

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UNB PLANALTINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

TANIA MACHADO DA SILVA

SISTEMAS FÍSICO-COMPORTAMENTAIS COMO MECANISMOS DE
CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DA ICTIOFAUNA EM USINAS
HIDRELÉTRICAS

BRASÍLIA
2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UNB PLANALTINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

TANIA MACHADO DA SILVA

SISTEMAS FÍSICO-COMPORTAMENTAIS COMO MECANISMOS DE
CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DA ICTIOFAUNA EM USINAS
HIDRELÉTRICAS

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do Título de Doutora em
Ciências Ambientais, pelo Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais
da Universidade de Brasília.

Linha de pesquisa: Estrutura, Dinâmica e
Conservação Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fabrício Zara

BRASÍLIA

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

MD111s MACHADO DA SILVA, TANIA
SISTEMAS FÍSICO-COMPORTAMENTAIS COMO MECANISMOS DE
CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DA ICTIOFAUNA EM USINAS
HIDRELÉTRICAS / TANIA MACHADO DA SILVA; orientador Luiz
Fabrício Zara. -- Brasília, 2023.
92 p.

Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) -- Universidade
de Brasília, 2023.

1. Dissuasão de ictiofauna. 2. Barreiras
comportamentais. 3. Proteção da ictiofauna. 4. Setor
hidrelétrico. I. Zara, Luiz Fabrício, orient. II. Título.

TANIA MACHADO DA SILVA

SISTEMAS FÍSICO-COMPORTAMENTAIS COMO MECANISMOS DE
CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DA ICTIOFAUNA EM USINAS
HIDRELÉTRICAS

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do Título de Doutora em Ciências
Ambientais, pelo Programa de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais da Universidade de
Brasília.

Aprovado em 28 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Fabrício Zara – Presidente da Banca
Universidade de Brasília - UnB

Prof. Dr. Eduardo Cyrino de Oliveira Filho – Membro Interno
Universidade de Brasília - UnB

Prof. Dr. Ézio Sargentini Júnior – Membro Externo
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia- INPA

Prof. Dr. Felipe André dos Santos – Membro Externo
Universidade Estadual Paulista – Unesp/Tupã

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram a buscar conhecimento, e aos meus irmãos, que me ajudaram a encontrar forças nos momentos difíceis.

E, em especial, dedico esta tese ao meu querido avô, Leonel (in memoriam), por sempre ter acreditado e se orgulhado de quem sou.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta tese. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado força e sabedoria para enfrentar os desafios que surgiram durante esta jornada.

Aos meus pais, sou imensamente grata por todo o amor, apoio e incentivo que me deram ao longo dos anos. Sem a confiança e a paciência de vocês, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu irmão Maurício, que é meu melhor amigo e minha base, agradeço por estar sempre presente em todos os momentos, me apoiando e me incentivando a seguir em frente. À minha irmã Grasiela, agradeço por todo o carinho e pela amizade sincera que sempre tivemos. Você é um exemplo de força e coragem, sou muito grata por tê-la em minha vida.

Ao meu avô, que infelizmente já não está mais entre nós, agradeço por ter sido uma grande inspiração em minha vida e por ter me ensinado valores importantes como respeito, humildade e dedicação.

Aos meus amigos Wllyane, Clarisse, Daphne, Murilo e Henrique, que estiveram ao meu lado durante essa jornada da pesquisa. Sua amizade e companheirismo foram fundamentais para que eu superasse os momentos de dificuldade e não desistisse. Agradeço por todas as discussões, trocas de ideias e ajuda mútua ao longo deste percurso.

Agradeço também ao meu orientador, o Prof. Dr. Luiz Fabrício Zara, por todo o conhecimento transmitido e pelo incentivo constante ao meu crescimento acadêmico.

Aos colegas do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, em especial ao professor Ézio Sargentini, agradeço por todos os ensinamentos e pelo ambiente de trabalho colaborativo que tornou esta pesquisa possível.

Ao programa de P&D da Jirau Energia, agradeço pelo apoio administrativo e financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

À Venturo Engenharia e Consultoria Ambiental, agradeço pelo apoio técnico e pela contribuição para a realização deste trabalho.

Por fim, gostaria de prestar uma homenagem especial à Mônica Dias, minha colega de turma e de Projeto. Sua partida prematura deixou uma grande lacuna em nossas vidas, mas tenho certeza de que ela está olhando por nós do céu.

A todos vocês, meu muito obrigada! Sem a ajuda de cada um, este trabalho não seria possível.

“O sucesso na ciência é superar as dificuldades e as limitações impostas pelos métodos atuais.”

(Jack Steinberg)

PRODUÇÃO CIENTÍFICA

ARTIGOS PUBLICADOS

- ¹ DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; ZARA, L. F. Hydraulic flow rate increase maneuver for ichthyofauna repulsion in bulb-type generating units – Jirau Hydroelectric Power Plant. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 17, n. 4, p. 53 – 63, 2021. <https://doi.org/10.17271/1980082717420213049>.
- ² DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; ZARA, L. F.; SILVA, L. L. O.; MELO JUNIOR, J. O.; RIBEIRO, F. S. L.; OBARA, M. K. T. Deterring fish by increasing the flow rate in bulb turbines. The International Journal on Hydropower and Dams, v. 29, n. 4, p. 62- 65, 2022.
- ³ FIGUEIREDO, W. S.; DA SILVA, T. M.; ZARA, L. F. Promising chemical barrier substance applied to ichthyofauna in hydroelectric plants. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 17, n. 4, p. 43 – 51, 2021. <https://doi.org/10.17271/1980082717420213048>.
- ⁴ FIGUEIREDO, W. S.; DA SILVA, T. M.; Respostas comportamentais de peixes expostos à hipoxantina-3-n-óxido e perspectivas de aplicabilidade no setor hidrelétrico. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 10, p. 43-52, 2022.
- ⁵ SANTANA, M. L. E.; DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; ZARA, L. F. Diversidade taxonômica e funcional da ictiofauna confinada durante parada de unidade geradora em hidrelétrica. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 8, 2022.
- ⁶ MAROJA, A. M.; DA SILVA, T. M.; GARAVELLI, S. L.; ZARA, L. F. Reação da ictiofauna amazônica a diferentes impulsos sonoros. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research.2023. (*in press*)
- ⁷ FIGUEIREDO, W.S.; DA SILVA T.M.; SARGENTINI, E.C.P.; BOLSON, M.A.; PEREIRA, G.M.; ROCHA, C.P.; SARGENTINI Jr., E. Eficácia da hipoxantina-3-N-óxido como método alternativo na proteção da ictiofauna em usinas hidrelétricas. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research.2023. (*in press*)
- ⁸ FIGUEIREDO, W.S.; DA SILVA, T.M.; ZARA, L.F.; ROCHA, J.C. Analysis of the effectiveness of fish skin extracts as a chemical repellent of ichthyofauna applied to the hydroelectric sector. Advances in Science, Technology & Innovation, 2023 (*in press*)

ARTIGOS SUBMETIDOS

- 1 DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; DOS SANTOS, A. S.; FERNANDES, T. R.; OBARA, M. K. T.; ZARA, L. F. Fish deterrent with bubble dispersion in bulb turbine. *Applied Animal Behaviour Science*, 2023.
- 2 DA SILVA, T. M.; MAROJA, A. M.; GARAVELLI, S. L.; ZARA, L. F. Soun landscape surrounding the Jirau Hydroelectric Power Plant, Rondônia, Brazil. *Applied Acoustics*, 2023.
- 3 FIGUEIREDO, W.S.; SARGENTINI Jr., E.; BOLSON, M.A.; SARGENTINI, E.C.P.; DA SILVA T.M.; ZARA, L. F. Behavioral analysis of fish in response to chondroitin and its applicability to the protection of ichthyofauna in the hydroelectric sector. *Ecological Engineering*, 2023.
- 4 FIGUEIREDO, W.S.; DA SILVA T.M.; SARGENTINI Jr., E.; CASSIANO, A.; RODRIGUES, T.F.; OBARA, M.K.T.; ZARA, L.F. Evaluation of fish skin extracts as a potential chemical repellent at Jirau Hydroelectric Power Plant, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*.
- 5 SANTANA, M. L. E.; DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S; ZARA, L. F. Real-time assessment of the movement of ichthyofauna confined in the draft tube of bulb-type turinnes. *River Research and Applications*, 2023.

ARTIGOS INTERDISCIPLINARES

- 1 SERRA, C. V.; DA SILVA, T. M.; BERNARDI, J. V. E. Dinâmica de exposição ao mercúrio em população do alto rio Madeira, Rondônia – Brasil. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 17, n. 4, p. 27 – 41, 2021.
- 2 SERRA, C.V.; DA SILVA, T.M.; FIGUEIREDO, W.S; BERNARDI, J.V.E. As Funções neuropsicologias e aspectos cognitivos associados à exposição ao mercúrio em população da Amazônia. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 13, n. 8, 2022.

APRESENTAÇÃO ORAL EM EVENTOS CIENTÍFICOS

- 3 XVII Fórum Ambiental Alta Paulista, Brasil, 27 a 29 de outubro de 2021.
- 4 HYDRO 2022, Estrasburgo, França, 25 a 27 de abril de 2022.

RESUMO

A expansão do setor hidroelétrico na região amazônica exige uma avaliação minuciosa dos possíveis impactos ambientais decorrentes dessa atividade. Durante a manutenção das unidades geradoras, a manobra operacional de parada da turbina pode resultar em baixa vazão, levando ao acúmulo de peixes dentro do tubo de sucção. Para minimizar o confinamento e os possíveis riscos à ictiofauna, diversas estratégias de repulsão têm sido desenvolvidas. Este estudo investigou a eficiência de três estratégias inovadoras de repulsão de peixes em turbinas do tipo bulbo, direcionadas à proteção da ictiofauna no setor hidrelétrico. A primeira estratégia foi a manobra operativa de elevação do fluxo hidráulico, que consiste na elevação da velocidade do fluxo hidráulico devido à redução da área de descarga do tubo de sucção. Essa estratégia está baseada na formação de uma barreira física pelo fluxo hidráulico. A avaliação da eficiência dessa manobra operacional mostrou uma redução de 87% na movimentação da ictiofauna no tubo de sucção, evidenciando o impedimento da entrada dos peixes durante a parada da unidade geradora. A manobra operacional de elevação do fluxo hidráulico, associado ao monitoramento em tempo real no tubo de sucção, impacta positivamente na conservação da ictiofauna e nos custos econômicos com a parada da unidade geradora. A segunda estratégia avaliada foi a manobra operativa de dissuasão da ictiofauna pela dispersão de bolhas ao longo do tubo de sucção. O procedimento de dispersão de bolhas foi feito utilizando o sistema de injeção de ar comprimido embutido no tubo de sucção das unidades geradoras da UHE Jirau, possibilitando a criação de uma barreira física e comportamental. Os resultados dessa manobra de dissuasão mostram uma redução de cerca de 42% na movimentação da ictiofauna após o procedimento de dispersão de bolhas, possibilitando inferir uma considerável diminuição no confinamento da ictiofauna no tubo de sucção. A terceira estratégia investigada foi a viabilidade de uma barreira acústica em ambiente aquático com elevada turbidez, como é o caso da UHE Jirau, localizada no Rio Madeira, em Rondônia. Para o desenvolvimento desse método, foi necessário fazer inicialmente a caracterização da paisagem sonora aérea e subaquática nas proximidades da usina. Os resultados indicaram que a interferência dos sons gerados pela operação da usina na paisagem sonora da região ocorre somente em áreas próximas ao empreendimento (cerca 5.000 m). Além disso, as baixas frequências observadas nos espectros estão fora da provável faixa audível da maioria das espécies de peixe do rio Madeira, minimizando os impactos negativos para a ictiofauna. Visando o desenvolvimento da barreira acústica, foram feitos ensaios no vertedouro da UHE Jirau, utilizando quatro diferentes configurações de ruído: rosa, trovão, de tiro e um com componentes tonais bem definidos. Durante esses ensaios em ambiente aberto, foram monitoradas as movimentações dos peixes antes e durante a exposição à fonte sonora. Os resultados indicam que todas as configurações de ruído têm o potencial de alterar o comportamento da ictiofauna exposta. O aumento da movimentação da ictiofauna variou em diferentes níveis, sendo de 57% com componentes tonais, 43% com ruído de trovão, 37% com ruído de tiro e 29% com ruído rosa. As três estratégias com abordagens diferentes para a proteção da ictiofauna foram eficazes e apresentam potencial para minimizar possíveis impactos à fauna aquática, decorrentes da geração de energia hidrelétrica na região amazônica.

Palavras-chave: Dissuasão de ictiofauna; Barreiras comportamentais; Proteção da ictiofauna; e Setor hidrelétrico.

ABSTRAT

The expansion of the hydroelectric sector in the Amazon region requires a thorough assessment of the possible environmental impacts resulting from this activity. During the maintenance of the generating units, an operational maneuver to stop the turbine can result in low flow, leading to the flow of fish inside the draft tube. To minimize confinement and possible risks to the ichthyofauna, several repelling strategies have been developed. This study investigated the efficiency of three innovative fish repelling strategies in bulb type turbines, aimed at protecting ichthyofauna in the hydroelectric sector. The first strategy was the operative maneuver to increase the hydraulic flow, which consists of increasing the speed of the hydraulic flow due to the reduction of the discharge area of the suction tube. This strategy is based on the formation of a physical barrier by the hydraulic flow. The evaluation of the efficiency of this operational maneuver showed an 87% reduction in the movement of the ichthyofauna in the suction tube, evidencing the impediment of the entrance of the fish during the shutdown of the generating unit. The operational operation of hydraulic flow flow, associated with real-time monitoring in the suction tube, has a positive impact on the conservation of the ichthyofauna and on the biological costs with the stoppage of the generating unit. The second strategy was the operative maneuver to dissuade the ichthyofauna by dispersing bubbles along the suction tube. The bubble discharge procedure was carried out using the compressed air injection system built into the suction tube of the generating units at the Jirau HPP, allowing the creation of a physical and behavioral barrier. The results of this dissuasion maneuver show a reduction of about 42% in the movement of the ichthyofauna after the bubble discharge procedure, allowing to infer a considerable decrease in the confinement of the ichthyofauna in the suction tube. The third strategy investigated was the feasibility of an acoustic barrier in an aquatic environment with high turbidity, as is the case of the UHE Jirau, located on the Madeira River, in Rondônia. For the development of this method, it was necessary to initially characterize the aerial and underwater soundscape in the vicinity of the power plant. The results indicated that the interference of the sounds generated by the operation of the plant in the soundscape of the region only occurs in areas close to the enterprise (about 5,000 m). Furthermore, the low frequencies observed in the spectra are outside the audible range of most fish species in the Madeira River, minimizing the negative effects on the ichthyofauna. Aiming at the development of the acoustic barrier, tests were carried out on the spillway of the UHE Jirau, using four different noise configurations: pink, thunder, shot and one with well-defined tonal components. During these tests in an open environment, fish movements were monitored before and during exposure to the sound source. Results indicate that all noise settings have the potential to alter the behavior of exposed ichthyofauna. The increase in ichthyofauna movement varied at different levels, being 57% with tonal components, 43% with thunder noise, 37% with gunshot noise and 29% with pink noise. The three strategies with different approaches to the protection of the ichthyofauna were effective and have the potential to minimize possible impacts on the remaining fauna, resulting from the generation of hydroelectric energy in the Amazon region.

