



XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

FI/GIA/02
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS - GIA

COMPORTAMENTO DE PEIXES A JUSANTE DE HIDRELÉTRICA: SUBSÍDIOS PARA A MITIGAÇÃO DE IMPACTOS DA GERAÇÃO

Raquel Coelho Loures
Fontes*

Cemig GT

Fábio Mineo Suzuki

Pisces – Consultoria e
Serviços Ambientais

Hersília de Andrade e
Santos

CEFET-MG

Paulo dos Santos Pompeu

UFLA

RESUMO

Compreender a relação direta entre o escoamento hidráulico e o comportamento dos peixes é fundamental para a criação de medidas de proteção à ictiofauna. Visando esse objetivo, um modelo hidrodinâmico tridimensional foi desenvolvido para simulação do escoamento hidráulico e o comportamento dos peixes foi avaliado através da técnica de telemetria acústica na área do canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias. Resultados obtidos nesse estudo permitiram associar o comportamento dos peixes às características da geração, fornecendo importante subsídio para definição de estratégias de operação com menor impacto à ictiofauna. A partir destes dados será então possível desenvolver modelos de previsão dos movimentos dos peixes, através da técnica *Numerical Fish Surrogate*.

PALAVRAS-CHAVE

Telemetria acústica, simulação hidráulica, peixe virtual, estratégias de operação, morte de peixes.

1.0 - INTRODUÇÃO

O barramento de rios causa uma série de modificações nas condições hidrológicas e ambientais na área de influência dos empreendimentos. Dentre estas alterações observa-se a interrupção do livre movimento dos peixes pelo rio, que pode levar a formação de agregações próximas às barragens. No caso de usinas hidrelétricas, os peixes que agregam a jusante de suas barragens correm risco de morte devido à possibilidade de acesso aos tubos de sucção durante execução de manobras. Considerando o risco de morte de peixes, a compreensão do seu comportamento em ambientes sob influência direta da usina pode fornecer importantes subsídios para definição de estratégias de operação com menor impacto à ictiofauna. Avanços em técnicas de telemetria, que permitem o aperfeiçoamento no registro de movimentos de peixes, e modernas simulações numéricas do escoamento hidráulico podem auxiliar o entendimento dos padrões de distribuição espacial e temporal de peixes em ambientes próximos às barragens, e suas relações com parâmetros da operação da usina. Assim foi desenvolvido um estudo na Usina Hidrelétrica de Três Marias, rio São Francisco (MG), utilizando estas técnicas para compreensão do comportamento de peixes a jusante da barragem, de forma a subsidiar medidas protetivas a ictiofauna.

2.0 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Este estudo foi desenvolvido na Usina Hidrelétrica de Três Marias – UHETM situada no rio São Francisco (18°12'47.67"S e 45°15'44.94"O), no município de Três Marias, região Central de Minas Gerais (Figura 1). A usina apresenta capacidade instalada de 396 MW sendo seis unidades geradoras com potência de 66MW, turbinas do

(*) Av.Barbacena, 1200 – 14º andar - Ala B1 - Santo Agostinho – CEP 30190-131 – Belo Horizonte – MG - Brasil
Tel.: (+55 31)3506-4533 – Email: raquel.fontes@cemig.com.br

tipo Kaplan. A queda nominal é de 46,1m, com engolimento de até 150m³/s. O vertedouro de superfície controlada apresenta 7 comportas de capacidade máxima total de 8.700m³/s (Cemig, 2006). A temperatura da água do rio à jusante da usina pode variar de 22,3 a 26,3°C, enquanto o oxigênio dissolvido pode oscilar entre 2,2mg/L, na estação chuvosa (outubro a março), a 7,6mg/l, na estação seca (abril a setembro) (Loures & Pompeu, 2012).



FIGURA 1 – Usina Hidrelétrica de Três Marias, rio São Francisco.

2.2 Telemetria acústica

Para a compreensão do comportamento dos peixes na área do canal de fuga, foi aplicada a técnica de telemetria acústica, que consiste no rastreamento dos movimentos dos peixes com o uso de transmissores e receptores de sinais acústicos. Esta técnica foi aplicada para duas espécies comumente afetadas por manobras de unidades geradoras, *Prochilodus argenteus* (Curimba) e *Pimelodus maculatus* (Mandi). Transmissores acústicos (Modelo HTI - 795 LG e LX) foram inseridos cirurgicamente em 90 indivíduos, sendo 50 Curimbas e 40 Mandis. Diferenças na frequência dos sinais transmitidos (3.2-5.3 segundos) por cada transmissor possibilitou a diferenciação dos sinais e a identificação dos movimentos de cada indivíduo marcado.

