

**Manobra de elevação da velocidade do fluxo hidráulico para a repulsão da ictiofauna em unidades geradoras tipo bulbo – Usina Hidrelétrica Jirau**

**Tania Machado da Silva**

Doutoranda em Ciências Ambientais, UnB, Brasil  
taniamachado91@gmail.com

**Wllyane Silva Figueiredo**

Doutoranda em Ciências Ambientais, UnB, Brasil  
wllyane@gmai.com

**Luiz Fabrício Zara**

Professor Doutor, UnB, Brasil  
fabriciozara@gmail.com

## RESUMO

Vários sistemas de repulsão têm sido desenvolvidos para minimizar o confinamento de ictiofauna em tubos de sucção. Nessa perspectiva, este estudo objetiva a análise da eficiência da manobra de elevação do fluxo hidráulico, utilizando acompanhado do sistema hidroacústico de monitoramento em tempo real da movimentação da ictiofauna confinada dentro do tubo de sucção das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica Jirau. Esta está localizada no rio Madeira, Rondônia, Brasil. Para tanto, foram analisadas as filmagens de 105 paradas de máquinas feitas entre os anos de 2019 e 2020 na Usina Hidrelétrica Jirau, as quais utilizaram a manobra de elevação do fluxo hidráulico como estratégia de repulsão de ictiofauna. Também, foram analisadas as filmagens de 7 paradas feitas em duas etapas no ano de 2020, a primeira etapa sem a manobra e a segunda com a manobra. O acompanhamento das 105 paradas, mostrou que aproximadamente 85% das filmagens apresentaram pouca ou nenhuma movimentação de ictiofauna no tubo de sucção, sendo as imagens das movimentações com padrões característicos de peixes de pequeno porte (~97%). Além disto, a avaliação quantitativa da manobra em duas etapas indicou redução de aproximadamente 91% da movimentação da ictiofauna após procedimento de elevação de fluxo hidráulico. Dessa forma, a elevação da velocidade do fluxo hidráulico, desenvolvida pela Jirau Energia, se mostrou uma estratégia inovadora e eficiente na redução de impactos socioambientais extensivos e, no favorecimento de impactos econômicos positivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Confinamento de ictiofauna. Risco. Redução de impacto.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil detém cerca de 12% do volume total de água doce disponível no mundo. Parte dessa disponibilidade hídrica encontra-se armazenada em reservatórios artificiais, sendo grande parcela desses reservatórios destinados à produção de energia elétrica (BARBOSA *et al.*, 2019). Devido à essa grande disponibilidade e a políticas públicas voltadas para o desenvolvimento de alguns eixos estratégicos, o setor hidrelétrico brasileiro tem crescido exponencialmente. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2019), em 2018, a energia instalada no Brasil era de 161,53 GW, sendo que 67,6% correspondia à hidroeletricidade.

Dentre os possíveis impactos decorrentes da implantação de empreendimentos hidrelétricos, encontram-se a interferência na distribuição e migração de comunidades aquáticas, além da possibilidade de danos à ictiofauna. Durante as paradas programadas e/ou intempestivas de unidades geradoras (UG), a baixa vazão operacional propicia o acúmulo de ictiofauna dentro do tubo de sucção (TB), em especial em rios de alta piscosidade, podendo, assim, causar impactos à comunidade aquática (SCHILT, 2007). Após o fechamento do TB, a sobrevivência da ictiofauna confinada depende basicamente da qualidade da água, em especial do oxigênio dissolvido e da concentração de amônia. Assim, a realidade vivenciada hoje é que, durante a paralisação de uma turbina, pouco se sabe, de antemão, sobre as reais necessidades e urgência de acionamento da equipe responsável pelo resgate da ictiofauna aprisionada. Dentro da ótica da sustentabilidade, a qual tem caracterizado e balizado o setor hidrelétrico frente à outras formas de geração de energia elétrica, a questão ambiental se reveste de grande importância, pois é um dos pilares do princípio da sustentabilidade.