Keywords: Ichthyofauna deterrence; Behavioral barriers; Protection of ichthyofauna; and Hydropower Sector.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 –	Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau, no rio Madeira, Rondônia.....	41
Figura 1.2 –	Fluxograma das etapas do procedimento de elevação do fluxo hidráulico durante paradas programadas e/ou emergenciais de máquinas.....	42
Figura 1.3 –	Sistema hidroacústico acoplado à comporta da UHE Jirau, mostrando: (a) comporta vagão com sistema SeeSub; (b) suporte de fixação e transdutores instalados na comporta vagão; (c) Detalhe do cabeamento através do parafuso adaptado da tala entre os segmentos, e da bomba de baixa vazão para análise da qualidade da água; e, (d) exibição de sonar comercial.....	43
Figura 1.4 –	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).....	44
Figura 1.5 –	Exemplos de imagens subaquáticas e classificações categóricas da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção: esquerda – detectável; centro – mensurável e direita – elevada.....	44
Figura 1.6 –	Exemplos de imagens subaquáticas obtidas após os experimentos em duas etapas: (a) após a primeira etapa (desligamento da máquina sem elevação de fluxo hidráulico); (b) após a segunda etapa (parada da máquina com procedimento de elevação de fluxo hidráulico).....	46
Figura 1.7 –	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 (CF1 - UG 01 a 28) e margem esquerda (CF2 - UG 29 a 50)	47
Figura 1.8 –	Avaliação categórica do tamanho relativo da ictiofauna confinada no TB nos diferentes períodos hidrológicos do rio Madeira, durante os anos 2019 e 2020.....	48
Figura 1.9 –	Avaliação quantitativa da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção após parada da máquina sem procedimento de aumento de vazão hidráulica (Etapa 1) e com procedimento de aumento de vazão hidráulica (Etapa 2)	49

Figura 2.1 –	Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau, no rio Madeira, Rondônia.....	55
Figura 2.2 –	Sistema de injeção de ar comprimido no tubo de sucção da unidade geradora da UHE Jirau. a – Visão frontal e indicação da localização dos bicos injetores; b – Bico injetor sextavado; c – Válvula de acionamento manual da injeção de ar comprimido.....	56
Figura 2.3 –	Sistema hidroacústico acoplado ao plano de face da comporta vagão da UHE Jirau (Patente nº BR 102015000457-5 A2). a – Comporta vagão; b – Detalhe da fixação dos transdutores; c – Detalhe do cabeamento; d – Operação do equipamento hidroacústico.....	57
Figura 2.4 –	Exemplos de imagens subaquáticas multifrequencias do tubo de sucção durante a primeira etapa (a) e segunda etapa (b) da parada prevista da unidade geradora da UHE Jirau.....	58
Figura 2.5 –	Avaliação quantitativa da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção durante a primeira etapa (convencional) e segunda etapa (manobra de dissuasão) das paradas previstas das unidades geradoras da UHE Jirau.....	59
Figura 2.6 –	Estratificação em função do tamanho relativo da ictiofauna confinada no tubo de sucção durante a primeira etapa (convencional) e segunda etapa (manobra de dissuasão) das paradas previstas das unidades geradoras da UHE Jirau.....	60
Figura 2.7 –	Imagem subaquática em perfil transversal ao desemboque do tubo de sucção durante a manobra operativa de dissuasão da ictiofauna na unidade geradora UG27 da UHE Jirau.....	60
Figura 3.1 –	Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau, no rio Madeira, Rondônia.....	68
Figura 3.2 –	Distribuição das medidas de ruído aéreo ao longo do eixo do barramento da UHE Jirau, no período hidrológico de seca (setembro a novembro/2021 - Leq em preto no centro) e cheia (março a maio/2022 - Leq em amarelo deslocado do centro) do rio Madeira.....	70
Figura 3.3 –	Espectrogramas típicos dos ruídos aéreos nas margens direita (a) e esquerda (b) do rio Madeira próximo a casa de força da UHE Jirau.....	71

Figura 3.4 –	Distribuição das medidas de ruídos subaquáticos na UHE Jirau, no período hidrológico de seca (setembro a novembro/2021 - Leq em preto no centro) e cheia (março a maio/2022 - Leq em branco) do rio Madeira. Obs: p1 e p2 – pontos dos espectros de ruído subaquático.....	72
Figura 3.5 –	Espectro do ruído subaquático no canal de fuga da casa de força – CF1 (a) e na calha do rio Madeira (b) a jusante da UHE Jirau.....	73
Figura 4.1 –	Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau com destaque da (a) Vista vão 18 do vertedouro, com comporta fechada a montante, impedindo o fluxo de água através da abertura a jusante, e da (b) Vista frontal dos tubos de sucção.....	81
Figura 4.2 –	Dimensões do vão 18 do vertedouro da UHE Jirau.....	82
Figura 4.3 –	Imagem da tela do sistema de contagem de movimentação de peixe utilizando sonar na parte interna do vertedouro.....	83
Figura 4.4 –	Sistema acústico e de monitoramento da ictiofauna implementado no vertedouro da UHE Jirau.....	84
Figura 4.5 –	Ruído residual no vertedouro da UHE Jirau. NPS globais em destaque para cada medida.....	86
Figura 4.6 –	Espectro do ruído ambiental no vertedouro quando a fonte acústica reproduz cada um dos ruídos pré-definidos (com sonar desligado): ruído Rosa (rosa), ruído Rampa (vermelho), ruído Trovão (azul) e ruído tiro (laranja).....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BBC	<i>British Briadcasting Corporation</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEUA	Comissão de Ética para Uso Animal
CF	Casa de Força
EEA	<i>European Environmental Agency</i>
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESBR	Energia Sustentável do Brasil
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICES	<i>International Council for the Exploration of the Sea</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
ISSN	<i>International Standard Serial Number</i>
LTDA	Sociedade de Responsabilidade Limitada
NBR	Norma Brasileira
NPS	Nível de Pressão Sonora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&D	Programa de Pesquisa e Desenvolvimento
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SAE	Santo Antônio Energia
SCSI	<i>Small Computer System Interface</i>
SOBRAC	Sociedade Brasileira de Acústica
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
STP	Sistema de transposição de peixes
UHE	Usina Hidrelétrica
UG	Unidade Geradora
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

WWF *World Wildlife Fund*

NOMENCLATURA

%	Porcento
~	Aproximadamente
<	Menor
>	Maior
≤	Menor ou igual
≥	Maior ou igual
±	Mais ou menos
°	Graus
°C	Graus Celsius
μg	Micrograma
μPa	micropascal
μS	Microsiemens
μS cm ⁻¹	Microsiemens por centímetro
cm	Centímetro
dB	Decibel
dB re:1μPa	Pressão de referência de 1 μPa
GW	Gigawatt
Hz	Hertz
kHz	Quilohertz
km	Quilômetro
km ²	Quilômetros quadrados
L	Litro
L _{eq}	Nível de pressão sonora equivalente
L _{Aeq}	Nível de pressão sonora equivalente
L _{min} tempo	Nível mínimo de pressão sonora medido em um determinado período de tempo
L _{máx} de tempo	Nível máximo de pressão sonora medido em um determinado período de tempo
L ₁₀	NPS correspondente ao valor que é excedido por 10 % do tempo total de medição

L ₉₀	NPS correspondente ao valor que é excedido por apenas 10 % do tempo total de medição
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
m s ⁻¹	Metros por segundo
m ³ s ⁻¹	Metros cúbicos por segundo
mg	Miligrama
mg L ⁻¹	Miligramas por litro
min	Minuto
mm	Milímetros
MW	Megawatt
n	Número de amostras
n ^o	Número
<i>p</i>	Nível de significância
pH	Potencial Hidrogeniônico
s	Segundo

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
NOMENCLATURA.....	18
INTRODUÇÃO GERAL	22
1. O SETOR HIDRELÉTRICO E SUA RESPONSABILIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	22
2. A RELEVÂNCIA DA ICTIOFAUNA NA MANUTENÇÃO DO EQUILÍBRIO ECOLÓGICO DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS	24
3. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA APLICADA AO SETOR HIDRELÉTRICO.....	25
4. ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO DA ICTIOFAUNA UTILIZADAS NO SETOR HIDRELÉTRICO.....	26
5. OBJETIVOS	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO 1	37
1. INTRODUÇÃO	37
2. METODOLOGIA.....	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4. CONCLUSÕES	49
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
CAPÍTULO 2.....	52
DISSUAÇÃO DE PEIXES ASSOCIADA À DISPERSÃO DE BOLHAS EM TURBINA TIPO BULBO	52
1. INTRODUÇÃO	53
2. METODOLOGIA.....	55
3. RESULTADOS.....	58
4. DISCUSSÃO	61
5. CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
CAPÍTULO 3.....	65

PAISAGEM SONORA NO ENTORNO DA USINA HIDRELÉTRICA JIRAU, RONDÔNIA, BRASIL.....	65
1. INTRODUÇÃO	65
2. METODOLOGIA.....	67
3. RESULTADOS.....	69
4. DICUSSÕES	73
5. CONCLUSÕES	75
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
CAPÍTULO 4.....	78
REAÇÃO DA ICTIOFAUNA DA REGIÃO AMAZÔNICA A DIFERENTES IMPULSOS SONOROS.....	78
1. INTRODUÇÃO	79
2. METODOLOGIA.....	81
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4. CONCLUSÕES	88
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
AGRADECIMENTOS.....	92

INTRODUÇÃO GERAL

1. O SETOR HIDRELÉTRICO E SUA RESPONSABILIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia hidrelétrica é uma fonte de energia limpa e renovável, uma vez que utiliza a força da água em movimento para produzir eletricidade. Além disso, sua capacidade de armazenar água em reservatórios, permite um controle maior da oferta de energia elétrica (BONDARIK, 2018). O setor hidrelétrico é responsáveis por grande parte da geração de energia elétrica em todo o mundo, representando cerca de 16,6% da energia elétrica produzida (IEA, 2022). No Brasil, essa participação é ainda mais significativa, correspondendo a cerca de 56,8% da energia elétrica gerada no país (EPE, 2021).

O histórico do setor hidrelétrico brasileiro remonta ao início do século XX, quando as primeiras usinas hidrelétricas começaram a ser construídas, impulsionadas pela necessidade de fornecer energia elétrica para o desenvolvimento da indústria e dos centros urbanos do país. Ao longo das décadas seguintes, o setor hidrelétrico brasileiro passou por diversas transformações e avanços tecnológicos, que permitiram a construção de usinas hidrelétricas cada vez maiores e mais eficientes (ELETROBRAS, 2022).

Na década de 50, foi inaugurada a Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso, considerada, na época, a maior do mundo em capacidade de geração de energia elétrica. Mais adiante, na década de 70, foi concluída a construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu, a maior usina hidrelétrica do mundo em capacidade de geração de energia elétrica até hoje (ELETROBRAS, 2022). Parte do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), criado em 2007, a construção das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio, localizadas no rio Madeira, em Rondônia, em 2008 e 2007, respectivamente, tiveram como objetivo a ampliação da capacidade de geração de energia elétrica do país, de forma a atender a demanda crescente de energia (BRASIL, 2023).

A construção das usinas no rio Madeira foi considerada uma das maiores obras de engenharia do país na ocasião, sendo projetadas para gerar cerca de 6.500 MW de energia, o que representava cerca de 10% da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil. Desde sua inauguração em 2012 (Jirau) e 2011 (Santo

Antônio), as usinas têm contribuído para a geração de energia elétrica brasileira (ESBR, 2023; SAE, 2023).

No Brasil, uma das principais vantagens dos empreendimentos hidrelétricos, frente à outras fontes de energia, é a disponibilidade de água. Possuindo uma das maiores reservas de água doce do mundo, o país detém cerca de 12% do volume total de água doce disponível. Parte dessa disponibilidade hídrica, encontra-se armazenada em reservatórios artificiais, sendo que grande parcela desses reservatórios são destinados à produção de energia elétrica (BARBOSA *et al.*, 2019).

Embora as usinas hidrelétricas sejam consideradas uma fonte de energia limpa e renovável, sua construção, operação e manutenção, podem acarretar diversos impactos ambientais, principalmente em relação à ictiofauna. Como resultado, é possível que ocorram mudanças na composição da biodiversidade e a diminuição da população de peixes nativos (CEMIG, 2015).

Uma das questões ambientais relacionadas à empreendimentos hidrelétricos, é a interrupção da rota migratória da fauna aquática. Durante a época da piracema, algumas espécies de peixes sobem o rio em busca de locais adequados para reprodução e desenvolvimento dos ovos e larvas. Após a desova, eles retornam ao rio principal para se alimentar e as larvas se desenvolvem nos berçários até estarem prontas para colonizar o leito principal do rio. A construção de barragens pode separar esses ambientes e dificulta a reprodução de peixes migradores (CEMIG, 2015).

Adicionalmente, durante os procedimentos de manutenção das usinas hidrelétricas, como a parada das unidades geradoras, a baixa vazão operacional propicia o acúmulo de peixes dentro do tubo de sucção, o que pode gerar riscos à ictiofauna, especialmente em rios com alta densidade de peixes, como na Bacia Amazônica (ARANTES *et al.*, 2019).

Nessa perspectiva, o desenvolvimento de estratégias de repulsão da ictiofauna associadas aos estudos de estimativas da sobrevivência da ictiofauna confinada durante paradas programadas ou intempestivas de unidades geradoras é muito relevante para o desenvolvimento consciente e sustentável do setor hidrelétrico brasileiro.

2. A RELEVÂNCIA DA ICTIOFAUNA NA MANUTENÇÃO DO EQUILÍBRIO ECOLÓGICO DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

A ictiofauna é um grupo importante de animais aquáticos que desempenha um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos. Esses animais, que incluem peixes e outros organismos aquáticos, atuam como reguladores dos ecossistemas, controlando a população de outras espécies e mantendo o equilíbrio entre os diferentes níveis tróficos (WWF, 2021).

A diversidade de peixes em ambientes aquáticos está diretamente relacionada à diversidade de plantas aquáticas e, conseqüentemente, à qualidade da água (LEPRIEUR *et al.*, 2013). Adicionalmente, a presença desses animais tem um impacto positivo na biodiversidade de outros organismos aquáticos, como invertebrados e algas (RADINGER & WOLTER, 2014).

Além dos benefícios ecológicos, a ictiofauna também é importante para as comunidades humanas, que dependem da pesca como fonte de alimento e renda (WWF, 2021). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação – FAO (2020), a pesca é fonte de subsistência para mais de 800 milhões de pessoas em todo o mundo e é responsável por gerar empregos e renda em muitas regiões costeiras e ribeirinhas. Nesse sentido, a proteção da ictiofauna e dos ecossistemas aquáticos é essencial para garantir a segurança alimentar e o bem-estar das populações que dependem desses recursos naturais.

Dentre as diversas espécies de peixes existentes, aproximadamente 15.000 são encontradas em ambientes de água doce, sendo que mais de 6.000 dessas habitam a região neotropical, que engloba a América do Sul. É nesta região que se encontra a maior diversidade de fauna de peixes de água doce do mundo, com espécies altamente adaptativas e especializadas (CEMIG, 2015).

A região amazônica, por sua vez, abriga uma das maiores diversidades de espécies de peixes do mundo, com mais de 3.000 espécies identificadas até o momento (WINEMILLER *et al.*, 2016). A diversidade de peixes na região é resultado de fatores como a extensão geográfica e a heterogeneidade de habitats disponíveis, que incluem rios, lagos, igarapés e áreas alagadas (LOWE-McCONNELL, 1987). Essa complexidade na ictiofauna é fundamental para a manutenção do equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos (RADINGER & WOLTER, 2014)

O rio Madeira, localizado na região amazônica, é um dos principais afluentes do rio Amazonas e é conhecido por sua grande riqueza de espécies de peixes. A ictiofauna dessa região é composta por mais de 800 espécies de peixes, sendo considerada uma das mais diversas do mundo. Tal diversidade de espécies também é influenciada por diversos fatores, como a presença de diferentes habitats, a heterogeneidade ambiental, a dinâmica fluvial e a conectividade hidrológica da bacia (LEAL *et al.*, 2013).

A complexidade da ictiofauna amazônica é também um desafio para a sua conservação e gestão. Muitas das espécies presentes na região são endêmicas, ou seja, não são encontradas em nenhum outro lugar do mundo, o que aumenta a sua vulnerabilidade a ameaças como a perda de habitat e a pesca excessiva (WINEMILLER *et al.*, 2016). Cerca de 30 % das espécies de peixes do rio Madeira são endêmicas, o que ressalta a importância da conservação desse ambiente para a manutenção da biodiversidade amazônica (LEAL *et al.*, 2013).

3. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA APLICADA AO SETOR HIDRELÉTRICO

A legislação ambiental garante a proteção da fauna aquática em atividades desenvolvidas no setor hidrelétrico. No Brasil, a Lei nº 6.938/1981, também conhecida como a Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelece o dever do Estado de preservar, conservar e recuperar o meio ambiente, definindo-o como um patrimônio público a ser protegido e melhorado para as presentes e futuras gerações. No caso de empreendimentos hidrelétricos, a Lei obriga o licenciamento ambiental, além de exigir a realização de estudos de impacto ambiental (EIA) e respectivo relatório de impacto ambiental (RIMA) antes da implementação do projeto. Esses estudos devem considerar a fauna aquática da região afetada e avaliar o potencial impacto do empreendimento sobre essas espécies.

A Lei nº 9.605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, estabelece que é crime ambiental matar, perseguir, caçar, capturar ou utilizar espécies da fauna silvestre sem a permissão ou autorização da autoridade competente, ou em desacordo com a obtida, inclusive durante as rotas migratórias. Em complementação, o Decreto Federal 6.514/2008 estabelece o processo administrativo federal para a

apuração das infrações ambientais previstas na Lei 9.605/1998 e dispõe sobre as sanções aplicáveis.

Além da Lei de Crimes Ambientais, outra legislação importante para o setor hidrelétrico é a Lei Federal nº 9.433/1997, que dispõe sobre a política nacional de recursos hídricos, estabelecendo que a gestão dos recursos hídricos deve ser feita de forma integrada e participativa, considerando aspectos ambientais, sociais e econômicos. Nesse sentido, a proteção da fauna aquática é um dos aspectos considerados na gestão dos recursos hídricos, já que a ictiofauna é uma parte importante do ecossistema aquático e sua preservação é essencial para a manutenção do equilíbrio ecológico.

4. ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO DA ICTIOFAUNA UTILIZADAS NO SETOR HIDRELÉTRICO

O setor elétrico nacional e internacional tem buscado soluções para minimizar possíveis impactos na ictiofauna decorrentes da manutenção e operação de usinas hidrelétricas. Para tanto, diversas medidas de manejo e conservação são adotadas e estudadas para mitigar e evitar esses impactos (CEMIG, 2015).

No Brasil, a legislação obriga a implantação de sistemas de transposição de peixes em barragens de cursos de água para quaisquer fins. Dentre os mecanismos de transposição mais comuns em empreendimentos hidrelétricos tem-se as escadas, os elevadores e a captura e transporte por meio de caminhões ou barcaças. Embora haja investimento em sistemas de transposição, grande parte dos peixes transpõem os barramentos de outras formas, tais como vertedouros e turbinas. Estudos tem indicado vários danos à ictiofauna decorrente dessa passagem, tais como cisalhamento, cavitações, moagem e abrasão (SCHILT, 2007).

Nessa perspectiva, muitas usinas hidrelétricas já adotam procedimentos específicos para evitar e/ou mitigar os impactos na ictiofauna durante as manobras relacionadas a operação e manutenção. Dentre os procedimentos comumente utilizados, o planejamento de paradas possibilita a otimização das manutenções, reduz o número de ocorrências e evita atividades no período de migração de peixes. Além disso, cada manobra de manutenção deve possuir procedimentos específicos, como limitar o tempo em que as unidades geradoras ficam ociosas e fazer a reversão

síncrono de maneira lenta para evitar grandes diferenças de pressão nos peixes (CEMIG, 2015).

Procedimentos de partidas de máquinas, são feitos com velocidade reduzida e durante o dia, evitando choques entre os peixes e as pás da turbina. A manobra de drenagem de máquina é feita acompanhada de um monitoramento da ictiofauna e da qualidade da água, de modo que, e em caso de risco, as atividades possam ser abortadas e reprogramadas (CEMIG, 2015).

