

USO DE SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA NA ANÁLISE DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO: O CASO DO RIO MATAPI NO BAIXO RIO AMAZONAS – AMAPÁ

Alan Cavalcanti da Cunha – alan.cunha@iepa.ap.gov.br

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA),
Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET)

Alaan Ubaiara Brito – alaan@eln.gov.br

Centro de Operações da Eletronorte – AP e (IEPA/NHMET)

Luis Aramis Pinheiro – aramis.pinheiro@iepa.ap.gov.br

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA/NHMET),
Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET/NHMET)

Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha – helenilzacunha@unifap.br

Colegiado de Ciências Sociais (UNIFAP)

Antônio César Pinho Brasil Júnior – brasiljr@unb.br

Faculdade de Engenharia – Departamento de Mecânica (LEA/UnB)

Resumo. *Uma das barreiras para o aproveitamento da energia de marés em rios na Amazônia é a dificuldade de avaliar as condições hidrodinâmicas aplicadas à geração de energia para o uso de micro-turbinas hidrocinéticas. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia fundamentada em experimentação e simulação numérica para avaliar a intensidade de correntes em rios sob influência de maré. A análise foi aplicada em um trecho próximo da foz do Rio Matapi-AP a partir de informações de descarga líquida durante um ciclo de maré semidiurna. Analisou-se o comportamento dos campos transientes de velocidades com uso da simulação numérica aplicada ao escoamento turbulento pertinente. O uso do método foi suficientemente satisfatório para avaliar o potencial hidrocinético do rio estudado refletindo as complexas condições de escoamento nestes ambientes estuarinos. A ferramenta numérica mostrou-se robusta na identificação de detalhes dos campos de velocidades e linhas de correntes que envolvem os principais movimentos preferenciais e de recirculação no escoamento. Também permitiu obter informações sobre a melhor localização e período do ciclo de maré adequados ao eficiente funcionamento de uma pequena turbina, considerando-se a variação da vazão na dimensão espaço-temporal no trecho estudado. Concluiu-se, como ocorre em qualquer modalidade de geração descentralizada, que a tecnologia sofre limitações específicas impostas pelas condições físicas do ambiente natural.*

Palavras-chave: *Hidrocinética, Potencial, Correntes de Marés, Simulação 3D, Amapá.*

1. INTRODUÇÃO

O acesso à eletricidade é uma das soluções para o desenvolvimento humano, proporcionando iluminação, aquecimento e força motriz para usos produtivos e bem-estar social, especialmente para as áreas rurais. Somente no Brasil há um contingente de 12 milhões de pessoas sem energia em seus lares. Para auxiliar na solução desse problema, especialmente na Amazônia, as microcentrais ou picocentrais elétricas descentralizadas se constituem em interessante alternativa econômica à extensão de rede, sendo consideradas fontes renováveis e menos poluentes (MME, 2007).

A energia hidrocinética é uma modalidade de energia renovável cujo uso está se tornando interessante para atendimento de comunidades isoladas na Amazônia. Um exemplo disso são os trabalhos de BRASIL Jr et al (2006), Van ELS (2008), RODRIGUES (2007), entre outros.

A idéia do uso da energia gerada a partir de correntes de marés é ainda relativamente pouco desenvolvido, mas é sabido que seu potencial é alto em todo o mundo onde existem áreas costeiras oceânicas ou estuarinas, como é o caso dos estados do Amapá, Pará e Maranhão, localizados na Amazônia Legal.

No caso da região do Baixo Rio Amazonas considera-se que exista, em algumas localidades específicas, potencial para o uso das correntes de marés (especialmente para uso de energia descentralizada nas remotas comunidades ribeirinhas sem energia elétrica). Como exemplo, observa-se o uso de rotores de pequenos diâmetros, apoiados no leito do canal ou fixados em estruturas na coluna d'água. Uma das vantagens deste conceito, segundo Boyle (2004), Brasil Jr et al (2006) e Reis (2003) seria a não necessidade da construção de barragens, onde as unidades poderiam ser

construídas em bases modulares e instaladas por etapas, minimizando custos, e com menor impacto ambiental, visual e virtualmente mais silenciosas.

A física básica de funcionamento de uma turbina sob efeito de correntes de marés seria similar à uma turbina eólica, sendo que a potência disponível é proporcional a densidade da água, vezes a área de varredura do rotor (hélice da turbina, diâmetro ao quadrado), vezes o cubo da velocidade da água. Boyle (2004) observa que as velocidades típicas de correntes marítimas (não estuarinas, mas de alto mar) podem ser superiores a 3 m/s (três metros por segundo), comparado com 7 m/s da eólica, em nível global. Neste aspecto, verifica-se que a velocidade é a variável mais sensível para a geração de energia elétrica.

Neste sentido esta pesquisa está voltada ao comportamento hidrodinâmico dos rios estuarinos na região do Baixo Amazonas, especialmente sobre os campos de velocidades e linhas de corrente gerados por simulação numérica, bem como as possíveis limitações físicas impostas ao eficiente funcionamento das turbinas hidrocínéticas. Tais limitações são impostas pelas condicionantes físicas dos perfis das correntes de marés nestes locais (Amapá, por exemplo), as quais foram preliminarmente detectadas em estudos hidrodinâmicos anteriores (Cunha et al, 2006, 2007). Ao estudo impõem-se alguns questionamentos: há possibilidade do uso de pequenas turbinas na região estuarina costeira do Amapá? A partir deste questionamento consideramos as seguintes hipóteses:

- 1) Verifica-se que as velocidades das correntes, medidas experimentalmente em alguns rios do Amapá, indicados por estudos anteriores (Silva e Kosuth, 2001, Cunha et al, 2006 e Cunha et al, 2007), durante a maior parte do ciclo de maré semidiurna, não alcançaram valores maiores que 1 m/s, normalmente necessários ao funcionamento eficiente das turbinas hidrocínéticas (Brasil Jr, et al, 2006);
- 2) Apesar das limitações dos escoamentos em rios das regiões costeiras do Amapá, é possível o aproveitamento da energia hidrocínética, considerando apenas os trechos críticos ou de estrangulamentos, contudo indicando a necessidade de se observar a geomorfologia dos canais, pois é aí que se verificam as maiores intensidades das velocidades. Além disso, há curtos períodos de tempo (período de máximas velocidades, na vazante e na enchente) em que as correntes parecem ser mais interessantes à geração de energia em detrimento de períodos mais prolongados de baixa velocidade;

Considerando-se o problema e as duas hipóteses acima, os seguintes objetivos foram traçados:

- 1) Simular o escoamento em rios para avaliar as potencialidades do uso da dinâmica dos fluidos computacional neste tipo de abordagem investigativa;
- 2) Indicar uma nova abordagem de pesquisa da área no Estado do Amapá, centrada na elaboração de estudos mais aprofundados sobre o tema, com o uso de ferramentas da modelagem e simulação computacional fundamentadas em análises experimentais, como as de Silva e Kosuth (2001), Cunha et al (2006), em rios do Baixo Rio Amazonas;
- 3) Gerar informações para otimizar estratégias de diagnóstico e exploração de recurso hidrocínético em regiões costeiro-estuarinas semelhantes às do Estado do Amapá.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia resume-se em três etapas importantes: a) caracterização física da área (geomorfologia, batimetria de fundo, características hidráulicas, etc); b) medição de descarga líquida em uma seção reta do rio previamente escolhida, com uso do perfilador acústico doppler de corrente (ADCP - Accoustic Doppler Current Profiler); c) simulação numérica da hidrodinâmica do escoamento do rio e identificação das condições iniciais e de contorno.

2.1 Caracterização física da área - foz do rio Matapi-AP e confluência com o rio Amazonas

Alguns estuários, como o Amazônico, são típicos de regiões de planície costeira que se formaram durante a transgressão do mar no Holoceno, que inundou os vales de rios. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade. A área de seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial e a configuração geométrica tem a forma de “V”, em que a razão entre a largura/profundidade, em geral, é grande (Lung, 1993 e Miranda *et al.*, 2002). A foz do Rio Matapi na confluência com o rio Amazonas, nos trechos estudados da zona estuarina, está um pouco fora desta classificação, com valores próximos de 20-40m na foz do Matapi e confluência do Canal de Santana e Canal do Norte no Amazonas (Figura-1). Os locais onde estão indicados por um trapézio azul invertido, foram locais onde há medições de descarga líquida realizadas pelo menos uma vez.

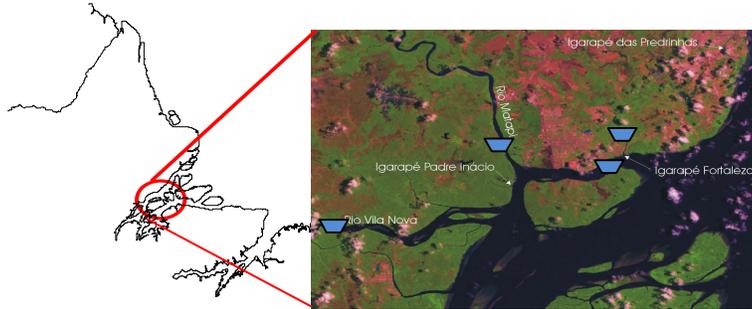


Figura-1: Área de estudo da hidrodinâmica no Estado do Amapá - AP. Observe os principais rios e igarapés da zona costeiro-estuarina, com destaque ao Matapi ($S 00 01' 35.0''$, $W051 12' 19.6''$), desaguando verticalmente no Canal de Santana – Rio Amazonas). Fonte: CUNHA *et al.*(2006).

Os processos físicos comuns aos sistemas estuarinos são os movimentos cíclicos e a mistura entre massas de água de origens contrastantes (água doce e salgada), cujos resultados ocasionam em corpos de água a não homogeneidade de suas propriedades físicas podem variar em elevadas faixas ou intervalos das escalas de espaço e tempo, ainda mais quando associado às forças geradoras de movimentos, como as forçantes climáticas. No caso da presente pesquisa as simulações foram embasadas nas variações reais de medidas de descargas líquidas do Rio Matapi, as quais variaram entre $-1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (enchente) e $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazante), e velocidades médias por volta de $-0,8 \text{ m/s}$ a $1,07 \text{ m/s}$, aproximadamente (Figuras 2a e b). A largura média do trecho estudado do Rio Matapi variou na ordem de 200 a 300 m, dependendo da distância do ponto à foz. A profundidade média considerada na geometria foi por volta dos 10 m. O comprimento total do trecho simulado foi de 7 km de distância a partir da sua foz (Cunha et al., 2006 e 2007).

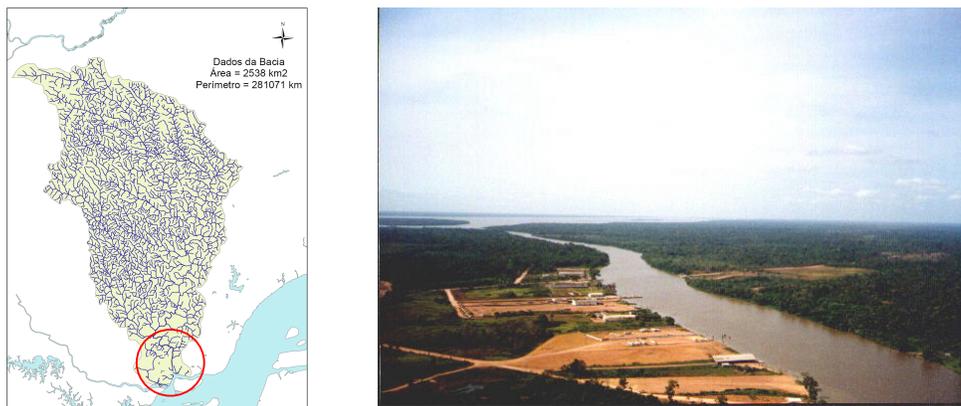


Figura 2: a) Bacia do Rio Matapi (círculo vermelho na foz) (Fonte: SEMA-AP); b) Trecho Modelado do Rio Matapi, desaguando no Rio Amazonas (Canal de Santana). Fonte: Cunha et al.(2006).