Atualmente existe pouco conhecimento a respeito de metodologias que possibilitem a repulsão da ictiofauna confinada em tubos de sucção de unidades geradoras em empreendimentos hidrelétricos na região Amazônica. Nessa perspectiva, diversas estratégias de repulsão ou barreiras têm sido desenvolvidas no intuito de minimizar os impactos à ictiofauna bem como seu confinamento em tubos de sucção. Barreiras físicas ou mecânicas, tais como telas, grades e armadilhas são amplamente utilizadas. Entretanto, requerem muita manutenção

e podem ser relativamente onerosas. Outra forma de barreira são as comportamentais, as quais utilizam estímulos como luz e som para atingir os sistemas sensoriais dos peixes (ZIELINSKI *et al.*, 2014). Barreiras físicas são comprovadamente eficientes, sendo indicadas para uma ampla gama de espécies (ANDRADE *et al.*, 2012). Em contrapartida, barreiras comportamentais, tais como som, luzes estroboscópicas, correntes elétricas e cortinas de bolhas, dependem da resposta de cada espécie frente à determinados estímulos sensoriais, além de ser influenciadas por condições ambientais, tais como vazão e turbidez (PERRY *et al.*, 2014).

A elevação da velocidade do fluxo hidráulico trata-se de um método de repulsão de peixes desenvolvido pela Jirau Energia, o qual consiste na redução gradativa da carga da UG até a completa descida da comporta vagão, sendo que essa elevação se dá pela diminuição da área de descarga do tubo de sucção durante a descida da comporta.

Parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D - 06631-0009/2019), o qual visa o desenvolvimento e validação de estratégias tecnológicas integrando sistemas físicos e químicos para repulsão da ictiofauna do tubo de sucção durante paradas de unidades geradoras, o presente estudo tem como objetivo analisar a eficiência da manobra de elevação da velocidade do fluxo hidráulico, utilizando sistema hidroacústico de monitoramento em tempo real da movimentação da ictiofauna confinada dentro do tubo de sucção das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica Jirau (UHE), localizada no rio Madeira, Rondônia, Brasil.

## 1.1 Sistema de Monitoramento Hidroacústico em Tempo Real

As ondas eletromagnéticas, uma associação entre cargas elétricas e campo magnético, são caracterizadas por uma ampla faixa de frequência, tais como a luz, ondas de rádio, raio X, micro-ondas, as quais varrem uma longa faixa do espectro e que podem ser transmitidas em vários meios, inclusive no vácuo. As ondas eletromagnéticas viajam a uma velocidade próxima de 300.000 km/s no vácuo, sendo que em outros meios, como ar e água, sua velocidade é um pouco inferior. Por sua vez, as ondas mecânicas se propagam apenas em meios materiais, e não no vácuo, como é o caso das ondas sonoras que interagem pelo fenômeno de oscilação e perturbação com o meio no qual estão se propagando. A velocidade de uma onda sonora no ar é de 343 m/s a 20° C, aumentando para 1.450 m/s na água.

A aplicação de ondas sonoras para a investigação de ambientes aquáticos (hidroacústica) é explorada desde o início do século passado, sendo que a primeira patente é datada de 1913. O termo SONAR (Sounding Navigation and Ranging) foi cunhado em 1942, lembrando que o princípio da técnica é a interpretação da reflexão de ondas (eco) de diversas frequências, sendo que a velocidade do som depende da temperatura e do tipo de fluido utilizado, sendo dada por:

$$C = (K/\rho)^{1/2}$$

onde: K = compressibilidade do fluido;  $\rho$  = densidade do fluido numa dada temperatura.

Nos últimos vinte anos houve um desenvolvimento notável da instrumentação de sistemas hidroacústicos quer seja pela miniaturização e robustez nos transdutores de

frequência, quer seja pela combinação de diversas frequências em um mesmo instrumento. Assim, a técnica passou a ser utilizada nas mais diversas situações onde a resolução de imagens, rapidez e segurança são exigidas. O uso de instrumentos multifrequenciais permite ampliar ou reduzir a área (cone ou lâmina) de varredura do som, alterando a resolução da imagem obtida não apenas devido às melhorias que foram introduzidas no gerador dessas ondas, mas também nos softwares que trabalham na filtragem e aprimoramento dos ecos recebidos.

