simples

O primeiro cenário a ser analisado consiste na usina operando em efeito-simples e com dez turbinas. Na Figura 7 é demonstrado o perfil da operação fictícia da usina durante as primeiras hora do dia 01 de janeiro de 2012.

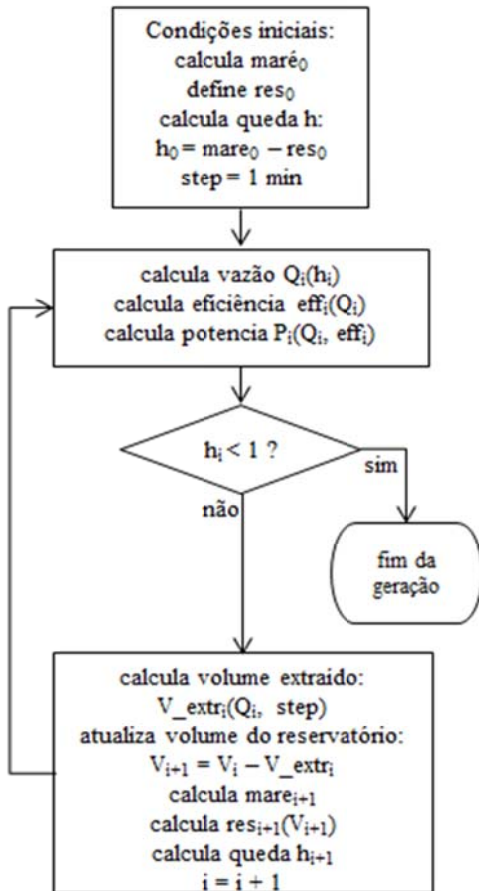


Figura 6. Fluxograma básico do algoritmo utilizado durante o processo de geração.

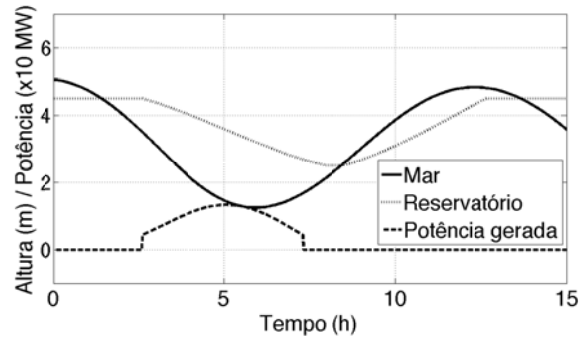


Figura 7. Operação da usina em efeito-simples.

Na tabela 1 são apresentados alguns indicadores de desempenho da usina operando em *efeito-simples*.

Tabela 1. Indicadores de desempenho da usina operando em *efeito-simples*.

Energia gerada (GWh)	37,397
Potência Máxima (MW)	23,511
Potência Média (MW)	4,257
Fator de Carga (%)	20,27
Tempo de operação (%)	37,48

Na Figura 8 é apresentada a curva de permanência da potência gerada pela usina durante uma ano de operação em *efeito-simples*.

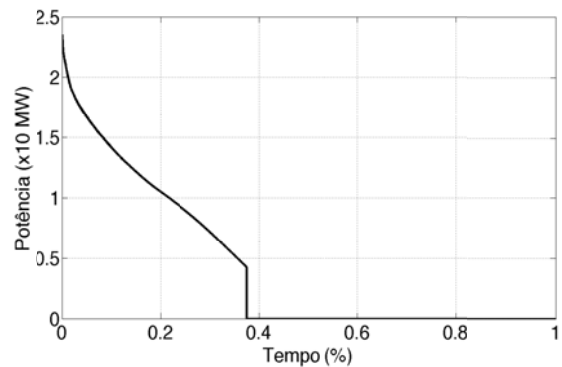


Figura 8. Curva de permanência da potencia gerada em *efeito-simples*.

4.2 Geração Efeito-Duplo

O segundo cenário avaliado consiste na operação da usina em *efeito-duplo*, ou seja, a geração acontece tanto na maré vazante quanto na maré enchente. Na Figura 9 é demonstrado o perfil de operação da usina durante as primeiras horas do mês de janeiro de 2012.

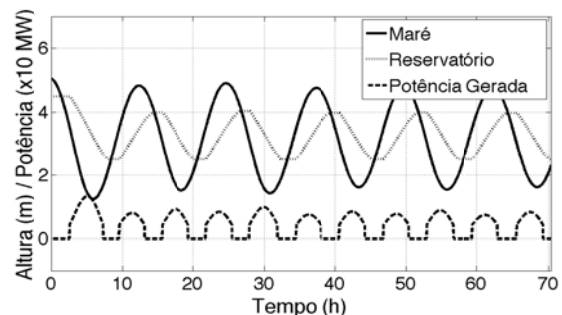


Figura 9. Perfil de operação da usina operando em *efeito-duplo*.

Na tabela 2 são apresentados alguns indicadores de desempenho da usina operando em *efeito-duplo*.

Tabela 2. Indicadores de desempenho da usina operando em *efeito-duplo*.

Energia gerada (GWh)	55,601
Potência Máxima (MW)	23,511
Potência Média (MW)	6,330
Fator de Carga (%)	30,140
Tempo de operação (%)	64,83

Na Figura 10 é apresentada a curva de permanência da potência gerada pela usina durante um ano de operação em *efeito-duplo*.

