

Influência da presença de parques de conversores de energia hidrocínética no movimento de sedimentos em cenários idealizados da baía de São Marcos, MA

Influence of hydrokinetic energy converter farms on sediment transport at idealized scenarios in São Marcos bay, MA

Eduardo González-Gorbeña¹; Geraldo Wilson Jr. Ducteur d'Etat.²; Paulo C. C. Rosman³ e Raad Y. Qassim⁴

¹ Pós-doutorando, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil
eduardogg@oceanica.ufrj.br

^{2,3} Professor da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil
gwj@gmail.com; pccrosman@ufrj.br

⁴ Ph.D. Professor da Área de Logística e Transporte Aquaviário, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil
qassim@peno.coppe.ufrj.br

Recebido: 13/02/14 - Revisado: 16/07/14 - Aceito: 22/12/14

RESUMO

No Brasil, a Baía de São Marcos no Estado do Maranhão apresenta um alto potencial energético para o aproveitamento elétrico das correntes de maré, tendo sido cogitada para instalação de Parques de Conversores de Energia Hidrocínética (PCEHs). O objetivo principal deste artigo é apresentar uma metodologia para análise dos impactos dos PCEHs em regiões costeiras. São consideradas a localização dos PCEHs, a quantidade de potência extraível em cada parque e os Processos Hidrodinâmicos, Sedimentológicos e Morfológicos. Para mostrar a exequibilidade da metodologia foram idealizados e analisados cenários hidrossedimentológicos, com uso do código computacional denominado SisBaHiA[®], desenvolvido na COPPE/UFRJ. Três regiões foram identificadas para a instalação de PCEHs, nas quais podem ser gerados 134 GWb.ano⁻¹. Os resultados do modelo hidrossedimentológico indicaram alterações no movimento de sedimentos devido às proximidades dos PCEHs, assim como interferências positivas e negativas na produtividade energética. Concluiu-se ser necessário otimizar o número e a distribuição espacial dos PCEHs, para maximizar a geração de energia elétrica e minimizar os possíveis impactos decorrentes do movimento de sedimentos na região.

Palavras Chave: Energia renovável. Energia das correntes de maré. PCEH. Modelagem hidrossedimentológica

ABSTRACT:

In Brazil, São Marcos Bay has a highly promising potential for the generation of electricity through the conversion of tidal current energy. This paper presents a methodology to study impacts of Hydrokinetic Energy Converter Farms (HECF) in coastal regions. Their location, power production and hydrodynamic, sedimentological and morphological processes are considered. For this purpose, idealized hydrosedimentological scenarios were modeled using the Base System for Environmental Hydrodynamics (SisBaHiA[®]) developed at COPPE/UFRJ. Three zones were identified for exploration. When an analytical power model was applied to these zones it yielded an annual potential output in the range of 134 GWb. Results of the hydrosedimentological model show alterations in sediment movement, as well as positive and negative interferences in power production. Interactions between HECF must be well understood to maximize power production and minimize adverse environmental impacts.

Keywords: Renewable energy. Tidal energy. Hydrokinetic energy converters. Hydrosedimentological modeling

INTRODUÇÃO

O Brasil é uma das maiores economias emergentes do mundo, cujo crescimento tem exigido quantidades consideráveis de energia. A Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2012) previu um aumento anual médio da demanda elétrica para a próxima década, de 4,5 %, passando de 472 TWh em 2011 para 736 TWh em 2021. Na matriz de energia, as usinas hidrelétricas geram 76,9 % da oferta de energia elétrica do Brasil, restando 12,0 % para os combustíveis fósseis, 2,7 % para a nuclear e 8,4 % para outras energias renováveis, tais como biomassa, eólica e solar (Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2013). O governo do Brasil pretende aumentar o uso de energias renováveis na geração de energia elétrica.

A costa do Brasil, banhada pelo Oceano Atlântico, tem uma extensão superior a 10.000 km incluindo reentrâncias, estendendo-se desde o Hemisfério Norte até Hemisfério Sul. As marés são semidiurnas de Vitoria-ES para o Norte e mistas, com dominância das semidiurnas, para o Sul. Condições de macromaré (desníveis do mar superiores a 4,0 m) são encontradas na região da embocadura do Rio Amazonas, a qual inclui os Estados do Amapá, Pará e Maranhão. No Estado do Maranhão, na Baía de São Marcos (Figura 1), registram-se desníveis em torno de 6,6 m durante as marés de sizígia (El-ROBRINI et al., 2006), sendo das mais significativas do país. Devido à energia das marés depender da velocidade de suas correntes de enchente e vazante, que por sua vez depende de sua altura, a Baía de São Marcos surge como local merecedor de análise detalhada, para esse tipo de aproveitamento energético.

OBJETIVOS

São quatro os objetivos deste artigo:

1. Selecionar as regiões da Baía de São Marcos, de maior potencial energético de correntes de maré, e dimensionar PCEHs para estas regiões.
2. Apresentar uma metodologia para análise dos impactos dos PCEHs sobre os Processos Hidrodinâmicos, Sedimentológicos e Morfológicos em regiões costeiras.
3. Descrever os possíveis impactos dos PCEHs nos Processos Hidrodinâmicos, Sedimentológicos e Morfológicos desta região estuarina.
4. Analisar os efeitos dos PCEHs na hidrodinâmica e morfologia das regiões selecionadas da Baía de São Marcos, com a ajuda de modelagem computacional, para cenários hidrossedimentológicos idealizados, possíveis de ocorrer nestas regiões.

Conversores de Energia Hidrocinética - CEH

Os Conversores de Energia Hidrocinética (CEH) são mecanismos que transformam a energia cinética de um escoamento hídrico em energia elétrica. Existem três tipos principais de conversores:

CEH de eixo horizontal: quando o eixo de rotação do rotor se situa no mesmo plano horizontal do escoamento (Figura 2a).

