



You are free: to copy, distribute and transmit the work; to adapt the work.
You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor

ESTUDO DO CAMPO DE ISOVELOCIDADES PARA AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS NO RIO MARACÁ-AP

Leandro Rodrigues de Souza¹; Alan Cavalcanti da Cunha²; Antônio César Pinho Brasil
Júnior³; Luis Aramis dos Reis Pinheiro⁴

RESUMO

Em canais abertos os sistemas de escoamento de fluidos podem ser descritos a partir do mapeamento de isolinhas ou campos de isovelocidades (*isovel*), descritos sobre a região da seção transversal. Máximas velocidades na corrente sobre a seção podem ser identificadas, especialmente quando o interesse é a geração de energia hidrocínética em rios. O objetivo deste trabalho é analisar a variação das máximas velocidades na seção transversal do rio Maracá, localizado em uma reserva extrativista do Estado do Amapá para estimar o potencial de geração de energia hidrocínética. A metodologia de quantificação das *isovel* e vazões sazonais baseou-se em técnicas hidrométricas com uso de molinete de hélice ao longo de pontos verticais. O período de estudo compreendeu duas medidas em outubro de 2007 (vazão mínima) e em fevereiro de 2008 (próxima da vazão máxima). No período analisado observou-se uma significativa variação do posicionamento geométrico das máximas *isovel*, provavelmente decorrente da mudança das características do escoamento e da influência da diferença geométrica do perímetro molhado sobre o escoamento. A variação da posição da máxima *isovel* foi significativa, indicando a necessidade de reposicionamento lateral do eixo da turbina hidrocínética em ambas as estações climáticas. Concluiu-se que esta variação deve ser considerada como um parâmetro relevante em projetos de estruturas de suporte do eixo da turbina, melhorando sua eficiência operacional e a capacidade de geração elétrica, a partir de um simples ajuste no posicionamento lateral do eixo da máquina indicado pela maior *isovel*.

Palavras-chaves: energia hidrocínética; isovel (isolinhas de velocidade); molinete de hélice.

STUDY ISOVELOCITY FIELD TO VALUATION OF THE POSITIONING OF HYDROKINETIC TURBINE AT MARACÁ RIVER-AP

ABSTRACT

In open channels the water flow can be described through a mapping of longitudinal velocity or isovelocity fields (*isovel*), it described in the transverse section. The Maximum velocity region in the river cross section could be identifying when the interest is hydrokinetic energy generation in rivers. The purpose of this study is to analyze the maximum velocities variation in the transverse section of Maracá River, near by a sustainable development protection region. O objective is to estimate the potential hydrokinetic energy generation. The quantification methodology of *isovel* and seasonal flow was based in hydrometric techniques using propeller reel along vertical profile. The experimental measurements were performed twice: the first in October 2007 (minimum flow) and seconde in February 2008 (near maximum flow). In the analyzed period was observed a significant variation in the geometric positioning *isovel*, which occurred probably due to change in the flow characteristics and of influence on geometry of wet perimeter over the flow. The variation of the position of maximum *isovel* was significant, indicating need for lateral repositioning of the turbine axis hydrokinetic for each season. This study has observed that the seasonally variation could be considerate a relevant parameter in projects of structures of support of turbine axis, improving the turbine operational efficiency and the electric generation capacity. This proceeding could be carried out by a simple adjust in the lateral positioning in the machine axis indicates for the biggest isovel.

Keywords: Isovél; Stream velocity mapping; propeller reel; hydrokinetic energy.

Trabalho recebido em 25/04/2011 e aceito para publicação em 14/09/2011.

¹ Mestrando em Meteorologia da UFCG. Av. Aprígio Veloso, 882. Campina Grande, PB. e-mail: souzalr@msn.com

² Professor adjunto da UNIFAP. Av. Jk. Macapá-ap; e-mail: alancunha@unifap.br

³ Professor adjunto da UnB. e-mail: brasiljr@unb.br

⁴ Mestrando em Ciências mecânicas da Unb. e-mail: aramisrp@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

No mundo cerca de dois bilhões de pessoas não têm acesso a fontes de energia elétrica, sendo que a maioria delas vive em áreas rurais, o que dificulta o desenvolvimento econômico e social das populações (El BASSAM et al., 2004). No Brasil, este número atinge aproximadamente cinco milhões de domicílios ou, cerca de 12 milhões de habitantes. Somente na Região Amazônica, estima-se que existam 18,45% domicílios que não são atendidos pelo fornecimento de energia elétrica convencional.

Além disso, Andrade et al. (2011) descrevem que, em nome de um desenvolvimento econômico, a região amazônica tem convivido com muitas conseqüências ambientais negativas resultantes de ações governamentais baseadas em extração predatória de seus recursos naturais, as quais praticamente não trazem benefícios às populações locais. Além disso, as populações locais sofrem com as desigualdades socioeconômicas e com a falta de infraestrutura básica. Um problema recorrente, em especial, é a falta de suprimento de energia elétrica que, mesmo quando fornecido, é de baixa qualidade e em bases de combustíveis fósseis, dependente de logística complexa e com impactos ambientais severos no seu consumo.

Andrade et al. (2011) também asseveram que há uma marcante disparidade entre as áreas rurais e urbanas na região amazônica. A economia local apresenta uma componente forte de extrativismo e baixa taxa de industrialização acoplada à falta de infraestrutura básica. A carência de oportunidade para o crescimento e o desenvolvimento tem contribuído com a migração demográfica da região norte do Brasil. Complementam, ainda, que uma das explicações para o crescimento desigual da região é que as cidades e vilas encontram-se isoladas, e não conseguem formar uma economia de larga escala. Além disso, a maior parte da população está concentrada nas capitais dos estados e outras áreas urbanas, pois são consideradas economicamente pungentes. Contudo, a parte do interior dos estados sofre com a severa falta de assistência neste setor (ELS et al., 2004; ELS, 2008).

Apesar das críticas, no intuito de eliminar essa exclusão energética no país, o Governo Federal criou em 2004 o Programa “Luz para Todos” que pretendia universalizar o acesso à energia elétrica até o final de 2008, atendendo aproximadamente quatro mil municípios e cerca de sete milhões de habitantes que hoje não têm acesso à energia. Entretanto, problemas relacionados aos desequilíbrios sócio-espaciais, como o alto custo da

geração, transmissão e distribuição de energia hidrelétrica inviabilizam iniciativas de atendimento às necessidades energéticas de pequena escala, deixando desprovidas de abastecimento populações rurais e/ou extrativistas geograficamente isoladas dos grandes centros urbanos (GREENTEC, 2003; BRASIL Jr, 2009).