Para a recepção dos sinais acústicos, 11 receptores (hidrofonos) foram instalados submersamente ao longo da área do canal de fuga. Todos os hidrofonos foram georreferenciados e conectados a um sistema principal (Data logger - Modelo HTI - 290 *Acoustic Tag Tracking System*), que armazena todos os sinais acústicos recebidos por cada hidrofone simultaneamente (Figura 2). O tempo de transmissão do sinal acústico entre o transmissor e cada hidrofone possibilitou determinar a posição dos peixes pelo mesmo princípio do sistema de posicionamento global (GPS), conhecida como: triângulação dos sinais (Ransom *et al.*, 2008). O sistema acústico operou 24 horas por dia durante o período de 31 de Outubro de 2011 a 16 de Fevereiro de 2012, totalizando aproximadamente 81 dias de rastreamento.

O comportamento das espécies foi avaliado através dos movimentos de visitas ao canal de fuga e da distribuição espacial dos indivíduos marcados dentro desta área. Adicionalmente, avaliou-se a influência do período do dia (diurno e noturno) e da vazão turbinada (mínimo e máximo) nos padrões encontrados, com o uso do teste não paramétrico de Mann-Whitney (M-W test, $p < 0.05$) e através de mapas de densidade dos pontos de detecção de indivíduos marcados no canal de fuga.

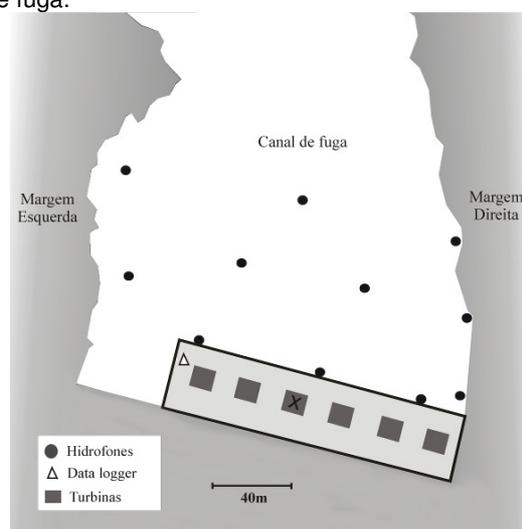


FIGURA 2 – Localização dos hidrofones, data logger e das turbinas na área do canal de fuga da UHE Três Marias. A letra X indica a turbina que não operou durante todo o período de estudo.

2.3 Simulações numéricas do escoamento hidráulico

A modelagem numérica em CFD (*Computational Fluid Dynamic*) foi dividida nas etapas de construção da geometria, geração da malha de volumes finitos, determinação das condições de contorno e simulação numérica no software Ansys.

Para construir a geometria do trecho de 2 km a jusante da UHE de Três Marias, foi necessário coletar dados da batimetria do local com um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) acoplado a um GPS diferencial. A construção dessa geometria foi uma aproximação da batimetria pela coleta de uma série de pontos em diversas seções ao longo do trecho do rio a jusante da usina. Ao total, foram coletados dados de profundidade em mais de 16000 pontos (Figura 3). A geometria do canal de fuga da UHE de Três Marias foi obtida por meio de desenhos e projetos detalhados para que o modelo representasse de forma fiel o protótipo em questão. Por se tratar de uma obra antiga, não havia nenhum desenho em formato digital. Então, o primeiro passo foi à construção do modelo em formato digital. Escolheu-se trabalhar com o software SOLIDWORKS.

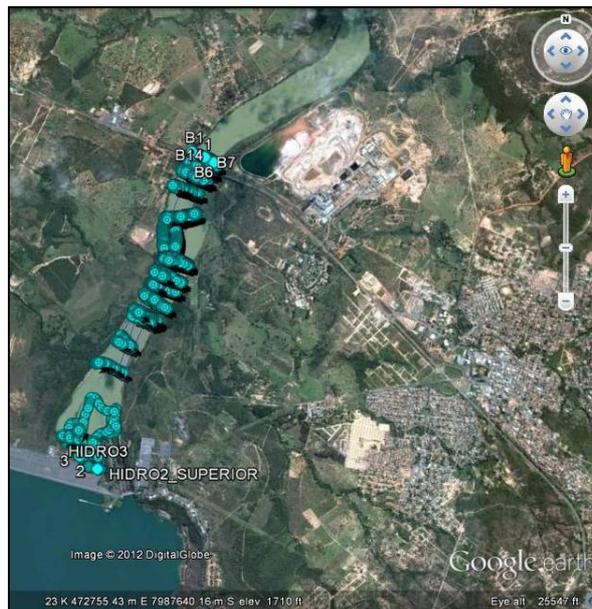


FIGURA 3 – Pontos de coleta com ADCP para geração da batimetria a jusante do canal de fuga