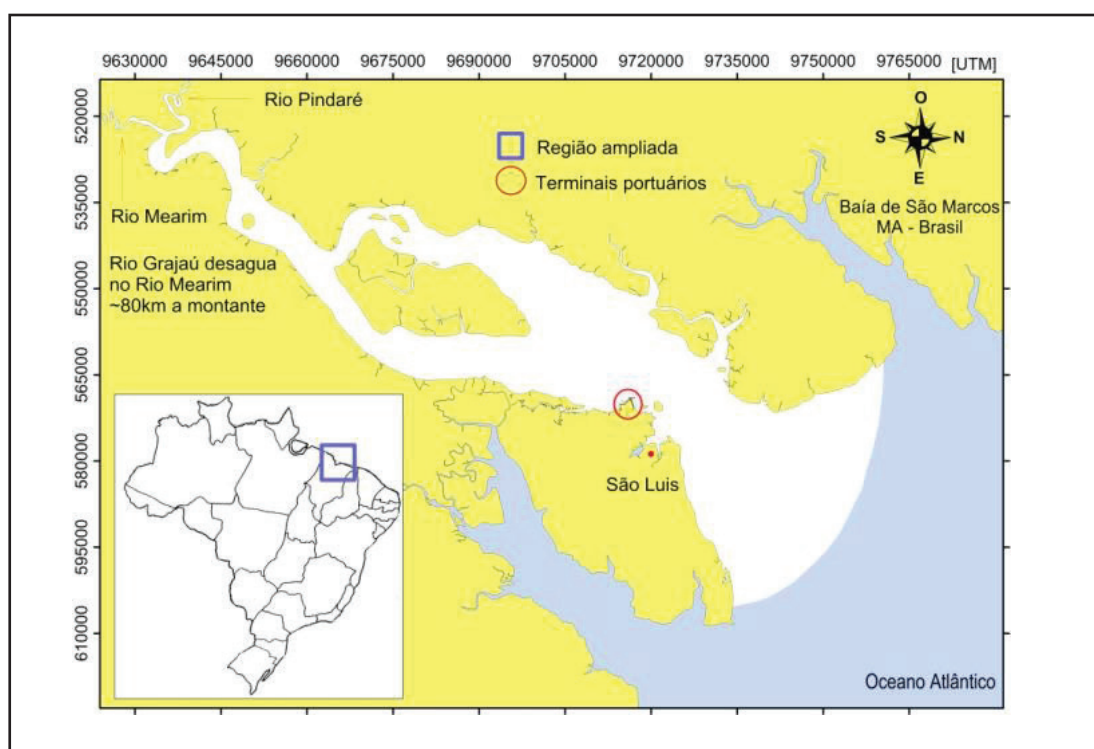


Figura 1 – Baía de São Marcos e domínio de estudo

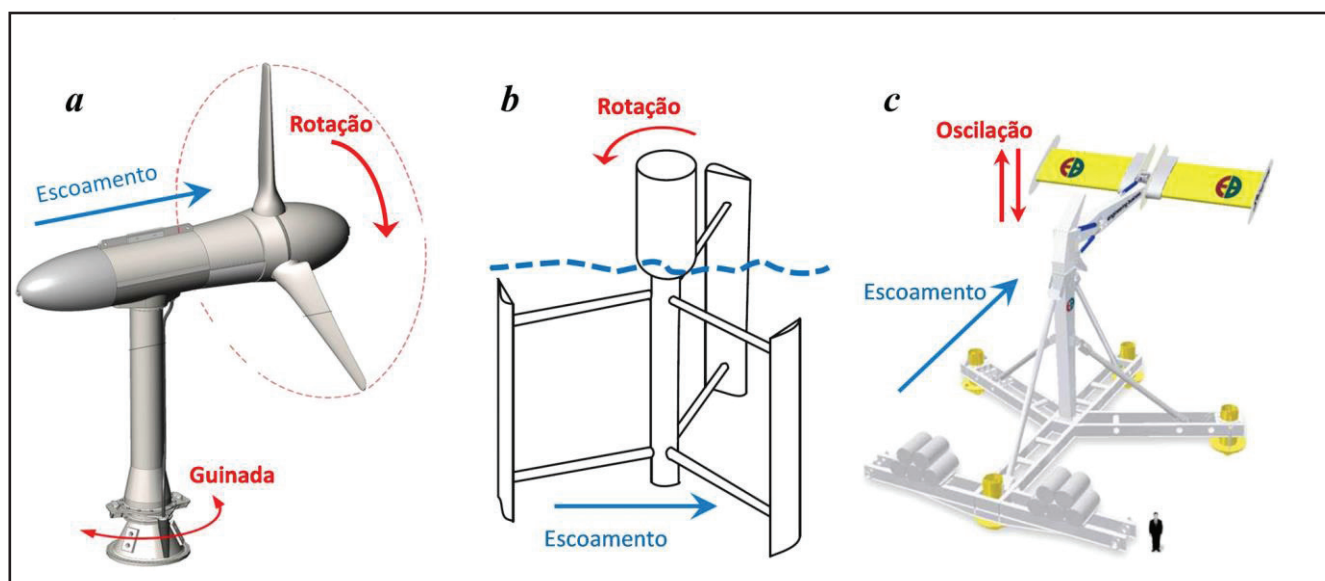


Figura 2 – Tipos de CEHs: a) Eixo horizontal (adaptado de Verdant Power, 2014), b) Eixo vertical (adaptado de Khan, 2009) c) Hidrofólio (STINGRAY GENERATOR, 2002)

CEH de eixo vertical: quando o eixo de rotação do rotor está num plano transversal ao escoamento (Figura 2b).

CEH hidrofólio: a diferença de pressão nas partes superior e inferior do aparelho provoca oscilação no hidrofólio, a qual é utilizada para a geração de energia elétrica (Figura 2c).

Os equipamentos a e b são os mais comuns, sendo os de eixo horizontal os mais desenvolvidos e testados em escala comercial.

Baía de São Marcos

A Baía de São Marcos (Figura 1) está localizada no Estado do Maranhão, entre as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Junto com a Baía de São José formam a unidade geológica conhecida como o Golfão Maranhense. Este golfão inclui baías, estuários, estreitos, igarapés, enseadas, inúmeras ilhas, além de uma vasta área de manguezal e planície de marés (EL-ROBRINI et al., 2006). Na metade sul da baía encontra-se uma grande ilha de manguezal - a Ilha do Caranguejo, que divide o estuário em dois canais. Os três rios principais da baía são os Rios Pindaré, Mearim e seu afluente Grajaú, que deságuam no extremo sul da baía, sendo os responsáveis pela carga sólida em suspensão, cuja concentração média anual é de 250 mg.L^{-1} (MALHEIRO DA SILVA, 2011). A entrada da baía tem aproximadamente 55 km de largura, estreitando-se para 15 km na sua seção central, para novamente aumentar para 25 km a jusante da Ilha do Caranguejo. A partir daí começa a diminuir continuamente para montante, até alcançar uma largura de 1,5 km na interseção dos Rios Pindaré e Mearim Malheiro da Silva (2011). A baía possui um canal principal bem definido, com profundidades que chegam a 70 m, permitindo acesso aos principais terminais portuários da região: Portos de São Luís e Itaqui, e os Terminais Alumar e Ponta da Madeira. A ampliação em andamento deste último permitirá exportar até 235 milhões de toneladas por ano de mineral de ferro, convertendo-se no porto com maior

volume de carga do Brasil. Estas instalações são responsáveis pelo crescimento econômico da região, mas, ao mesmo tempo, em conjunto com usinas de produção de aço e alumínio, são consumidores vorazes de energia elétrica.

Condições para a eficiente extração de energia

Segundo Fraenkel (2002, 2007) e Myers e Bahaj (2005), as condições necessárias para a extração eficiente de energia com CEHs, são:

1. Velocidades de correntes acima $1,1 \text{ m.s}^{-1}$. Locais ideais teriam velocidades de correntes de maré de sizígia médias entre $2,0$ a $2,5 \text{ m.s}^{-1}$, com baixa dispersão direcional.
2. Profundidades entre 20,0 e 50,0m para CEH de primeira geração. A porção utilizável da coluna de água, encontra-se entre 0,25 \times acima do fundo e 3,0 m abaixo do nível mínimo de maré de sizígia (MLWS), em áreas protegidas, ou 7,0 m abaixo do MLWS, em áreas costeiras expostas a ondas maiores que 4,0 m.
3. Áreas com correntes de maré, cujas inversões ocorrem no mesmo eixo longitudinal, são preferíveis para a instalação de CEHs, devido às características operacionais dos conversores.
4. Áreas com restrições ambientais, conflito de usos e exequibilidade comercial devem ser consideradas, com o objetivo de identificar, de forma adequada, as zonas para instalação de parques de CEHs.

ESTIMATIVA DA POTÊNCIA A SER EXTRAÍDA: METODOLOGIA

Para um PCEHs com espaçamento homogêneo, as

distâncias entre os conversores devem ser otimizadas. Os espaçamentos lateral e longitudinal afetam diretamente as características das esteiras formadas a jusante dos conversores e, conseqüentemente, a extração de potência. O déficit de velocidade na esteira ($1-U/U_o$), é igual à redução da velocidade do escoamento livre U_o a montante e a jusante do CEH. U é o valor da velocidade do escoamento atingida ao longo da linha de conversores. Neste trabalho, assume-se para conversores com diâmetro DR , um espaçamento lateral igual a $3 DR$ e um espaçamento longitudinal inicial de $20 DR$, para uma recuperação de 90% de U_o , de acordo com Sun (2008), Harrison et al. (2009) e Myers e Bahaj (2010).

O procedimento para a estimativa preliminar de geração de potência na Baía de São Marcos, com CEHs, contém as seguintes etapas, hipóteses simplificadoras e considerações:

1. Identificação das regiões com velocidades acima de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ em 50 % do tempo de um mês lunar, e profundidades acima de 25,0 m.
2. Promediação das séries temporais de velocidades estimadas pelo modelo hidrodinâmico, para as zonas de interesse, uma vez que na modelagem numérica, cada zona é representada por vários elementos e nós de cálculo.
3. Os perfis laterais de velocidade do escoamento, que atingem as filas de conversores, são uniformes.
4. CEHs com eixo horizontal de rotação. Escolha do diâmetro do rotor em função da profundidade média de cada zona.
5. Arranjo retangular simétrico dos CEHs no corpo de água.
6. A Potência Extraída, P , de um CEH é calculada pela Equação 1:

$$P = 0,5 \eta C_p \rho A_T U^3 \quad (1)$$

onde η é a eficiência da turbina, C_p o coeficiente de potência, ρ a densidade da água, A_T a área de varredura do rotor e U a velocidade do escoamento. O valor de ηC_p resulta de observações de um CEH testado em escala comercial e divulgado por Smith (2012). No cálculo da potência, este valor foi mantido constante.

7. Uma taxa constante de $U/U_o = 0,9$ foi admitida para todo o parque. Desta forma, a velocidade do escoamento que atinge as sucessivas filas de conversores U_p é calculada pela Equação 2:

$$U_i = \left(\frac{U}{U_o} \right)^{i-1} U_o, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Sendo i o índice de cada fila, e n o número total de filas.

8. Devido ao comprimento longitudinal do parque, é possível que haja um déficit crescente de velocidade para jusante da primeira fila. Assim, definem-se as seguintes restrições para a velocidade de arranque:
 - a. A quantidade de filas deve permitir, em 50 %

do tempo, que a velocidade do escoamento que atinge as filas seguintes, U_{50} , seja maior que o valor da velocidade de arranque do conversor, ou seja, $U_a = 0,7 \text{ m.s}^{-1}$, para o caso em análise (Polagye, 2010). Por meio da Equação 3, substitui-se U_i por U_a e U_o por U_{50} pode-se obter uma expressão, Equação 3:

$$N_F = \ln \left(\frac{U_a}{U_{50}} \right) / \ln \left(\frac{U}{U_o} \right) \quad (3)$$

para determinar o número máximo de filas, N_F .

Onde U/U_o corresponde à taxa definida no item 7.

b. Em alguns casos, o espaçamento longitudinal entre as filas é aumentado, para maior extração de potência. Como a curva de taxa de perda de velocidade do escoamento é assintótica, haverá uma distância acima da qual não haverá mais recuperação significativa de velocidade. Por esse motivo, para espaçamentos de $25 D_R$ a $30 D_R$, as relações U/U_o foram consideradas iguais a 0,91 e 0,92, respectivamente.

9. As hipóteses simplificadoras relativas ao movimento de sedimentos serão destacadas a seguir e no decorrer do artigo.

BASES ANALÍTICAS E HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS DA MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

Os modelos utilizados neste trabalho fazem parte do SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. (www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Este sistema foi adotado por resolver adequadamente as equações que representam os fenômenos físicos a serem modelados. Vale mencionar que o SisBaHiA® foi aplicado em numerosos e variados projetos de modelagem de corpos de água naturais. Na página do modelo, pode-se acessar exemplos de aplicações e a Referência Técnica do SisBaHiA®, com informações detalhadas sobre as formulações matemática e numérica dos modelos.