A alternativa encontrada pelas prefeituras para atendimento às comunidades isoladas é o sistema de quotas mensais de óleo diesel, distribuídos entre os moradores. Ultrapassando essa quota, os moradores assumem os custos adicionais, elevando o custo médio da tarifa praticada pelas concessionárias. Porém, quando há dificuldade no transporte do óleo diesel até essas comunidades remotas, a solução possível para o problema é o uso de fontes renováveis. A abundância de recursos como biomassa, energia solar, eólica e hidráulica, potencialmente podem garantir energia em condições adequadas às realidades locais (ELS, 2005; CUNHA et al., 2010; ANDRADE et al., 2011).

Do ponto de vista conceitual, as energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, que é a fonte primária de quase toda energia disponível na Terra. Por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta. Em algumas localidades da Amazônia é possível dar

ênfase à produção da Hidroenergia, ou seja, da energia cinética das massas de água dos rios (SOUZA, 2009), que fluem de altitudes elevadas para os mares e oceanos graças à força gravitacional. Este fluxo é alimentado em ciclo reverso graças à evaporação da água, elevação e transporte do vapor condensado em forma de nuvens, naturalmente realizado pela radiação solar e pelos ventos. A fase se completa com a precipitação pluvial nos locais de maior altitude (BRASIL Jr, 2008).

A hidroenergia também pode ser vista como forma de energia potencial; volume de água armazenada nas barragens rio acima. As grandes hidrelétricas se valem das barragens para compensar as variações sazonais do fluxo dos rios e, através do controle por comportas, permitir modulação da potência instantânea gerada nas turbinas.

Contudo, em se tratando de Turbinas Hidrocinéticas (THC) é necessário avaliar/estudar locais com potencial hidrocinético para utilização desta forma de energia e transformá-la em energia elétrica para comunidades remotas na Amazônia. A razão disso é que nesta modalidade de geração não é possível armazenar a água e o sistema é completamente dependente das variações hidroclimáticas de precipitação e da geomorfologia dos canais que lhe atribuem

qualidade e quantidade de geração. Para o caso de estudos no estado do Amapá, um exemplo disso são os trabalhos de BRASIL Jr et al. (2006a), ELS (2008), SOUZA (2009), CUNHA et al, (2010), entre outros.

Neste trabalho são abordados os principais aspectos físicos e técnicos relacionados ao uso e instalação de picocentrals hidrocínéticas, as quais podem gerar até 2KW de potências, em comunidades remotas na Amazônia. No presente caso foi estudada uma localidade próxima da comunidade extrativista do rio Maracá, no Estado do Amapá.

Efetivamente os estudos foram iniciados em 2006 com o projeto intitulado “Alternativas Energéticas para Comunidades Isoladas da Amazônia: A energia hidrocínética no Maracá, sul do Amapá” que tinha como objetivo central apoiar a inserção social, técnica e econômica de uma turbina hidrocínética de 2ª geração. Atualmente, a proposta é difundir a tecnologia para todas as regiões do Brasil, em especial na Amazônia, buscando-se o apoio de financiadores como SUFRAMA, SUDAM, etc, a partir de métodos de incubação e produção em escala (BRASIL Jr, 2006b).

Um problema a ser enfrentado pela inserção da tecnologia em desenvolvimento e em sua 3ª geração, é que os rios sobre os quais há o potencial para sua inserção na Amazônia

apresentam-se praticamente desconhecidos do ponto de vista hidrológico ou hidráulico. Neste aspecto, este trabalho contribui com novas e relevantes informações sobre o potencial hidrocínético em rios da região. A velocidade de escoamento é o principal parâmetro de análises, sobre o qual se busca quantificar a importância/necessidade de criação de um dispositivo lateral na turbina (Figura 1) que permita o movimento lateral e vertical da turbina, de modo que seja possível aproveitar o máximo potencial hidroenergético durante os períodos sazonais seco e chuvoso daquela bacia hidrográfica, especialmente no canal principal do rio Maracá-AP.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Turbina

Hidrocínética

O termo Turbina Hidrocínética é dedicado às máquinas hidráulicas que convertem energia cinética dos rios ou de correntes de maré em eletricidade (Figura 1). A exploração de pequenas máquinas hidrocínéticas não é definitivamente um novo conceito, mas sim uma re-visitação desta tecnologia. No momento atual pode significar uma excelente alternativa para a geração de eletricidade sustentável (BRASIL Jr, 2007, CUNHA et al., 2010).

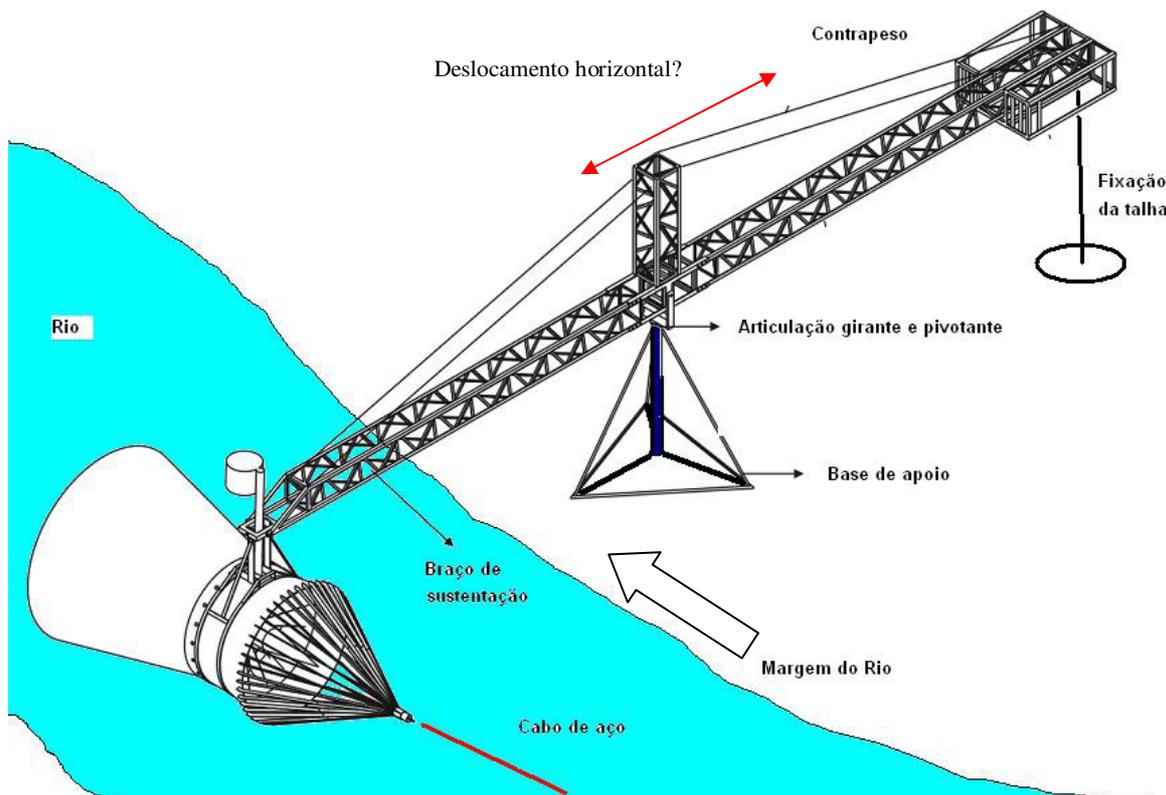


Figura 1. Esquematização do funcionamento da Turbina Hidrocinética (THC), sendo o sentido do escoamento do rio representado pela seta branca.