A malha foi construída no software comercial Gridgen. Sendo do tipo não-ortogonal estruturada, esta possui diferentes graus de refinamento: próximo à saída das turbinas os elementos são menores, portanto a malha possui maior grau de refinamento e locais a jusante do domínio possuem menor grau de refinamento (Figura 4A). Foram definidas as condições de contorno (cc) de entrada (vazão das turbinas = $109.6 \text{ m}^3/\text{s}$; $108 \text{ m}^3/\text{s}$ e $108 \text{ m}^3/\text{s}$ para turbinas 1, 2 e 3 respectivamente – Figura 4B), de saída (profundidade do escoamento na seção de saída), de parede (velocidade igual a zero do escoamento nas paredes= condição de não deslizamento das paredes) e topo (condição de deslizamento – existência de ar nesta CC).

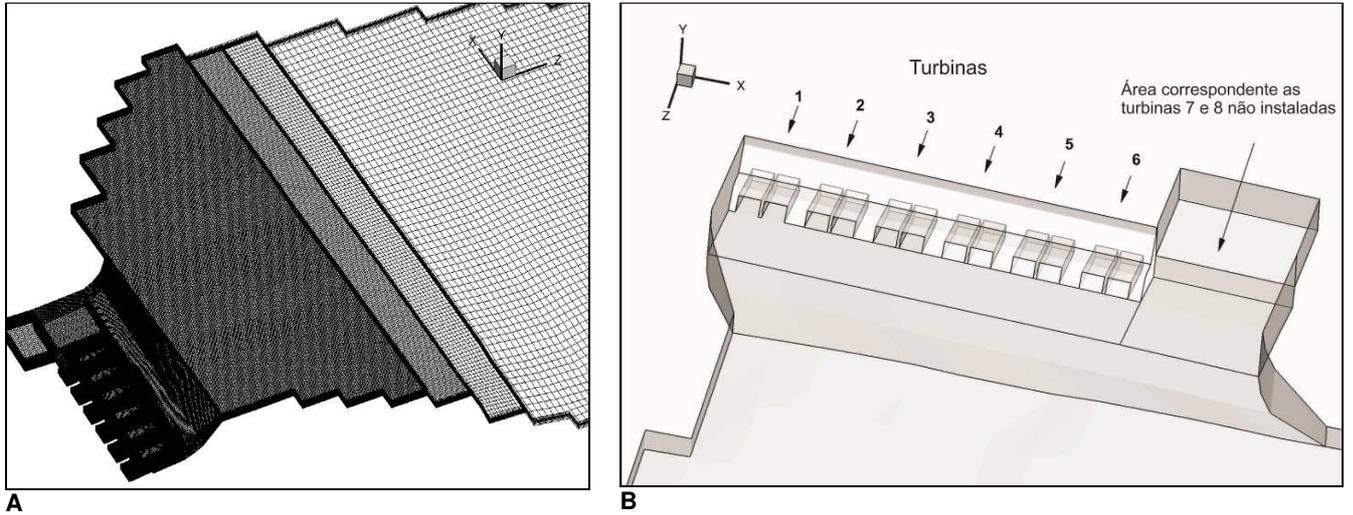


FIGURA 4 – A) Detalhamento do refinamento da malha a montante do rio. B) Condições de entrada da simulação numérica

Na parte final, a simulação se processa calculando para cada elemento da malha as equações: da conservação da massa (Eq. 1), da conservação do momento (Eq. 2), da conservação de energia (Eq. 3), da energia cinética turbulenta (Eq. 4) e da taxa de dissipação de energia turbulenta (Eq. 5):

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do fluido; u é a velocidade e t é o tempo (White, 2002).

$$\sum F = \frac{\delta P}{\delta t} \quad (3)$$

onde P é a quantidade de movimento linear e t é o tempo (White, 2002).

$$\rho \frac{\delta u}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta t} + (u \cdot \nabla) u \quad (4)$$

onde ρ é a densidade do fluido; u é a velocidade e t é o tempo (White, 2002).