Resume-se, a seguir, a parte relativa à modelagem hidrossedimentológica da referência técnica do SisBaHiA® (ROSMAN et al., 2013).

Equações governantes do modelo hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® é um modelo 3D ou 2DH, otimizado para corpos de águas naturais com geometria complexa, que considera as aproximações hidrostática e de Boussinesq. Processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação sigma, σ , que permite o mapeamento de corpos de água com contornos e batimetrias complexas, campos de vento e atrito junto ao fundo que variam no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). Podem-se incluir efeitos de gradientes de densidade, acoplando-se, por exemplo,

o transporte de sal e calor, dos Modelos de Qualidade de Água, aos Modelos Hidrodinâmicos. Pode-se também incluir a evolução morfológica do fundo, com o acoplamento de modelos de movimento de sedimentos, descrito sem seguida.

Para o caso analisado, o modelo hidrodinâmico 2DH com fundo móvel foi utilizado. Basicamente, o modelo empregado é uma evolução do utilizado por Rosman (2009), com a inclusão de um termo de tensão devido aos efeitos de turbinas, semelhante ao empregado por Gorbeña et al. (2015), mas acoplado a um modelo de transporte de sedimentos, para descrição da evolução morfodinâmica. As equações resolvidas numericamente pelo modelo hidrodinâmico são:

Equação da continuidade volumétrica com leito móvel:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\hat{u}_i (\zeta + h)] = \Sigma q, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

sendo ζ o nível da superfície livre, h a cota batimétrica, i.e., o valor negativo da cota do fundo relativa ao plano de referência adotado. Σq representa fluxos de evaporação, precipitação e infiltração, e \hat{u}_i a velocidade do escoamento promediada na vertical. A altura instantânea da coluna de água é definida pela Equação (5)

$$H(x, y, t) = \zeta(x, y, t) + h(x, y, t) \quad (5)$$

Equação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \\ & + \frac{1}{\rho H} \left[\frac{1}{\partial x_i} \left(H \hat{\tau}_{ij} \right) + \tau_{i2}^S + \tau_{i3}^F + \tau_{i4}^T \right] + \hat{a}_i \end{aligned} \quad (6)$$

onde: \hat{a}_i representa a aceleração de Coriolis, 1* são as tensões dinâmicas turbulentas, 2* são as tensões do vento na superfície livre, 3* são as tensões de atrito atuantes no fundo do escoamento e 4* são termos adicionais de tensão para representar o efeito de perda de carga associado à influência dos CEHs. Para isto, Gorbeña (2010) introduziu no código do modelo hidrodinâmico do SisBaHiA®, o termo de tensão dado pela Equação:

$$\tau_i^T = \frac{1}{2} \rho C_T (\hat{u}^2 + \hat{v}^2)^{0,5} \hat{u}_i \cdot \Theta \quad (7)$$

C_T é o coeficiente de arrasto, o qual se relaciona com o coeficiente de potência da turbina, C_p , mediante a teoria do disco atuador desenvolvida por Rankine (1865) e Froude (1889), Equação 8 e Equação 9, respectivamente:

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (8)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (9)$$

Sendo a o fator de indução de fluxo axial. Conforme o limite de Betz (1920), o valor ótimo é $a = 1/3$, do qual se obtém

$$C_T = 0,870 \text{ e } C_p = 0,593.$$

Se A_I é a área de influência de cada nó computacional, A_T a área de varredura de cada CEH, e N_p o número de conversores por nó, a Equação 10,

$$\Theta = N_p \cdot (A_T / A_I) \quad (10)$$

representa a área total de varredura por nó de cálculo, que se denomina fator de obstrução nodal.

Para os CEHs de eixo horizontal com controle de ângulo de passo das pás, o valor de C_T varia com a velocidade da ponta da pá (BAHAJ et al., 2007). Assim, durante um ciclo de maré haverá variação de C_T . O mesmo acontece com C_p ; o qual alcança um valor máximo em função da velocidade da ponta da pá. Os valores de C_p de um conversor comercial de eixo horizontal com controle de passo de pá, variam entre 0,45 e 0,52 (FRAENKEL, 2011) e o valor máximo de C_T é igual a 0,82 para uma velocidade nominal de 2,4 m.s⁻¹ (FRAENKEL, 2009).

Modelo hidrodinâmico com fundo móvel – evolução morfodinâmica

No SisBaHiA®, o modelo morfodinâmico faz o balanço de massa de sedimentos no fundo, a partir da estimativa do movimento de sedimentos devido à ação dos agentes hidrodinâmicos.

O usuário tem a opção de escolher e calibrar a fórmula de transporte de sedimentos a ser utilizada. A superfície do fundo, $S_F \equiv z = -h(x, y, t)$, se altera com o tempo, já que o valor de h varia com o tempo. Deste modo, é possível avaliar, dentro da escala espacial do modelo, a evolução morfológica do leito, no domínio de modelagem e quantificar as taxas de erosão e assoreamento.

Com a alteração da batimetria, alteram-se também as características hidrodinâmicas do escoamento, resultando em um processo com retroalimentação.

Critério de mobilidade dos sedimentos

A erosão, o transporte, a dispersão e o assoreamento do leito dependem dos valores da tensão de atrito do escoamento junto ao leito, τ_o . Valores de $\tau_o > \tau_c$, onde τ_c é a tensão crítica de mobilidade dos grãos de sedimentos do leito, colocam em movimento os sedimentos e degradam o leito do escoamento, e quando $\tau_o < \tau_c$, o escoamento não consegue movimentar os sedimentos do leito. Entretanto, os valores de τ_o necessários para manter o grão em movimento podem ser inferiores ao valor crítico τ_c . Assim se $\tau_o > \tau_c$ é um bom critério para caracterizar o início do movimento do grão, $\tau_o \leq \tau_c$ não, necessariamente, faz com que o grão que estiver em movimento, se imobilize.

No caso de sedimentos arenosos, o critério de mobilidade empregado se baseia no parâmetro de Shields (1936), θ denominado tensão tangencial normalizada.

Na natureza, o limite para o movimento incipiente não é bem definido, pois as forças hidrodinâmicas dos escoamentos turbulentos, são variáveis aleatórias que variam continuamente no tempo, e atuam sobre leitos formados de sedimentos que apresentam irregularidades de forma, tamanho e peso específico.

De fato, como se pode observar em representações do diagrama de Shields, há uma nuvem de pontos na vizinhança da linha que define τ_c e/ou θ_c . Além do mais, segundo Neil e Yalin (1969), Buffington e Montgomery (1997) e De Souza (2010), a dispersão dos dados experimentais, observada nas curvas do movimento incipiente, deve-se, principalmente, à subjetividade na definição das condições críticas. Deste modo, ao invés de um valor crítico preciso, há uma faixa de movimento incipiente definida por $\tau_c \pm \alpha$, onde α representa uma faixa de incerteza ou tolerância. O SisBaHiA® (ROSMAN, 2013) considera que à medida em que τ_o / τ_c se aproxima de $(1 + \alpha)$ a probabilidade de ocorrer movimento e transporte se aproxima de 100%, e, passa a ser 100% quando $\tau_o / \tau_c \geq (1 + \alpha)$. Analogamente, quando τ_o / τ_c se aproxima de $(1 - \alpha)$ a probabilidade de ocorrer movimento diminui, sendo nula quando $\tau_o / \tau_c \leq (1 - \alpha)$.

Fórmulas de Transporte de Sedimentos – Descarga Sólida Potencial

No SisBaHiA® pode-se escolher ou inserir a fórmula de transporte de sedimentos a ser utilizada. Para o transporte total, por arraste e em suspensão do material do leito: Ackers e White (1973) apud (HR, 1990), Engelund e Hansen (1967) e Van Rijn (2007a,b,c). Para o transporte por arraste: Meyer-Peter e Muller (1948), Nielsen (1992), Madsen (1991) e Yalin (1977). Embora todas sejam fórmulas bem estabelecidas, com aplicações práticas bem sucedidas, a escolha demanda critério, já que foram calibradas e validadas para escoamentos e condições hidrosedimentológicas específicas. Quando aplicadas em escoamentos naturais, elas devem ser calibradas e validadas para o trecho de escoamento estudado, para que suas aplicações sejam confiáveis. A fórmula de Engelund e Hansen (1967) é utilizada no presente trabalho por considerar os transportes por arraste e suspensão do material do leito. O uso desta fórmula se justifica pelos bons resultados alcançados com seu uso, na estimativa do movimento de sedimentos de leitos arenosos que apresentam configurações de fundo do tipo dunas e rugas similares às encontradas nas regiões de estudo (ENGELUND, 1967; ENGELUND; HANSEN, 1967; KHORRAM; ERGIL, 2010a, 2010b).

Trata-se de uma expressão, calibrada originalmente com dados de Guy et al. (1966) apud Engelund e Hansen (1967) obtidos em Fort Collins, Colorado, USA, para leitos móveis em regimes de dunas, transição, anti-dunas e “canal-e-poço” (ENGELUND; HANSEN, 1967; SOUZA; SILVA, 2013). Para sua aplicação, deve-se separar a tensão tangencial de atrito em duas parcelas que atuam sobre o leito móvel do escoamento: (i) a parcela τ_o , relativa à rugosidade dos grãos de sedimentos, responsável pela geração do movimento de sedimentos, e (ii) a parcela complementar $\tau_{o'}$, relativa às configurações ou formas de fundo, responsável pela geração de turbulência e calor.