Além dos procedimentos internos inerentes às manobras de manutenção e operação, diversas estratégias têm sido desenvolvidas no intuito de minimizar possíveis impactos, bem como o confinamento de peixes em tubos de sucção (ARANTES *et al.*, 2019). As tecnologias de proteção mais comuns incluem barreiras físicas, sistemas de isca elétrica, sistemas de eclusas para peixes, redes de proteção, sistemas de câmeras e sonares, além de dispositivos de atração e repulsão de peixes, como luzes estroboscópicas e cortinas de bolhas (TAFT, 2020).

As barreiras físicas incluem grades, telas e barreiras elétricas, as quais são instaladas nas estruturas das barragens e têm como objetivo evitar que os peixes sejam succionados pelas turbinas ou passem pelos vertedouros (TAFT, 2020). A efetividade dessas medidas tem sido avaliada por meio de estudos de monitoramento antes e depois da implementação das estratégias (AGOSTINHO *et al.*, 2013; GARAVELLO *et al.*, 2015; TAFT, 2020)

Um estudo realizado em uma usina hidrelétrica no rio Paraná, mostrou que a instalação de telas nas turbinas reduziu em até 89% a mortalidade de peixes durante a passagem pelas turbinas (AGOSTINHO *et al.*, 2013). Outro estudo, realizado na usina hidrelétrica de Santo Antônio, no rio Madeira, mostrou que a construção de um canal de desvio para permitir a migração dos peixes teve um efeito positivo na diversidade e abundância da ictiofauna (GARAVELLO *et al.*, 2015). Ressalta-se que esse tipo de tecnologia é eficaz em impedir que peixes entrem em áreas críticas, como turbinas, mas também podem impedir a migração natural de peixes (TAFT, 2020).

Em contrapartida, barreiras comportamentais, tais como som, luzes estroboscópicas e cortinas de bolhas, são menos impactantes ao meio ambiente e à paisagem, pois geralmente não envolvem a construção de estruturas físicas grandes e permanentes. Além disso, podem ser ajustadas e adaptadas com mais facilidade em resposta a mudanças nas condições hidrológicas ou no comportamento dos

peixes (PERRY *et al.*, 2014). Por fim, as barreiras comportamentais podem ter um custo menor a longo prazo em comparação com barreiras físicas, pois não exigem manutenção e reparos frequentes (ZIELINSKI *et al.*, 2014). Entretanto, a eficácia dessas tecnologias depende 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).

As vantagens de cada tecnologia voltada para conservação da ictiofauna variam, dependendo do tipo de usina hidrelétrica, espécies de peixes, fluxo de água e condições ambientais locais. A escolha ideal depende da compreensão completa do ambiente da usina hidrelétrica e das necessidades de proteção das espécies de peixes locais (TAFT, 2020). Portanto, é importante que cada usina hidrelétrica avalie cuidadosamente as estratégias de repulsão disponíveis e escolha as mais adequadas para minimizar os impactos sobre a ictiofauna em sua localização específica.

4.1. BARREIRAS POR CORTINA DE BOLHAS

Dentre as barreiras comportamentais, a cortina de bolhas tem grande potencial como estratégia de proteção da ictiofauna. Uma das grandes vantagens dessa tecnologia está em sua capacidade de gerar estímulos visuais, sonoros e táteis, possibilitando sua utilização para uma vasta gama de espécies (ZIELINSKI *et al.*, 2014). Adicionalmente, a cortina de bolhas não impede a passagem de água ou outros organismos aquáticos, o que pode reduzir o impacto ambiental, além de ser facilmente ajustada para diferentes profundidades e condições de fluxo, tornando-a mais versátil do que algumas outras tecnologias (JESUS *et al.*, 2019b). Outro ponto positivo está relacionado ao seu baixo custo de instalação e manutenção quando comparada às demais barreiras (JESUS *et al.*, 2019b; ZIELINSKI *et al.*, 2014).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos a fim de verificar a eficácia de cortina de bolhas como uma barreira comportamental (HABERLINA *et al.*, 2021; LEANDER *et al.*, 2021; ZIELINSKI *et al.*, 2014; ZIELINSKI & SORENSEN, 2015). Nessa linha, Zielinski e colaboradores (2014) avaliaram a capacidade da cortina de bolha em inibir a movimentação de carpas comuns, em laboratório. Para isso, os pesquisadores testaram três tratamentos distintos (sem cortina de bolhas, com cortina de bolhas de baixa densidade e com cortina de bolhas de alta densidade), sendo que os resultados demonstraram que as cortinas foram eficazes em reduzir o movimento das carpas comuns, em especial a cortina de alta densidade. Durante os experimentos as carpas

exibiram menos movimento em direção à cortina e passaram menos tempo próxima a ela quando comparadas ao grupo sem cortina de bolhas.

Posteriormente, Zielinski & Sorensen (2015) testaram a eficiência do sistema de cortina de bolhas no lago Kohlman Creek, Maplewood, Minnesota, EUA. Após a instalação do sistema foi observada redução significativa do número de carpas em movimento para dentro e fora da área de estudo, sendo que contagem de carpas caiu de uma média de 104 por dia, antes da instalação, para uma média de 9 por dia, após 7 dias de operação da cortina de bolhas.

Leander e colaboradores (2021) também investigaram a eficácia da cortina de bolhas, nesse caso, voltada para orientação da migração de salmões do Atlântico (*Salmo salar*) em um rio sueco. Os resultados indicaram que a barreira foi eficaz em redirecionar os salmões, aumentando a taxa de sucesso da migração em comparação com o grupo controle. Além disso, a cortina de bolhas não afetou negativamente o comportamento ou o estado fisiológico dos peixes.

Ressalta-se que cada espécie de peixe pode ter respostas diferentes a determinados estímulos, portanto, alguns estudos tem demonstrado a importância em se utilizar diferentes tipos de barreiras comportamentais para garantir a proteção de uma ampla gama de espécies (STEWART *et al.*, 2014). A utilização de barreiras múltiplas pode reduzir os efeitos adversos de cada barreira individualmente, tornando a mitigação de impactos mais efetiva. A diversificação de barreiras também permite ajustes para diferentes ambientes e situações, levando a um monitoramento mais eficiente e flexível do sistema de proteção (MARTIN *et al.*, 2021).

Stewart e colaboradores (2014) fizeram experimentos em laboratório a fim de verificar eficácia da combinação de luzes estroboscópicas e cortinas de bolhas no desencorajamento da fuga de peixes em barragens. O estudo analisou o comportamento dos peixes em relação a diferentes configurações (luz estroboscópica, cortina de bolhas e uma combinação de ambas), bem como sua taxa de escapamento da barragem. Como resultado, a combinação de luzes estroboscópicas e cortina de bolhas foi a mais eficaz em reduzir a taxa de fuga de peixes.

Em um estudo sobre o uso de uma barreira comportamental múltipla para peixes, Jesus e colaboradores (2019b) instalaram uma cortina de bolhas e uma luz estroboscópica em um tanque de teste com salmão truta. As observações do comportamento dos peixes foram feitas com e sem a barreira, assim como medições

da velocidade de nado e análises histológicas do tecido muscular. Os resultados indicaram que a cortina de bolhas combinada com a luz estroboscópica foi eficaz em alterar o comportamento do salmão truta, reduzindo a velocidade de nado e impedindo a passagem de peixes para o outro lado da barreira. Além disso, não foram observadas lesões ou alterações histológicas nos tecidos musculares dos peixes expostos à barreira.

Welton e colaboradores (2002) também investigaram a eficácia de barreiras comportamentais combinadas (cortina de bolhas, barreira acústica e barreira bolhas acústicas) na deflexão de salmões juvenis (*smolts*) durante a migração no Rio Frome, Reino Unido. A barreira de bolhas acústicas se mostrou mais eficaz para proteger os peixes durante a migração quando comparada à cortina de bolhas e à barreira acústica, separadamente, sendo que a barreira de bolhas acústica redirecionou 58% dos *smolts* para um canal de desvio, enquanto a barreira acústica e a cortina de bolhas desviaram 42% e 32% dos peixes, respectivamente.

Nessa perspectiva, combinando diferentes tipos de barreiras comportamentais, tais como cortina de bolhas, luzes estroboscópicas e barreira acústicas, é possível criar uma solução personalizada para cada local, maximizando a proteção da fauna aquática e minimizando os impactos causados pela geração de energia hidrelétrica (JESUS *et al.*, 2019b).

4.2. BARREIRAS ACÚSTICAS

O ambiente subaquático de rios e oceanos não é silencioso, na verdade podem ser bastante ruidosos, especialmente em áreas com águas rasas onde existe uma maior população de peixes e nas vizinhanças de áreas urbanas, hidroelétricas, portos e rotas de navios. Os ruídos antropogênicos, ou seja, decorrentes de atividades humanas, tem potencial de afetar de maneira significativa a ictiofauna (JESUS *et al.*, 2019a).

As barreiras acústicas têm sido utilizadas para evitar a entrada de peixes em tubos de sucção de usinas hidrelétricas e fábricas, bem como guiar peixes em direção a rotas seguras, evitando assim possíveis riscos à ictiofauna (JESUS *et al.*, 2019a). Entretanto, para discutir o uso do som na orientação de peixes, é essencial compreender a acústica subaquática e definir termos relacionados ao som para fornecer uma melhor compreensão do estímulo ao qual os peixes respondem e

esclarecer questões relacionadas ao design e uso de estímulos acústicos (DIAS et al., 2020; POOPER et al., 2020).

Hawkins e colaboradores (2014) investigaram como peixes pelágicos selvagens reagem à reprodução de som, expondo cardumes de espadilha europeia (*Sprattus sprattus*) e cavala atlântica (*Scomber scombrus*) de um lago marinho na Irlanda, a sequências curtas de sons impulsivos repetidos em níveis de som variados, que simulavam os golpes de um bate-estacas. O estudo indicou que, à medida que o nível de som aumentava, a incidência de respostas comportamentais em ambas as espécies de peixes aumentava, com os cardumes de espadilha sendo mais propensos a se dispersar e os cardumes de cavala mais propensos a mudar de profundidade.

Pesquisadores realizaram dois experimentos para avaliar o potencial de estímulos acústicos para aumentar a eficiência de uma tela de barra vertical na orientação de enguias. No primeiro experimento, peixes de dois grupos diferentes foram testados na presença ou ausência de um estímulo contínuo de banda larga. No segundo experimento, enguias foram expostas a um pulso de 100 Hz. Em ambos os experimentos, a maioria das enguias atingiu o desvio, sugerindo que o uso de estímulos acústicos pode melhorar a eficiência de orientação de telas físicas. (DELEAU et al., 2019).

É amplamente reconhecido que todos os peixes são capazes de detectar e usar o som para aprender sobre o ambiente ao seu redor, rastrear presas, evitar predadores, navegar e se comunicar uns com os outros (POOPER et al., 2020). No entanto, diferentes espécies podem reagir de maneira diferente a uma barreira acústica, destacando a importância de testes de avaliação comportamental dedicados à espécie (JESUS et al. 2019a). Um estudo realizado na Usina Hidrelétrica de Jirau indicou que a faixa detectável de frequência para a maioria das espécies de peixe mais abundantes nas atividades de resgate vai de 100 Hz a alguns KHz, com intensidade superior a 100 (dB re: 1 μ Pa) apenas para a espécie *Lepomis macrochirus* da família *Centrarchidae* (DIAS et al., 2020).

Pesquisas indicam que certos sons podem causar mudanças comportamentais em algumas espécies de peixes, no entanto, ainda não é certo se essas mudanças são suficientemente duradouras para impactar significativamente o movimento dos peixes e permitir sua orientação em estruturas hidrelétricas e outras tomadas d'água (POOPER et al., 2020). Portanto, é necessário realizar mais estudos para o

desenvolvimento de metodologias efetivas na proteção da fauna aquática no setor hidrelétrico.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento e avaliação de diferentes estratégias de barreiras física e comportamental em turbina do tipo bulbo dedicadas à proteção da ictiofauna durante paradas previstas ou imprevistas de unidades geradoras.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a eficiência da manobra operacional de elevação do fluxo hidráulico como barreira física impeditiva da entrada de peixes em tubos de sucção de unidade geradora do tipo bulbo;
- b) Avaliar a eficiência da barreira comportamental de dispersão de bolhas de ar comprimido para dissuasão da ictiofauna do tubo de sucção de unidade geradora do tipo bulbo;
- c) Caracterizar a paisagem sonora ambiental aérea e subaquática nas proximidades de empreendimento hidrelétrico com 50 turbinas do tipo bulbo (UHE Jirau);
- d) Analisar a resposta comportamental da ictiofauna da região amazônica à diferentes configurações de ruídos e suas potencialidades no desenvolvimento de uma barreira acústica para proteção da ictiofauna.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F. F. M.; SHIMIZU, L. A.; OLIVEIRA, J. S.; GOMES-SILVA D. M. Protecting the biodiversity of the Paraná River and floodplain: effects and efficacy of the law regulating fish passage in dams. **Brazilian Journal of Biology**, v. 73, n. 4, p. 797-805, 2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Panorama do setor elétrico brasileiro: Ano base 2019. Brasília: ANEEL, 2020. Disponível em: <<https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2020/04/PanoramaDoSistemaEletricoBrasileiro2019.pdf>> Acesso e junho de 2022.

ARANTES, C. C.; FITZGERALD, D. B.; HOEINGHAUS, D. J.; WINEMILLER, K. O. Impacts of hydroelectric dams on fishes and fisheries in tropical rivers through the lens of functional traits. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 37, p. 28–40, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.04.009>

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.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p 680-688, 2018.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Programa de Aceleração do Crescimento**. Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.pac.gov.br/>. Acesso em: 23 mar. 2023.

BRASIL, **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981, Diário Oficial da União - Seção 1 - 2/9/1981, Página 16509.

BRASIL. **Lei nº 9.605**, de 12 de fevereiro de 1998, Diário Oficial da União - 13/2/1998 e retificado em 17/2/1998.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997, Diário Oficial da União - 9/1/1997

BRASIL. **Decreto nº 6.514**, de 22 de julho de 2008, Diário Oficial da União - 23/7/2008.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Tópicos de manejo e conservação da Ictiofauna para o setor Elétrico. 1 ed. Belo Horizonte: Cemig, 2015.

DELEAU, M. J. C.; WHITE, P. R.; PEIRSON, G.; LEIGHTON, T. G.; KEMP, P. S. Use of acoustics to enhance the efficiency of physical screens designed to protect downstream moving European eel (*Anguilla anguilla*). **Fish Management and Ecology**, v. 27, n.1, p.1–9, 2020. <https://doi.org/10.1111/fme.12362>

DIAS, M. F.; MAROJA, A. M.; GARAVELLI, S. L.; Sistema para repulsão de ictiofauna em hidroelétricas brasileiras. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 16, n. 5, p. 180 – 191, 2020. <https://doi.org/10.17271/1980082716520202657>

ELETROBRAS. **1962-2022 - Seis décadas de inovação: Eletrobras 60 anos**. Centro da Memória da Eletricidade no Brasil. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade, 2022. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/SobreaEletrobras/eletrobras%2060%20anos.pdf>. Acesso em: janeiro de 2023.

ESBR - JIRAU ENERGIA S.A. **Sobre a usina**. Disponível em: <https://www.jirau.com.br/pt-br/a-usina/sobre-a-usina>. Acesso em: março de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Brazilian Energy Balance 2021 Year 2020 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2021.**

FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2020**. Sustainability in action. Rome, 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>

GARAVELLO, J. C.; Xavier, R. O.; Carvalho, A. P. O.; Martins, R. F.; Voigt, C. M. Fish fauna in a bypass channel at a Neotropical hydroelectric plant: what has been the effect after one year of operation? *Brazilian Journal of Biology*, v. 75, n. 4, p. 894-902, 2015.

HABERLINA, D.; MCALLENB, R.; DOYLEA, T. K. Field and flume tank experiments investigating the efficacy of a bubble curtain to keep harmful jellyfish out of finfish pens. **Aquaculture**, v. 531, p. 735915, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735915>

HAWKINS, A. D.; ROBERTS, L.; CHEESMAN, S. Responses of free-living coastal pelagic fish to impulsive sounds. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 135, n. 5, p. 3101, 2014. doi: 10.1121/1.4870697.

IEA – International Energy Agency. **Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA**. Disponível em: <[Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA](#)>. Acesso em: abril de 2022.

JESUS, J; AMORIM, M. C. P.; FONSECA, P. J.; TEIXEIR, A.; NATÁRIO, S.; CARROLA, J.; VARANDAS, S.; PEREIRA, T. P.; CORTES, R. M. V. Acoustic barriers as an acoustic deterrent for native potamodromous migratory fish species. **Journal of Fish Biology**, v. 95, n.1, p. 247–255, 2019a.

JESUS, J.; NATÁRIO, S.; CORTES, R.; TEIXEIRA, A. Desenvolvimento de uma barreira comportamental para peixes: Efeitos da Cortina de Bolhas e luz estroboscópica no Salmonídeo *Salmo trutta*. In: III Congresso Ibérico Restauración Fluvial. 2019b.

LEAL, C. G.; ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M.; ALMEIDA-VAL, V. M. F.; LUZ-ARAUJO, C. M.; HUMPHREY, S. R.; SAINT-PAUL, U.; ZUANON, J.; CORNELIUSSEN, C.; WITTMANN, F.; NUNES, J. A. C. The fish fauna in tropical rivers: The case of the River Madeira (Brazil) - A review. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 25, n. 2, p. 164-178, 2013.