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_j u'_k \quad (5)$$

onde u' são as flutuações turbulentas ao longo do tempo em relação aos eixos de coordenadas (White, 2002).

$$\varepsilon = \frac{k}{\nu} \quad (6)$$

onde k é a energia cinética turbulenta e ν é a viscosidade turbulenta (White, 2002).

No caso da aplicação de métodos numéricos em escoamentos abertos, ou seja, em escoamentos onde a pressão atmosférica atua diretamente no fluido, a determinação da linha de interação água e ar é uma dificuldade adicional à solução computacional. Para tratar dos casos de escoamentos livres, algumas aproximações numéricas foram propostas: método de Lagrange, método da altura d'água, *Marker-and-Cell* (MAC), *Surface Marker* e *Volume-of-Fluid* (VOF).

O método VOF trabalha com uma parametrização para cada estrutura do domínio, denominada célula C, onde se representa o estado dessa célula, variando em três e são dados por valores, sendo estes (Politano *et al.*, 2009):

- C = 0 Célula cheia de ar (vazia de água) – Fase 1;
- C = 1 Célula cheia de água – Fase 2;
- $0 < C < 1$ Mistura de ar e água – Fase 3.

O volume de cada uma das fases é controlado em todas as células, sendo que cada uma contém uma porção dos fluidos, separados ou juntos (caso onde está a interface).

Neste trabalho foi utilizado o software comercial Fluent (Ansys), que utiliza o método dos volumes finitos. O método de cálculo é implícito. O regime de escoamento simulado nesse trabalho é transiente em relação ao tempo, porém em condição permanente, pois a vazão de entrada é constante.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Telemetria acústica

Resultados obtidos através da telemetria acústica possibilitaram identificar diferenças no comportamento das espécies. Enquanto as Curimbas apresentaram movimentos predominantemente diurnos e ao longo da coluna da água (M-W test; $U=55,5$; $p<0,001$), os Mandis apresentaram maior atividade noturna e movimentos mais próximos ao leito do rio (M-W test; $U=88$; $p<0,001$). Esses resultados reforçam as características comportamentais do grupo ao qual pertencem, Characiformes e Siluriformes, respectivamente (Lowe-McConnell, 1987). Resultados semelhantes foram observados por Loures & Pompeu (2012) na mesma área de estudo, cuja captura de Characiformes e Siluriformes se deu predominantemente nos períodos diurno e noturno, respectivamente. No entanto, embora tenha sido observada essa diferença no comportamento, ambas as espécies exibiram movimentação constante entre o canal de fuga e as áreas à jusante. Este comportamento pode estar associado às características migratórias das duas espécies. Tentativas sem sucesso de migração para as regiões a montante, ou ausência de habitats adequados na região da barragem podem levar os indivíduos a procurarem por novas rotas migratórias, explicando a saída dos indivíduos do canal de fuga (Scruton *et al.*, 2007).

Embora o regime de operação da usina não tenha sido determinante no comportamento das Curimbas, diferenças significativas foram observadas no número de visitas e na distribuição espacial dos Mandis entre os diferentes cenários de geração na área do canal de fuga. O maior número de visitas a esta área foi observado durante a vazão máxima em ambos os períodos do dia (M-W test; Diurno: $U=38,5$; $p<0,05$ e Noturno: $U=25$; $p<0,05$) (Figura 5). A alta capacidade natatória e a preferência de deslocamento próximo ao fundo ou da parede da barragem apresentada pelo Mandi (Santos *et al.*, 2008), pode facilitar a entrada dos indivíduos dessa espécie, mesmo durante a vazão máxima. Influência da operação da usina no comportamento dos peixes também foi observada para as espécies de Truta (*Salmo trutta*) e Salmão (*Salmo salar*), cuja maior atração ao canal de fuga ocorreu durante a vazão máxima (Linnik *et al.* 1998; Rivinoja *et al.* 2001; Thorstad *et al.* 2003).