Fonte: Els (2008).

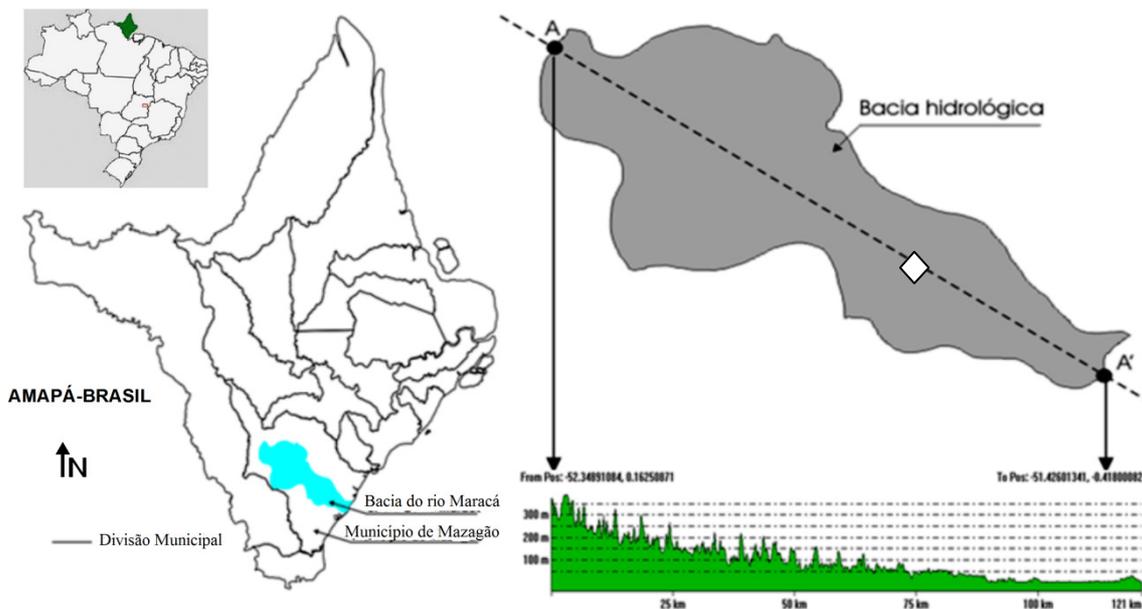


Figura 2. Localização da Bacia do rio Maracá.

Considerando especificamente a região amazônica brasileira, onde grande parte das comunidades pequenas são ribeirinhas, o atendimento dos serviços de eletricidade, descentralizado também pode focar a opção hidrocínética como uma das formas de viabilizar projetos de desenvolvimento sustentáveis. Estas, por sua vez podem promover equidade para as populações enraizadas nas regiões mais isoladas. Tiago Filho (2003) apresenta uma revisão interessante sobre turbinas hidrocínéticas (THC's) descrevendo aspectos gerais, além do potencial e uso desta tecnologia no Brasil. Portanto, a abordagem experimental do presente estudo serve como uma contribuição importante para indicar a melhoria da viabilidade técnica da instalação ou equipamentos para as condições amazônicas referentes às picocentrals hidrocínéticas. Além disso, a simples há uma real necessidade de se otimizar o rendimento de THC, pois, além de serem de baixa potência, dependem enormemente

A Bacia do rio Maracá apresenta características físicas e clima bastante comuns às de bacias Amazônicas (CUNHA et al., 2010). Por outro lado, a existência do relevo elevado para os padrões amazônicos torna a região propícia ao uso de energia hidrocínética (ELS, 2008). O rio Maracá é perene e deságua no braço esquerdo do rio Amazonas (Ponto

da variabilidade hidroclimática da bacia. Desta forma, a contribuição hidrométrica do cálculo das isovel não só favorece a otimização operacional da turbina mas também nos informa sobre quais seriam as alternativas de posicionamento da turbina em momentos críticos de seca ou cheia do rio, por exemplo. Tais procedimentos exigiriam da população local conhecimentos básicos mínimos para identificar o local de máximas velocidades da seção apontada por este tipo de estudo.

1.1 Caracterização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do rio Maracá (Figura 2) esta localizada no Município de Mazagão – AP e encontra-se cerca de 2 horas de Macapá, pela Rodovia BR-156 (em sentido ao município de Laranjal do Jari). Há várias comunidades que vivem nesta região. As principais fontes de renda são o extrativismo (principalmente castanha) e a fabricação de móveis (próximo a foz do rio Maracá).

A', da Figura-2). O trecho de estudo é indicado na Figura 2 no triângulo vermelho, mais precisamente na parte do médio Maracá. Neste trecho as vazões médias são da ordem de 120 m³/s no período chuvoso e 80 m³/s no período de seca (faça as correções das vazões corretas do seu TCC) (SOUSA, 2009).

1.2 Descrição do método utilizado para estimar o potencial hidrocínético

A energia cinética de correntes hidráulicas disponibilizam uma potencia hidráulica que pode ser convertida e dada por:

$$P_H = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad [1]$$

Na estimativa da potência elétrica utilizou-se a equação (2):

$$P_{(potência\ elétrica)} = C_p \cdot P_H \cdot \eta_m \cdot \eta_e \quad [2]$$

Em que: **P_H**: Potência Hidráulica disponível (W), **m**: Massa de água (Kg), **V**: Velocidade da corrente do rio (m/s), **ρ**: Densidade da água (Kg/m³), **A**: Área da secção da turbina (m²), **P_e**: Potência

elétrica (W), **η_m**: Rendimento Mecânico e **η_e**: Rendimento elétrico, **C_p**: coeficiente de potencia da máquina.

A potência hidráulica da turbina disponível (equação 1) depende da velocidade de corrente d'água no rio e do tamanho do hélice. O tamanho do hélice, por sua vez depende da profundidade do rio. No diagrama da Figura-3 é mostrada a relação entre potência elétrica em função da velocidade da água do rio e do diâmetro do hélice, considerando um coeficiente de potencia de 0,56 (coeficiente de Betz).

		Diâmetro da hélice						
		0,8 m	1,0 m	1,2 m	1,4 m	1,6 m	1,8 m	2,0 m
Velocidade de água (m/s)	0,8 m/s	51	80	115	157	204	259	319
	1,0 m/s	100	156	225	306	399	505	624
	1,2 m/s	173	270	388	528	690	873	1078
	1,4 m/s	274	428	616	839	1096	1387	1712
	1,6 m/s	409	639	920	1252	1636	2070	2556
	1,8 m/s	582	910	1310	1783	2329	2948	3639
	2,0 m/s	799	1248	1797	2446	3195	4044	4992
			Potência (Watt)					

Figura 3. Diagrama que relaciona a potência com velocidade e diâmetro do hélice. **Fonte:** ELS, 2008.