LEANDER, J.; KLAMINDER, J.; HELLSTRÖM, G.; JONSSON, M. Bubble barriers to guide downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*): An evaluation using acoustic telemetry. *Ecological Engineering*, v. 160, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106141>

LEPRIEUR, F., COLOSIO, S.; DESCOMBES, P; PARRAVICINI, V.; KULBICKI, M.; COWMAN, P. F.; BELLWOOD, D. R.; MOUILLOT, D.; PELLISSIER, L. Historical and contemporary determinants of global phylogenetic structure in tropical reef fish faunas. **Ecography**, v. 36, n. 12, p. 1295-1307, 2016. <https://doi.org/10.1111/ecog.01638>

LOWE-McCONNELL, R. H. Ecological studies in tropical fish communities. **Cambridge University Press**, 1987. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511721892>

MARTIN, N. F.; LEIGHTON, T. G.; WHITE, P. R.; KEMP, P. S. The response of common carp (*Cyprinus carpio*) to insonified bubble curtains. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 150, n. 5, p. 3874 - 3888, 2021. <https://doi.org/10.1121/10.0006972>

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, n. 2, p. 192 – 203, 2014. <https://doi.org/10.1002/rra.2628>

POPPER, A. N.; HAWKINS, A. D.; JACOBS, F.; JACOBSON, P. T.; JOHNSON, P.; KREBS, J. Use of sound to guide the movement of eels and other fishes within rivers: a critical review. **Reviews in Fish Biology Fisheries**, v. 30, p. 605–622, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11160-020-09620->

RADINGER, J.; WOLTER, C. Patterns and predictors of fish species extinction risk in Europe. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, n. 6, p. 753-766, 2014.

SAE - SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **A usina**. Disponível em: <<https://www.santoantonioenergia.com.br/a-usina>> Acesso em: março de 2023.

SCHILT, C. R. Developing fish passage and protection at hydropower dams. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 104, n. 3-4, p. 295 – 325, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.09.004>

STEWART, H. A.; WOLTER, M. H.; WAHL, D. H. Laboratory Investigations on the Use of Strobe Lights and Bubble Curtains to Deter Dam Escapes of Age-0 Muskellunge. **North American Journal of Fisheries Management**, v. 34, p. 571-575, 2014. <https://doi.org/10.1080/02755947.2014.892549>

TAFT, E. P. Fish protection technologies: a status report. **Environmental Science & Policy**, v. 3, n. 1, p. 349-359, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(00\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(00)00038-1)

WELTON, J. S.; BEAUMONT, W. R. C.; CLARKE, R. T. The efficacy of air, sound and acoustic bubble screens in deflecting Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts in the River Frome, UK. **Fisheries Management and Ecology**, v. 9, n. 1, p. 11-18, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2400.2002.00252.x>

WINEMILLER, K. O.; MCINTYRE, P. B.; CASTELLO, L.; FLUET-CHOUINARD, E.; GIARRIZZO, T.; NAM, S.; ... & TAPHORN, D. C. (2016). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. **Science**, v. 351, n. 6269, p. 128-129, 2016. <https://doi.org/10.1126/science.aac7082>

WWF. **The world's forgotten fishes**. 2021. Disponível em: <https://europe.nxtbook.com/nxteu/wwfintl/freshwater_fishes_report/index.php> Acesso em: outubro de 2022.

ZIELINSKI, D. P.; VOLLER, V. R.; SVENDSEN, J. C.; HONDZO, M.; MENSINGER, A. F.; SORENSEN, P. Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp. **Ecological Engineering**, v. 67, p. 95 – 103, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.003>

ZIELINSKI, D. P.; SORENSEN, P. W. Field test of a bubble curtain deterrent system for common carp. **Fisheries Management and Ecology**, v. 22, n. 2, p. 181–184, 2015. <https://doi.org/10.1111/fme.12108>

CAPÍTULO 1

Este capítulo aborda a estratégia de barreira física para proteção da ictiofauna, portanto apresenta os resultados da avaliação da manobra de elevação da velocidade do fluxo hidráulico para repulsão a ictiofauna do tubo de sucção de turbina do tipo bulbo. Esse procedimento foi adotado pela Usina Hidrelétrica (UHE) Jirau para evitar/mitigar possíveis impactos na ictiofauna durante paradas programadas e/ou intempestivas de unidades geradoras. Para isso, foram compilados dois artigos sobre o tema publicados nos anos de 2021 e 2022.

O primeiro, intitulado "Manobra de elevação da velocidade do fluxo hidráulico para a repulsão da ictiofauna em unidades geradoras tipo bulbo - UHE Jirau", foi publicado no ***Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*** (ISSN 1980-0827), 2021. O segundo artigo, intitulado "*Deterring fish by increasing the flow rate in bulb turbine*", foi apresentado no evento internacional HYDRO 2022 em Estrasburgo, França, em abril de 2022, e publicado no ***The International Journal on Hydropower and Dams*** (ISSN 1352-2523), 2022.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países emergentes do mundo, com um sistema energético altamente pressionado nos últimos anos (SOUZA, 2008). Contudo, o país detém cerca de 12% do volume total de água doce disponível globalmente e uma grande parte desses recursos é armazenada em reservatórios artificiais, que são usados principalmente para a produção de energia hidrelétrica (BARBOSA *et al.*, 2019). Considerando essa grande disponibilidade de água doce e às políticas públicas voltadas para o desenvolvimento de setores estratégicos, o setor hidrelétrico brasileiro tem experimentado um crescimento exponencial. Em 2018, a energia instalada no país era de 161,53 GW, sendo que 67,6% correspondiam à hidroeletricidade, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2019).

A implantação de empreendimentos hidrelétricos no Brasil tem sido um importante vetor de impactos ambientais. Dentre os possíveis impactos, está a interferência na distribuição e migração das comunidades aquáticas, além da possibilidade de riscos à ictiofauna, o que pode levar à mortandade de peixes em turbinas. Em alguns empreendimentos hidrelétricos, procedimentos de manutenção

como as paradas programadas e/ou emergenciais de unidades geradoras podem resultar em baixa vazão operacional, o que propicia o acúmulo de ictiofauna dentro do tubo de sucção (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022). Esse acúmulo é mais frequente em rios com alta piscosidade e pode representar um risco para a comunidade aquática, conforme observado por Schilt (2007).

A sobrevivência da ictiofauna aprisionada após o fechamento do tubo de sucção depende da qualidade da água, especialmente do nível de oxigênio dissolvido e concentração de amônia. Durante paradas programadas ou emergenciais de turbinas, há pouca informação prévia sobre a urgência de resgate de peixes aprisionados, o que representa um problema ambiental importante dentro do princípio da sustentabilidade que orienta o setor hidrelétrico em relação a outras formas de geração de energia elétrica (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022).

Embora haja investimento em sistemas de transposição para peixes em barragens, muitos deles transpõem os obstáculos de outras maneiras, como através de vertedouros ou turbinas. No entanto, essas passagens não são isentas de riscos para a ictiofauna, e estudos mostram que a passagem por turbinas pode causar danos como cisalhamento, cavitação, moagem e abrasão. Como resultado, diversas estratégias de repulsão e barreiras têm sido desenvolvidas para minimizar os impactos e confinamento de peixes em tubos de sucção. Apesar desses avanços, ainda há pouca informação sobre metodologias para prevenir o aprisionamento da ictiofauna nos tubos de sucção das unidades geradoras de projetos hidrelétricos na região amazônica (SCHILT, 2007; DA SILVA *et al.*, 2021; 2022).

As soluções de barreiras para proteção da ictiofauna podem ser físicas ou comportamentais. As barreiras físicas, como telas, grades e armadilhas, são amplamente utilizadas, mas requerem manutenção constante e podem ser caras. Já as barreiras comportamentais utilizam estímulos como luz e som para atingir os sistemas sensoriais dos peixes (ZIELINSKI *et al.*, 2014). As barreiras físicas são eficientes e adequadas para muitas espécies (DE ANDRADE *et al.*, 2012). Por outro lado, as barreiras comportamentais dependem da resposta sensorial de cada espécie e são influenciadas por condições ambientais, como o fluxo de água e turbidez (PERRY *et al.*, 2014).

Com o objetivo de reduzir os possíveis impactos sobre a vida dos peixes, muitas usinas têm implementado medidas específicas para cada manobra (CEMIG, 2016). A

elevação da velocidade do fluxo hidráulico é uma das estratégias para repulsão de peixes atualmente utilizada na Usina Hidrelétrica (UHE) Jirau, que consiste em diminuir gradativamente a carga da unidade geradora até que a comporta vagão seja completamente abaixada. Isso resulta em uma elevação da velocidade do fluxo hidráulico devido à redução da área de descarga do tubo de sucção (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022).

Nessa perspectiva, este estudo tem como propósito avaliar a eficácia da manobra de elevação da velocidade do fluxo hidráulico utilizando um sistema hidroacústico de monitoramento em tempo real do movimento da ictiofauna confinada nos tubos de sucção das unidades geradoras da UHE Jirau, localizada no rio Madeira, Rondônia, Brasil.

Desde o começo do século XX, a hidroacústica, que é a utilização de ondas sonoras para a investigação de ambientes aquáticos, tem sido objeto de exploração. A primeira patente deste método data de 1913 e o termo SONAR (*Sounding Navigation and Ranging*) foi criado em 1942. É importante ressaltar que a técnica consiste na interpretação do eco de ondas de diferentes frequências, e que a velocidade do som depende da temperatura e do tipo de fluido utilizado, e é dada pela equação:

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

onde: K = compressibilidade do fluido; ρ = densidade do fluido numa dada temperatura (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022).

Durante as últimas duas décadas, a instrumentação de sistemas hidroacústicos teve um desenvolvimento notável, tanto na miniaturização e robustez dos transdutores de frequência, quanto na combinação de diversas frequências em um único instrumento. Como resultado, a hidroacústica passou a ser utilizada em diversas situações que exigem alta resolução de imagens, rapidez e segurança. A utilização de instrumentos multifrequenciais permite ajustar a área de varredura do som, aumentando ou diminuindo a resolução da imagem obtida. Isso não se deve apenas às melhorias na geração de ondas, mas também aos *softwares* que trabalham na filtragem e aprimoramento dos ecos recebidos (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022).

2. METODOLOGIA

2.1. ÁREA DE ESTUDO

O rio Madeira é um dos principais afluentes da bacia amazônica, com uma extensão de 3.400 km e uma área de aproximadamente $1,47 \times 10^6$ km², representando cerca de 23% da bacia. Ele também corresponde a 18% da precipitação pluviométrica da região amazônica e 15% do volume total de água do rio Amazonas (BACELLAR & ROCHA, 2010; BASTOS et al, 2008). No rio Madeira, está localizada a UHE Jirau, em operação desde setembro de 2013, a 136 km de Porto Velho, em Rondônia. Com uma capacidade instalada total de 3.750 MW, a partir de 50 unidades geradoras do tipo bulbo, distribuídas em duas casas de força (CF). A CF1 compreende as unidades geradoras 1 a 28 e a CF2 29 a 50 (ESBR 2021; DA SILVA et al., 2021; 2022).



Figura 1.1 – Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau, no rio Madeira, Rondônia.
Fonte: Jirau Energia – ESBR.

2.2. MANOBRA DE ELEVAÇÃO DA VELOCIDADE DO FLUXO HIDRÁULICO

Seguindo o procedimento operacional desenvolvido pelo operador da UHE Jirau, o aumento do fluxo hidráulico é realizado ao manter a unidade em marcha a vazio com uma descarga nominal de $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Após isso, a comporta vagão é abaixada até que esteja a 1 m da soleira, diminuindo a área de descarga e aumentando a velocidade do fluxo hidráulico de $3,6$ para $11,0 \text{ m s}^{-1}$. Esse fluxo é mantido por aproximadamente 10 minutos enquanto o regulador de velocidade

controla a frequência da unidade geradora em velocidade nominal, e a comporta vagão alcança a soleira, vedando completamente o tubo de sucção. Assim que a unidade geradora é confirmada como fechada, o bloqueio mecânico (86M) é acionado manualmente, finalizando o procedimento de parada da unidade. A **Figura 1.2** apresenta o fluxograma das etapas do procedimento de elevação do fluxo hidráulico (DA SILVA *et al.* 2021; 2022).

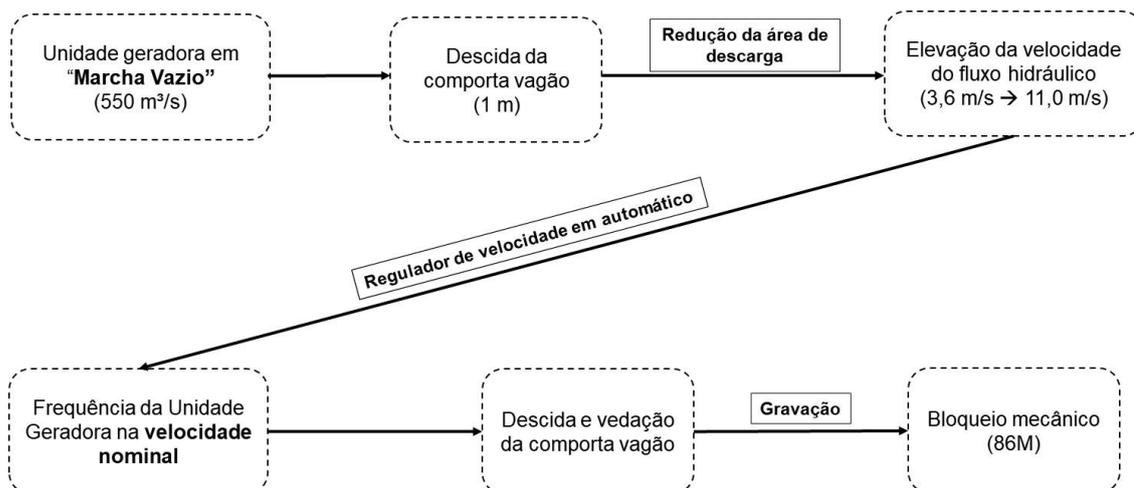


Figura 1.2 – Fluxograma das etapas do procedimento de elevação do fluxo hidráulico durante paradas programadas e/ou emergenciais de máquinas.

Fonte: DA SILVA *et al.* - Adaptado (2021; 2022)

2.3. MONITORAMENTO DA ICTIOFAUNA CONFINADA

O monitoramento da biomassa confinada no tubo de sucção da UHE Jirau é feito por meio hidroacústico, utilizando um sistema de sonar chamado SeeSub, o qual foi desenvolvido pela empresa Venturo Consultoria Ambiental Ltda. Esse sistema é composto por dois transdutores multifrequenciais de imagem fixados na face externa do painel frontal de cada uma das seis comportas vagões da UHE Jirau, a uma distância de 9 m acima da parte inferior da comporta. Essa posição garante que o transdutor fique no centro do tubo de sucção após a vedação. A propagação de onda eletromecânica pela água e a análise de seus ecos permitem o registro de imagens da biomassa no tubo de sucção. Um visor de sonar comercial conectado aos transdutores nas comportas é utilizado para registrar essas imagens (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022). A **Figura 1.3** apresenta os componentes do sistema de monitoramento da ictiofauna confinada no tubo de sucção da UHE Jirau.

O sistema utilizado para gerar imagens utiliza uma ampla faixa de frequências que varia de 50 kHz a 2.000 kHz, o que permite demarcar diferentes áreas e melhorar

a qualidade da imagem. Para avaliar o movimento da ictiofauna, o sistema ajusta a resolução da imagem de acordo com as necessidades (DA SILVA et al., 2022).

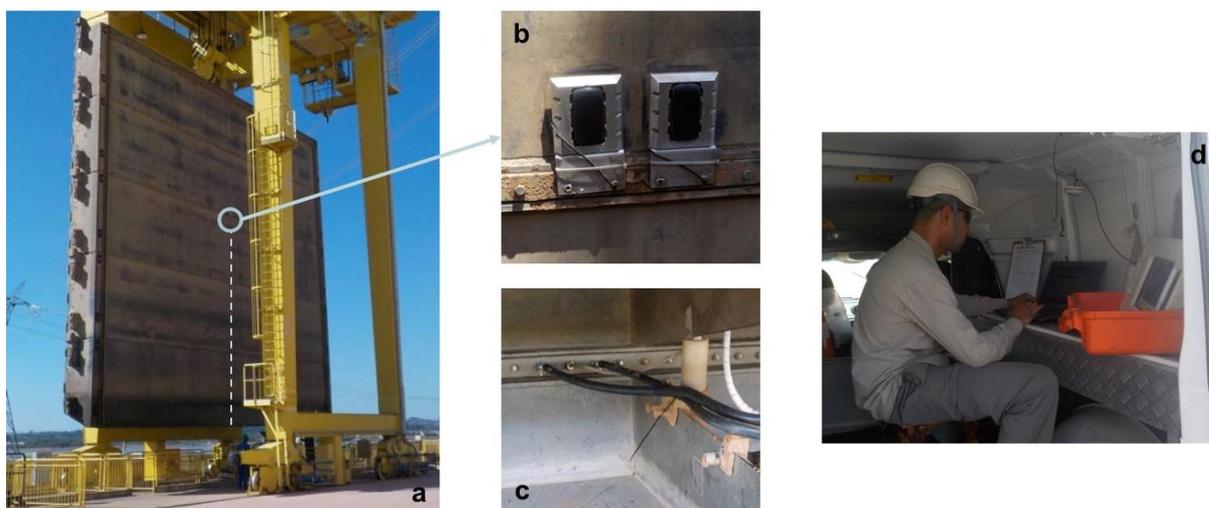


Figura 1.3 – Sistema hidroacústico acoplado à comporta da UHE Jirau, mostrando: (a) comporta vagão com sistema SeeSub; (b) suporte de fixação e transdutores instalados na comporta vagão; (c) Detalhe do cabeamento através do parafuso adaptado da tala entre os segmentos, e da bomba de baixa vazão para análise da qualidade da água; e, (d) exibição de sonar comercial. Fonte: DA SILVA et al. (2021).