## **2 METODOLOGIA**

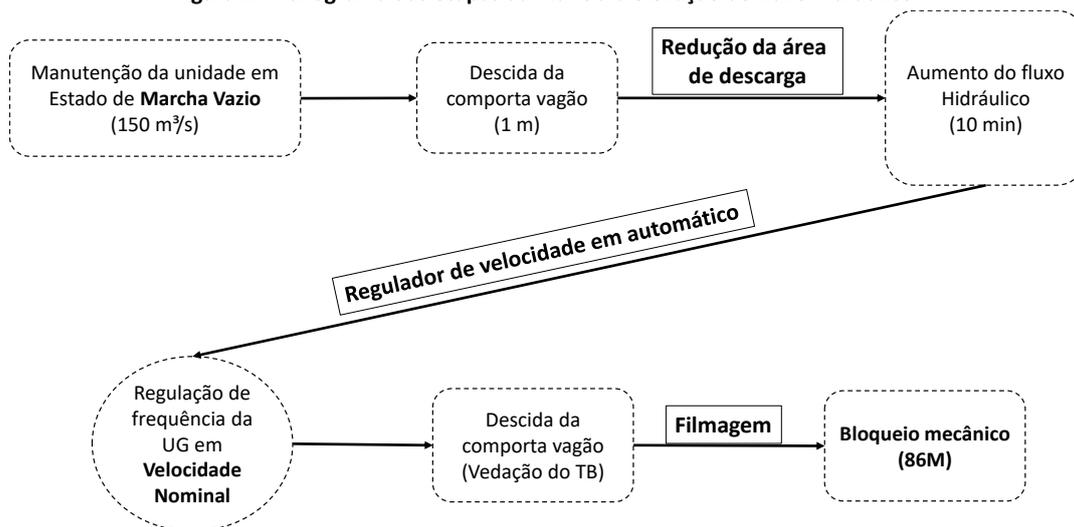
### **2.1 Área de estudo**

A bacia hidrográfica do rio Madeira compreende uma área de aproximadamente 1.420.000 km<sup>2</sup>, o que representa 23% da Bacia Amazônica. Além de corresponder a 18% da precipitação pluviométrica da região amazônica e 15% do volume total de água do rio Amazonas (BACELLAR & ROCHA, 2010). No rio Madeira está em operação a UHE Jirau desde setembro de 2013. A Usina está localizada a 136 km de Porto Velho, em Rondônia. Sua capacidade total instalada é de 3.750 MW, distribuída em 50 unidades geradoras Bulbo, o que lhe proporciona área do reservatório reduzida e, conseqüentemente, menor grau de impacto ambiental (ESBR, 2009).

### **2.2 Manobra de elevação da velocidade do fluxo hidráulico**

No procedimento desenvolvido pela Jirau Energia, existe o aumento do fluxo hidráulico por meio da manutenção da unidade em estado de marcha a vazio, mantendo-se a descarga nominal de 150 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, para este estado. Em seguida, a jusante da UG, ocorre a descida da comporta vagão até que alcance 1 m em relação à soleira. Com a redução da área de descarga do TB há o aumento da velocidade do fluxo hidráulico. Esse fluxo é mantido por cerca de 10 min. Durante esse procedimento o regulador de velocidade é mantido em automático, fazendo a regulação de frequência da unidade geradora em velocidade nominal, enquanto a comporta vagão alcança a soleira, ocorrendo a completa vedação do tudo de sucção. Imediatamente após a confirmação de fechamento da unidade geradora, é acionado manualmente o bloqueio mecânico (86M) da unidade geradora e consolidado o procedimento de parada da unidade (Figura 1).

Figura 1: Fluxograma das etapas da manobra elevação do fluxo hidráulico.



Fonte: Autor, 2021.

### 2.3 Monitoramento da ictiofauna confinada

O monitoramento da biomassa confinada no tubo de sucção é feito por meio hidroacústica, isto é, a propagação de onda eletromecânica pelo meio líquido, sendo os ecos analisados com o auxílio de um sonar. Para tanto, foram fixados 2 transdutores multifrequenciais de imagem na face externa do painel frontal das comportas vagão de jusante da UHE Jirau, exatamente a 14 m acima da parte inferior da comporta, de forma que o transdutor ficasse no centro do tubo de sucção após a vedação (Figura 2).

Figura 2: Sistema hidroacústico acoplado ao plano de face da comporta vagão da UHE Jirau (Patente nº BR 102015000457-5 A2 / [www.venturoconsultoria.com.br](http://www.venturoconsultoria.com.br)).



Fonte: Acervo Venturo Consultoria Ambiental, 2020.