A fórmula de Engelund-Hansen implementada no SisBaHiA® é definida pela Equação 11.

$$q_{bm} = \frac{0,05}{c_f} \left[D_m \sqrt{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) D_m} \right] \left[\frac{\tau_o}{g(\rho_s - \rho) D_m} \right]^{5/2} \quad (11)$$

onde, q_{bm} é a descarga sólida em $[L^3 T^{-1}]$ dos sedimentos de diâmetro médio D_m , da classe granulométrica m do material do leito, ρ_s é a massa específica do sedimento, c_f é um novo coeficiente de atrito no fundo, que foi introduzido, empiricamente, na fórmula, o qual é calculado, pela Equação 12:

$$c_f = g \left[18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\epsilon} \right) \right]^{-0.5} \quad (12)$$

sendo ϵ a amplitude da rugosidade equivalente do fundo.

Com a fórmula apresentada, calculou-se a descarga sólida potencial para o sedimento do leito, i.e., a capacidade de transporte do escoamento fluido.

Atualização da batimetria do modelo morfodinâmico em função da curva granulométrica do material do leito

Para modelagem morfodinâmica é necessário conhecer a distribuição granulométrica dos sedimentos do leito e o estoque disponível, ou altura da camada erodível, em cada local.

Em um dado local, a altura da camada erodível de sedimentos no fundo por metro quadrado é dada por $S_E(x, y, t)$. Em cada instante, a altura da camada erodível corresponde à diferença entre a cota do fundo e a cota da camada não erodível mais abaixo. Um valor inicial S_{E0} deve ser determinado para todos os pontos do domínio do modelo.

Para o estudo morfodinâmico, é necessário conhecer a curva granulométrica dos sedimentos do leito do escoamento. No Brasil, adota-se a classificação granulométrica da “American Geophysical Union/USA”, baseada no processo de peneiramento, na qual os diâmetros da série de peneiras seguem uma progressão geométrica de razão igual a 2,0. Assim, um leito arenoso heterogêneo pode ser composto de uma mistura de areia muito fina ($0,0625 \leq D < 0,125$ mm) até areia muito grossa ($1,000 \leq D < 2,000$ mm), num total de $M = 5$ classes granulométricas. Caso o leito contenha sedimentos grossos, tipo cascalho, ou finos não coesivos, tipo siltes, novas classes poderão ser acrescentadas.

Curvas Granulométricas do Material do Leito

Para aplicação do SisBaHiA®, é necessário conhecer, em todos os pontos da malha do domínio, a curva granulométrica da camada ativa do material do leito. Assim, o usuário deve fornecer os valores das seguintes variáveis, para cada ponto do domínio:

D_m = diâmetro médio da classe m ($m = 1, M$), em [mm]

ρ_s = massa específica dos grãos em $[kg.m^{-3}]$

λ = porosidade do leito arenoso, que varia de 0,3 a 0,5.

α = percentual da faixa de tolerância para τ_c .

Com os dados acima o modelo calcula a tensão crítica de Shields, para cada classe de sedimento.

No instante inicial t_0 , em um ponto (x, y, t_0) do leito do escoamento, tem-se a Equação 13:

$$\sum_{m=1}^M f_m(x, y, t) = 1,0 \quad (13)$$

onde $f_m(x, y, t_o)$ é a frequência relativa, i. é. a fração em peso, dos sedimentos da classe granulométrica de diâmetro médio D_m , no instante t_o .

O SisBaHiA[®] considera um esquema simplificado de movimento de sedimentos, no qual supõe que, no instante inicial, to, a espessura da camada ativa de sedimentos de cada classe S_{Eom} , em cada ponto, é dada pela Equação 14:

$$S_{Eom}(x, y, t_o) = f_m(x, y, t_o) S_{Eo}(x, y, t_o) \quad (14)$$

Durante o tempo, o estoque de sedimentos, ou altura erodível remanescente de cada classe de sedimentos será dada pela Equação 15 :

$$S_{Em}(x, y, t) = \max[S_{Eom}(x, y) + DS_{Em}(x, y, t); 0] \quad (15)$$

onde DS_{Em} é a variação acumulada da altura erodível de cada sedimento.

A equação do balanço de massa de cada classe de sedimento, dada pela Equação de Exner (1925), Equação 16, relaciona a variação temporal de S_{Em} , em função das variações espaciais das componentes da descarga sólida efetiva por unidade de largura, q_{bmx} e q_{bmy} :

$$\frac{\partial S_{Em}}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_m} \left(\frac{\partial q_{bmx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bmy}}{\partial y} \right) \quad (16)$$

onde λ_m é a porosidade do sedimento m .

O cálculo de q_{bm} considera a fração disponível de sedimento, que deve ser obtida de amostras de sedimentos de fundo.

Modelagem hidrossedimentológica

A modelagem hidrossedimentológica demanda uma série de dados de entrada que incluem: batimetria, vazões líquida e sólida dos principais rios, curvas granulométricas e espessuras das camadas erodíveis no domínio, assim como o regime de marés e ventos na região. Como ainda não se dispõe de um banco de dados sobre os regimes hidrossedimentológicos e sobre as características morfológicas da região de estudo, durante ciclos lunares e hidrológicos, foram utilizados dados da literatura e conhecimentos sobre a região, para a idealização de cenários e comparação das interferências dos PCEHs sobre o movimento de sedimentos, nas áreas selecionadas da Baía de São Marcos.

A modelagem do terreno foi obtida da digitação de cartas náuticas da Baía de São Marcos disponibilizadas pela Marinha do Brasil (1999 a,b,c,d, 2000), embora estas cartas careçam de dados das regiões internas do estuário que têm pouco interesse para a navegação. Em tais regiões, a batimetria foi obtida da pesquisa desenvolvida na mesma região por Malheiro da Silva (2011). O domínio foi discretizado por uma malha de elementos finitos quadrangulares composta de 1.244 elementos e 5.757 nós de cálculo. A Figura 3 ilustra o detalhamento da malha nas proximidades do Terminal Marítimo da Ponta da Madeira. Para as interpolações foram utilizados polinômios Lagrangeanos biquadráticos.

A Tabela-1 mostra as vazões líquidas médias mensais,

mínimas e máximas, observadas durante o período de 1964 a 1983, em estações fluviais situadas nos três rios principais, Mearim, Pindaré e Grajaú que afluem à Baía de São Marcos (MONTES, 1997).

Tabela 1 – Vazões líquidas médias mensais, mínimas e máximas, dos principais rios da região (Montes, 1997)

Rio	Estação	Vazão média mensal (m³.s⁻¹)	
		Mínima	Máxima
Mearim	Barra do Corda	45,2	97,0
	Bacabal	50,6	199,0
Grajaú	Grajaú	9,2	86,7
	Aratoi-Grande	15,2	317,0
Pindaré	Pindaré-Mirim	27,6	532,0

Como mencionado por Malheiro da Silva (2011), devido ao grande prisma de maré da Baía de São Marcos, as vazões fluviais, mesmo durante as cheias, só influenciam a hidrodinâmica no extremo sul do estuário. Portanto, na modelagem hidrodinâmica 2DH da Baía de São Marcos, o forçante principal é a maré. Desta forma, as amplitudes e fases para os constituintes de maré observados na estação maregráfica de Ponta da Madeira, o principal porto da região, e disponibilizadas pela FEMAR (SALLES et al., 2000), foram extrapoladas para a fronteira aberta do domínio.

Devido à falta de dados sobre os tipos de sedimentos e sua distribuição na baía, adotou-se uma curva granulométrica geral composta por cinco classes granulométricas de siltes e areias, conforme apresentado na Tabela 2, facilmente encontradas em regiões costeiras brasileiras. Como em geral, as dunas observadas nestas regiões apresentam amplitudes inferiores a 5,0 m, adotou-se este valor para a espessura máxima de transporte ou de espessura máxima erodível. Nas regiões com afloramentos rochosos identificados nas cartas náuticas, o limite de erosão foi estabelecido em 0,0 m. A Tabela 2 apresenta as características das classes de sedimentos e percentuais que formam a curva granulométrica hipotética do estudo.

Tabela 2 – Características das classes de sedimentos utilizadas na modelagem da Baía de São Marcos, MA

Sedimento	D_m (mm)	Porosidade	% da classe
Silte grosso	0,0450	0,55	5,0
Areia muito fina	0,0935	0,45	10,0
Areia fina	0,1875	0,40	50,0
Areia média	0,3750	0,30	30,0
Areia grossa	0,7500	0,25	5,0

As condições de contorno sedimentológicas adotadas nos contornos aberto e fluviais foram de capacidade de transporte, para as M classes de sedimentos pertinentes ao domínio. No caso, as frequências das diferentes classes de sedimentos são definidas nas condições iniciais para o nó de contorno. Condições de capacidade de transporte significam que em qualquer momento, a descarga sólida que atravessa o contorno é igual à capacidade de transporte do escoamento local.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo foi realizada utilizando as constantes de maré observadas no marégrafo do Terminal Portuário de Ponta da Madeira. Para esse propósito, as principais componentes harmônicas da maré foram individualmente propagadas da fronteira aberta exterior do modelo até a estação de medição, e calibradas via um fator de correção aplicado, tanto na amplitude como na fase de cada componente. Os fatores de correção foram definidos sequencialmente, para as famílias 1, 2, 3 e 4 de constantes harmônicas. Os resultados da modelagem proporcionaram séries de nível semelhantes às obtidas pela maré sintética na estação de Ponta da Madeira.