2.4. MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA

Para monitorar a qualidade da água dentro do tubo de sucção durante a parada da máquina, foi conectado um tubo coletor de água a uma bomba inundada localizada fora da comporta (**Figura 1.3(c)**). Após a vedação do tubo de sucção, o monitoramento da qualidade da água foi iniciado utilizando uma sonda multiparâmetros. Os valores de pH, oxigênio dissolvido, turbidez e temperatura foram determinados a cada 30 minutos durante um período de duas horas, com intervalos de tempo ajustáveis, dependendo das mudanças observadas. Para quantificar a amônia, foi utilizado um teste colorimétrico comercial com uma faixa de concentração de até 8 mg L⁻¹. A medição da qualidade da água foi fundamental para garantir a eficiência do processo e identificar eventuais problemas durante a parada da máquina (DA SILVA et al., 2022).

2.5. AVALIAÇÃO CATEGÓRICA DA MOVIMENTAÇÃO DE ICTIOFAUNA CONFINADA

Foram analisadas 105 paradas de máquinas ocorridas entre 2019 e 2020, no intuito de avaliar o histórico de movimentação da ictiofauna confinada após a manobra de elevação do fluxo hidráulico. Esse procedimento seguia o seguinte protocolo: Após

cada manobra, o monitoramento da ictiofauna confinada foi realizado por cerca de 40 minutos dentro do tubo de sucção utilizando o sistema hidroacústico (**Figura 1.4**). As filmagens obtidas foram classificadas em 4 categorias de acordo com as movimentações da ictiofauna confinada: incipiente (sem movimentação), detectável (menos de 5 movimentações/minuto), mensurável (mais de 5 movimentações/minuto) e elevada (movimentações sobrepostas impossibilitando a contagem). A **Figura 1.5** apresenta exemplos de imagens subaquáticas e as classificações categóricas da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção (DA SILVA *et al.*, 2021).



Figura 1.4 – 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: DA SILVA *et al.* (2021).

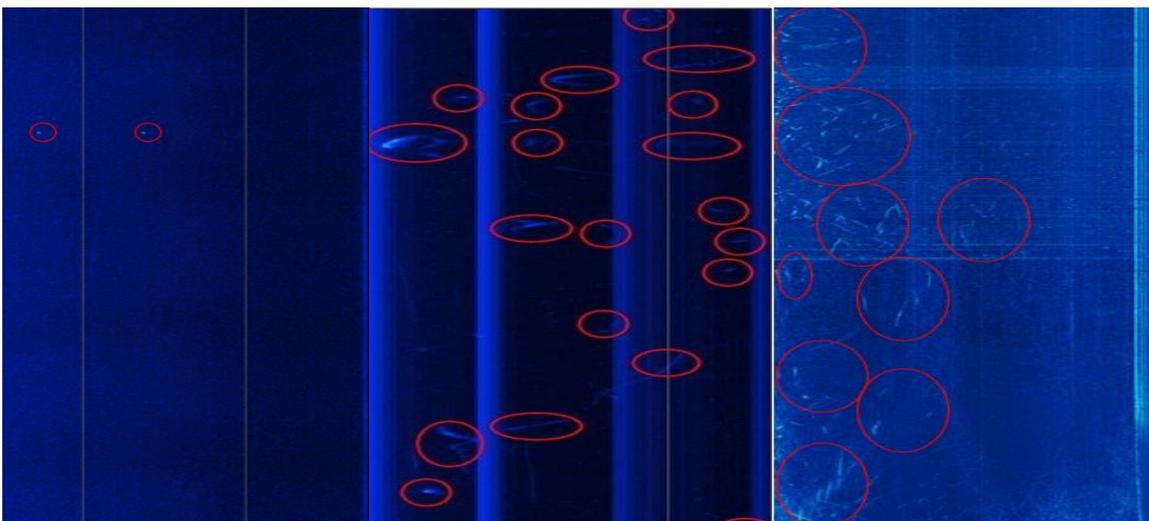


Figura 1.5 – Exemplos de imagens subaquáticas e classificações categóricas da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção: esquerda – detectável; centro – mensurável e direita – elevada. Fonte: DA SILVA *et al.* (2021).

2.6. AVALIAÇÃO CATEGÓRICA DO TAMANHO DA ICTIOFAUNA CONFINADA

Para avaliar o tamanho relativo da ictiofauna confinada, foi utilizado um sistema de análise de imagem com uma composição de cores falsas "Azul-Turquesa" com um valor de pixel de 0,000361 m². Com base no tamanho da movimentação observada na filmagem, foi estabelecido um parâmetro para determinar o tamanho relativo da ictiofauna presente no tubo de sucção, dividido em três índices: o índice 1 se refere a um alvo de ≤ 1 cm; o índice 2 se refere a um alvo de > 1 cm e ≤ 2 cm; e o índice 3 se refere a um alvo de > 2 cm (DA SILVA *et al.*, 2021).

2.7. AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA MANOBRA DE ELEVAÇÃO DE FLUXO HIDRÁULICO EM TURBINAS TIPO BULBO

Durante o período de outubro de 2020 e agosto de 2021, foram realizados procedimentos de parada de onze unidades geradoras da UHE Jirau, incluindo as unidades nº 2, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 28, 30 e 42. As paradas foram feitas em duas etapas: na primeira, sem a elevação do fluxo hidráulico, e na segunda, a comporta foi retirada, a unidade foi novamente acionada, e a parada ocorreu com a elevação do fluxo hidráulico. Em ambos os casos, o monitoramento da movimentação da ictiofauna confinada foi feito por cerca de 20 minutos após a vedação completa do tubo de sucção. As imagens obtidas foram avaliadas e os movimentos foram contados manualmente, com os resultados comparados para determinar a eficiência do método de elevação do fluxo hidráulico (DA SILVA *et al.*, 2021; 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao utilizar hidroacústica para o monitoramento em tempo real da movimentação da ictiofauna confinada, foram identificados diferentes cenários durante os experimentos em duas etapas, com e sem o procedimento de elevação de fluxo hidráulico. De maneira geral, as imagens subaquáticas obtidas na primeira etapa do experimento mostraram comportamento semelhante ao da **Figura 1.6.a**, com alto grau de movimentação da ictiofauna, possivelmente de médio a grande porte. Por outro lado, após a segunda etapa, as imagens mostraram, em geral, pouco ou nenhuma movimentação de ictiofauna confinada no tubo de sucção, como na **Figura 1.6b**.

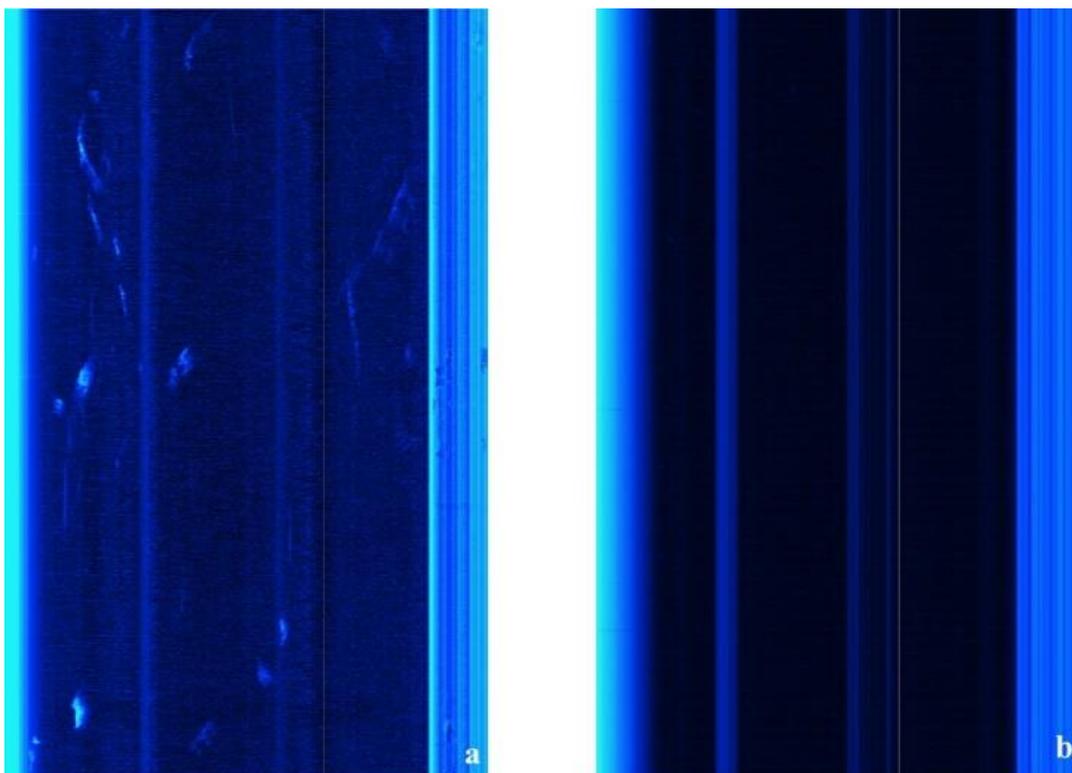


Figura 1.6 – Exemplos de imagens subaquáticas obtidas após os experimentos em duas etapas: (a) após a primeira etapa (desligamento da máquina sem elevação de fluxo hidráulico); (b) após a segunda etapa (parada da máquina com procedimento de elevação de fluxo hidráulico). Fonte: DA SILVA *et al.* (2022).

Durante o período de 2019 a 2020, foram monitoradas 105 paradas de máquinas da UHE Jirau, em que a manobra de elevação do fluxo hidráulico foi utilizada. As filmagens resultantes totalizaram 423, correspondendo a 282 horas de observação. A movimentação média registrada foi de 6 ± 9 movimentos por minuto, com uma mediana de 2, variando de 0 a 66 movimentos por minuto. A análise integrada das imagens multifrequenciais da região interna do tubo de sucção após a manobra de elevação do fluxo hidráulico demonstrou que 85% das filmagens não apresentaram movimentação significativa de ictiofauna confinada, sendo classificadas como incipientes ou detectáveis, enquanto apenas cerca de 15% das filmagens apresentaram movimentação mensurável. Não foram observadas filmagens com movimentação elevada. A **Figura 1.7** ilustra o índice de movimentação total da ictiofauna por minuto após a execução da manobra de elevação do fluxo hidráulico, considerando todas as unidades geradoras da UHE Jirau, nos anos de 2019 e 2020.

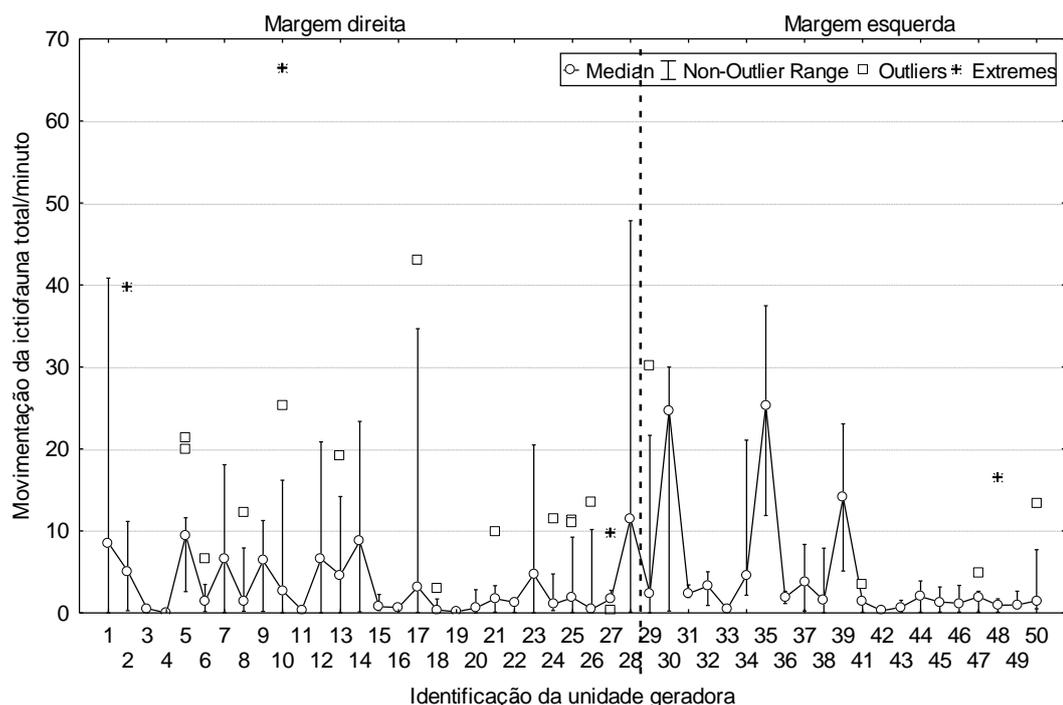


Figura 1.7 – Movimentação da ictiofauna confinada por minuto de filmagem no tubo de sucção das unidades geradoras da UHE Jirau. A linha tracejada indica a separação entre margem direita (CF1 - UG 01 a 28) e margem esquerda (CF2 - UG 29 a 50).
 Fonte: DA SILVA *et al.* (2021).

Ao avaliar o tamanho relativo da ictiofauna confinada no tubo de sucção em relação aos índices 1, 2 e 3 durante diferentes períodos hidrológicos (enchente, cheia, vazante e seca), foi observada uma diferença significativa entre os períodos ($p < 0,05$) com uma diminuição da movimentação da ictiofauna confinada no tubo na seguinte sequência: Enchente > Cheia > Vazante > Seca. No entanto, as espécies classificadas como índice 1 (≤ 1 cm) foram mais comuns, independentemente do período hidrológico analisado, com 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 1.8**).

A precipitação anual média na bacia do rio Madeira varia entre 1.900 e 2.200 mm, no entanto, cerca de 75 % do volume do rio Madeira é influenciado pelo clima da região andina do leste da Bolívia, enquanto apenas 25% provém de pequenos rios abaixo da cidade de Porto Velho. Durante o período de cheia, a vazão do rio varia entre 30.000 e 35.000 $m^3 s^{-1}$, enquanto na seca, a vazão varia entre 5.000 e 10.000 $m^3 s^{-1}$ (BACELLAR & ROCHA, 2010). Durante o período de chuvas, a maior vazão de água justifica a maior movimentação próxima ao paramento de jusante das casas de força de empreendimentos hidrelétricos. 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. A atração de peixes pequenos para os tubos de sucção está relacionada ao fato de que sua menor massa corporal diminui a resistência à velocidade da água.

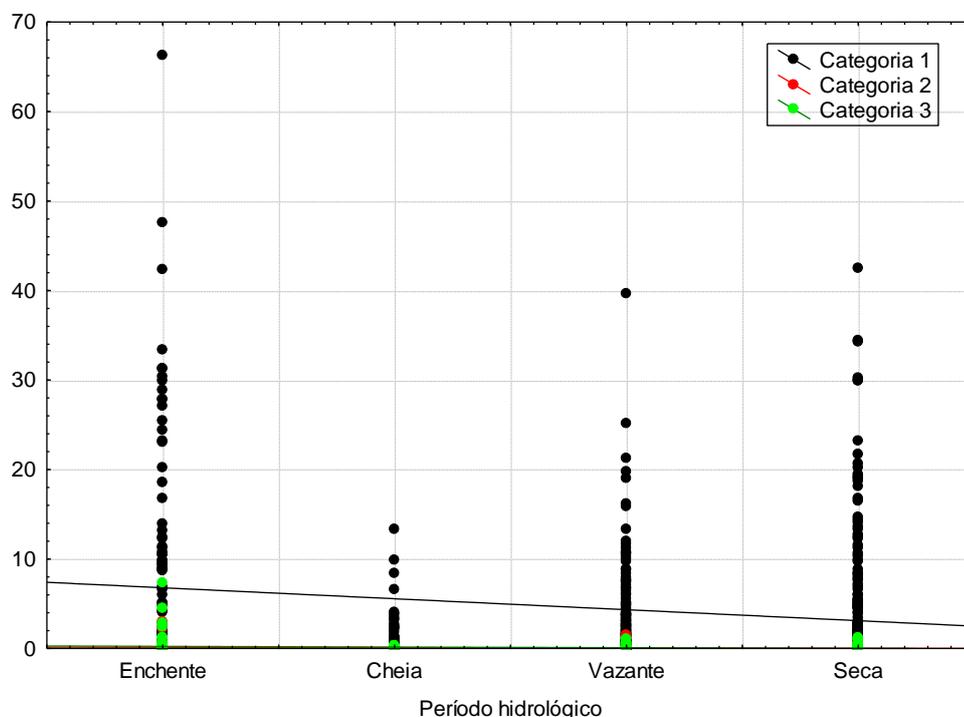


Figura 1.8 – Avaliação categórica do tamanho relativo da ictiofauna confinada no TB nos diferentes períodos hidrológicos do rio Madeira, durante os anos 2019 e 2020. Fonte: DA SILVA *et al.* (2021).

Concomitantemente ao procedimento de parada de máquinas em duas etapas, foram realizados monitoramentos da qualidade da água nas unidades geradoras nº 2, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 28, 30 e 42. O resultados evidenciaram temperatura mediana da água de 28,90 °C (28,74 ± 0,91 °C), enquanto as concentrações médias de oxigênio dissolvido foram de 3,78 mg L⁻¹ (3,78 ± 1,11 mg L⁻¹), resultado comum em ecossistemas tropicais, onde a temperatura média da água é geralmente mais alta, a solubilidade do oxigênio é menor quando comparada com ecossistemas temperados (BENNER E AMON, 2016). O pH apresentou pouca variação, com mediana de 6,90 (6,95 ± 0,48), enquanto a concentração de amônia foi inferior ao limite de quantificação da técnica utilizada. As medições para sólidos totais dissolvidos apresentaram mediana de 53,95 mg L⁻¹ (57,09 ± 9,19 mg L⁻¹) e a mediana para condutividade foi de 87,90 µS cm⁻¹ (94,76 ± 14,11 µS cm⁻¹). Após o experimento, o monitoramento da qualidade da água por duas horas não evidenciou alteração nos parâmetros

monitorados. Ressalta-se que o monitoramento da qualidade da água, associado às metodologias de monitoramento e repulsão da ictiofauna, se mostrou uma importante ferramenta para a gestão e tomada de decisão em relação à manutenção das unidades geradoras e riscos à ictiofauna.