## 2.3.1 Avaliação categórica da movimentação de ictiofauna confinada no TB

Para análise do histórico de movimentação de ictiofauna confinada após a manobra elevação da velocidade do fluxo hidráulico foram consideradas 105 paradas de máquinas que ocorreram no período de 2019 e 2020.

Após a manobra de elevação do fluxo hidráulico, o monitoramento utilizando o sistema hidroacústica foi feito por cerca de 40 minutos dentro do TB (Figura 3). As filmagens foram analisadas utilizando uma composição colorida de falsa cor “Blue – Turquoise” com valor do pixel de 0,000361 m<sup>2</sup>, e classificadas em 4 categorias (Figura 4), de acordo com as movimentações de ictiofauna confinada, são elas:

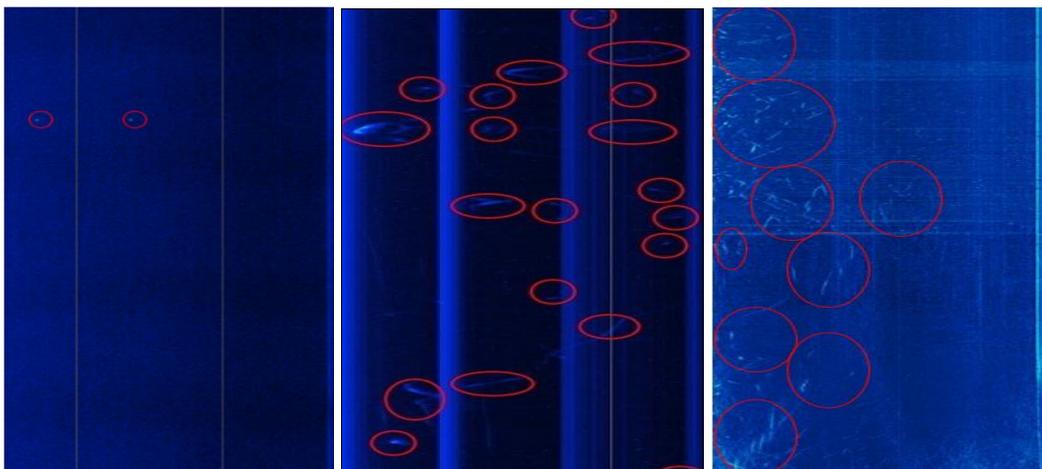
- Incipiente: a qual corresponde a filmagens com nenhuma movimentação;
- Detectável: quando o padrão de movimentação possibilita contagem, contudo, menos de 5 movimentações min<sup>-1</sup>;
- Mensurável: quando o padrão de movimentação possibilita contagem, contudo, acima de 5 movimentações min<sup>-1</sup>,
- Elevada: quando o padrão de movimentação não possibilita contagem devido a sobreposição de movimentações.

Figura 3: Tubo de sucção da UHE Jirau (esquerda). Captura de imagem da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção após aplicação da manobra de elevação do fluxo hidráulico (direita).



Fonte: Acervo Venturo Consultoria Ambiental, 2020.

Figura 4: Exemplos de imagens subaquáticas e classificações categóricas da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção: esquerda – detectável; centro – mensurável e direita – elevada.



Fonte: Acervo Venturo Consultoria Ambiental, 2020.

### 2.3.2 Avaliação categórica do tamanho da ictiofauna confinada no TB

Para avaliação quanto ao tamanho relativo da ictiofauna confinada, as filmagens foram analisadas utilizando uma composição colorida de falsa cor “Blue – Turquoise” com valor do pixel de 0,000361 m<sup>2</sup>, e de acordo tamanho da movimentação observada na filmagem foi estabelecido um parâmetro referente ao tamanho relativo da ictiofauna presente no tubo de sucção, sendo dividido em 3 índices, são eles:

- Índice 1 - quando na tela o alvo correspondia a  $\leq 1$  cm;
- Índice 2 - quando na tela o alvo corresponde a  $> 1$  cm e  $\leq 2$  cm;
- Índice 3 - quando na tela o alvo corresponde a  $> 2$  cm.