Dalbene (2014) publicou medições de séries temporais de nível e velocidades de correntes, realizadas pelo INPH (1991) na Baía de São Marcos, que foram comparadas com os resultados do modelo aqui descrito. Na Figura 3 apresentam-se as comparações das séries computadas e medidas no ponto nomeado Area-Delta-VI. Como se pode observar nos gráficos comparativos da Figura 3, há forte coerência entre valores medidos e valores computados de níveis e correntes. Tomando como escala a amplitude dos respectivos valores, i.e., 2 m para níveis e $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ para correntes, verifica-se que as diferenças são em média inferiores a 5% nos níveis e a 10% nas correntes.

Condições hidrodinâmicas predominantes

Considerando as condições para a eficiente extração de

energia definidas anteriormente, apresenta-se na Figura 4, um mapa com ocorrências de velocidades de maré acima de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$, durante um período de 31 dias. Na Figura 4 são visíveis várias zonas com potencial para a extração de energia, das quais as três nomeadas A, B e C foram selecionadas para o cálculo de potência, por apresentarem porcentagens de ocorrência de velocidades acima de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ superiores a 50 % e de profundidades superiores a 20 m. A zona A está limitada à Oeste pelo canal de navegação. Embora a zona B esteja no canal de navegação, ela foi considerada para avaliação de potencial energético. A Tabela 3 resume as características físicas (comprimento X, largura Y, e cota batimétrica $h = -Z$) e hidrodinâmicas (velocidade média e máxima) de cada zona.

Tabela 3 – Características físicas e hidrodinâmicas das zonas identificadas com potencial energético

Zona	X (m)	Y (m)	h (m)	$U_{\text{média}} \pm \sigma, (\text{m.s}^{-1})$	$U_{\text{Max}}, (\text{m.s}^{-1})$
A	1.350	1.000	25 a 40	$1,14 \pm 0,06$	2,76
B	1.900	2.600	22	$1,17 \pm 0,14$	2,58
C	1.100	1.000	30 a 35	$1,07 \pm 0,04$	2,28

Elipses de correntes de maré foram obtidas para definir o comportamento direcional em cada zona. Na Figura 5 nota-se que os eixos das correntes de maré são bem definidos nas três zonas, características ótimas para a instalação de CEHs. Nesta figura, as correntes de vazante são positivas e as de enchente, negativas.

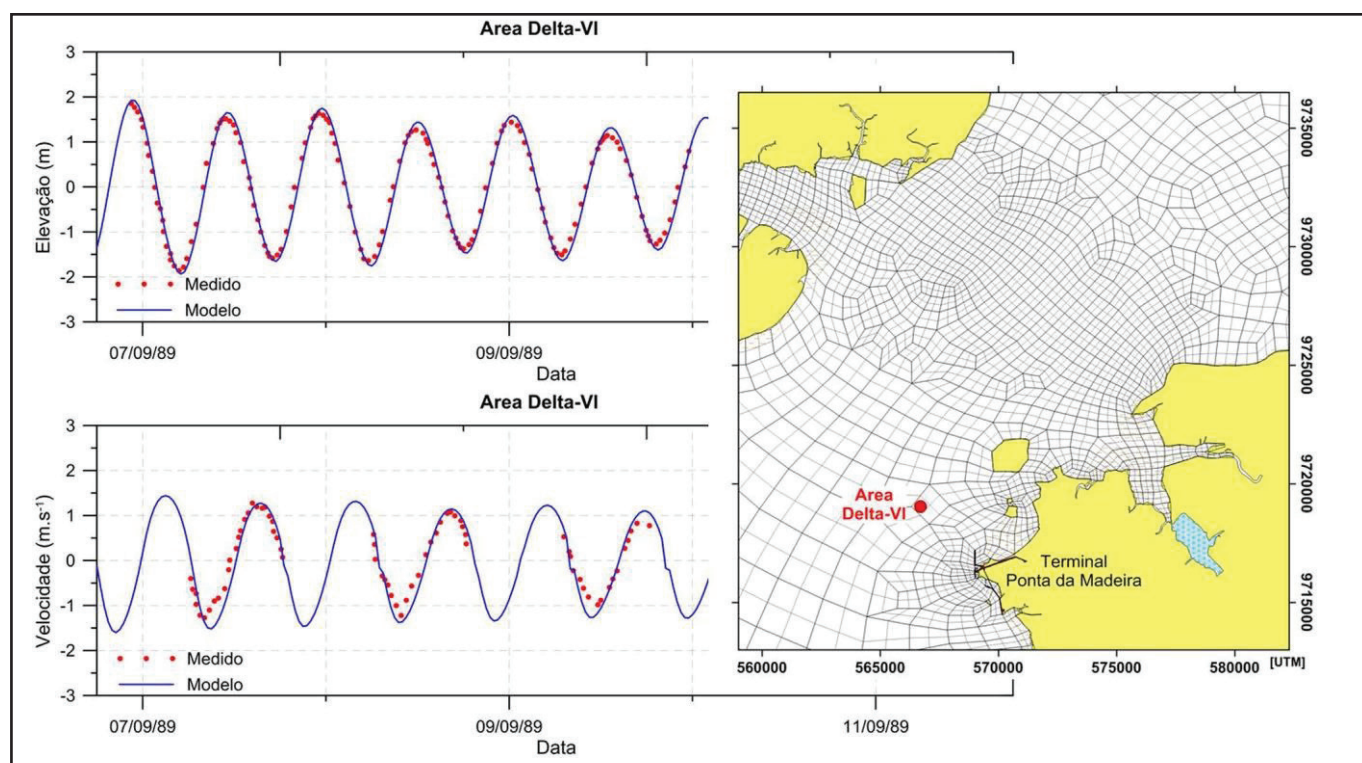


Figura 3 – Comparação das séries temporais de nível computadas e medidas no ponto nomeado Area-Delta-VI

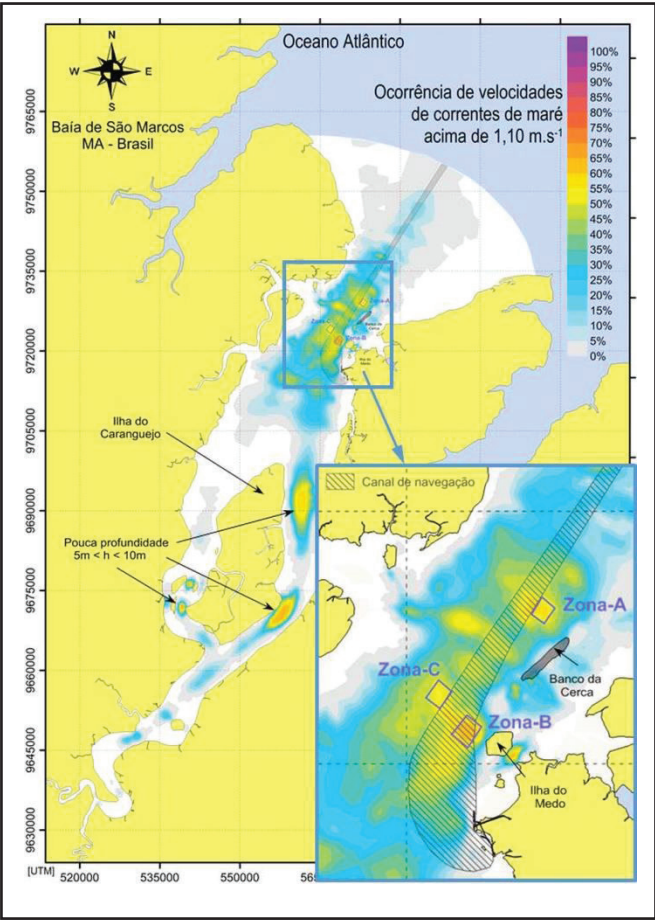


Figura 4 – Mapa de ocorrência de velocidades de correntes de maré acima de 1,1 m/s, com destaque para as regiões onde foram avaliadas as interferências dos PCEHs

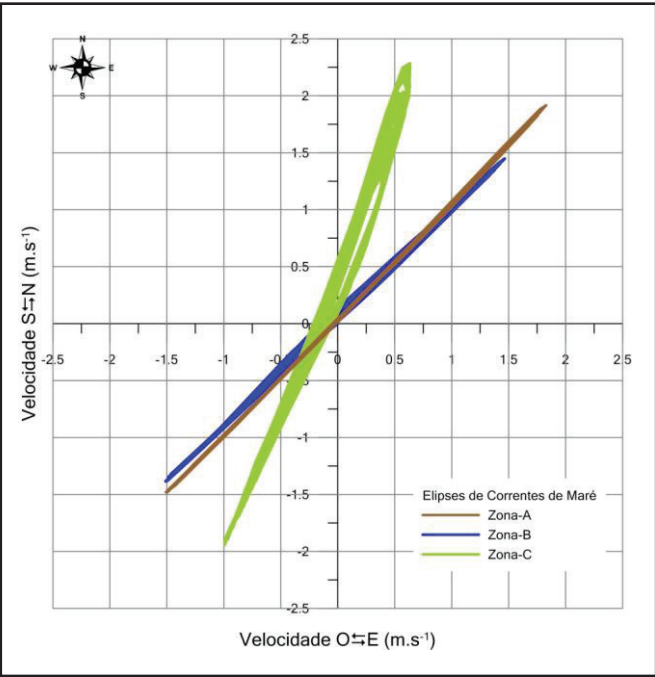


Figura 5 – Elipses de correntes de maré nas zonas A, B, e C

Localização, potência extraída e outras características dos PCEHs

A Tabela 4 resume as características dos parques e potências geradas nas regiões selecionadas. As quantidades previstas de potência anual são significativas, mas podem ainda ser otimizadas como indicado por (BAI et al., 2009 ; DIVETT et al., 2011 ; LEE et al., 2010 ; WANG ; MÜLLER, 2012 ; MYERS ; BAHAJ, 2012).