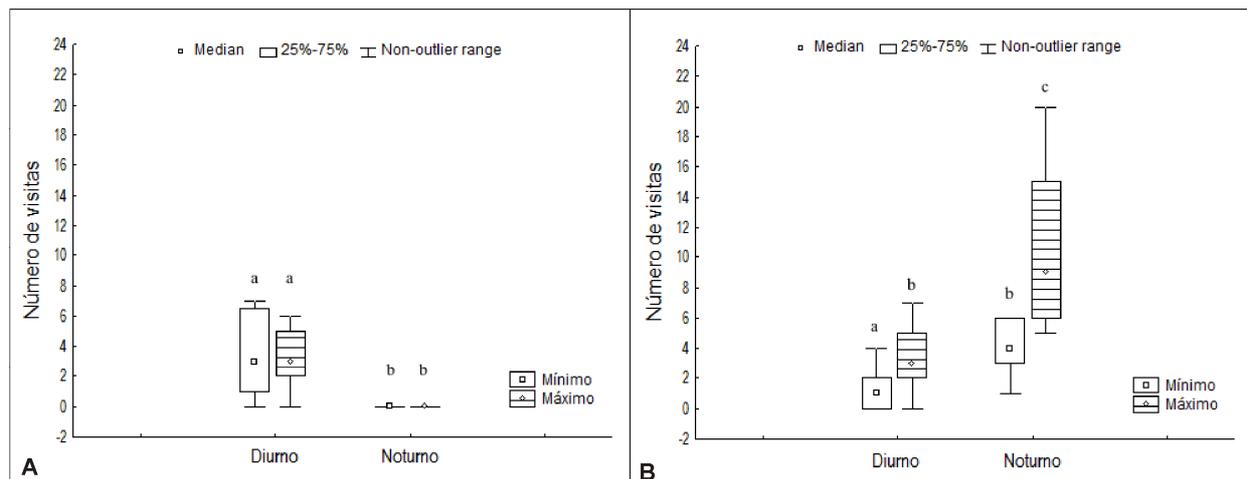


FIGURA 5. Número de visitas de Curimba (A) e Mandi (B) em dois cenários de geração (mínimo e máximo) durante o período diurno e noturno na área do canal de fuga da UHE Três Marias entre Outubro de 2011 a Fevereiro de 2012. As letras (a, b, c) indicam diferenças significativas pelo teste de Mann-Whitney ($p<0,05$).

A avaliação da distribuição espacial dos indivíduos no canal de fuga demonstrou que, durante a vazão mínima, os pontos de detecções ocorreram exclusivamente próximos às turbinas em ambos os períodos do dia (Figura 6), enquanto na vazão máxima, as maiores densidades foram observadas ao longo da área do canal de fuga. Esse resultado pode indicar que, embora a vazão máxima possa atrair um maior número de peixes ao canal de fuga, a maior proximidade dos peixes às turbinas, ocorre durante a vazão mínima. Isso explica os resultados encontrados por Andrade *et al.* (2012), no qual observaram um maior número de peixes aprisionados nos tubos de sucção após um regime de operação no mínimo. A menor velocidade da água durante a vazão reduzida deve permitir uma maior aproximação às turbinas e aumentar os riscos de entrada nos tubos de sucção durante uma manobra operacional das unidades geradoras.

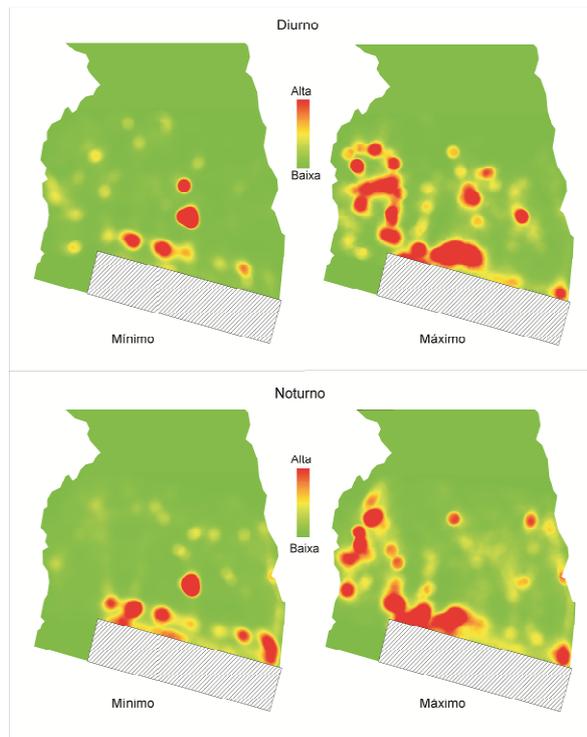


FIGURA 6 – Densidade de pontos de detecção de Mandi no cenário de geração mínimo e máximo durante o período diurno e noturno na área do canal de fuga da UHE Três Marias entre Outubro de 2011 a Fevereiro de 2012.