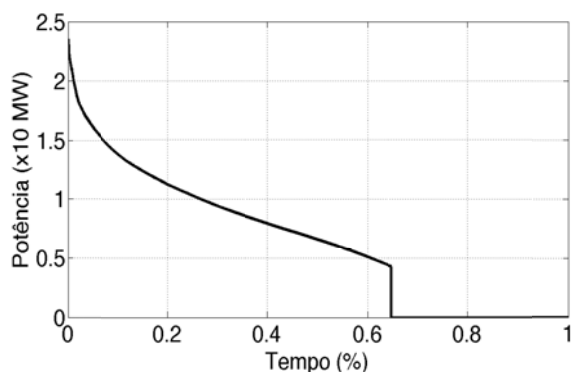


Figura 10. Curva de permanência da potencia gerada em *efeito-duplo*.

5 Análise dos Resultados

Embora se tratem de estudos preliminares, as simulações apresentadas demonstraram um potencial energético significativo a ser explorado no estuário do Bacanga. Além disso, as construções civis já existentes no estuário, bem como os baixos custos de operação de uma usina maremotriz apontam para a viabilidade econômica do projeto.

Outro aspecto bastante favorável é a proximidade do estuário a grandes centros de consumo. Esta característica reduziria substancialmente alguns custos adicionais tais como a redução de linhas para integração à rede elétrica. Além disso, por se tratar de uma fonte de geração bastante próxima de um centro de carga, outras melhorias, como por exemplo a redução das perdas e do carregamento nas linhas de transmissão convencionais e também a economia de reservatório das grandes hidroelétricas poderiam ser observadas.

Embora seja uma planta de pequeno porte, se comparada ao sistema a qual estaria conectada, tal característica permite considerar que toda a produção da usina poderia ser absorvida pelo mesmo. Isto implicaria na redução do tempo de recuperação do investimento inicial da usina.

Os resultados apresentados demonstraram ainda que a escolha do modo de operação da usina é um fator decisivo para o desempenho da usina, sendo que a operação em *efeito-duplo* apresentou resultados significativamente melhores. A escolha do modo de

operação é um importante fator a ser analisado no planejamento da usina, principalmente com relação ao planejamento das turbinas.

A metodologia apresentada permite fazer o máximo de aproveitamento de umas das principais características da geração maremotriz que é a alta previsibilidade das marés, ou seja, através de uma simulação temporal, é possível prever o quanto e em quais momentos a usina poderá gerar. Isto constitui uma ferramenta bastante útil tanto para o planejamento da operação da usina como também para fins de mercado de energia elétrica.

6 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma nova metodologia para a estimação de indicadores energéticos de uma usina maremotriz no estuário do Bacanga. Foram analisados cenários de geração em *efeito-simples* e *efeito-duplo*.

Através dos resultados, pode-se concluir que, embora algumas restrições impeçam o pleno aproveitamento do potencial do estuário, ainda é possível um aproveitamento significativo do mesmo. Isto se deve em grande parte às melhorias, em termos de eficiência, dos equipamentos eletromecânicos disponíveis atualmente, que possibilitam a exploração energética de baixíssimas quedas, como é o caso do Bacanga.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CAPES, Eletrobrás e CNPq através do projeto *Pesquisa e Desenvolvimento para a Implantação de uma Usina-Laboratório Maré-motriz na Barragem do Bacanga*, Edital MCT/CNPq FNDCT Nº 05/2010.

Referências Bibliográficas

- Castro, Rui M. G (2008). Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Energia Mini-Hídrica. Universidade Técnica de Lisboa. Ed. 3.1.
- Charlier, R. H., C. W. Finkl (2009). Ocean Energy. Tide and Tidal Power. Ed. 1. Springer.
- DNH – Diretoria de Hidrografia e Navegação. Centro de Hidrografia da Marinha. Banco Nacional de Dados (2012). Previsões de Marés – Terminal da Ponta da Madeira. www.mar.mil.br.
- Leite Neto, P. B., O. R. Saavedra, N. J. Camelo, L. A. S. Ribeiro (2010). Viabilidade de Pequenos Aproveitamentos para a Geração de Energia Eletromaremotriz. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Anais do CBA, Vol. 1, pp. 66286-66292.
- Leite Neto, P. B., O. R. Saavedra, N. J. Camelo, L. A. S. Ribeiro, Rafael M. Ferreira (2011). Exploração de energia Maremotriz para Geração de Eletricidade: Aspectos Básicos e Principais

- Tendências. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. vol. 19, No. 2, pp. 219-232.
- Leite Neto, P. B., Oliveira, D. Q., N. J. Camelo, O. R. Saavedra (2009). Estudo do Potencial para Geração de Energia Elétrica a partir de Fonte Maremotriz. 8th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission. Ubatuba. Anais do VIII CLAGTEE. Guaratinguetá : UNESP. Vol. 1. pp. 709.
- Lima, Shigeaki Leite, O. R. Saavedra, A. K. Barros, N. J. Camelo (2003). Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas. 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission. UNESP. Vol. 1. pp. 1 - 6.
- Martins, Leonor, Reis, Joana (2007). Nível Médio, Maré e Análise Harmônica. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Lisboa. pp. 1 – 16.
- Rafael M. Ferreira (2007). Aproveitamento da Energia das Marés, Estuário do Bacanga, MA. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro.
- Rafael M. Ferreira, S. F. Estefen (2009). Alternative Concept for Tidal Power Plant with Reservoir Restrictions. *Renewable Energy*. Vol. 34. Issue 4. pp. 1151 – 1157.
- Sondotécnica Engenharia de Solos S. A., Eletrobrás (1981). Aproveitamentos Maremotrizes na Costa Maranhão – Pará – Amapá. Invetário Preliminar.
- Nag, Bodhibrata (2011). A Dynamic Programming Algorithm for Optimal Design and Operation of Tidal Power Plants. *Indian Institute of Management Calcutta*. No. 680. pp 1 – 10.
- Prandle, D (1984). Simple Theory for Designing Tidal Power Plants. *Adv. Water Resources*. Vol. 7. pp. 21 – 27.