Uma vez fixadas suas características, é necessário, avaliar as alterações morfológicas e hidrodinâmicas causadas pelos PCEHs, assim como seus efeitos na produtividade de cada uma das regiões ou zonas selecionadas.

Tabela 4 – Configuração e potência gerada nos PCEHs para as zonas selecionadas

Zona	Diâmetro D_R do rotor (m)	$\Delta x(m)$	Nº de CEHs por fila	Nº de filas	Potência gerada (GWh.ano ⁻¹)
A	20	400	16	3	49,0
B	15	450	25	3	41,0
C	20	400	14	3	34,0

A análise dos impactos possíveis foi realizada para 6 cenários computacionais que incluem os efeitos:(i) individuais, de cada parque sobre demais zonas, e (ii) combinados, de pares de parques sobre zona remanescente. Nas modelagens inclui-se o termo de tensão adicional associado à presença dos conversores. O valor de C_T foi mantido constante igual a 0,54 para a velocidade mediana do escoamento durante o período das simulações (FRAENKEL, 2009).

Os resultados apresentados na Tabela 5 indicam a influência da combinação de PCEHs. Em alguns casos, há aumento significativo de geração de energia, em outros, diminuição.

Tabela 5 – Influência na geração de potência devido à combinação de PCEHs

Zona	P, GWh.ano ⁻¹	Porcentagem de ganho ou perda devido à influência de:					
		A	B	C	A-B	A-C	B-C
A	49,0	---	3,2	-5,4	---	---	-10,7
B	50,5	-2,5	---	9,5	---	-10,4	---
C	34,0	-4,1	16,7	---	13,2	---	---

Resultados hidrossedimentológicos dos PCEHs

De modo geral, a alteração na morfologia da região de estudo, em consequência da presença de PCEHs, foi avaliada para os 6 cenários mencionados, e mais outros 6, com coefi-

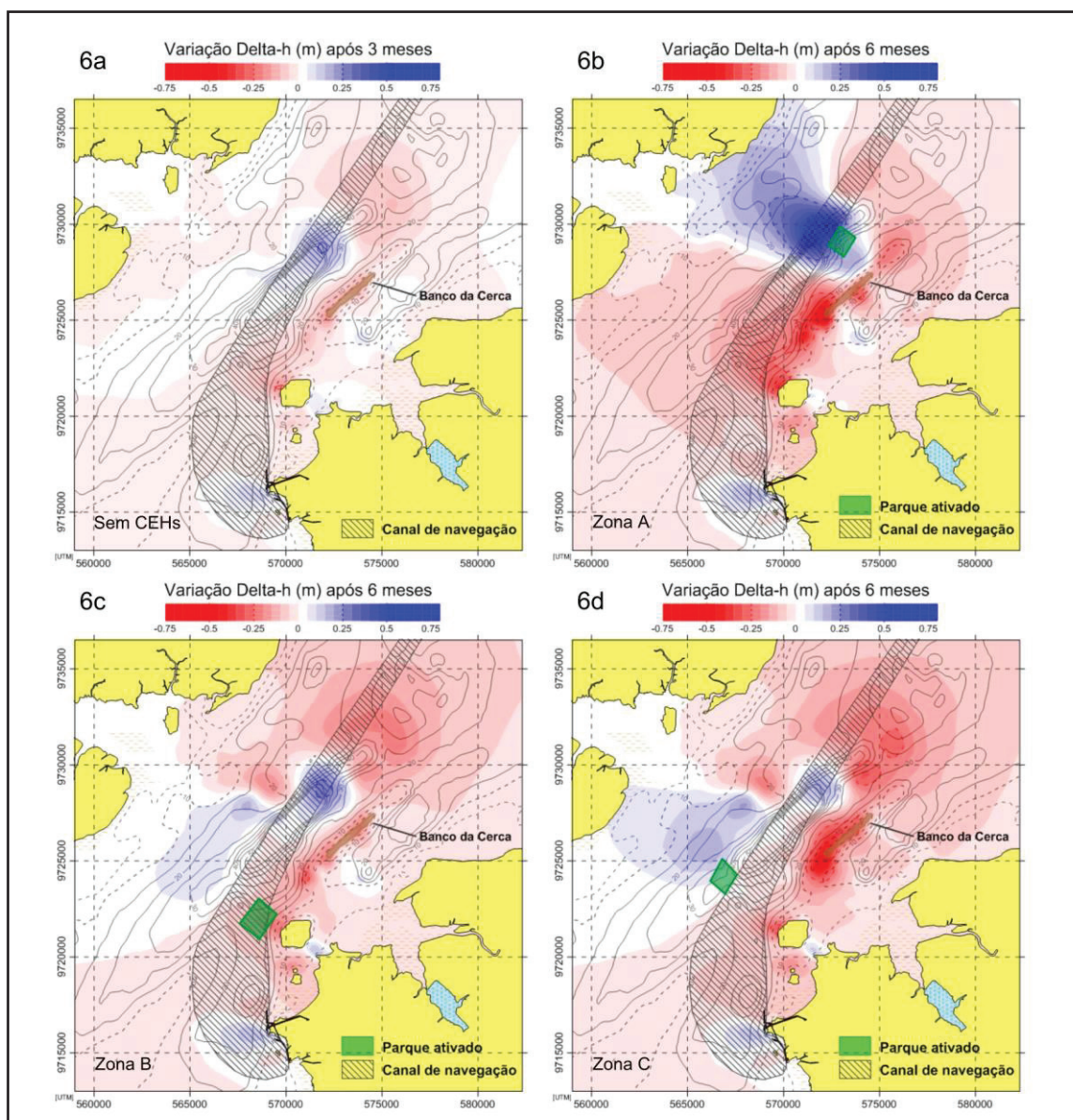


Figura 6 – Resultados, após um período de 6 meses, da variação de Δh acima da batimetria inicial adotada. Condições: Sem CEHs (3 meses) e com CEHs nas Zonas A, B e C (6 meses)

cientes de arraste para a condição de velocidade máxima. Os resultados obtidos para os 12 cenários foram comparados com a condição sem CEHs. As simulações compreendem um período de 6 meses para todos os cenários com parques de CEHs e de 3 meses para o cenário sem turbinas. Esse tempo de simulação foi considerado apropriado para atingir uma condição de equilíbrio dinâmico. Os resultados obtidos são apresentados, de acordo com a região de interesse, no conjunto de mapas das Figuras 6 e 7, para a condição de velocidade mediana. As cores vermelhas indicam áreas de assoreamento ou perda de profundidade, e as cores azuis indicam áreas que sofrem erosão ou ganho de profundidade.

Da condição sem conversores, Figuras 6a e 7a, resulta uma região com tendência à deposição ao Leste da zona B, entre esta e a Ilha do Medo. A região de assoreamento segue na direção Nordeste, de acordo com o banco identificado nas cartas náuticas denominado Banco da Cerca. A Sudoeste da zona

A, no canal de navegação, tem-se uma área de erosão devido às fortes correntes.

O resultado do cenário incluindo o parque na zona A, da Figura 6b, indica a maior movimentação sedimentológica dentre as quatro simulações realizadas. A região de erosão identificada na simulação sem conversores é amplificada, seguida de uma área de leve deposição no canal, na direção Nordeste. A deposição no Banco da Cerca é aumentada, assim como na zona B e suas imediações.

No caso do parque de CEHs se localizar na zona B, os processos sedimentológicos são semelhantes aos da condição sem turbinas. No terceiro cenário, o parque de conversores se localiza na zona C, os processos de erosão e assoreamento são influenciados pelos CEHs, embora quantitativamente não tenham a mesma intensidade dos cenários com parques na zona A. A região de erosão no interior do canal diminui, mas aumenta nas proximidades da zona C, na região Oeste e alinhadas ao canal de