3.2 Simulações numéricas do escoamento hidráulico

A batimetria do canal de fuga apresenta áreas profundas na saída do tubo de sucção, bem como na área lateral aonde estavam previstas a instalação de outras duas turbinas no projeto original da usina (Figura 7A).

A operação de três unidades gerou um escoamento com padrão complexo. De acordo com as linhas de corrente, a velocidade assume múltiplas direções no canal de fuga (Figura 7B). O escoamento apresenta velocidades mais altas próximo à saída das turbinas, tendo o valor máximo de 3m/s.

As características do escoamento mudam de acordo com o posicionamento no canal de fuga. Apesar do valor de vazão ser semelhante em cada turbina, as direções e os valores das linhas de corrente apresentam padrões diferentes para cada máquina. Isto ocorre em função da influência de cada turbina sobre o escoamento geral bem como em função das condições de contorno impostas pela geometria do canal (Figura 7B).

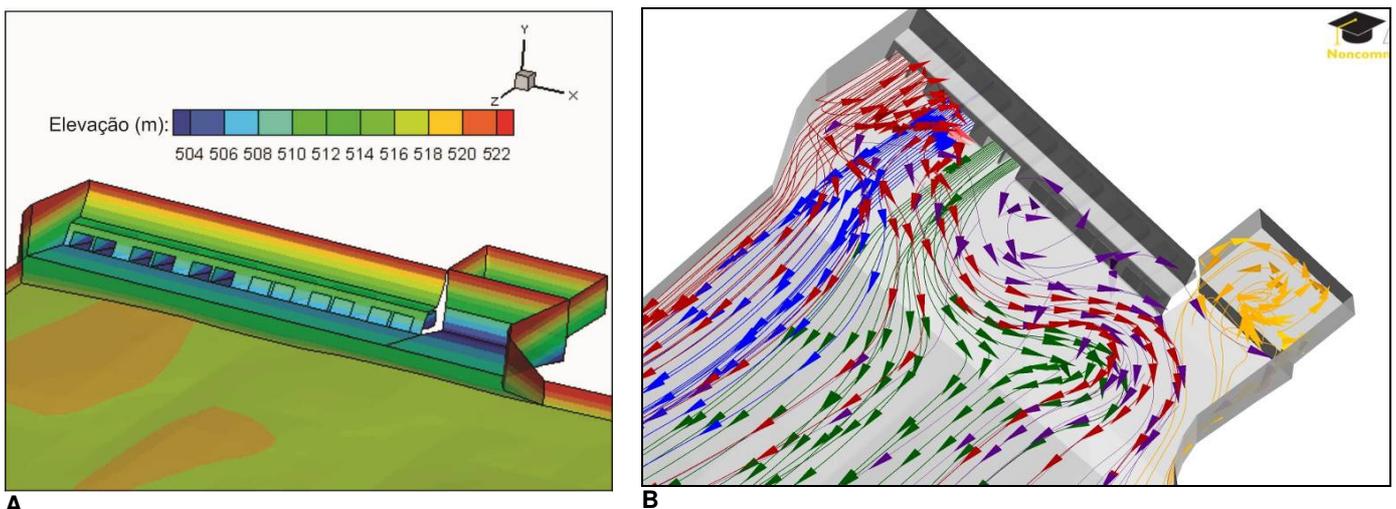


Figura 7- A) Batimetria do canal de fuga; B) Linhas de corrente coloridas com base na fonte e na região de feito.

O escoamento da turbina 2 gera um fluxo com formato uniforme composto por jato direto. O escoamento da turbina 3 forma um jato inicialmente direto, mas depois este assume uma direção à margem esquerda do trecho de rio. A área em frente das turbinas, que não estão em operação, apresenta um escoamento secundário com uma grande recirculação. O escoamento tem característica rotacional e é marcado pela ocorrência de jatos de turbulência. Finalmente, a área, aonde deveriam ter sido construídas obras civis para alocação de mais duas máquinas, também apresenta escoamento rotacional com baixos valores de velocidade (0.5m/s) (Figura 7B e 8).

Os valores de velocidade obtidos com a simulação numérica do canal de fuga da UHE Três Marias são inferiores à velocidade prolongada dos peixes migradores mais frequentes na área (Santos *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2012). Além disto, soma-se o fato de que as principais áreas de posicionamento de mandi (*Pimelodus maculatus*) e curimba (*Prochilodus lineatus*) obtidas com a técnica de telemetria acústica se assemelham às áreas de menor velocidade dentro do canal de fuga. Ressalta-se que as mesmas correspondem a área de grande recirculação de correntes de velocidade e portanto de grande vorticidade.