Todas as tecnologias de aproveitamento hidroenergético dependem das características do rio que determina a opção tecnológica e a escolha do sítio para instalação do empreendimento (CUNHA et al., 2010). Para turbinas hidráulicas

convencionais, os valores da vazão do rio e a queda determinam a melhor localização dos equipamentos hidráulicos. No caso de turbinas hidrocínéticas, os fatores essenciais são a velocidade e a geometria

(profundidade principalmente) do rio (ELS, 2008).

1.3 Método de Medição de Velocidade e Vazão com Molinete

As etapas iniciais do trabalho consistiram na implantação de seções de réguas verticais imaginárias que permitem a verificação das variações da profundidade do rio, onde foram separadas a cada três metros de acordo com a largura do rio, no caso até 50m (SOUZA, 2009; SANTOS et al., 2001). As velocidades verticais foram realizadas a partir de medições de descarga a 0,2p; 0,4p; 0,6p e 0,8p da profundidade do rio (SANTOS et al., 2001). Após ter sido medido o comprimento ou largura do rio, as verticais foram marcadas em um barbante localizado em cada distância imaginária em relação às margens do rio, nas qual foram posicionados o molinete. Dependendo

da profundidade, utilizou-se o procedimento indicado pela Tabela-1, ilustrado pela Figura 4, representada pela seção real de estudo.

Utilizou-se a equação com quatro pontos da Tabela1, visto que, o rio apresentou profundidades entre 3 e 4m. A vazão de interesse no curso natural da água do rio Maracá é determinada principalmente pelo valor da velocidade, que por sua vez varia significativamente ao longo do ciclo sazonal do regime de precipitação pluvial na região. Além disso, há uma significativa alteração da área da seção reta o que também implica na influência sobre a vazão quantificada. Contudo, esta alteração tem se mostrado pouco significativa e pode ser facilmente corrigida nos procedimentos de cálculo das vazões e determinação das *isovel* (SOUZA, 2008).

Tabela 1. Número e posição de pontos de medição na vertical recomendados de acordo com a profundidade do rio.

Pontos	Posição em relação a S*	Velocidade média na vertical (m/s)	Prof. h(m)
1	0,6h	$V = V_{0,6}$	0,15 - 0,60
2	0,2 e 0,8h**	$V = (V_{0,2} + V_{0,8})/2$	0,60 - 1,20
3	0,2; 0,6; e 0,8h	$V = (V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8})/4$	1,20 - 2,00
4	0,2; 0,4; 0,6; 0,8h	$V = (V_{0,2} + 2V_{0,4} + 2V_{0,6} + V_{0,8})/6$	2,00 - 5,00

*S: Superfície; h**: Profundidade

Fonte: SANTOS et al (2001).

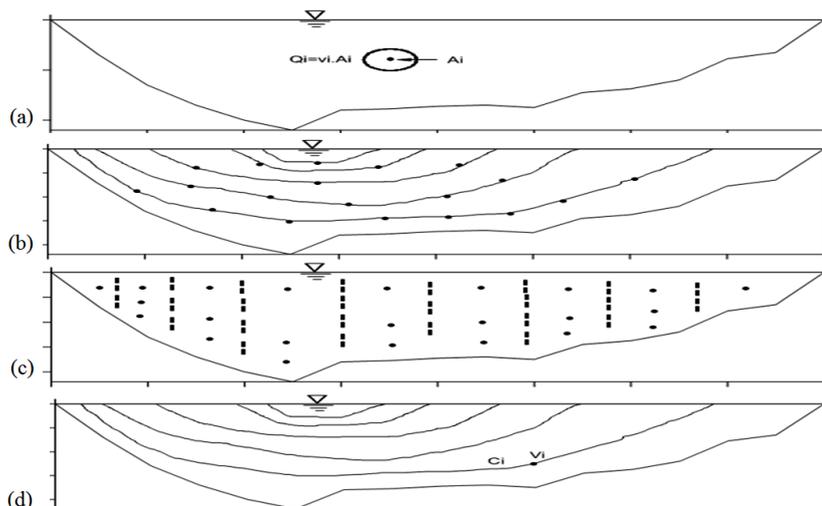


Figura 4. Diferentes técnicas de medição de vazão (a) somatório de velocidade-área, (b) integração de velocidade-área, (c) caso especial de somatório de velocidade-área; métodos de um e dois pontos, (d) técnica de medição em ponto simples.

Fonte: Adaptado de MAGHREBI, 2006.

No estudo foi quantificada a velocidade e a vazão de um trecho do rio Maracá localizado a jusante do local onde está instalada a turbina hidrocínética na comunidade do Maracá. O objetivo foi a determinação das curvas de descarga líquida (curva-chave). Esta curva de descarga é obtida através de medições

diretas da velocidade em diversas seções dos rios e das áreas de secção do rio. Cabe ainda observar que a velocidade superficial é medida a 10 cm de profundidade para que o hélice do molinete permaneça submerso, enquanto a velocidade do fundo é medida entre 15 e 25 cm acima do leito do rio, em função da distância do lastro ao eixo do molinete (Figura 5).



Figura 5. Molinete Universal Newton utilizado na seção de estudo do rio Maracá-AP.

A partir do uso do molinete calcula-se a velocidade pontual de escoamento do

rio utilizando equações específicas contida no manual de fabricação do equipamento e

da metodologia apresentada. A determinação da vazão do rio é necessária para normalizar os campos de Iso-velocidades (*isovel normalizadas*). A multiplicação das áreas de cada sub-seção pela velocidade média entre as velocidades pontuais verticais resultam na vazão da sub-seção, as quais, quando integradas ao longo da seção quantificam a vazão total. Em particular, considerou-se a caracterização e o mapeamento da seção transversal para diferentes condições hidrológicas de período chuvoso e seco.

1.4 Método de Obtenção das Isovel a partir dos Dados Experimentais de Campo

O método proposto é capaz de prever os contornos de *isovel* normalizadas em seções transversais das seções retas e irregulares de canais abertos com diferentes rugosidades e geometrias (MAGHREBI & RAHIMPOUR, 2005; MAGHREBI & BALL, 2006). Supõe-se que cada elemento da fronteira influencia a velocidade em um ponto arbitrário sobre a seção transversal. Então, o efeito total da fronteira pode ser obtido pela integração ao longo do perímetro molhado (equação 3):

$$ui = \int f(\mathbf{r}) \cdot c_1 ds \quad [3]$$

Em que: \mathbf{u} é a velocidade longitudinal em um ponto na seção de canal, \mathbf{i} é um vetor

unitário ao longo da coordenadas x , $f(\mathbf{r})$ é uma função da velocidade que é semelhante ao perfil de velocidade dominante sobre uma placa plana com largura infinitamente grande, $d\mathbf{s}$ é a notação de vetores ao longo do perímetro molhado e c_1 é uma constante relacionada à rugosidade limite.