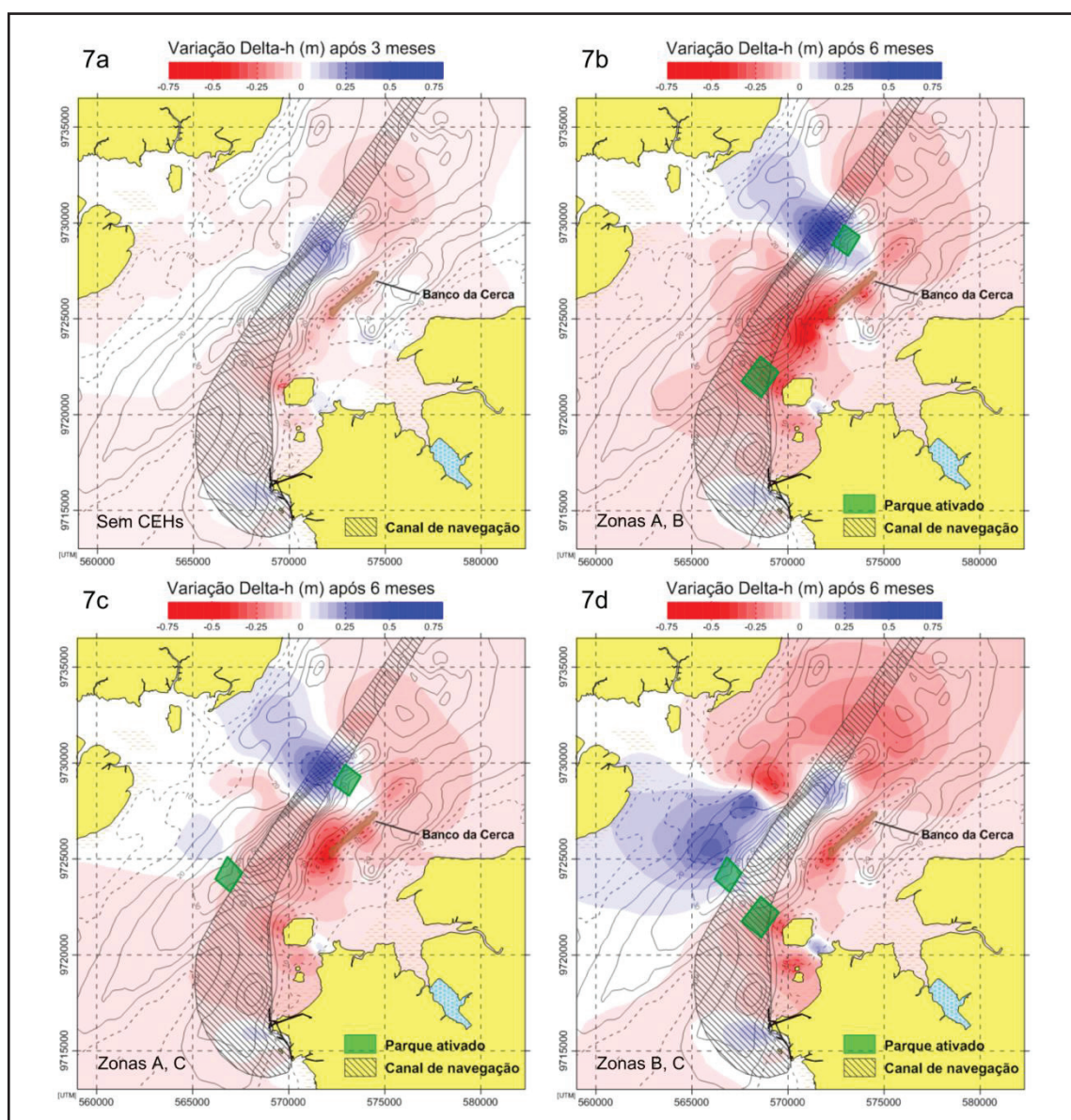


Figura 7 – Resultados, após um período de 6 meses, da variação de Δh acima da batimetria inicial adotada. Condições: Sem CEHs (3 meses) e com CEHs nas Zonas A,B; A,C e B,C (6 meses)

navegação. Para esse mesmo cenário, os processos de deposição aumentam no Banco da Cerca e Nordeste da zona A. Entretanto, a zona B sofre um assoreamento menor em comparação aos outros cenários. Os resultados dos cenários que consideram o efeito conjunto de pares de parques de CEHs estão apresentados na Figura 7. Os cenários que consideram a localização de conversores na zona A, Figura 7b e Figura 7c, apresentam uma erosão significativa na região do canal de navegação adjacente à zona A, sendo um pouco maior para o conjunto de parques A-B, mas sem atingir os valores da situação com o parque, individual, na zona A (Figura 6b). O aumento de profundidade na área é compensado pela deposição de sedimentos ao Sul, no alinhamento do Banco da Cerca, sendo mais significativa para o cenário com parques nas zonas A e B. Finalmente, no cenário com parques nas zonas B e C, Figura 7d, a intensidade da erosão diminui no canal de navegação, próxima a zona A, e intensifica-se a Oeste da zona C, seguida de uma região de leve

deposição a Nordeste, alinhada à via navegável. O resultado da erosão é semelhante ao caso da Figura 6d, porém mais intenso.

Vale destacar, a coerência da deposição indicada pelo modelo ao longo do Banco da Cerca, a Leste do canal de navegação entre as zonas A e B, indicando assim capacidade de reproduzir o que se verifica naturalmente. Os efeitos mencionados, em cada um dos cenários modelados indicam deposição de maior ou menor importância, dependendo do campo de velocidades decorrente da interação dos parques de CEHs.

Ao se analisar os processos sedimentológicos dos cenários com coeficientes de arraste para a condição de velocidade máxima, encontraram-se padrões semelhantes aos cenários acima, porém com valores de perda e ganho de profundidades maiores. No entanto, esses valores foram cerca de 20 % mais elevados. No cenário com parques nas zonas A e C, por exemplo, a erosão foi duas vezes maior na região do Banco da Cerca.

CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram alcançados:

1. Por meio da geração e posterior análise de mapas de ocorrência de velocidades de correntes de maré acima de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$, Figura 4, e profundidades acima de 20 m, determinaram-se três regiões para a instalação de PCEHs na Baía de São Marcos. Com a aplicação de um modelo analítico, descrito pelas Equações 1 a 3, foram especificados: (i) o número de CEHs para cada parque, que variou de 14 a 15 unidades, e (ii) a quantidade de energia extraível, que apresentou valores de 34 GWh.ano^{-1} até 50 GWh.ano^{-1} . As características de cada zona e parque foram resumidas nas Tabelas 3 e 4.

2. Apresentou-se uma metodologia para análise dos impactos dos PCEHs sobre os Processos Hidrodinâmicos, Sedimentológicos e Morfológicos em regiões costeiras com a utilização do modelo hidrossedimentológico do SisBaHiA[®]. Para o estudo desses impactos incluiu-se um termo adicional de tensão na equação bidimensional de quantidade de movimento promediada na vertical, apresentado na Equação (7). O termo de tensão, baseado na teoria do disco atuador, considera o efeito dos PCEHs e dos conjuntos dos mesmos, com coeficiente de arrasto, C_T , e área de varredura de cada CEH, A_T , distintas.

3 e 4. A modelagem hidrossedimentológica avaliou as interações entre os PCEHs na geração de energia e os efeitos morfodinâmicos devido à presença dos parques. Os resultados das interações evidenciaram, para a Baía de São Marcos, relações de ganho ou perda na geração de energia dependendo do posicionamento dos parques, como mostrado na Tabela 5.

5. Os resultados da modelagem hidrossedimentológica foram comparados com a batimetria inicial empregada na modelagem, ou seja, para um cenário sem CEHs. Na totalidade dos cenários com presença de PCEHs ficou evidente a influência dos mesmos nas taxas de erosão e assoreamento em suas imediações, ver Figuras 6 e 7. Além disto, os processos sedimentológicos influenciaram regiões afastadas até 15 km da zona de extração de energia. Nos cenários com posicionamento de PCEHs na zona A (Figura 6b, 7b e 7c), a morfologia do canal de navegação adjacente mostrou variações maiores de espessuras de erosão do que de deposição. O mesmo ocorreu para os cenários com conversores nas zonas B (Figuras 6c, 7b e 7d) e C (Figuras 6d, 7c e 7d), porém com tendências menores, tanto de erosão quanto de assoreamento. Concluiu-se que, para este estudo, a presença dos PCEHs não tem impacto significativo nos processos morfológicos, que ocasione, por exemplo, a perda de calado no canal de navegação e/ou nos terminais portuários. Para uma avaliação com maior grau de confiabilidade quantitativa será necessário obter dados mais realistas, especialmente de batimetria e de caracterização dos tipos de sedimentos na baía como um todo e especialmente nas cercanias das PCEHs.

Atualmente, estão sendo aplicados modelos de otimização (GORBEÑA, 2013), para a maximização da eficiência dos parques instalados, e minimização dos impactos adversos decorrentes das interações entre os parques e o movimento de sedimentos.

O estudo realizado confirma a importância das correntes

de maré da Baía de São Marcos para a instalação de PCEHs. A metodologia concebida neste trabalho permite determinar os efeitos dos PCEHs na Hidrodinâmica e Morfologia de regiões selecionadas na Baía de São Marcos, e em qualquer outra região fluvial ou costeira.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ pelo apoio recebido durante os estudos de doutorado, assim como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento da bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- ACKERS, P.; WHITE, W.R.. Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, v. 99, n.11, p. 2041-2060, 1973.
- BAHAJ, A.S.; BATTEN, W.M.J.; MCCANN, G. 2007. Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbines. *Renewable Energy*, v. 32, n.15, p. 2479-2490, 2007.
- BAI, L.; SPENCER, R.G. ; DUDZIAK, G. Investigation of the influence of array arrangement and spacing on tidal energy converter (CEHC) performance using a 3-dimensional CFD model. *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009.
- BETZ, A. "Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, v. 26, p. 307–309, 1920.
- BUFFINGTON, J.M.; MONTGOMERY, D.R. A system-atic analysis of eight decades of incipient motion studies with special references to gravel-bedded rivers. *Water Resources. Res.* V. 33, n. 8, p.1993-2029, 1997.
- DALBONE, R.C. *Análise das assimetrias de correntes ao longo do canal de acesso portuário da Baía de São Marcos: Um estuário de Macromarés*. 2014. Dissertação (MSc) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- DE SOUZA, A. L. R. *Estudo do movimento incipiente de sedimentos não coesivos em escoamentos com superfície livre*. 2010. Dissertação (M.Sc) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- DIVETT T.; VENNEL, R., STEVENS, C. Optimisation of multiple turbine arrays in a channel with tidally reversing flow by numerical modelling with adaptive mesh. *Proceedings European Wave and Tidal Energy Conference*, 8 pages, Southampton, 9/2011.