Durante a avaliação quantitativa da manobra de elevação de fluxo hidráulico, em dois etapas, foram analisadas 22 filmagens. Quando não houve a manobra de elevação de fluxo hidráulico, a mediana foi de 5,39 e a média foi de $7,32 \pm 5,69$ movimentações por minuto no tubo de sucção das unidades avaliadas. Já na segunda etapa, quando houve elevação do fluxo, a mediana foi de 0,56 e a média foi de $0,96 \pm 1,30$ movimentações por minuto.

Os dados dos dois grupos experimentais mostraram diferenças significativas no número de movimentações da ictiofauna no tubo de sucção ($p < 0,05$, teste de *Wilcoxon*), e a comparação entre as duas etapas do experimento revelou uma redução de cerca de 87 % da movimentação após o procedimento de elevação do fluxo hidráulico (**Figura 1.9**). Esses resultados indicam que a manobra teve um impacto significativo na redução do movimento da ictiofauna no tubo de sucção.

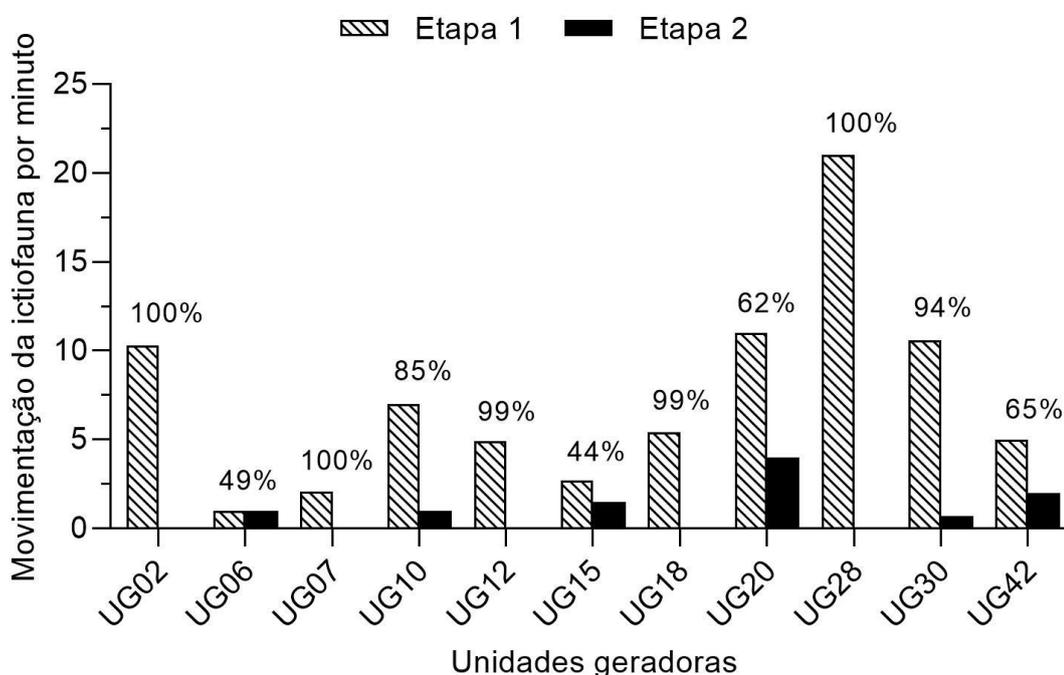


Figura 1.9 – Avaliação quantitativa da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção após parada da máquina sem procedimento de aumento de vazão hidráulica (Etapa 1) e com procedimento de aumento de vazão hidráulica (Etapa 2). Fonte: DA SILVA *et al.* – Adaptado (2022).

Estudos tem documentado os riscos para a ictiofauna associados a várias etapas da operação de usinas hidrelétricas, como paradas de máquinas (ANDRADE & ARAÚJO, 2011). A realização de paradas de máquinas para manutenções corretivas e preventivas podem prejudicar a ictiofauna por meio de diversos fatores, tais como a variação de pressão no tubo de sucção, choque mecânico, barotrauma, exoftalmia, eversão estomacal e rompimento da bexiga natatória (CEMIG, 2016).

Nesse sentido, diversas estratégias de repulsão ou barreiras têm sido desenvolvidas para minimizar os impactos à ictiofauna e evitar seu confinamento em tubos de sucção. Telas, grades e armadilhas são exemplos de barreiras físicas ou mecânicas amplamente utilizadas, mas que requerem manutenção frequente e podem ser dispendiosas. Por isso, vários projetos têm investido no desenvolvimento de outras estratégias eficientes para repelir a ictiofauna, como formas de iluminação e sons específicos, a fim de evitar danos à fauna e garantir o funcionamento adequado das unidades geradoras (ZIELINSKI *et al.*, 2014; DE ANDRADE *et al.*, 2012).

A estratégia de elevação do fluxo hidráulico para repelir a ictiofauna, juntamente com a realização de estudos para estimar a movimentação da ictiofauna confinada, demonstrou ser extremamente importante. A criação de um protocolo tecnológico que utiliza imagens em tempo real da ictiofauna, uma estratégia de repulsão e variáveis de qualidade da água permitiu a minimização dos impactos socioambientais, enquanto gerava impactos econômicos positivos.

4. CONCLUSÕES

O procedimento de elevação do fluxo hidráulico em turbina bulbo, que varia de 3,6 para 11,0 m s⁻¹, é altamente eficiente na minimização do confinamento da ictiofauna nos tubos de sucção. Ao reduzir em cerca de 87% o confinamento da ictiofauna, esse procedimento de manutenção, combinado com o monitoramento em tempo real no tubo de sucção, tem um impacto positivo na conservação da fauna e nos custos econômicos relacionados à parada da unidade geradora, além de reduzir a carga de trabalho das equipes responsáveis pelo resgate da ictiofauna em espaços confinados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. S.; 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.

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, n9, p. 5004-5012, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.023>

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.

BASTOS, W. R., REBELO, M. F., FONSECA, M. F., ALMEIDA, R. AND MALM, O. A description of mercury in fishes from the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 3, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000300006>

BENNER, R.; AMON, R.M.W. The Size-Reactivity Continuum of Major Bioelements in the Ocean. **Annual Review of Marine Science**, v. 7, p. 185 – 205, 2016. <https://doi.org/10.1146nnurev-marine-010213-135126>

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

DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; ZARA, L. F. Hydraulic flow rate increase maneuver for ichthyofauna repulsion in bulb-type generating units – Jirau Hydroelectric Power Plant. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 17, n. 4, p. 53 – 63, 2021. <https://doi.org/10.17271/1980082717420213049>

DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO W. S.; ZARA, L. F.; SILVA, L. L. O.; MELO JUNIOR, J. O.; RIBEIRO, F. S. L.; OBARA, M. K. T. Deterring fish by increasing the flow rate in bulb turbine. **The International Journal on Hydropower and Dams**, v. 29, n. 4, p. 62-65, 2022.

DE 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, n. 4, p. 723 – 730, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400005>

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

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O sistema interligado nacional**. 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, n. 2, p. 192 – 203, 2014. <https://doi.org/10.1002/rra.2628>

SCHILT, C. R. Developing fish passage and protection at hydropower dams. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 104, n. 3-4, p. 295 – 325, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.09.004>

SOUZA, A.C.C. Assessment and statistics of Brazilian hydroelectric power plants: Dam areas versus installed and firm power”, **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 12, n. 7, p. 1843-1863, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.04.005>

ZIELINSKI, D. P.; VOLLER, V. R.; SVENDSEN, J. C.; HONDZO, M.; MENSINGER, A. F.; SORENSEN, P. Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp. **Ecological Engineering**, v. 67, p. 95 – 103, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.003>

CAPÍTULO 2

Este capítulo aborda a estratégia de barreira comportamental para proteção da ictiofauna, portanto apresenta os resultados da avaliação da manobra de dispersão de ar comprimido para dissuasão da ictiofauna do tubo de sucção de turbinada do tipo bulbo.

O artigo científico "*Fish deterrent associated with bubble dispersion in bulb turbine*", foi submetido ao periódico ***Applied Animal Behaviour Science*** (ISSN 0168-1591), 2023.

DISSUAÇÃO DE PEIXES ASSOCIADA À DISPERSÃO DE BOLHAS EM TURBINA TIPO BULBO

RESUMO

Durante os procedimentos de manutenção de unidades geradoras, a manobra operacional de parada da turbina ocasiona baixa vazão, podendo propiciar o acúmulo de peixes dentro do tubo de sucção. Atentando as premissas de proteção a ictiofauna, vários sistemas de repulsão têm sido desenvolvidos para minimizar o confinamento e os possíveis riscos à ictiofauna. O principal objetivo deste estudo foi investigar a efetividade dissuasiva na ictiofauna causada pela dispersão de bolhas ao longo do tubo de sucção durante a parada de unidade geradora. O monitoramento da ictiofauna no tubo de sucção foi feito com o auxílio de sistema hidroacústico. O procedimento de dispersão de bolhas foi feito utilizando o sistema de injeção de ar comprimido embutido no tubo de sucção das Unidades Geradoras da UHE Jirau, no rio Madeira - Rondônia. Foram acompanhadas 09 paradas de máquinas feitas em duas etapas, sendo a primeira etapa referente a parada convencional e a segunda etapa a parada da unidade geradora com dispersão de bolhas. A movimentação da ictiofauna confinada, durante as duas etapas, foi acompanhada continuamente por um sistema hidroacústico de monitoramento em tempo real instalados nas comportas vagões. Os resultados mostram a redução de cerca de 42% da movimentação da ictiofauna após o procedimento de dispersão de bolhas, possibilitando inferir considerável diminuição no confinamento da ictiofauna no tubo de sucção. Esta efetividade observada, em ambiente desfavorável com elevada turbidez do rio Madeira, infere considerável potencialidade dessa tecnologia robusta e de baixo custo para proteção da ictiofauna no setor hidrelétrico.

Palavras-chave: Dissuasão de ictiofauna; Bolhas de ar; Efeito comportamental; Rio Madeira.

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é composta por uma variedade de fontes, incluindo hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares, biomassa e nuclear. Detendo cerca de 12 % do volume total de água doce disponível no mundo, o Brasil, historicamente, tem a hidroeletricidade como sua principal fonte de geração de energia. A potência total instalada em operação no Brasil é de 182.974,2 MW, destes, cerca de 49,65 % são provenientes do setor hidrelétrico (ANEEL, 2022).

A opção brasileira pelas usinas hidrelétricas pode ser justificada basicamente pela segurança temporal no provimento de energia (em função da formação de um reservatório) e pelo grande potencial hidrelétrico ainda disponível no território brasileiro (MORETTO *et al.*, 2012). No Brasil, o potencial hídrico remanescente está na Região Amazônica e o grande interesse hidrelétrico voltado para essa região é resultante das grandes quedas topográficas existentes nos afluentes do rio Amazonas a partir do Escudo Brasileiro (na parte sul da região) e do Escudo Guianense (no lado norte), além dos valores dos potenciais estudados e estimados na região (FEARNSIDE, 2013). O processo de decisão do balanço positivo de um empreendimento hidrelétrico é extremamente complexo, devendo ocorrer de forma cuidadosa e embasado em critérios ambientais, técnicos e econômicos (MENDES *et al.*, 2017). Apesar da hidroeletricidade ser considerada uma fonte sustentável, com baixa emissão de gases do efeito estufa, durante todas as fases, desde o planejamento até a operação, os empreendimentos do Setor Elétrico enfrentam diversas preocupações relacionadas ao meio ambiente. Entre elas, uma das questões mais evidentes diz respeito aos efeitos causados sobre a vida aquática, sobretudo os impactos sobre a ictiofauna (CEMIG, 2015; DA SILVA *et al.*, 2021).

Durante os procedimentos de manutenção, as manobras operacionais de paradas programadas e/ou intempestivas de unidades geradoras, propicia a baixa vazão de operação podendo causar o acúmulo de ictiofauna no interior do tubo de sucção, principalmente em rios de alta piscosidade, representando riscos para a comunidade aquática (SCHILT, 2007). O aprisionamento da ictiofauna no tubo de sucção, demanda operações complexas de resgate da ictiofauna, os quais seguem protocolos rígidos de segurança de trabalho para as equipes de resgate, podendo levar a passivos econômicos, caso o período sem geração de energia elétrica se estenda. Nessa perspectiva, novas regras operativas e diversas tecnologias para

proteção da ictiofauna têm sido desenvolvidos no intuito de minimizar possíveis impactos e otimizar os procedimentos de manutenção (DA SILVA *et al.*, 2022; FIGUEIREDO *et al.*, 2022; SANTANA *et al.*, 2022).

No Brasil é registrada a ocorrência de cerca de 2.600 espécies de peixes válidas (HILSDORF & MOREIRA, 2008). No rio Madeira foram inventariadas cerca de 920 espécies, o que atribui a esse rio o título de maior riqueza de espécies da ictiofauna registrada na Amazônia (DE QUEIROZ *et al.*, 2013). O movimento migratório de peixes é de extrema importância na modulação de sua fisiologia reprodutiva, sendo necessário para o desenvolvimento das gônadas (ovários e testículos) e para a maturação dos gametas após desova, além de propiciar a dispersão dos ovos e larvas (HILSDORF & MOREIRA, 2008). Fatos como esse, associado à grande diversidade de peixes encontrada no rio Madeira, demanda, de empreendimentos hidrelétricos situados nessa região, o desenvolvimento e a utilização de métodos de monitoramento e repulsão de ictiofauna mais abrangentes

As barreiras físicas ou mecânicas (telas e grades), utilizadas no setor hidrelétrico são indicadas para uma ampla gama de espécies, entretanto, requerem onerosas e constantes manutenções preventivas e corretivas (DE ANDRADE *et al.*, 2012). Outras tecnologias de proteção da ictiofauna, são as barreiras comportamentais, as quais utilizam estímulos sonoros, luzes estroboscópicas, correntes elétricas e cortinas de bolhas para atingir os sistemas sensoriais dos peixes (ZIELINSKI *et al.*, 2014; DIAS *et al.*, 2020; FIGUEIREDO *et al.*, 2021). As respostas comportamentais são complexas e específicas de cada espécie frente à determinados estímulos sensoriais, além de ser influenciadas por condições ambientais, tais como vazão e turbidez (PERRY *et al.*, 2014).

Atentando às premissas de proteção a ictiofauna, este estudo investiga a efetividade dissuasiva da ictiofauna causada pela dispersão de bolhas ao longo do tubo de sucção de turbina hidrelétrica do tipo bulbo na UHE Jirau, no rio Madeira – Rondônia.

2. METODOLOGIA

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica Jirau (UHE Jirau) está localizada na região amazônica, no Rio Madeira (**Figura 2.1**). A UHE Jirau possui capacidade instalada de 3.750 MW, sendo a quarta maior geradora de energia elétrica do Brasil, representando cerca de 3,7% de toda a energia hidrelétrica do país. A usina conta com 50 unidades geradoras tipo bulbo, distribuídas em duas casas de força (CF1 e CF2), com descarga nominal de $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e garantia física de 2.211,6 MW (ESBR, 2022).



Figura 2.1 - Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau, no rio Madeira, Rondônia.
Fonte: Jirau Energia – ESBR.

2.2. MANOBRA OPERATIVA DE DISSUAÇÃO DA ICTIOFAUNA

A estrutura civil do tubo de sucção das unidades geradoras do tipo bulbo da UHE Jirau possui um sistema de injeção de ar comprimido embutido, composto por 8 bicos injetores sextavados distribuídos igualmente nas laterais com espaçamentos de 6,0 m (**Figura 2.2**). A manobra operativa de dissuasão da ictiofauna inicia com a abertura total da válvula de acionamento manual da linha de injeção de ar comprimido (7 bar) com o tubo de sucção aberto. A descida da comporta vagão ocorre somente após 15 minutos de dispersão de bolha ao longo do tubo de sucção. Imediatamente após a confirmação de fechamento da unidade geradora, é acionado manualmente o bloqueio mecânico (86 M), fechada a válvula da linha de injeção de ar comprimido e consolidado o procedimento de parada da unidade.