Os perfis de velocidade foram gerados no *software* Surfer 9.0 que permitiu a visualização da velocidade na seção de análise. Observa-se então o melhor posicionamento da turbina hidrocínética tanto no período chuvoso, em fevereiro, quanto no seco, em outubro, de forma que ambos indiquem seus respectivos locais de rendimento máximo da turbina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados experimentais do estudo de acordo com a metodologia anteriormente descrita. A aplicação mais importante é a sua utilização nas etapas anteriores à instalação de turbinas hidrocínéticas. Na Tabela-2 constam as informações hidráulicas obtidas para avaliar o potencial hidrocínético no rio Maracá (Tabela 2). Além dos parâmetros globais, como vazão, largura média, profundidade média e velocidade média, também foram gerados os perfis verticais de velocidade detalhados na seção de

medida, as quais permitiram identificar com exatidão a melhor posição do eixo da turbina hidrocínética, segundo as coordenadas da seção transversal. A principal hipótese é que o contorno da máxima isovel é um indicativo do local exato do eixo da turbina que apresenta teoricamente o maior rendimento potencial

possível para aquela vazão, tanto no período seco quanto no chuvoso. Outros valores intermediários, por analogia, deverão apresentar localizações na seção reta entre ambos os valores identificados na máxima de cheia e mínima de seca (Tabela 2)

Tabela 2. Parâmetros hidrométricos médios calculados do Rio Maracá – AP.

Parâmetros Calculados	1ª Medição (Out/07)	2ª Medição (Fev/08)
Área (m ²)	99,12	126,24
Largura do rio (m)	42,00	48,00
Profundidade (m)	2,36	2,63
Vazão (m ³ /s)	113,01	209,26
Velocidade (m/s)	1,14	1,66

Com base na Tabela 2, acima, é possível observar uma significativa variação da vazão quando comparados dois períodos sazonais. Portanto, é fácil observar pelos dados obtidos que o conhecimento das características hidráulicas das seções devem ser um dos critérios técnicos decisivos considerados na instalação e na operação de turbinas hidrocínéticas. Uma observação semelhante foi feita por MAGHREBI (2006) quando afirma que em contorno de canais prismáticos regulares e retos a localização da máxima velocidade ocorre no centro da seção do canal, mas sua localização não é óbvia em canais naturais (irregulares). Por outro lado, os contornos

das isovelocidades (*isovel*), tais como produzidas pelas Figuras 5 e 6 mostram a posição de máxima velocidade, as quais devem ser consideradas em qualquer análise das etapas preliminares de instalação de turbinas hidrocínéticas.

O que se conclui desta análise é que as isovel mostradas para os períodos chuvoso e seco, respectivamente nas Figuras 5 e 6, são parâmetros importantes a serem considerados em todo o ciclo de vida da turbina hidrocínética. A razão disso é que a eficiência do sistema poderá ser elevada por meio de uma medida operacional muito simples, que seria apenas um providencial reposicionamento do eixo da turbina, baseado no conhecimento das características

hidráulicas do escoamento na seção, segundo a variação sazonal da vazão (ou mudança da posição das máximas velocidades na seção).

Uma vez que o principal parâmetro avaliado nos estudos técnicos para instalação de uma turbina é a velocidade de corrente do rio a obtenção dos campos da isovel são também importantes. Como é sabido, é possível elevar a potência de

operação da turbina com pequenos ajustes laterais ou verticais do seu eixo. Observa-se na Tabela 3 que no mês de outubro (vazão de estiagem) a potência representa apenas 31,77% da potência no mês de fevereiro (vazão de cheia), vez que a potência hidráulica varia com o cubo da velocidade, e entre os intervalos de medição há uma diferença de 0,52m/s devido ao efeito sazonal da vazão.

Tabela 3. Potência elétrica da turbina.

Mês	Velocidade (m/s)	Potência Elétrica (W)
Outubro/2007	1,14	402,10
Fevereiro/2008	1,66	1265,50

Em virtude da condição de máquina de fluxo livre, pelo princípio de Betz, o máximo teórico de potência que se deve extrair desse tipo de máquina é 0,56. Além disso, foram considerados os rendimentos mecânico de turbina e elétrico do gerador igual a 0,7 e 0,9 respectivamente. Observa-se a potência da turbina hidrocínética na Figura 3 (diagrama de potência), onde se considerou um diâmetro da turbina de 1,4m. Para a estimativa da potência hidráulica ou hidrocínética utilizou-se a equação (1) e em seguida, calculou-se a potência elétrica por intermédio da equação (2).

Observa-se pelas Figuras 6 e 7, na elaboração dos perfis de velocidade, que é possível optar pela localização das máximas velocidades, otimizando o

rendimento hidrocínético. Também, por intermédio da obtenção do campo de velocidades normalizadas (Figuras 9 e 10) é, conseqüentemente, possível verificar a posição do eixo da turbina que gera o melhor rendimento. A razão desta variação geométrica transversal das isovel é a variação sazonal que altera o perfil e o padrão das velocidades e a geometria da seção do rio, inclusive provavelmente devido à influência da variação do novo perímetro molhado formado.

Na Figura 6, no período de seca, as máximas velocidades são da ordem de 1,8 a 2,1 m/s, as quais ocorrem em duas posições da seção do canal. A partir da margem esquerda, as máximas velocidades ocorrem nas distâncias próximas de 18 m e 30 m, com vantagem para a primeira. Isto

porque, nesta posição, o canal é mais fundo e favorece tanto o posicionamento horizontal quanto a vertical da turbina. É importante observar, no entanto, que a

profundidade média da seção é baixa, da ordem de, no máximo, 3,4m.

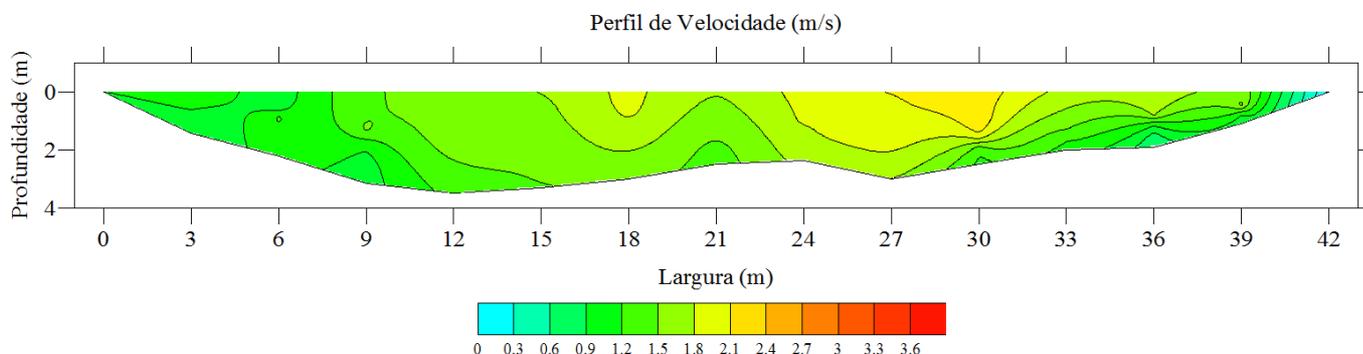


Figura 6. Perfil esquemático da velocidade no Rio Maracá no mês de outubro de 2007 (seco).