É possível também caracterizar esses locais como ambientes costeiros de transição, onde se encontram áreas das bacias inundadas pelas marés e influenciados por diferentes regimes energéticos, como as descargas de água da bacia de drenagem, ventos, ondas, etc. O trecho estudado do Rio Matapi, próximo de sua foz, pode ser considerado como bastante influenciado pelo regime de descarga líquida, sob efeitos de marés e precipitações pluviométricas sazonais, de acordo com algumas definições de estuários feitas por Miranda *et al.* (2002).

2.2 Medição de descarga líquida em uma seção – velocidade das correntes em rios estuarinos do Amapá

Para a quantificação da vazão ou descarga líquida foi utilizado o equipamento adequado aos propósitos da pesquisa para uso em grandes rios, o ADCP de 600 Hz. O ADCP é um equipamento composto por uma sonda, com quatro transdutores e um “deck box”, onde os sinais são filtrados e transmitidos para um PC com um software específico que coordena as ações de todo o sistema, recebe os dados e os disponibiliza em forma de gráficos e tabelas.

O funcionamento do equipamento é regido pelo movimento das partículas na água que causam variações na frequência de eco e mede estas variações (efeito Doppler) com uma função da profundidade para obter a velocidade da

corrente em até 128 posições diferentes na coluna da água. Com o conhecimento da velocidade da corrente, da área da seção de medição e da profundidade da mesma, um programa de computador desenvolvido para o ADCP calcula a vazão total na seção de descarga ou de medição (Silva e Kosuth, 2001).

No caso do Rio Matapi, segundo Silva e Kosuth (2001) e Cunha et al (2006) e Cunha et al. (2007), a metodologia experimental, para a quantificação de vazão, consistiu em:

- 1) Realizar, em uma seção do rio, uma série de medições de vazão durante um período de 12,30h (um ciclo de maré semidiurna, usando o equipamento ADCP (foram feitas 172 medições);
- 2) Interpolar a evolução temporal da vazão e velocidade na base das respectivas medições;
- 3) Integrar os valores no ciclo de maré para obter o valor médio da vazão (ou velocidade média);
- 4) Analisar os valores máximos e mínimos da vazão, bem como a relação entre vazão/velocidade e cota.

As medições seguiram as etapas pertinentes com o intuito de obter informações sobre as variações de vazão ao longo de um ciclo de maré semidiurna e fundamentar as primeiras simulações numéricas (modelos numéricos hidrodinâmicos). Na Figura-3 observa-se um dos valores de medida de descarga líquida obtida com o equipamento ADCP para o Rio Matapi (maio de 2006). O domínio espacial escolhido para a simulação do escoamento no rio foi somente o trecho de aproximadamente 7 km de extensão a partir da sua foz (Figura-2b) que deságua no Canal de Santana (Rio Amazonas).

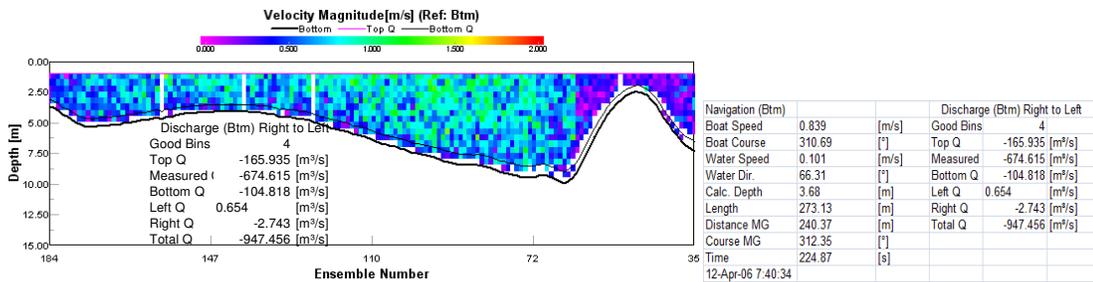


Figura 3: Medição de descarga líquida (numa série de 172) em um ciclo de maré. O sinal negativo da vazão significa maré subindo.

O foco da referida etapa foi gerar uma função senoidal completa de vazões e velocidades médias em função do tempo e ao longo de um ciclo de maré semidiurna. Este procedimento gerou os parâmetros hidráulicos necessários para a fase inicial do pré-processamento das simulações computacionais (condições iniciais e de contorno hidrodinâmicos). Estas informações foram integradas à análise do potencial hidrocínético do Rio Matapi.

A partir das informações dadas pelas medições de descargas líquidas passou-se para a etapa de pré-processamento, solução das equações diferenciais e pós-processamento das simulações numéricas a fim de obter os campos vetoriais de velocidades ao longo de um ciclo de maré.

2.3 Simulação numérica da hidrodinâmica aplicada ao rio Matapi segundo a visão da hidrocínética

Para a resolução do escoamento foi empregado o pacote comercial ANSYS CFX-11 (Licença NHMET-IEPA/UNIFAP). Foram utilizados as seguintes módulos: ANSYS CFX-Pre para o pré-processamento, ANSYS CFX-Solver, para o processamento numérico do escoamento e o ANSYS CFX-Post para o pós-processamento, de forma que permitisse a análise do problema desde a apresentação de sua geometria com a malha inserida, até a visualização final do escoamento a *posteriori* (campos de velocidade e linhas de correntes).