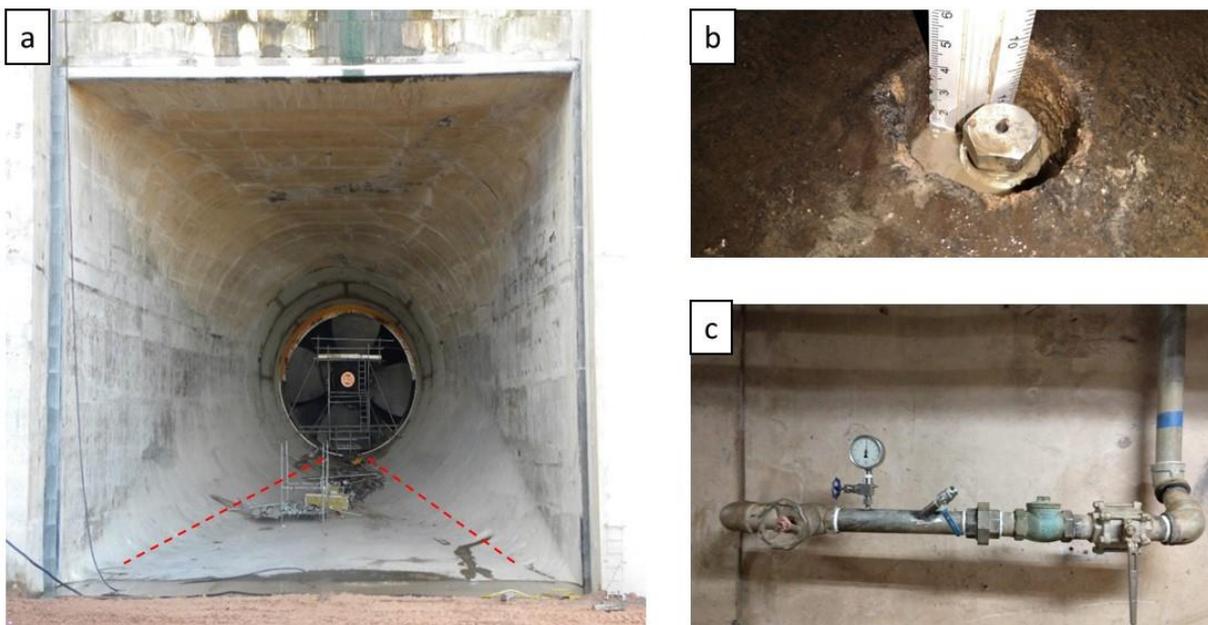


Figura 2.2 – Sistema de injeção de ar comprimido no tubo de sucção da unidade geradora da UHE Jirau. **a** – Visão frontal e indicação da localização dos bicos injetores; **b** – Bico injetor sextavado; **c** – Válvula de acionamento manual da injeção de ar comprimido. Fonte: Acervo Venturo Engenharia e Consultoria ambiental.

2.3. MONITORAMENTO DA ICTIOFAUNA CONFINADA

A avaliação em tempo real da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção é feita utilizando o sistema hidroacústico de varredura de baixa e de alta frequência, desenvolvido pela Venturo Consultoria Ambiental. No plano de face da comporta vagão foram fixados 2 transdutores cerca de 9,0 m acima da parte inferior da comporta vagão, de forma que o transdutor fique no centro do tubo de sucção após o fechamento da unidade geradora. Os transdutores são conectados por cabeamento específico e resistente ao equipamento hidroacústico, na laje superior do paramento de jusante da casa de força (**Figura 2.3**). O sistema de geração de imagens utilizou frequências distintas, permitindo a demarcação de áreas de coberturas específicas da movimentação da ictiofauna no tubo de sucção da unidade geradora do tipo bulbo. O sistema hidroacústico foi ajustado para frequências de 250 a 350 kHz, com largura de feixe horizontal de $0,9^\circ$, largura de feixe vertical de 39° e ângulo de inclinação na vertical de 26° (DA SILVA *et al.*, 2022).

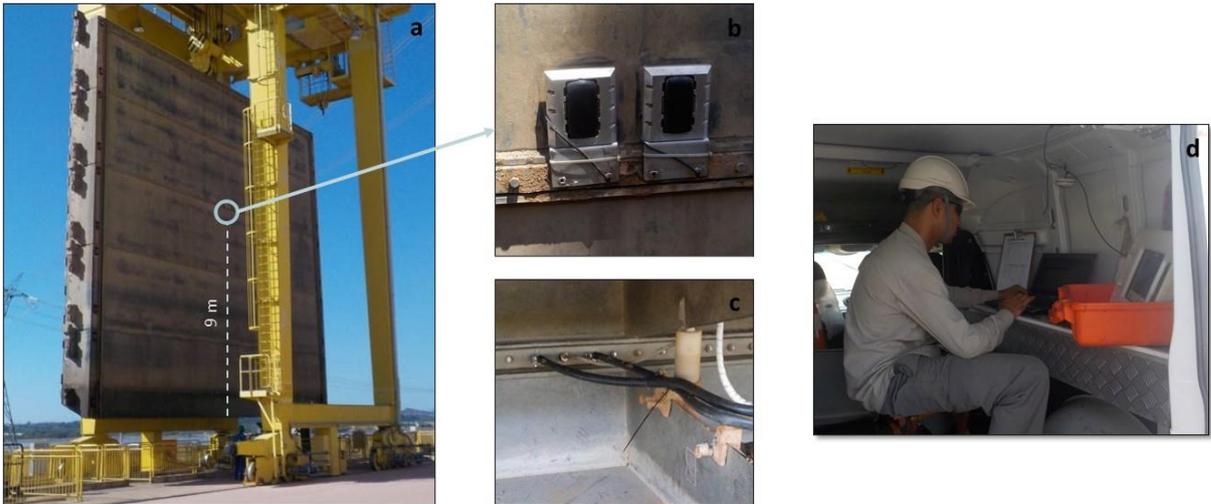


Figura 2.3 – Sistema hidroacústico acoplado ao plano de face da comporta vagão da UHE Jirau (Patente nº BR 102015000457-5 A2). **a** – Comporta vagão; **b** – Detalhe da fixação dos transdutores; **c** – Detalhe do cabeamento; **d** – Operação do equipamento hidroacústico. Fonte: DA SILVA *et al* (2021).

2.4. AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DISSUASIVA DA ICTIOFAUNA

Para a avaliação a efetividade da dissuasão da ictiofauna pela dispersão de bolhas, o procedimento de parada programada de nove unidades geradoras UHE Jirau (maio a agosto/ 2022), foi feito em duas etapas. Na primeira etapa, a parada da unidade geradora ocorreu de forma convencional, sem ocorrência de qualquer método de repulsão da ictiofauna. Enquanto que, na segunda etapa, a parada da unidade geradora ocorreu com a execução da manobra operativa de dissuasão da ictiofauna. Nas duas etapas, após completa vedação do tubo de sucção, o monitoramento da movimentação da ictiofauna confinada foi feito por cerca de 20 minutos. As imagens foram arquivadas e posteriormente analisadas utilizando *software* para visualização, com ajuste de composição colorida de falsa cor “Blue – Turquoise” e valor do pixel de 0,000361 m². As movimentações dos espécimes de ictiofauna confinada foram classificadas em função do tamanho na tela de interface do *software* nas categorias < 1,0 cm; ≥ 1,0 a ≤ 2,0 cm e > 2,0 cm (DA SILVA *et al.*,2021).

3. RESULTADOS

O sistema hidroacústico com os transdutores instalados no plano de fase da comporta vagão (Sistema SeeSub) possibilitou a visualização em tempo real da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção durante as paradas previstas das unidades geradoras, resguardando de quaisquer impactos a ictiofauna.

As imagens subaquáticas multifrequenciais em tempo real evidenciaram a diminuição da movimentação da ictiofauna após a execução da manobra operativa de dissuasão da ictiofauna (**Figura 2.4**), sendo importante ressaltar que as duas unidades geradoras adjacentes permaneceram em operação. A avaliação em tempo real, com rapidez e robustez, possibilita a interrupção do procedimento operacional de parada da unidade geradora caso haja risco de danos a assembleia de peixes confinada.

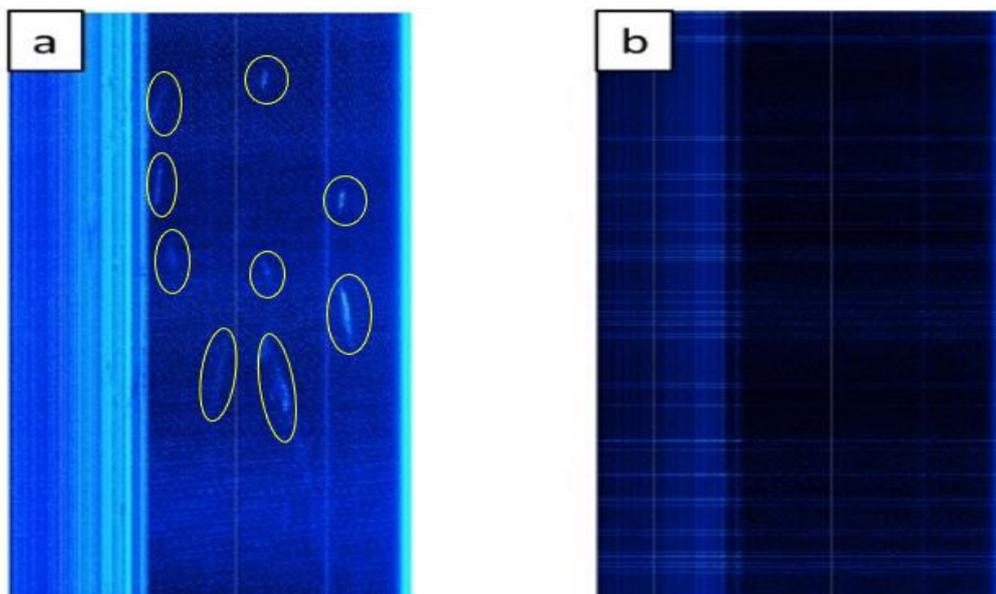


Figura 2.4 – Exemplos de imagens subaquáticas multifrequencias do tubo de sucção durante a primeira etapa (a) e segunda etapa (b) da parada prevista da unidade geradora da UHE Jirau. Fonte: Acervo Venturo Engenharia e Consultoria ambiental.

Adicionalmente, os resultados obtidos na avaliação quantitativa após a primeira etapa, indicaram mediana de 98 e média de 139 ± 96 movimentações durante 20 minutos. Enquanto que na segunda etapa, após execução da manobra de dissuasão da ictiofauna por dispersão de bolhas, a movimentação mediana foi de 70 e a média de 61 ± 24 . A análise integrada dos resultados obtidos para os dois grupos experimentais (primeira e segunda etapa), mostrou diferença significativa na movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção (teste de *Mann-Whitney*, p

< 0,05), possibilitando estimar a redução de cerca de 42% da movimentação da ictiofauna no tubo de sucção após procedimento dissuasão da ictiofauna (**Figura 5**).

Considerando todas as paradas de unidades geradoras analisadas, em apenas 15% não foi observada eficiência da manobra de dissuasão da ictiofauna do tubo de sucção, estando este fato possivelmente relacionado à várias questões externas ou até mesmo a presença de predadores que possam ter inimizado a dissuasão dos espécimes.

A estratificando da ictiofauna confinada no tubo de sucção em função do tamanho na tela de interface do *software* nas categorias < 1,0 cm; $\geq 1,0$ e $\leq 2,0$ cm; e > 2,0 cm, durante as paradas das unidades geradoras, mostraram a efetividade da manobra operativa de dissuasão de ictiofauna nas diferentes faixas de tamanho dos espécimes (**Figura 2.6**). É importante destacar que a manobra de dissuasão minimizou o confinamento de espécimes de maior porte (> 3 cm) com 68% de efetividade relativa, sendo de grande importância quando se considera o esforço, humano e material, para o desenvolvimento de atividades de resgate de ictiofauna do tubo de sucção.

Os resultados da efetividade da manobra operativa de dissuasão da ictiofauna indicam claramente a eficiência da utilização da dispersão de bolhas na repulsão de peixes de turbinas do tipo bulbo. Neste procedimento operacional pode ser inferido a ocorrência dos estímulos sonoros e táteis na parte interna do tubo de sucção e um possível efeito de atratividade da ictiofauna na parte externa do tubo de sucção e próxima a superfície, devido a ebulição das bolhas de ar.

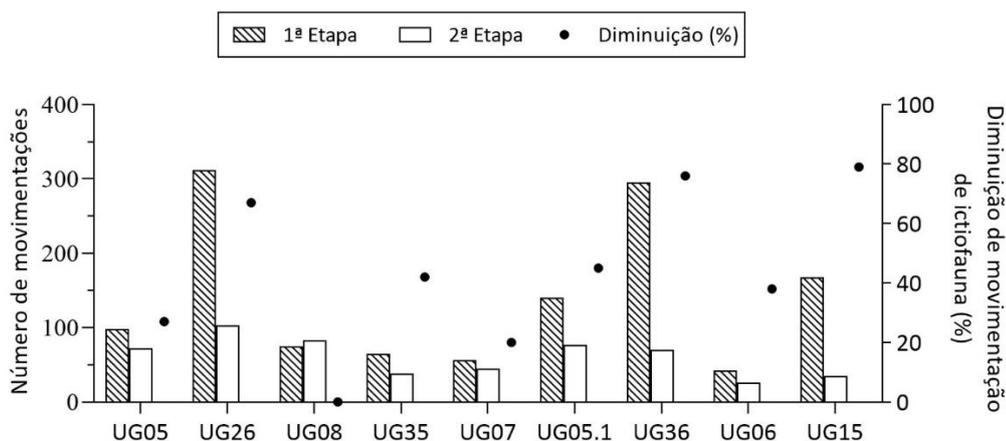


Figura 2.5 – Avaliação quantitativa da movimentação da ictiofauna confinada no tubo de sucção durante a primeira etapa (convencional) e segunda etapa (manobra de dissuasão) das paradas previstas das unidades geradoras da UHE Jirau. Fonte: Autores.

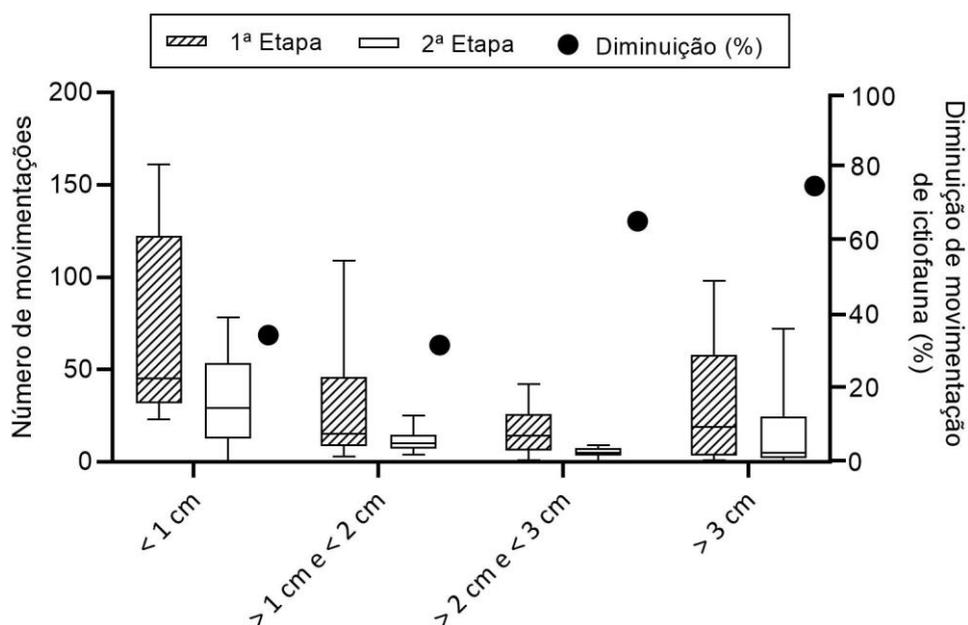


Figura 2.6 – Estratificação em função do tamanho relativo da ictiofauna confinada no tubo de sucção durante a primeira etapa (convencional) e segunda etapa (manobra de dissuasão) das paradas previstas das unidades geradoras da UHE Jirau. Fonte: Autores.

A imagem subaquática em perfil transversal ao desemboque do tubo de sucção das unidades geradoras durante a manobra operativa de dissuasão da ictiofauna mostra a efervescência na região do plano de vedação superior do tubo de sucção e a pluma de dispersão gasosa, sendo na superfície observado a formação de cardume de peixes próximo ao paramento de jusante da unidade geradora (**Figura 2.7**).

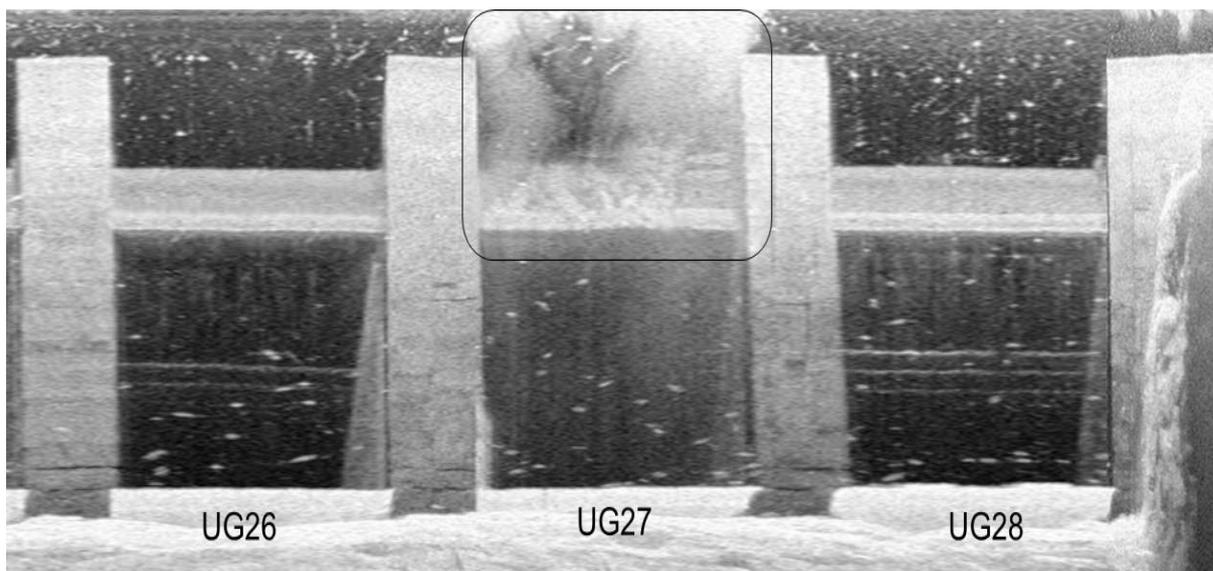


Figura 2.7 – Imagem subaquática em perfil transversal ao desemboque do tubo de sucção durante a manobra operativa de dissuasão da ictiofauna na unidade geradora UG27 da UHE Jirau. Fonte: Autores.