- EL-ROBRINI, M.; MARQUES, V. J.; SILVA, M. A.; EL-ROBRINI, M. H. S.; FEITOSA, A.C.; TAROUÇO, J. E .F.; SANTOS, J. H. S.; VIANA, J. R. Atlas de erosão e progradação da zona costeira do Estado do Maranhão - região amazônica: área oceânica e estuarina. In: DIETER MUEHE. (Org.). *Atlas de erosão e progradação da zona costeira brasileira*, São Paulo, 2006. p. 1-44.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA DO BRASIL, EPE. *Informe à imprensa: demanda de energia elétrica – 10 anos*. Rio de Janeiro 04/01/2012. http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120104_3.pdf
- ENGELUND, F. Discussion Closure to Hydraulic Resistance of Alluvial Streams. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 93, HY4, p. 287-296, 1967.
- ENGELUND, F.; HANSEN, E. 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Copenhagen, Denmark: TekniskForlag, 1967. 65 p.
- EXNER, F.M.. Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. *Sitzungsbericht Akademie der Wissenschaft, Wien*, v. 134, p. 165-180, 1925.
- FEMAR. *Catálogo de Estações Maregráficas do Brasileiras*. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro, 2000. p. 281.
- FRAENKEL, P. Power from marine currents. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: *Journal of Power and Energy*, v. 216, 2002. 14 p.
- FRAENKEL, P. Marine current turbines: pioneering tidal stream technology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: *Journal of Power and Energy*, v. 221, n. 2, p. 159-169, 2007.
- FRAENKEL, P., 2009. SeaGen: progress with the world's first commercial-scale tidal turbine. *Proceedings of the 3rd International Seminar on Ocean Energy*, Bilbao, Spain; 04/2009.
- FRAENKEL, P., 2011. MCT's SeaGentidal turbine. Short presentation, 03/2011.
- FROUDE, R.E., 1889. "On the part played in propulsion by differences of fluid pressure". *Transactions of the Institution of Naval Architects*, vol. 30, p. 390.
- GORBEÑA, E.G., 2010. *Exame de qualificação ao doutorado, parte II: proposta de tese*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro; Brasil.
- GORBEÑA, E.G., 2013. *Um modelo de otimização matemático para a geração de energia elétrica a partir de correntes hidrodinâmicas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GORBEÑA, E.G., ROSMAN, P.C.C., QASSIM, R.Y., 2015. Assessment of tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* (No prelo).
- GUY, H.P., SIMONS, D.B., RICHARDSON, E.V., 1966. Summary of alluvial channel data from flume experiments. *Professional Paper* 462-I, 1956-1961, U.S. Geological Survey.
- HARRISON, M.E., BATTEN, W.M., MYERS, L.E., BAHAI, A.S., 2009. A comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines. *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden.
- HR - Hydraulic Research 1990. Sediment transport: the Ackers and White theory revised, *Report SR237*– Wallingford, England.
- IHC MERWEDE, 2012. Disponível em: <<http://www.ihcmerwede.com>>. Acessado em: 06/2012.
- INPH – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS, 1991. *Medições hidráulicas realizadas na Baía de São Marcos*. Relatório INPH 54/91.
- KHAN, M.J., BHUYAN, G., IQBAL, M.T., QUACOE, J.E., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, vol. 86, n. 10, (Oct), pp 1823-1835.
- KHORRAM, S., ERGIL, M., 2010a. Most Influential Parameters for the Bed - Load Sediment Flux Equations Used in Alluvial Rivers. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 46, n. 6, pp. 1065-1090.
- KHORRAM, S., ERGIL, M., 2010b. A Sensitivity Analysis of Total - Load Prediction Parameters in Standard Sediment Transport Equations. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 46, n. 6, pp. 1091-1115.
- LEE, S.H., JANG, J.K, LEE, J., HUR, N., 2010. A numerical study for the optimal arrangement of ocean current turbine generators in the ocean current power parks. *Current Applied Physics*, vol. 10, n. 2, Supplement 1, pp. S137–S141.
- MADSEN, O.S., 1991. Mechanics of cohesionless sediment transport in coastal waters. *Proceedings Coastal Sediments* 1991. ASCE, New York, pp. 15–27.
- MALHEIRO DA SILVA, R., 2011. *Técnica de interferometria SAR e modelagem hidrodinâmica para avaliação de locais adequados ao aproveitamento da energia das correntes de maré*. Tese DSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- MARINE CURRENT TURBINES, 2012. Disponível em: <<http://www.marineturbines.com>>. Acessado em: 06/2012.

- MARINHA DO BRASIL, 1999a. Carta Náutica 410: Proximidades da Baía de São Marcos. Escala: 1:50.000.
- MARINHA DO BRASIL, 1999b. Carta Náutica 411: Baía de São Marcos. Escala: 1:50.000.
- MARINHA DO BRASIL, 1999c. Carta Náutica 412: Baía de São Marcos proximidades do Terminal da Ponta da Madeira e Itaqui. Escala: 1:50.000.
- MARINHA DO BRASIL, 1999d. Carta Náutica 413: Terminal da Ponta da Madeira e Itaqui. Escala: 1:50.000.
- MARINHA DO BRASIL, 2000. Carta Náutica 414: Baía de São Marcos de Itaqui ao Terminal Alumar. Escala: 1:50.000.
- MEYER-PETER, E., MÜLLER, R., 1948. *Formulas for bed-load transport. Proceedings of the International Association for Hydraulic Research*, 3rd Annual Conference, Stockholm, Sweden, pp, 39-64.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL, MME, 2013. *Resenha Energética Brasileira*, Exercício de 2012 Edição de 29 de maio de 2013.
- MONTES, M.L., 1997. *Zoneamento geoambiental do Estado do Maranhão*. Em: Diretrizes gerais para a ordenação territorial, IBGE, Salvador, BA, Brasil.
- MYERS L.E., BAHAJ, A.S., 2005. Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race. *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1713–1731.
- MYERS, L.E., BAHAJ, A.S., 2010. Experimental analysis of the flow field around horizontal axis tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators. *Ocean Engineering*, vol. 37, (2-3), pp. 218-227.
- MYERS, L.E., BAHAJ, A.S., 2012. An experimental study of flow effects within 1st-generation marine current energy converter arrays. *Renewable Energy*, vol. 37, (1), pp. 28-36.
- NEIL, C.R., YALIN, M.S., 1969. Quantitative definition of beginning of bed movement. *Journal of Hydraulic Division*, vol. 95 (1), pp. 585-588.
- NIELSEN, P., 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. World Scientific, *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 4, p. 324.
- POLAGYE, B., 2010. Environmental effects of tidal energy development: a scientific workshop. University of Washington, SA; USA.
- OWEN, A. *The application of low aspect ratio hydrofoils to the secure positioning of equipment in tidal streams*. 2007. Thesis (PhD) - The Robert Gordon University, UK, 2007.
- RANKINE, W. J. M. On the mechanical principles of the action of propellers. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1865, v. 6, p. 13, 1865.
- ROSMAN, P.C.C., 2009. Analyses of the effects of turbine array densities in the tidal currents in São Marcos Bay - MA - Technical Report in project: Selecting sites for tidal current power extraction in Brazil. *Fundação Coppetec*, PENO11297 - 04/2009.
- ROSMAN, P.C.C., Ed., 2013. *Referência técnica do SisBaHi-4*. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 04/2012.
- SALLES, F. J. P.; BENTES, F. C. M.; SANTOS, J. A. *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*. Fundação de Estudos do Mar –Rio de Janeiro: FEMAR, 2000. p. 281.
- SHIELDS, A. *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung (Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement)*. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau*. 26. Berlin: Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau, 1936.
- SMITH, R. *New York City's East River Roosevelt Island Tidal Energy (RITE) project: leading the commercialization of hydrokinetic tidal energy systems*. Palestra para o New York Association for Energy Economics, 3/22/2012.
- SOUZA e SILVA, M. G. *Análise de processos sedimentológicos em escoamentos com superfície livre: trecho do Projeto de Irrigação Iuiú no Rio São Francisco*. 2013. Dissertação (M.Sc.) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- SUN, X.. *Numerical and experimental investigation of tidal current energy extraction*. 2008. Thesis (PhD) - The University of Edinburgh, 2008.
- STINGRAY GENERATOR, 2002. Disponível em: <<http://www.see.ed.ac.uk/~eeto/Modules%20-%20do%20not%20use/45-07/Handouts/tidal/Stingray/>>. Acessado em: 08/2014.
- WANG, J., MULLER, N. Performance prediction of array arrangement on ducted Composite Material Marine Current Turbines (CMMCTs). *Ocean Engineering*, v. 41, p. 21-26, 2012.
- YALIN, M.S. *Mechanics of sediment transport*. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- VAN RIJN, L.C. United view of sediment transport by currents and waves I: initiation of motion, bed roughness and bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 133, n. 6, p. 649-667, 2007a.
- VAN RIJN, L.C. United view of sediment transport by currents and waves II: suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 133, n. 6, p. 668-689, 2007b.

VAN RIJN, L.C. United view of sediment transport by currents and waves III: graded beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 133, n. 7, p. 761-775, 2007c.

VERDANT POWER, 2014. Disponível em: <<http://www.verdantpower.com/>>. Acessado em: 08/2014.