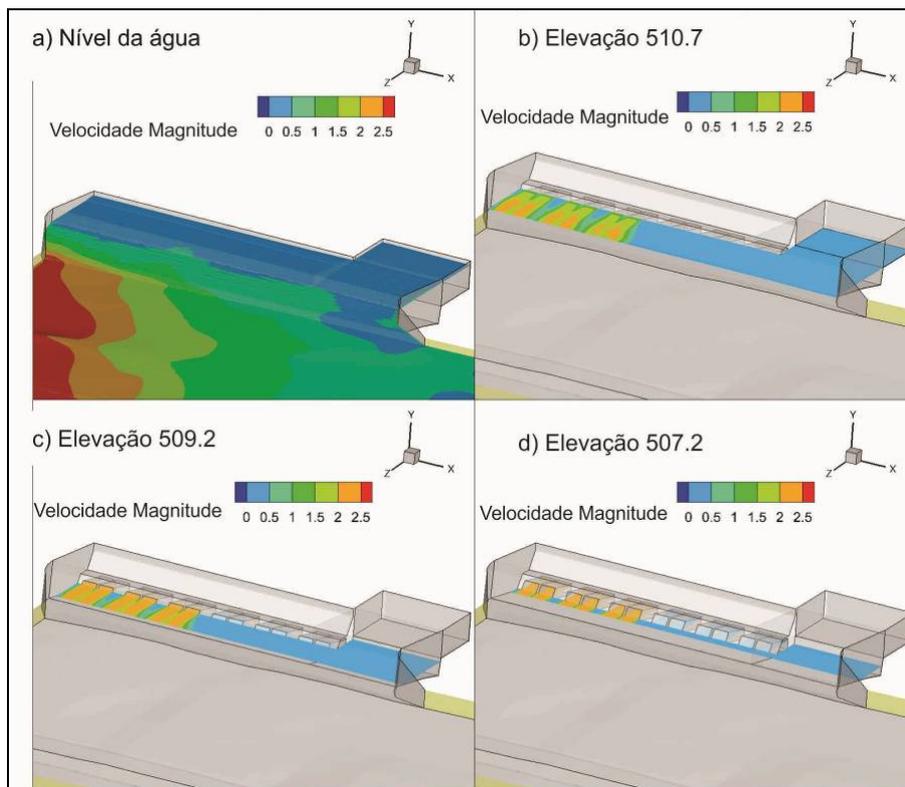


Figura 8 – Valores de velocidade no canal de fuga para diferentes profundidades.