Ainda, a Figura 6 (chuvoso) apresenta as linhas de isovelocidades distribuídas de forma mais homogêneas quando comparada com as linhas de isovelocidades da Figura 7 (seca). A explicação é que no mês outubro (vazão de estiagem) são observadas intensidades de velocidades inferiores quando comparadas ao do mês de fevereiro (vazão de cheia) que, por sua vez, tem maior influência lateral do rio, além do aumento da intensidade da turbulência do fluxo cinemático.

Na Figura 7 (período chuvoso), as máximas velocidades foram da ordem de até 3,4m/s, localizadas nos trechos centrais

do canal. A partir da margem esquerda, as máximas velocidades ocorreram nas distâncias horizontais próximas de 21 m e no intervalo entre 27 e 30 m, com vantagem para a segunda posição, pois neste intervalo o canal permite ou favorece um maior número de opções para o posicionamento do eixo da turbina. Observa-se também que a profundidade média da seção é significativamente maior do que no período seco, da ordem de, no máximo 4,4m.

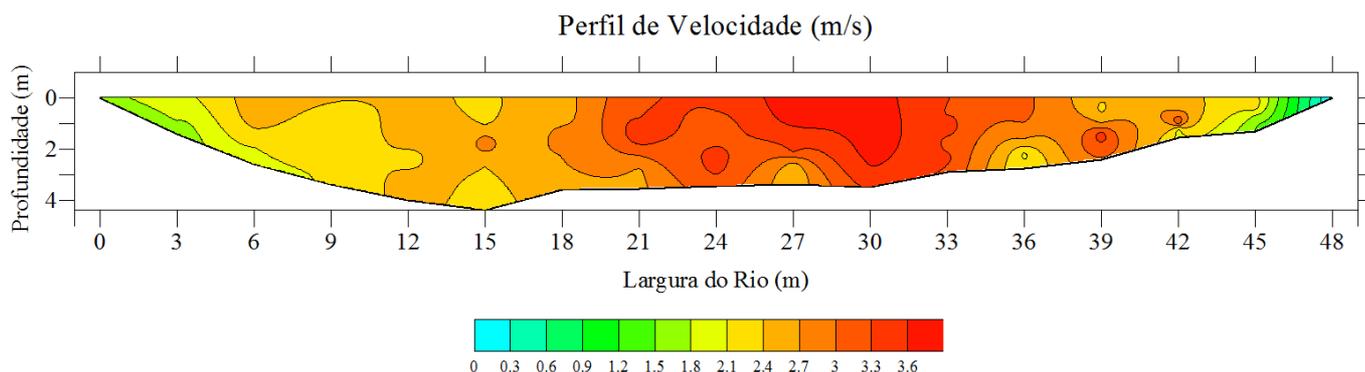


Figura 7. Perfil esquemático da velocidade no Rio Maracá no mês de fevereiro de 2008 (chuvoso).

Resumindo a presente análise, foi possível estimar o local dos pontos específicos mais interessantes para a fixação do eixo da turbina no aproveitamento da melhor velocidade máxima a ser turbinada. Estas, por sua vez dependem dos fatores hidráulicos e de geometria do canal, principalmente a geometria do rio.

Quando comparados os escoamentos sazonais em canais irregulares naturais semelhantes, os dados de MAGHREBI (2006) indicam que os parâmetros mais importantes a serem considerados neste tipo de estudo, onde há um interesse na localização pontual da velocidade são o perfil de velocidade e a geometria. Em detalhes estes são: a) o perfil de velocidade, pois nos escoamentos turbulentos existem duas funções conhecidas para a distribuição de velocidades, o perfil logaritmo e a função potência; b) efeitos de contorno, onde é

possível observar diferentes níveis de rugosidades para o leito do canal bem como nas laterais do mesmo, pois a rugosidade pode mudar tanto ao longo do eixo longitudinal, quando no eixo lateral da seção, cuja assimetria afetaria também a distribuição de tensão de cisalhamento; c) relação largura/profundidade do canal, que influencia significativamente também a distribuição das velocidades. Neste último caso, é importante considerar os efeitos das correntes secundárias, sobre as quais se acredita serem influenciadas principalmente pelas paredes laterais e condições de contorno do canal. Portanto, estes últimos estão relacionados com a geometria do canal, especialmente o perímetro molhado da seção de estudo.

Assim como nos estudos de MAGHREBI (2006), e avaliados nas Figuras 6 e 7, pode ser observado que há nítidas regiões que se apresentam com maior potencial de velocidades máximas.

Neste aspecto, há também um maior potencial para o aproveitamento da corrente para fins de geração de energia hidrocinética.

Na presente análise foi observado mudanças da geometria da seção do canal, as quais ocorreram durante o ciclo sazonal hidrológico. Neste aspecto, verificou-se se diferenças das isovel entre a localização dos pontos de determinação das velocidades no período chuvoso e seco.

Observa-se que para ambas as vazões foi utilizada uma mesma referência da origem na largura do rio, devido a redução da área alagada de ambas as margens e em ambos os períodos sazonais de vazão. Assim, não foi possível manter rigorosamente as origens coincidentes para a presente análise, o que causou uma

pequena variação da linha de fundo (Figura 8).

As linhas pontilhada e contínua do fundo do canal representam, respectivamente, o perímetro molhado no período seco e no período chuvoso. Um teste t-Student foi utilizado para verificar se as diferenças entre as cotas individuais poderiam ser consideradas estatisticamente diferentes a ponto de influenciar as análises e os cálculos das isovel. O teste t resultou em diferenças não significativas em um nível 0,05 de significância ($p < 0,05$). Portanto, considera-se que as linhas de fundo sejam estatisticamente “coincidentes” para efeito de análise comparativa entre ambos os períodos sazonais.