### 2.3.3 Avaliação quantitativa da manobra de elevação do fluxo hidráulico em duas etapas

Durante o período de outubro a dezembro de 2020, o procedimento de parada de sete UG da Usina Hidrelétrica Jirau (UG02, UG07, UG15, UG12, UG30, UG18 e UG28), foi feito em duas etapas. Na primeira, a parada da UG ocorreu sem que houvesse o procedimento de elevação do fluxo hidráulico. Posteriormente, a comporta vagão foi retirada, a UG foi novamente acionada e a parada ocorreu com o procedimento de elevação do fluxo hidráulico.

Nas duas etapas, após completa vedação do TB, o monitoramento da movimentação da ictiofauna confinada foi feito por cerca de 20 minutos. Posteriormente as imagens obtidas foram avaliadas, as movimentações contadas manualmente e os resultados comparados para determinar a eficiência do método de elevação do fluxo hidráulico.

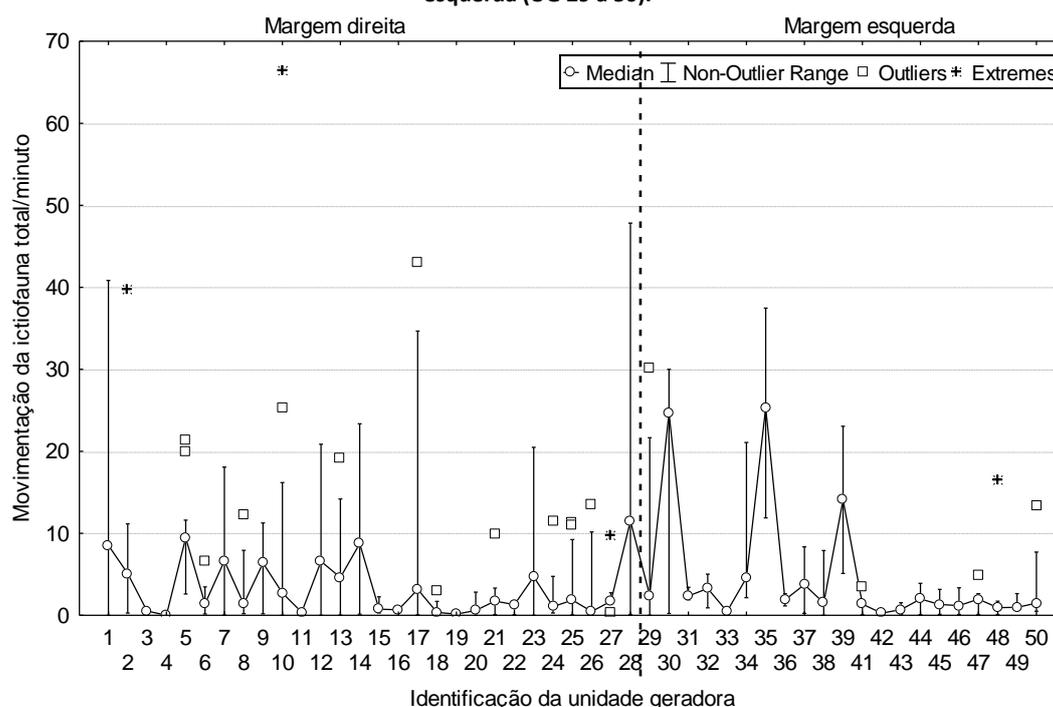
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No período de 2019 a 2020 foram monitoradas 105 paradas de máquinas utilizando a manobra de elevação do fluxo hidráulico, totalizando 423 filmagens (282 horas de observações). A movimentação registrada foi em média de  $6 \pm 9$  movimentação min<sup>-1</sup>, com mediana de 2

movimentação.min<sup>-1</sup>, variando entre 0 e 66 movimentação.min<sup>-1</sup>. A análise integrada das imagens multifrequenciais da região interna do TB após a manobra de elevação do fluxo hidráulico mostra que 85% não apresentam nenhuma ou menos de 4 movimentações, sendo classificadas como incipiente ou detectável. Apenas cerca de 15% das filmagens apresentaram padrão de classificação mensurável, não sendo observadas filmagens com movimentação elevada.

A Figura 5 apresenta o índice de movimentação da ictiofauna total por minuto após a execução da manobra de elevação do fluxo hidráulico, considerando todas as unidades geradoras da Usina Hidrelétrica Jirau nos anos 2019 e 2020.