A fase de pré-processamento foi responsável pela determinação das condições de contorno e iniciais do problema, ou seja, condições de entrada, saída do escoamento, superfície da parede e superfície livre (fundamentada na análise da correntometria real resultante da integração da função vazão x tempo ao longo de um ciclo de maré semidiurna, como o indicado na Figura-3). Na etapa do Solver, foram resolvidas as equações de Navier-Stokes discretizadas, permitindo o acompanhamento do processo de convergência do problema. Na fase final, o pós-processamento forneceu as saídas gráficas do escoamento (campo de velocidades e outras variáveis como os campos de outras propriedades hidrodinâmicas, coeficientes, etc).

O CFX-11 utiliza um esquema amplo e único de discretização para o cálculo de frações de volume das fases. As características antidifusivas deste esquema fornecem uma melhor e mais acurada interface com o usuário, as quais possibilitam o uso de contornos convencionais e esquemas de segunda ordem. Além disso, o esquema genérico é também aplicável aos problemas dependentes do tempo (regime transiente). Adicionalmente, a equação global da

continuidade do CFX-11 é solicitada em sua forma volumétrica. Esta formulação evita as dificuldades de estabilidade numéricas que podem ocorrer em casos de envolvimento de grandes diferenças entre densidades (ar-água).

Outra vantagem do CFX-11 é a possibilidade do refinamento da malha adaptativa que pode também agir contra a difusão numérica para permitir melhor formatação da interface da superfície livre. O CFX-11 pode adaptar todos os tipos de elementos de malhas, incluindo os formatos tipo tetra e hexatetra, pirâmide e prisma, enquanto mantém a descrição delineada original. Além disso, a malha pode ser importada em uma ampla variedade de formatos e adaptações que podem ser imediatamente aplicadas.

Uma malha refinada foi gerada como um resultado adaptativo de refinamento em um estágio breve da própria solução, mas tal refinamento não deverá ser de mais longo período do que o último estágio da solução. Para prevenir isso, o algoritmo executa uma tarefa de adaptação da malha “grossa”.

A precisão da simulação computacional de escoamentos com superfície livre requer *software* de dinâmica dos fluidos computacional que capture as nuances do escoamento de maneira precisa. O CFX-11 fornece ao usuário esses requerimentos necessários, e muito mais, por oferecer desempenho para outros desafios e aplicações.

Finalmente, a robustez e a precisão do CFX-11 oferece significantes benefícios em todos os problemas de escoamento de superfície livre, o qual pode ter excelente desempenho em aplicações como escoamentos de água em canais abertos, reservatórios, etc.

2.4. Geração da Malha e Simulação Hidrodinâmica Computacional

Digitalização do Domínio Computacional a partir da Batimetria do Canal

A partir dos dados da caracterização do Rio Matapi (Figura-1) foram confeccionados os contornos físicos a partir de valores médios da batimetria do rio (evitando-se excesso de detalhes devido a potenciais problemas na geração das malhas), resultando o desenho indicado pela Figura-4a,b e c. O *software solidworks* foi utilizado para elaborar os referidos desenhos e acoplamentos a um gerador de malha do CFX, durante a fase de pré-processamento.

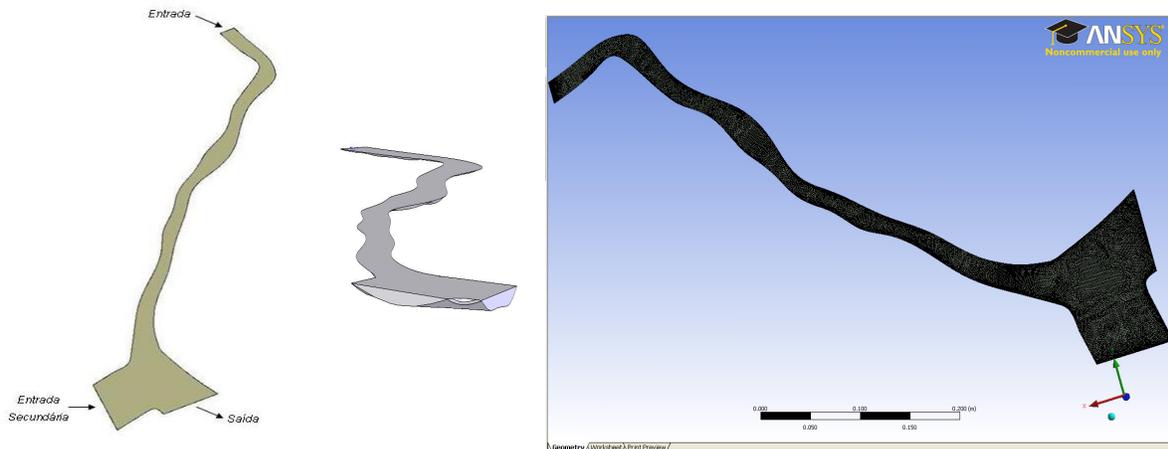


Figura 4: a) Rio Matapi (superfície livre) e condições de contorno, b) entradas e saída em perspectiva 3D, na interseção com o Canal de Santana; c) Malha 3D gerada. Fonte: Cunha et al (2006).

Pré-processamento e Geração da Malha Computacional 3D

A geração da malha foi executada no próprio pré-processador do CFX-11, resultando em uma estatística com a seguinte estrutura: a) o número de nós gerados foi de 164.979 e o número de elementos tetraédricos foi de 820.854, tal como indicado na Figura-4c.

Modelagem e simulação do escoamento no Rio Matapi-AP com uso do Modelo SST

De acordo com Rodrigues (2007) o uso do Modelo SST tem sido indicado para diversas aplicações da dinâmica dos fluidos computacional, para melhor solucionar problemas de escoamento complexos, como a avaliação de estruturas de turbinas. Porém há outras questões, como a hidrodinâmica de canais de geometrias complexas sob influência de marés, especialmente a geomorfologia da margem e fundo dos canais naturais (MENTE, 1994 *apud* CUNHA et al., 2006, 2007¹ e CUNHA, 2008).