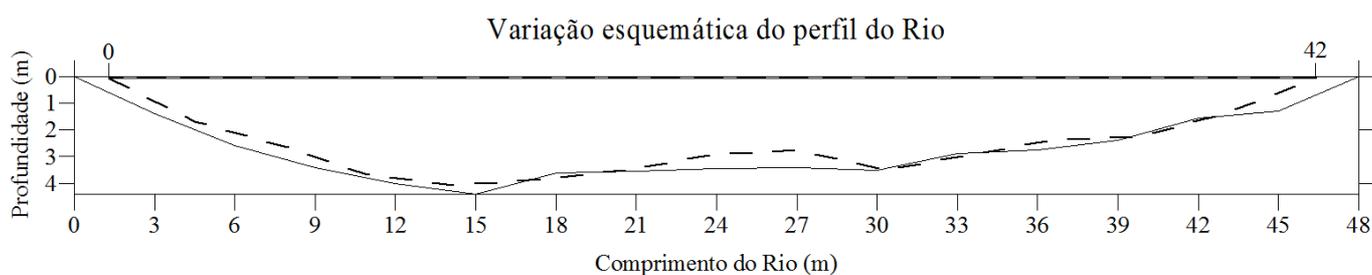


Figura 8. Diferença não significativas entre as geometrias de fundo do rio outubro (tracejado) e fevereiro (contínuo).

Por outro lado, um modo um pouco mais produtivo de observar a variação das *isovel* é por intermédio de uma análise do campo adimensionalizada de velocidades, que conciste na razão do valor medido pela média em cada ponto, onde é possível perceber a intensidade relativa da corrente

em relação à máxima velocidade. Nas áreas cujos pontos apresentam valores mais próximos de 1,0, são os mais apropriados para a fixação do eixo da turbina hidrocinética.

Para o período seco (outubro), na Figura 9, observa-se que, mesmo com a

redução na profundidade média, a velocidade ótima esta próxima à superfície. Horizontalmente entre 25 a 31m em relação à margem esquerda. De modo similar, no período chuvoso (fevereiro), na Figura 10, a resposta é mais satisfatória em

relação às isovelocidades adimensionalizadas, cujo potencial hidrocínético encontra-se próximo das distâncias entre 24 e 33m em relação à margem esquerda.

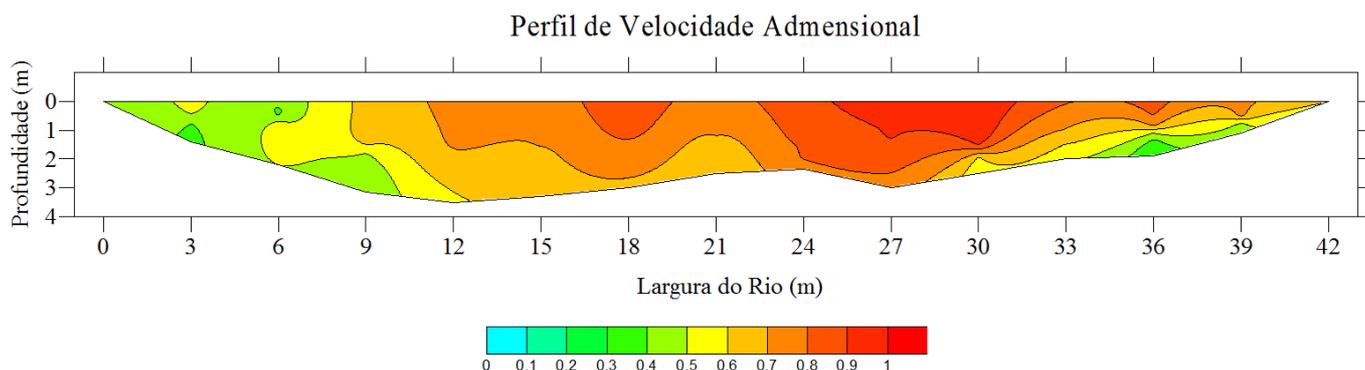


Figura 9. Velocidades adimensionalizadas no Rio Maracá no mês de outubro de 2007.

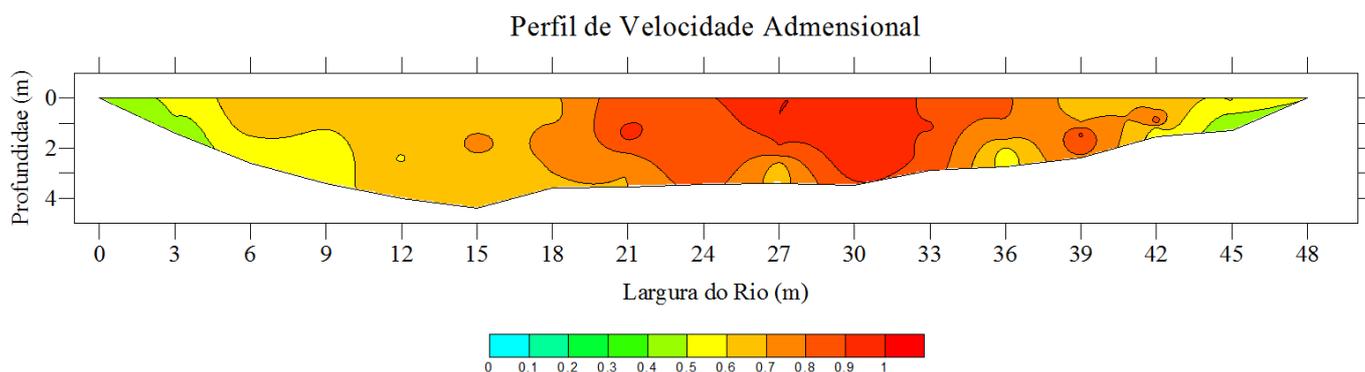


Figura 10. Velocidades adimensionalizadas no Rio Maracá no mês de fevereiro de 2008.

Em síntese, ao longo desta análise, percebeu-se que o conhecimento prévio das principais características hidrométricas ou hidráulicas do escoamento, em seções específicas dos rios utilizados para o aproveitamento hidrocínético, deve ser um dos critérios técnicos importantes e decisivos ao longo das etapas de instalação e operação de turbinas hidrocínéticas. Nestes termos, o nível de segurança operacional bem como alguns

procedimentos prévios necessários à instalação da turbina, estas informações servem para melhor atender as necessidades de comunidades isoladas.

Contudo, na região amazônica há carência e desconhecimento sobre os rios cujo objetivo é o aproveitamento de geração de energia desta modalidade de baixa potência, visto que a demanda isolada é reduzida e, por este motivo, não se observa interesse real nos estudos de

pequena capacidade de aproveitamento energético.

Finalmente, espera-se que as análises aqui abordadas venham a contribuir com a discussão sobre a necessidade de melhorias nas alterações no projeto de engenharia/construção da turbina hidrocínética. Quando se considera o deslocamento horizontal do eixo da turbina, a resposta física deve ser uma resultante natural dos procedimentos que considerem as variações sazonais significativas sobre a velocidade turbinada. A necessidade de uma mudança natural do posicionamento da máxima velocidade implica potencialmente na redução do desperdício de rendimento elétrico considerado naturalmente escasso.