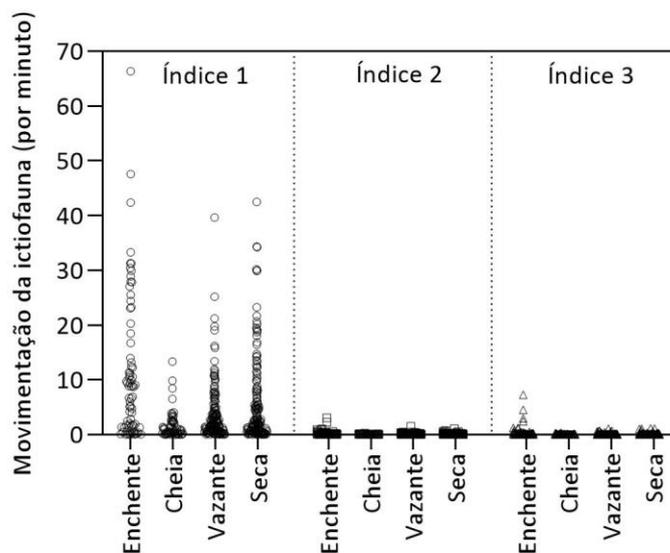
**Figura 5: Movimentação da ictiofauna confinada por minuto de filmagem no tubo de sucção das unidades geradoras da UHE Jirau. A linha tracejada indica a separação entre margem direita (UG 01 a 28) e margem esquerda (UG 29 a 50).**



Fonte: Autor, 2021.

No que se refere à avaliação categórica do tamanho da ictiofauna confinada no TB, comparando os diferentes períodos hidrológicos (enchente, cheia, vazante e seca) em relação aos índices 1, 2 e 3, observou-se diferença significativa entre os períodos (Teste *Kruskal Wallis*; < 0,05) com diminuição da movimentação da ictiofauna confinada no tubo na sequência: Enchente > Cheia > Vazante > Seca. Entretanto, as espécies classificadas no índice 1 ( $\leq 1$  cm;) foram mais recorrentes, independente do período hidrológico analisado, sendo 94,3 a 96,1% das movimentações classificadas como índice 1; 2,0 a 2,6% como índice 2; e 1,6 a 3,1% como índice 3.

**Figura 6: Avaliação categórica do tamanho relativo da ictiofauna confinada no TB nos diferentes períodos hidrológicos do rio Madeira, durante os anos 2019 e 2020.**



Fonte: Autor, 2021

A precipitação média anual na bacia do rio Madeira varia de 1.900 a 2.200 mm, entretanto cerca de 75% do volume do rio Madeira é determinado pelo clima da região andina do leste da Bolívia, apenas 25% provém de pequenos rios à jusante da cidade de Porto Velho. A vazão varia entre 30.000 e 35.000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no período de cheia e entre 5.000 e 10.000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> na seca. A maior vazão de água no período de chuvas justifica a maior movimentação próxima ao paramento de jusante das casas de força de empreendimentos hidrelétricos durante o período de enchente (BACELLAR & ROCHA, 2010). A maior atração de peixes pequenos para os tubos de sucção está associada ao fato de a menor massa corporal diminuir a resistência à velocidade da água. Entretanto, a baixa movimentação da ictiofauna (15 %) e a predominância de peixes de pequeno porte (95 %) nos tubos de sucção após a interrupção do funcionamento das unidades geradoras da UHE Jirau indicam que a elevação do fluxo hidráulico é eficiente na minimização do confinamento da ictiofauna.

Na avaliação quantitativa da manobra de elevação do fluxo hidráulico em duas etapas foram analisadas 14 filmagens. Os dados obtidos nas paradas sem o procedimento de elevação de fluxo hidráulico, indicaram mediana de 323 e média de 488 ± 395 movimentações por hora no TB das UG avaliadas. Na segunda etapa, com a elevação do fluxo hidráulico, a mediana foi de 3 e média de 20 ± 34 movimentações por hora no TB das UG avaliadas.

A análise integrada dos dados obtidos para os dois grupos experimentais em conjunto, mostra diferenças significativas no número de movimentação da ictiofauna no tudo de sucção (teste de Wilcoxon, p < 0,05), sendo que a comparação entre as duas etapas do experimento demonstra a redução, em média, de 91% da movimentação da ictiofauna no TB após procedimento de elevação de fluxo hidráulico (Tabela 1).