Menter (1994) *apud* Rodrigues (2007) propôs um modelo de duas equações designado para melhorar o comportamento dos modelos κ - ϵ e κ - ω . O ponto inicial para o desenvolvimento desse modelo foi a necessidade de resultados mais acurados para os escoamentos aeronáuticos que têm gradientes de pressão e descolamento da camada limite acentuados. O modelo κ - ϵ é um modelo muito robusto, porém, não consegue capturar descolamento da camada limite em casos turbulentos e apresenta dificuldades em geometrias complexas. Nesse ponto, o modelo κ - ω é mais realista, isto é, obtém melhores resultados perto da parede. Porém, em escoamentos livres, a equação de ω possui uma sensibilidade muito grande o que acaba inviabilizando a troca definitiva do modelo do κ - ϵ pelo κ - ω . Esse foi o ponto motivacional para o desenvolvimento do modelo SST (Menter, 2003)². Para que a lógica desse modelo funcione, o modelo κ - ϵ é multiplicado por uma função de mistura e adicionado ao modelo κ - ω também multiplicado por essa função de mistura. Então, impõe-se que a função tenha valor unitário na região logarítmica e gradativamente torne-se nula fora da mesma.

As especificações para esse modelo são:

Viscosidade turbulenta

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, (S_{ij} S_{ij})^{1/2} F_2)} \quad (1)$$

onde $(S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ é uma medida invariante do tensor taxa de deformação e F_2 é uma das funções de combinação e é determinada por:

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{B^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (2)$$

A formulação das funções de mistura F_1 e F_2 é baseada na distância até a parede e nas variáveis. As funções de mistura têm como característica a delimitação de zonas nas quais cada modelo irá atuar. Através do valor encontrado para as funções, o modelo irá mudar a formulação nas equações de transporte, onde a primeira função de mistura (F_2) é responsável pela troca de modelos na formulação da viscosidade turbulenta e a outra função de mistura, F_1 (Equação-5) é responsável pela determinação das constantes do modelo, e pela troca de modelos na equação de transporte de ω (Noletto, 2006³; Cunha et al, 2006, 2007). F_1 é igual a 1, considerando afastado da parede (utiliza a função κ - ϵ) e é igual a zero quando considera a função próxima à parede (nesse caso, faz uso da função κ - ω).

Equação de transporte para a energia cinética turbulenta k , é dada por:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \bar{P}_k - \beta^* \rho \kappa \omega ; \quad (3)$$

onde:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow P_k = \min (P_k, 10 \cdot \beta^* \rho \kappa \omega) ; \quad (4)$$

Equação de transporte para ω é:

¹ Menter, F. R. Eddy viscosity transport equations and their relation to the k - ϵ Model, AMMES Research Center, 1994.

² Menter, F. R. Multiscale model turbulent for turbulent flow, In: 24th Fluid Dynamic Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.

³ Noletto, L. Comunicação pessoal. Estudo de escoamentos de cilindros. Simulação numérica híbrida e grandes escalas do escoamento turbulento em uma matriz de cilindros. Dissertação Mestrado, UnB. (2005).

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_{\omega} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}; \quad (5)$$

onde F_1 é definida como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{B^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\kappa \omega} y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (6)$$

com $CD_{\kappa \omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$ e y é a distância da superfície de não deslizamento.

As outras constantes são todas oriundas dos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$ com alguns ajustes e são determinadas como: $\beta^*=0,09$, $\alpha_j=5/9$, $\beta_j=3/40$, $\sigma_{k1}=0,85$, $\sigma_{\omega1}=0,5$, $\alpha_2=0,44$, $\beta_2=0,0828$, $\sigma_{k2}=1$ e $\sigma_{\omega2}=0,856$ (Menter, 2003)⁴. Todo o processo de resolução das equações, de 1 até 6, é automaticamente executado pelo módulo do CFX-Solver.

3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM USO DO SST

3.1 Descarga líquida e campos de velocidade.

Na Figura 5 é apresentada a seqüência temporal de medição de vazão utilizada para gerar as condições de contorno e iniciais do processo de simulação numérica com o uso do CFX 11. Para a presente análise a curva senoidal de geração da maré foi inicializada a partir do período de início da vazante. Em seqüência, as Figura-6 e 7 representam os resultados dos campos de velocidades e auxiliados pelos gráficos das linhas de correntes, com as respectivas escalas.

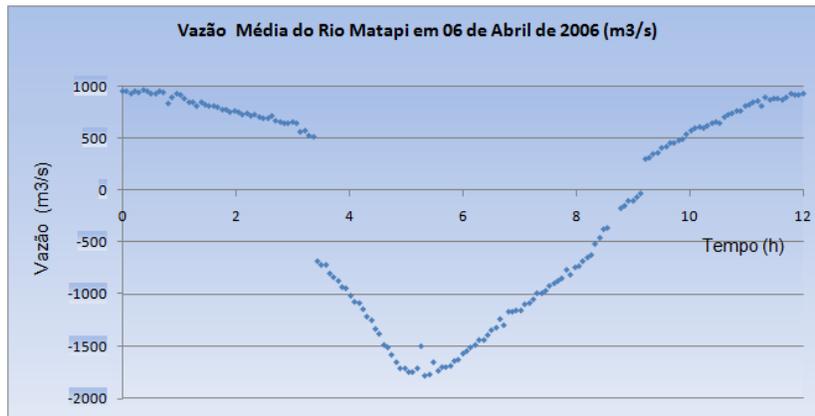


Figura 5: curva de descargas líquidas processada ao longo de um ciclo de maré semidiurna na seção escolhida do Rio Matapi. Fonte: Cunha et al. (2006)

Um ajuste matemático da curva acima (senoidal) gerou uma função numérica temporal das condições físicas aproximadas do escoamento real ao longo das simulações numéricas do escoamento turbulento (pré-processamento).