4.0 - CONCLUSÃO

Os resultados de ambas as técnicas apontam que quando a vazão liberada pela usina for elevado pode haver atração dos peixes para o canal de fuga, e se houver redução em seguida, os peixes poderão se aproximar das turbinas, quando o risco de morte pode ser maior. Da mesma forma, pelo cenário observado no escoamento hidráulico, observa-se que a área da UG01 forma uma zona de atração dos peixes, e a velocidade da água não é impeditiva para que os indivíduos se aproximem do canal de fuga. Nesse sentido, a adaptação de manobras operativas, com base nos resultados obtidos, pode representar alternativa para a diminuição de mortes de peixes nas unidades geradoras. Um diferencial deste estudo, é que de forma inédita os dados gerados estão sendo utilizados para geração de modelo preditivo do comportamento destas espécies a jusante de uma usina no Brasil. A integração dos resultados de movimento natatório dos peixes com as simulações hidráulicas do escoamento podem gerar modelos de previsão dos movimentos dos peixes em diferentes cenários operativos, a partir da técnica *Numerical Fish Surrogate* (NFS – sem tradução no Brasil). O NFS cria uma realidade virtual, a partir da calibração com dados reais, onde peixes virtuais exibem acuradamente um comportamento realístico de aproximação da barragem. A partir desta calibração pretende-se realizar a simulação de diferentes cenários operativos para previsão da resposta comportamental dos peixes virtuais, eliminando, assim, a necessidade de novos estudos de marcação de peixes.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANDRADE, F; PRADO, IG; LOURES, RC; GODINHO, AL. Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil Neotropical Ichthyology 10(4). 2012.
- (2) CEMIG. Usinas da Cemig: 1952-2005, a história da eletricidade em Minas e no Brasil. Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, Rio de Janeiro, 304p. 2006.
- (3) LOURES, RC; POMPEU, PS. Temporal variation in fish community in the tailrace at Três Marias Hydroelectric Dam, São Francisco River, Brazil. Neotrop. ichthyol., 10(4). 2012.
- (4) LOWE-McCONNELL, RH. Ecological studies in tropical fish communities. University Press, Cambridge. 382p. 1987.
- (5) POLITANO M.; CARRICA P.; WEBER, L. A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces. International Journal of Multiphase Flow, 35: 1036-1050. 2009
- (6) RANSOM, BH; STEIG, TW; TIMKO, MA; NEALSON, PA. Basin-wide monitoring of salmon smolts at US dams. Hydropower & Dams, 1(3): 2-7. 2008.
- (7) RIVINOJA, P; MCKINNELL, S; LUNDQVIST, H. Hindrances to upstream migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a northern swedish river caused by a hydroelectric power-station. Regulated Rivers: Research and Management, 17(2). 2001.
- (8) SANTOS, H. A.; VIANA, E. M. F. ; POMPEU, P. S. ; MARTINEZ, C. B. . Optimal swim speeds by respirometer: an analysis for three neotropical species. Neotropical Ichthyology, 10: 805-811, 2012.
- (9) SANTOS, HA; POMPEU, OS; VICENTINI, GS; MARTINEZ, CB. Swimming performance of the freshwater neotropical fish: *Pimelodus maculatus* Lacepède, 1803. Brazilian Journal of Biology, 68(2). 2008.
- (10) SCRUTON, DA; BOOTH, RK; PENNELL, CJ, CUBITT, F; MCKINLEY, RS; CLARKE KD. Conventional and EMG telemetry studies of upstream migration and tailrace attraction of adult Atlantic salmon at a hydroelectric installation on the Exploits River, Newfoundland, Canada. Hydrobiologia, 582(1). 2007.
- (11) Thorstad, EB; Økland, F; Kroglund, F; Jepsen, N. Upstream migration of Atlantic salmon at a power station on the River Nidelva, Southern Norway. Fisheries Management and Ecology, 10(3). 2003
- (12) WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos, 4 ed., Rio de Janeiro: McGraw –Hill, 570p. 2002

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Raquel Coelho Loures Fontes (Belo Horizonte, 1983)

Analista de Meio Ambiente. Possui graduação em Ciências Biológicas, licenciada (2004) e bacharel em Ecologia (2006) pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Mestre em Ecologia Aplicada pela Universidade Federal de Lavras – UFLA. Analista de Meio Ambiente desde 2006 na CEMIG Geração e Transmissão, coordenadora do Programa Peixe Vivo, atuando principalmente nas áreas de ecologia e manejo de peixes de água doce, com ênfase em impactos de hidrelétricas e monitoramento da ictiofauna.

Fábio Mineo Suzuki (Itamarajú, 1983)

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Londrina (2003), mestrado e doutorado em Ecologia Aplicada, pela Universidade Federal de Lavras. Atualmente é consultor ambiental em ecologia de peixes e ambientes aquáticos, da empresa Piscos - Consultoria e Serviços Ambientais e pesquisador associado no Laboratório de Ecologia de Peixes da Universidade Federal de Lavras. Possui experiência na área de ecologia geral de peixes, ictioplâncton e de reservatórios, impactos de barragens à ictiofauna e telemetria aplicada ao estudo de comportamento de peixes.

Hersília de Andrade e Santos (Belo Horizonte, 1979)

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (2002), mestrado (2004) e doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2007) e pós-doutorado (2014) pela The University of Iowa (EUA). Atualmente é professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Hidráulica, atuando principalmente nos seguintes temas: renaturalização de cursos d'água, sedimentologia e mecanismos de transposição de peixes.

Paulo dos Santos Pompeu (Belo Horizonte, 1973)

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Minas Gerais (1994), mestrado em Ecologia (Conservação e Manejo da Vida Silvestre) pela Universidade Federal de Minas Gerais (1997) e doutorado

em Meio Ambiente Saneamento e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2005). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Lavras, coordenando o curso de pós-graduação em Ecologia Aplicada. Tem experiência na área de Ecologia, com ênfase em Ecologia Aplicada à Conservação de Ambientes Aquáticos, atuando principalmente nos seguintes temas: ecologia de peixes, impacto ambiental, usinas hidrelétricas, vazões ecológicas e recursos hídricos.