**Tabela 1: Avaliação quantitativa da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção após parada de máquina sem manobra de elevação de fluxo hidráulico (1ª etapa) e com manobra de elevação de fluxo hidráulico (2ª etapa).**

UG	Movimentação/hora		Redução percentual
	Etapa 1	Etapa 2	
UG02	617	0	100%
UG07	128	0	100%
UG15	160	90	47%
UG12	293	3	99%
UG30	635	41	94%
UG18	323	3	99%
UG28	1261	3	100%

Fonte: Autor, 2021.

Há de se reconhecer a grande importância da adoção de sistemas de monitoramento e repulsão a fim de minimizar possíveis impactos à ictiofauna e, concomitantemente, permitir o funcionamento das unidades geradoras (ANDRADE & ARAUJO, 2011). Nessa linha, diversas estratégias de repulsão ou barreiras têm sido desenvolvidas no intuito de minimizar os impactos à ictiofauna bem como seu confinamento em tubos de sucção. Barreiras físicas ou mecânicas, tais como telas, grades e armadilhas, são amplamente utilizadas (ANDRADE *et al.*, 2012). Entretanto, estas requerem muita manutenção e podem ser relativamente caras (ZIELINSKI *et al.*, 2014).

Os resultados do histórico do monitoramento (2019 e 2020) indicaram baixa movimentação de ictiofauna dentro do tubo de sucção após a execução da manobra. Em complemento, é importante verificar qual a movimentação de ictiofauna caso este recurso não estivesse disponível e, dessa forma, criar um panorama comparativo entre os dois cenários. Nessa perspectiva a avaliação quantitativa da manobra de elevação do fluxo hidráulico em duas etapas indicou redução de cerca de 91% de movimentação após manobra.

#### 4 CONCLUSÃO

O procedimento de elevação da velocidade do fluxo hidráulico em turbina bulbo (2,5 para 40,5 m.s<sup>-1</sup>) apresentou elevada eficiência na minimização do confinamento da ictiofauna nos tubos de sucção. Este procedimento de manutenção impacta positivamente na conservação da ictiofauna e nos custos econômicos envolvidos com a parada da unidade, minimizando o trabalho das equipes responsáveis pelo resgate da ictiofauna em espaço confinado.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de P&D da Energia Sustentável do Brasil (ANEEL/PD-06631-0009/2019), a equipe de operação e manutenção da UHE Jirau desenvolvedora da manobra de operação MO-COPE-US-67-SH-UG-00002 e a Universidade de Brasília (UnB) – Campus Planaltina pelo apoio à realização do Projeto.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. S. e ARAÚJO, J. C. Medidas mitigadoras dos impactos ambientais causados por usinas hidrelétricas sobre peixes. **Revista Electronica de Veterinaria**, v. 12, n. 3, p. 1–30, 2011.

ANDRADE F.; PRADO I.G.; LOURES R.C.; GODINHO A.L. Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v.10, p.723–730, 2012.

BACELLAR, A.A.; ROCHA, B.R.P. Wood-fuel biomass from the Madeira River: A sustainable option for electricity production in the Amazon region. **Energy Policy**, v.38, p. 5004-5012, 2010.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: Princípios e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

CEMIG - Companhia Energética De Minas Gerais. **Avaliação de Risco de Morte de Peixes em Usinas Hidrelétricas**. Belo Horizonte: CEMIG, 332p, 2016.

ESBR - Energia Sustentável do Brasil. 2019. Disponível em: < <https://www.esbr.com.br/empresa#a-usina-hidreletrica-jirau> >. Acesso em: jul. de 2021.

SCHILT, C. R. Developing fish passage and protection at hydropower dams. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 104, n. 3–4, p. 295–325, 2007.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. 2019. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: jul. de 2021.

PERRY, R. W.; ROMINE, J. G.; ADAMS, N. S.; BLAKE, A. R.; BURAU, J. R.; JOHNSTON, S. V.; LIEDTKE, T. L. Using a non-physical behavioural barrier to alter migration routing of juvenile chinook salmon in the Sacramento–San Joaquin river delta. **River Research and Applications**, v.30, p.192-203, 2014.

ZIELINSKI, D. P. et al. Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp. **Ecological Engineering**, v. 67, p. 95–103, 2014.