Na seqüência das figuras 6a até 6f são mostrados os campos de velocidade em períodos de interesse previstos pelas simulações numéricas. Percebe-se, inicialmente, os movimentos das correntes no sentido de vazante (direção à foz), a partir do intervalo de tempo $t = 30$ min, reversão do fluxo, $t = 1$ h, até o tempo $t = 5,5$ h. No período de tempo $t = 6$ h ocorre o início da reversão da maré. Em $t = 8$ h, ocorre enchente, e em $t = 12$ h ocorre novamente reversão da maré.

Uma análise similar, para fins de visualização, foi obtida para as linhas de correntes (Figuras 7a até 7f), onde são melhor evidenciados, especialmente, os movimentos de recirculação, intensificação ou diminuição das velocidades.

⁴ Menter, F. R. A scale-adaptative simulation model for turbulent flow predictions, 41st Aerospace Science Meeting & Exhibit, 6-9 January, Reno, Nevada. 2003.

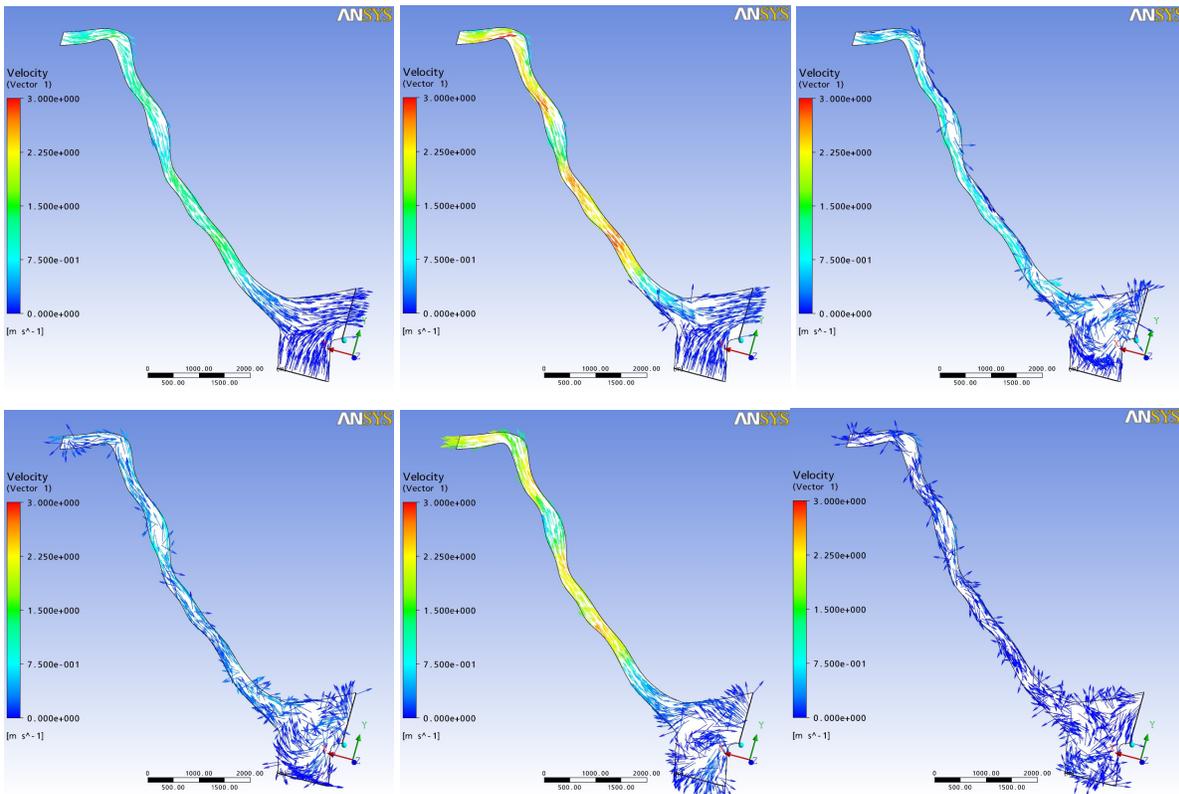


Figura 6a: campos de velocidades em regime transiente no Rio Matapi: a) vazante em $t = 1\text{h}$, b) $t = 2,5\text{h}$, c) baixa mar em $t = 5,5\text{h}$, d) reversão da maré em $t = 6\text{h}$, e) enchente em $t = 8\text{h}$ e f) $t = 12\text{h}$, reversão do fluxo e início da vazante.