4. CONCLUSÕES

O estudo avaliou a condição hidráulica do rio Maracá-AP do escoamento do rio Maracá para estimar o potencial hidrocínético e os campos de velocidades em uma seção experimental para observar a variação lateral da velocidade máxima no eixo da turbina no rio.

Verificou-se que há potencial hidroenergético significativo para atender pequenas demandas da ordem de até 2KW de potência.

Mesmo no período de estiagem, com significativa redução da vazão e,

conseqüentemente, da velocidade como no mês de seca (outubro) é viável seu uso, desde que seja considerado o reposicionamento da turbina na seção de estudo. Por exemplo, no período seco, é possível gerar no mínimo 402,1W. No período de cheia (fevereiro) esse valor atinge até 1.265,5W.

Os campos de velocidades (isovel) mostraram que há um deslocamento do eixo que se deve levar em consideração quanto ao rendimento elétrico sazonal, a fim de operar a turbina na maior eficiência da potência possível. A energia hidrocínética máxima proporcionaria ganhos significativos em relação ao funcionamento operacional normal da THC, se o eixo da turbina deixasse de ser fixo ao longo do tempo operacional.

É inegável que a geração de energia hidrocínética obtida das correntes dos rios é uma ótima solução energética, mas depende das condições hidráulicas dos rios próximos das comunidades que necessitam desta infraestrutura. Em caso de reposicionamento da turbina, de acordo com os campos de isovel obtidos (Figuras 6, 7, 9 e 10), os ganhos seriam consideráveis, pois variariam com o cubo da diferença da velocidade entre as duas situações – eixo fixo ou eixo reposicionado lateralmente pelo operador.

Conclui-se que é preciso que se busque maior conhecimento sobre as

condições hidrológicas (hidráulicas) dos rios cujos potenciais sejam interessantes para a produção de energia em sistemas isolados, tais como prevenir problemas hidroclimáticos de secas ou de cheias que possam inviabilizar a geração ou, de modo contrário, danificar os equipamentos.

Há ainda desconhecimento das características hidráulicas dos rios amazônicos, principalmente os menores. Este desconhecimento talvez possa se configurar em mais uma das lacunas de pesquisa para a implantação da energia hidrocinética na região, principalmente devido a inexistência de séries hidrológicas na maioria dos rios amazônicos, como é o caso da reserva extrativista do Maracá no Estado do Amapá.

Considerando os fatores estudados no presente trabalho as condições operacionais agregariam maior valor aos produtos extrativistas no período chuvoso de entressafra, pois elevaria o nível de geração de energia. Mais energia significa diminuição potencial da deterioração dos produtos na entressafra climática regional, porque a castanha se apresentaria com menor teor de umidade e com melhores condições de armazenamento a partir da energia potencialmente disponível.

As características hidrológicas dos rios, como apontado neste estudo, merecem uma atenção especial no contexto do uso desta tecnologia apropriada na

modalidade hidrocinética, pois são os fatores que realmente determinam e condicionam o funcionamento da tecnologia apropriada nesta região brasileira.

5. AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem a concessão de bolsa Produtividade-PQ do CNPq, processo 305657/2009-7, a CAPES e ao Projeto Tucunaré P&D Eletronorte/LEA-UnB, Projeto SUDAM/NHMET/IEPA e CCAM/UNIFAP.

6. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. S.; ROSA, L. P.; SILVA, N. F. Generation of electric energy in isolated rural communities in the Amazon Region: a proposal for the autonomy and sustainability of the local populations. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 15, p. 493-503, 2011.
- EL BASSAM, N.; MAEGAARD, P. **Integrated renewable energy for rural communities**. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- BRASIL JUNIOR, A. C. P.; SALOMON, L. R. B.; ELS, R. V. A new conception of the hydrokinetic turbine for isolated communities in Amazon. **Anais... IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Recife. 2006a.
- BRASIL JUNIOR, A. C. P. **Energia renovável para a reserva do Maracá**. Edital CT-Energ MME CNPq 03/2003, Proposta UnB/IEPA. 12 p., 2006b.
- BRASIL JUNIOR, A. C. P.; ELS, R. V.; SALOMON, L. B. R.; OLIVEIRA, T. F.; RODRIGUES, A. P.; FERREIRA, W. O. Turbina

- hidrocinética geração 3. **Anais... IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, in CDROM, Araxá. p. 1-10. 2007.
- BRASIL JUNIOR, A. C. P. **Programa nacional de universalização do acesso e uso da energia elétrica – Manual de operacionalização**. Ministério das Minas e Energia – MME. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 01 de julho de 2008.
- BRASIL JUNIOR, A. C. P. **Turbinas hidráulicas hidrocinéticas para o aproveitamento do potencial remanescente em usinas hidrelétricas**. Projeto P&D Tucunaré. Edital P&D Eletronorte. Brasília – DF. Proposta UnB. 12 p., 2010.
- CUNHA, A. C.; BRITO, D. C.; PINHEIRO, L. A.; CUNHA, H. F. A.; BRASIL JUNIOR, A. C. P. Simulação hidrodinâmica e avaliação de potencial hidrocinético: estudo da foz do rio Matapi no Baixo Amazonas – Amapá/Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 1, n. 2, p. 139-148, setembro, 2010.
- ELS, R. V.; CAMPOS, C.; SALOMON, L. R. B. **Turbinas hidrocinéticas no Brasil. In: Primeiro seminário sobre atendimento energético de comunidades extrativistas - SAEEX 2004**, Brasília: Ministério de Minas e Energia e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2004.
- ELS, R. V. **Sustentabilidade de projetos de implantação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na Amazônia: casos do Suriname e Amapá**. 2008. 242 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- GREENTEC ECOLOGIA AMBIENTAL. **Energia Hidrocinética - Estudo de Mercado**. Brasília – DF: 2003.
- MAGHREBI, M. F.; RAHIMPOUR, M. A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open channels. **Journal of Flow Measurement and Instrumentation**, v. 17, p. 347-352, 2005.
- MAGHREBI M. F. Application of the single point measurement in discharger estimation. **Advances in Water Resources**, v. 29, p. 1504-1514, 2006.
- MAGHREBI, M. F.; BALL, J. E. New method for estimation of discharge. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 10, p. 1044-105., 2006.
- PINHEIRO, L. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; SOUZA, L. R. Simulação Computacional Aplicada à Dispersão de Poluentes e Análise de Riscos à Captação de Água na Orla de Macapá-AP. **Revista Pesquisa & iniciação científica**. Macapá–Ap, 2008.
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, 2001.
- SOUZA, L. R. **Experimentação, Modelagem e Simulação Hidrológica Aplicadas ao uso de Energias Hidrocinética na Bacia do Rio Maracá**. 2009. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Federal do Amapá, Amapá. 2009.
- TIAGO FILHO, G. L. The state of art of hydrokinetic Power in Brazil. In: **Waterpower XII**, 2003, Buffalo. **Proceedings...** Innovative Small Hydro Technologies, in CD-ROM, Buffalo: 2003.