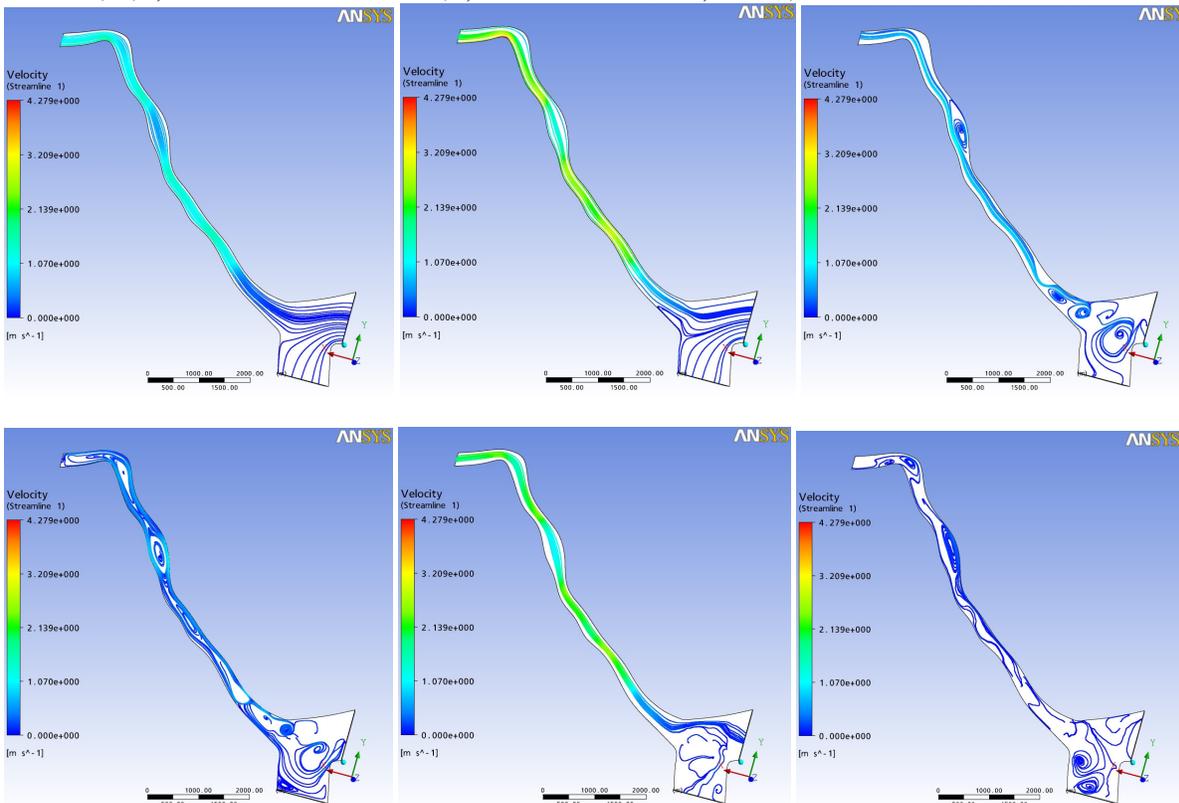


Figura 7a: linhas de correntes em regime transiente no Rio Matapi: a) vazante em $t = 1\text{h}$, b) $t = 2,5\text{h}$, c) baixa mar em $t = 5,5\text{h}$, d) reversão da maré em $t = 6\text{h}$, e) enchente em $t = 8\text{h}$ e f) $t = 12\text{h}$, reversão do fluxo e início da vazante.

4. CONCLUSÕES

O estudo apresenta relevância para levantamentos de potenciais energéticos renováveis, especialmente em uma região pouco estudada e desconhecida como a região estuarina do Estado do Amapá. Desta forma, a partir das hipóteses levantadas, podemos afirmar que as principais contribuições da presente pesquisa foram:

- 1) Verificou-se, tanto pelos resultados obtidos pelo ADCP quanto pela simulação numérica que, apenas em poucos períodos curtos, os valores médios de velocidades alcançaram valores um pouco superiores a 1 m/s. Isto é, são aparentemente insuficientes ao funcionamento eficiente das turbinas hidrocinéticas de pequeno porte, como as desenvolvidas por Brasil Jr et al (2006). Contudo, vale lembrar que Silva e Kosuth (2001) observaram valores de velocidade de 1,5 m/s ou superiores durante o período de enchente em rios próximos ao Matapi (Figura-1).
- 2) As maiores intensidades das velocidades ocorrem durante curtos períodos. Normalmente no final da maré vazante e no início da enchente (melhores valores em períodos de no máximo 1 a ½ hora). Fora desses períodos, as velocidades tendem ser de menor ordem, cerca de 0,5 m/s ou próximas, ou pouco interessantes para o aproveitamento hidrocinético. Neste aspecto, foi possível quantificar os intervalos de tempo de mais ou menos 2 a 3 horas em que a velocidade do escoamento, em uma dada seção de monitoramento, pode ser interessante ao uso de micro-turbinas hidrocinéticas. Para estes casos a tecnologia de turbinas hidrocinéticas deve estar associada com outras modalidades de geração de energia (solar, eólica, maré-motriz, ondas, etc).
- 3) As simulações superestimaram as velocidades quando se comparam os dados experimentais a partir do ADCP e os resultados da simulação. A razão disso decorre talvez da simplificação física da área da seção reta ser considerada como constante. Sabe-se, no entanto, que a área varia ao longo do ciclo de maré. Neste aspecto, quando a vazão se eleva ou diminui, mantida a área da seção constante, a velocidade tende a aumentar ou diminuir em relação à média esperada, para manter o equilíbrio do balanço de massa no volume de controle. Além disso, as Figuras 6 e 7, obtidas pelo pós-processamento mostram os campos de velocidade e linhas de **correntes na superfície**, onde justamente estes valores tendem a ser maiores que as médias, em contraponto aos valores médios de toda coluna d'água observadas pelas medidas do ADCP.
- 4) O aproveitamento potencial da energia hidrocinética em rios semelhantes ao Matapi-AP, pode ser interessante, considerando apenas trechos críticos como os estreitamentos em que a velocidade tende a se intensificar (mas depende também da profundidade). Tais fatos corroboram que sempre haverá a necessidade de se observar a geomorfologia em conjunto com os estudos hidrodinâmicos dos canais. Tal tarefa torna esse tipo de estudo bastante laborioso e difícil, pois na região amazônica, além do difícil acesso, faltam equipamentos e condições de logística, e informações hidrodinâmica desses rios.
- 5) A simulação numérica proporcionou uma boa visualização da situação real do escoamento natural. Mostrou também qualitativamente onde, como e quando, exatamente, ocorrem as maiores intensidades das velocidades. Verificou-se que os campos de velocidade tendem a ser mais intensos nos estreitamentos do canal e mais estagnadas nos alargamentos ou quando ocorrem recirculações inversas ao escoamento. Também, verificou-se que em alguns “cantos (curvas muito acentuadas, próximo de 90° de curvatura)”, as velocidades aumentam devido à recirculação concorrente ao escoamento, alcançando valores próximos de 2m/s ou maiores, que são relativamente distintos dos dados de Silva e Kosuth (2001), Cunha et al (2006).

Os resultados indicam que o uso da ferramenta numérica é interessante para o aprofundamento de novas pesquisas na área, o que pode permitir uma maior gama de informações sobre os sistemas físicos tão complexos como os rios da região do Baixo Amazonas. Observou-se que, mesmo em um contexto um tanto quanto limitado de análise, foi possível avaliar **quantitativamente e qualitativamente** os principais componentes governantes dos fenômenos hidrodinâmicos em rios, cuja avaliação, ainda que simplificada, é suficientemente apurada para identificar pontos críticos de velocidade, muito úteis ao uso de pequenas máquinas hidrocinéticas nesses ambientes amazônicos;

O “modelo turbulento híbrido” SST (ANSYS CFX-11) mostrou-se **robusto e suficientemente capaz** de gerar os campos de velocidade plausíveis e os principais movimentos hidrodinâmicos do escoamento real esperado para o sistema fluvial em questão. Ficou razoavelmente demonstrado que a ferramenta computacional CFX-11 é interessante para se estudar o potencial hidrocinético de rios, conhecendo-se de antemão as nuances e detalhes do escoamento e geomorfologia e influência das marés. Contudo, as principais considerações e limitações da presente pesquisa estão relacionadas às dificuldades de obtenção de uma série de dados hidrológicos mais precisos, bem como maior aproximação geométrica e detalhamento da batimetria de fundo do canal.

As ferramentas utilizadas neste estudo abrem fortes perspectivas de aprofundamento em uma área sensível e pouco investigada da Engenharia na região, sobre a qual pesam muitas lacunas de conhecimento a respeito dos levantamentos dos potenciais hidrocinéticos de modo geral.

5. Autorizações e reconhecimentos

Os autores autorizam a publicação dos trabalhos em favor da ABENS, assumindo toda a responsabilidade sobre o conteúdo dos mesmos, no momento da inscrição formal do trabalho, acompanhado da taxa de publicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FINEP (projetos REMETAP, AERBOM e P&D HIDROKINÉTICA 3ªG da UnB/IEPA/ELETRONORTE/MME/MCT), e aos técnicos, bolsistas do NHMET/IEPA, SETEC e do LEA/UnB.

REFERÊNCIAS

- Brasil Jr, A. C. P, Salomon, L. R, B., Van Els, R. 2006. A new conception of the hydrokinetic turbine for isolated communities in Amazon. Anais do IV CONEM 2006. 22 a 25 de agosto. Recife Pernambuco.
- Boyle, G. 2004. Renewable energy: power for sustainable future. Open University, UK. Oxford.
- Cunha, A. C. et al. 2006. Estudo numérico do escoamento superficial na foz do rio Matapi – Costa Interna Estuarina do Amapá. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2006. Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering - ABCM, Curitiba, Brazil, Dec. 5-8.
- Cunha A. C. et al., 2007. Estudo experimental e numérico da dispersão de poluentes sob efeito de marés na foz do rio Matapi – Distrito Industrial de Santana – AP. VIII Ecolab, Macapá - AP, Agosto, 6-12, SI, p. 40-44.
- Cunha, A. C. 2008. Movement of pollutants in the environment: experimental and numerical modeling of the surface flow on Matapi River Mouth – Amapa/Brazil. Tese Pós-doc, AWU, CA/EUA (em desenvolvimento).
- Lung, Seng-Wu. 1993. *Water quality modeling*. Vol III: Application to Estuaries. CRC Press, Inc.USA. 194 p.
- MME. 2007. Minicentrals hidrelétricas: turbinas hidrocínéticas, In: Soluções energéticas para a Amazônia – eletrificação de comunidades isoladas. Secretaria de Energia, Programa Luz para Todos. Novembro. 90 p.
- Miranda, L. B. et al. 2002. Princípios da Oceanografia de Estuários. Editora Edusp-SP.
- Reis, L. B. 2003. Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. Ed. Manole. Barueri-SP.
- Rodrigues, A. P. S. P. 2007. Parametrização e simulação numérica em turbina hidrocínética – otimização via algoritmos genéticos. Dissertação de Mestrado, UnB. 94 p..
- Silva, M. S.; Kosuth, P. 2001 – Comportamento das vazões do rio Matapi em 27.10.2000. CONGRESSO DA ASSOC. BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8. Imbé-RS. Resumos, ABEQUA, p. 594-596.
- Van Els, R. 2008. Sustentabilidade de projetos de implantação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na Amazônia: casos do Suriname e Amapá. Tese de Doutorado, UnB. Brasília-DF. Março, 242 p.

Abstract. *One of the barriers to the energy of tides in rivers in the Amazon is the difficulty of assessing the hydrodynamic conditions applied to the generation of energy for the use of hydrokinetic micro-turbines. This paper seeks to present a methodology based on experimentation and numerical simulation to assess the strength of currents in rivers under the influence of tide. The analysis was applied to a stretch near the mouth of the Rio Matapi-AP from information from unloading water discharges during a cycle of tide. It was analyzed the behavior of transient data speeds with the use of numerical simulation applied to the turbulent flow. It was observed that the use of the method was sufficiently satisfactory to assess the hydrokinetic potential of the river studied reflecting the complex conditions of flow in estuarine environments. The numerical tool proved to be robust in identifying details of the fields of speed and current lines of the main movements involving preferential and recycling areas. It was possible to obtain information on the best location and duration of the tide cycle suitable for efficient operation of a small turbine, considering the large variation in the space-temporal characteristics of the flow in the stretch studied. It was conclude then, as happens in any form of decentralized generation, that referred technology presents specific limitations imposed by the physical conditions of the natural environment.*

Key words: *Hydrokinetic, potential, tidal rivers, 3D simulation, Amapa.*