4. DISCUSSÃO

Atualmente, barreiras físicas são amplamente utilizadas no setor hidrelétrico, tendo em vista sua eficiência no que se refere ao impedimento da passagem de peixes para às turbinas. Entretanto, essas tecnologias requerem muita manutenção e podem ser relativamente onerosas (ZIELINSKI *et al.*, 2014). Além disso, esses métodos negligenciam aspectos biológicos e comportamentais das espécies de peixes, considerando apenas aspectos puramente físicos (JESUS *et al.*, 2019).

Nessa perspectiva, as barreiras comportamentais para peixes têm se mostrado eficazes em reduzir os impactos causados pelas estruturas hidráulicas das barragens, pois além de impedir o acesso da ictiofauna às turbinas de produção elétrica, sistemas de bombeamento, sistemas adutores, entre outros, auxilia no direcionamento da ictiofauna aos sistemas de transposição de peixes (STP), promovendo o contínuo ecológico e reduzindo a possibilidade de mortalidade e ferimentos de peixes. Essas barreiras funcionam por meio da emissão controlada de estímulos primários, visando atingir os sistemas sensoriais dos peixes e provocar reações desejadas, seja de atração ou repulsão. A modulação dos estímulos emitidos possibilita desenvolver as reações desejadas em indivíduos-alvo, ajudando a criar barreiras eficazes e seletivas (ZIELINSKI *et al.*, 2014; JESUS *et al.*, 2019).

Jesus e colaboradores (2019) estudaram, em condições laboratoriais, os efeitos repulsivos da cortina de bolhas isoladamente e combinada com luz estroboscópica (600 flashes/minuto) na espécie *Salmo trutta*, durante os períodos diurno e noturno. Foram observadas diferenças comportamentais nos testes com a cortina de bolhas, sendo observado efeito repulsivo durante o dia e levemente atrativo durante os testes noturnos. Por outro lado, nos testes que utilizaram ambos os estímulos em conjunto (bolhas e luz), a espécie apresentou um comportamento repulsivo superior à cortina de bolhas isoladamente, durante ambos os períodos (diurno e noturno).

Em estudo sobre a eficiência da cortina de bolhas para desviar a migração do salmão do Atlântico, Leander e colaboradores (2021) constataram que em laboratório as bolhas desviaram 95 % dos peixes e em ambientes naturais 90%. Contudo, nesse experimento as bolhas não afetaram a migração no escuro, indicando que pistas visuais são necessárias para a real eficiência desse sistema.

O rio Madeira apresenta elevada turbidez, principalmente em períodos chuvosos, causando grande grau de atenuação da intensidade de luz ao atravessar a água devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos, algas e bactérias, plânctons, entre outros (BARBOSA *et al*, 2018). Dessa forma, a elevada turbidez desse ecossistema impede a passagem de luz, o que pode reduzir a eficiência das bolhas como procedimento repulsivo de ictiofauna.

A efetividade observada na dissuasão da ictiofauna, neste ambiente de elevada turbidez, na UHE Jirau infere considerável potencialidade dessa tecnologia robusta e de baixo custo para proteção da ictiofauna no setor hidrelétrico.

5. CONCLUSÕES

A manobra operativa de dissuasão da ictiofauna utilizando dispersão de ar comprimido ao longo do tubo de sucção agrega estímulos primários de repulsão no interior do tubo de sucção e estímulos de atratividade na região externa do tubo de sucção próxima a superfície. A manobra operacional reduziu em 42% a movimentação da ictiofauna no tubo de sucção, inferindo menor quantidade de peixes confinados, sendo efetiva em todos os tamos de peixes. Dessa forma, a utilização desse procedimento operacional como sistema de dissuasão de ictiofauna no tubo de sucção de unidades geradoras tipo bulbo se mostrou uma estratégia inovadora e eficiente na proteção da ictiofauna.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**, 2022, Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>> Access: jun. 2022

BARBOSA, J.G., GUIMARÃES, J.R.D. AND BRAGA, A.C. Análise da turbidez da água na bacia do rio das Almas, Goiás. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.22, n. 2, p.620 - 628, 2018.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Tópicos de manejo e conservação da ictiofauna para o setor Elétrico**. 1 ed. Belo Horizonte: Cemig, 2015.

DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; ZARA, L. F. Hydraulic flow rate increase maneuver for ichthyofauna repulsion in bulb-type generating units – Jirau Hydroelectric

Power Plant. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 17, n. 4, p. 53 – 63, 2021. <https://doi.org/10.17271/1980082717420213049>

DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S.; ZARA, L. F.; SILVA, L. L. O.; MELO JUNIOR, J. O.; RIBEIRO, F. S. L.; OBARA, M. K. T. Deterring fish by increasing the flow rate in bulb turbines. **The International Journal on Hydropower and Dams**, v. 29, n. 4, p. 62- 65, 2022.

DE 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, n. 4, p. 723 – 730, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400005>

DE QUEIROZ, L. J.; TORRENTE-VILARA, G.; OHARA, W. M.; PIRES, T. H. S.; ZUANON, J.; DORIA, C. R. C. (Org.) **Peixes do rio Madeira - Volume 1**, Santo Antônio Energia, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.santoantonioenergia.com.br/peixes_doriomadeira/ictio1.pdf

DIAS, M. F.; MAROJA, A. M.; GARAVELLI, S. L.; Sistema para repulsão de ictiofauna em hidroelétricas brasileiras. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 16, n. 5, p. 180 – 191, 2020. <https://doi.org/10.17271/1980082716520202657>

ESBR - Energia Sustentável do Brasil. 2022. Available in: < <https://www.esbr.com.br/empresa#a-usina- hidreletrica-jirau> >. Access: jun. 2022

FEARNSIDE, P. M. 2013. Viewpoint-decision making on amazon dams: Politics trumps uncertainty in the madeira river sediments controversy. **Water Alternatives**, v. 6, n. 2, p 313 – 325, 2013.

FIGUEIREDO, W. S.; DA SILVA, T. M.; ZARA, L. F. Promising chemical barrier substance applied to ichthyofauna in hydroelectric plants. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 17, n. 4, p. 43 – 51, 2021. <https://doi.org/10.17271/1980082717420213048>

FIGUEIREDO, W. S.; DA SILVA, T. M.; Respostas comportamentais de peixes expostos à hipoxantina-3-n-óxido e perspectivas de aplicabilidade no setor hidrelétrico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 10, p. 43-52, 2022. <https://orcid.org/0000-0002-4144-4949>

HILSDORF, A. W. S.; MOREIRA, R. G. **Piracema, por que os peixes migram?** Scientific American Brasil, p. 76-80, 2008. Disponível em: <https://www.umc.br/artigoscientificos/art-cient-0089.pdf>

JESUS, J.; AMORIM, M. C. P.; FONSECA, P. J.; TEIXEIRA, A.; NATÁRIO, S.; CARROLA, J.; VARANDAS, S.; PEREIRA, L. T.; CORTES, R. M. V. Acoustic barriers as an acoustic deterrent for native potamodromous migratory fish species. **Journal of Fish Biology**, v. 95, p. 247 – 25, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfb.13769>

LEANDER, J.; KLAMINDER, J.; HELLSTRÖM, G.; JONSSON, M. Bubble barriers to guide downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*): An evaluation using

acoustic telemetry. **Ecological Engineering**, v. 160, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106141>

MENDES, C. A. B.; BELUCO, A.; CANALES, F. A. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. **Energy**, v. 141, n. 15, p. 123–138, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.071>

MORETTO, E. M.; GOMES, C. S.; ROQUETTI, D. R.; JORDÃO, C. O. Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: A antiga e atual fronteira amazônica. **Ambiente & Sociedade**, v. 15, n. 3, p. 141–164, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2012000300009>

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, n. 2, p. 192 – 203, 2014. <https://doi.org/10.1002/rra.2628>

SANTANA, M. L. E.; DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO, W. S; ZARA, L. F. Diversidade taxonômica e funcional da ictiofauna confinada durante parada de unidade geradora em hidrelétrica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 8, 2022.

SCHILT, C. R. Developing fish passage and protection at hydropower dams. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 104, n. 3-4, p. 295 – 325, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.09.004>

ZIELINSKI, D. P.; VOLLER, V. R.; SVENDSEN, J. C.; HONDZO, M.; MENSINGER, A. F.; SORENSEN, P. Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp. **Ecological Engineering**, v. 67, p. 95 – 103, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.003>

CAPÍTULO 3

Este capítulo aborda a paisagem sonora aérea e subaquática no entorno da Usina Hidrelétrica Jirau. Portanto, apresenta o artigo intitulado "*Sound landscape surrounding the Jirau Hydroelectric Power Plant, Rondônia, Brazil*", o qual foi submetido ao periódico *Applied Acoustics* (ISSN 0003-682X), 2023.

PAISAGEM SONORA NO ENTORNO DA USINA HIDRELÉTRICA JIRAU, RONDÔNIA, BRASIL

RESUMO

A energia hidrelétrica é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, sendo a principal fonte na matriz energética brasileira. A expansão do setor hidroelétrico para região Amazônica, demanda a avaliação dos impactos ambientais provocados por este tipo de empreendimento. O objetivo deste estudo foi caracterizar e avaliar os sons presentes nas vizinhanças da Usina Hidrelétrica de Jirau através da avaliação e caracterização dos níveis de pressão sonora no ambiente aéreo e no ambiente subaquático. A gravação do sinal permitiu a análise dos espectros de frequência, além da análise dos níveis de pressão sonora ao longo do tempo. Os resultados do estudo indicaram que o ruído aéreo na área efetiva da Usina não superou o limite de 70 dB em nenhum dos pontos avaliados, este é o valor máximo indicado pela legislação brasileira para uma área industrial. Na área entre a área da usina e a floresta, os níveis de pressão sonora variaram entre 30 e 50 dB, sendo o som ambiente característico de baixas frequências pontuadas por vocalizações de pássaros. Como conclusão principal tem-se que a interferência dos sons gerados pela usina na paisagem sonora da região ocorre somente nas áreas muito próximas a ela, ou seja, pouco impacto ambiental.

Palavras-chave: Barreira sonora; Peixes amazônicos; Turbinas; Ruído subaquático.

1. INTRODUÇÃO

O ruído ambiental é um poluente que afeta a saúde, o bem-estar dos cidadãos e a vida selvagem no ambiente terrestre e no ambiente subaquático. As atividades humanas dentro e ao redor de sistemas hídricos, tais como portos, fábricas, pontos de captação de água e Usinas Hidrelétricas (UHE), são fontes geradoras não apenas de ruído ambiental aéreo, mas também do ruído ambiental subaquático. O transporte marítimo e fluvial é a principal fonte geradora do ruído subaquático nas rotas de barcos e navios e suas vizinhanças (EEA, 2020).

A propagação do som no ambiente subaquático difere da propagação no ar, pois a mudança de meio afeta tanto a velocidade como a propagação e dispersão da onda sonora, existindo também outras variáveis como a pressão. A grandeza acústica mais utilizada para representar a intensidade do som no ambiente aquático é o Nível de Pressão Sonora (NPS), pois a pressão sonora é o estímulo físico que melhor se relaciona com a sensação de som (FINFER *et al.*, 2008)

No ambiente subaquático são utilizados termos específicos que informam a origem dos sons produzidos, o termo antropofonia é utilizado para retratar os sons produzidos pelo homem, biofonia retrata os sons devido a atividade biológica, incluindo as vocalizações dos animais, e a geofonia se refere aos sons gerados por eventos geofísicos e meteorológicos, como o ruído provocado pela ação do vento soprando sobre a superfície da água e a chuva 0

Não existe a percepção que o ambiente subaquático de rios e oceanos é bastante ruidoso, contudo, especialmente em áreas com águas rasas, onde existe uma maior população de peixes e outros animais marinhos, a detecção da vocalização de peixes é frequente, especialmente na época da desova (VIEIRA *et al.*, 2021)0. Nestes ambientes a poluição sonora tem o potencial de afetar a ictiofauna, acarretando mudanças na sua distribuição espacial e no comportamento, provocando estresse, perda auditiva temporária e danos ao sistema auditivo (EEA, 2020). As respostas comportamentais são complexas e específicas 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 energia hidrelétrica é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, sendo a principal fonte na matriz energética brasileira, ao contrário da matriz energética mundial, onde em média mais de 60% da energia vem dos combustíveis fósseis. A região Amazônica apresenta o maior potencial hidroelétrico disponível, sendo, na última década, uma área de expansão do setor hidroelétrico brasileiro com a construção do complexo do rio Madeira (UHE Jirau e Santo Antônio) e UHE Belo Monte 0EPE, 2021). Seguindo as premissas do desenvolvimento sustentável, é importante conhecer o ambiente sonoro e mensurar o impacto ambiental acústico aéreo e subaquático nas vizinhanças deste tipo de empreendimento na Amazônia, a maior floresta tropical do mundo.

O rio Madeira apresenta elevada turbidez, principalmente em períodos chuvosos, devido a presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) (BARBOSA *et al.*, 2018). A movimentação de partículas de pressão acústica pode influenciar a resposta do peixe ao som, sendo que esse movimento das partículas é acentuado quando próximo de uma fonte sonora (KNUDSEN *et al.*, 1997). Estudos específicos de inventário da ictiofauna na bacia do rio Madeira em território brasileiro, registraram uma ictiofauna composta por cerca de 920 espécies (TORRENTE-VILARA *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2009; FARIAS *et al.*, 2010; TORRENTE-VILARA *et al.*, 2011; OHARA *et al.*, 2013).

Neste trabalho os espectros de frequência e níveis pressão sonora (NPS) aéreos e subaquáticos foram utilizados na caracterização da paisagem sonora no entorno da Usina Hidrelétrica (UHE) de Jirau, a qual é composta por 50 unidades geradoras do tipo bulbo, e está localizada no rio Madeira – Rondônia.

2. METODOLOGIA

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica Jirau (UHE Jirau) possui capacidade instalada de 3.750 MW, sendo a quarta maior geradora de energia elétrica do Brasil (**Figura 3.1**). A usina conta com 50 unidades geradoras tipo bulbo em operação desde setembro de 2013, distribuídas em duas casas de força (CF1 e CF2), com descarga nominal de $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e garantia física de 2.211,6 MW. No eixo da calha do rio Madeira possui o vertedouro com 18 vãos, equipados com comportas seguimento (ESBR, 2022).



Figura 3.1 - Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau, no rio Madeira, Rondônia.
Fonte: Google Earth.

2.2. MEDIDAS AMBIENTAIS AÉRIAS E SUBAQUÁTICAS

As medidas acústicas foram feitas no período hidrológico de seca do rio Madeira (setembro a novembro/2021) sendo característico da fase operativa com menor quantidade de unidades geradoras em operação, e no período hidrológico de cheia (março a maio/2022), com operação plena das unidades da UHE Jirau.

Na medida do ruído aéreo foram selecionados pontos de forma a abranger distâncias de 1,0 km do centro das barragens. Os pontos foram localizados próximos às principais estruturas e no limite da área florestal que circunda a UHE Jirau, e georreferenciados com a utilização de um GPS. Para as medidas foi utilizado o sonômetro tipo 1, modelo Fusion da 01 dB. O aparelho foi configurado de modo a realizar as medidas dos parâmetros acústicos: L_{Aeq} , L_{min} e $L_{máx}$ (valores mínimo e máximo do nível sonoro) bem como os índices estatísticos L_{10} e L_{90} , que correspondem ao nível sonoro que foi excedido em 10 % e 90 % do tempo de medição, respectivamente. Também foi selecionada a opção de aquisição do espectro em 1/3 de oitavas e a de gravação do sinal referente ao som ambiental, que permite a avaliação posterior do espectro de frequências de forma detalhada. Em cada medida, realizada em dias de sol e sem ventanias, o aparelho foi posicionado de modo que o

microfone ficasse a uma altura de 1,5 m em relação ao solo e distante de superfícies refletoras, sendo o tempo de medida de 3 e 5 minutos.

As medidas dos níveis de pressão subaquático foram realizadas na vizinhança da barragem, os pontos foram georreferenciados com o auxílio de um GPS. Foi utilizado o sistema de monitoramento de ruído e análise espectral modelo C75-200-SP (*Cetacean Research Technology*), composto pelo hidrofone omnidirecional de banda ultra larga C75, com a interface de computador USB calibrada SpectraDAQ-200 e pelo *software* de análise espectral SpectraPLUS-SC. A interface ligada a um computador através de um cabo SCSI coletou os dados por meio do *software* Spectra Plus-SC.

Os dados coletados permitiram a avaliação de L_{eq} , bem como a análise espectral. O tempo de cada medida foi de 1 a 15 minutos e a profundidade de 5 m. Nas medições foram observadas a distância segura em relação a barragem, pois as turbinas encontravam-se em funcionamento. Foi utilizado um sonar para a verificação da presença da ictiofauna na área de estudo.

3. RESULTADOS

Os pontos de medição do ruído aéreo abrangem todas as estruturas civis (casas de força - CF1 e CF2, sistema de transposição de peixes - STP, vertedouro e edifício comando/administração) no eixo do barramento da UHE Jirau, delimitado pela floresta nativa nas margens esquerda e direita do rio Madeira. A **Figura 3.2**, mostra a distribuição dos pontos de medição e seus respectivos NPS aéreos durante as distintas fases operativas da UHE Jirau.

Os resultados da avaliação do ruído ambiental indicam que os impactos acústicos na área externa à usina, estão abaixo do limite estabelecido pela legislação ambiental de 70 dB, nos distintos períodos hidrológicos do rio Madeira e, conseqüentemente, diferentes fases operativas da UHE Jirau. O ruído antropogênico, tem seu valor ampliado pela movimentação de veículos sobre o eixo do barramento, sendo observado os valores máximos de NPS (até 66 dB) nas regiões das casas de força e vertedouro, com predominância de baixas frequências.

Nos limites das interfaces do empreendimento com a floresta que circunda a UHE Jirau, os NPS variaram entre 30 e 50 dB, sendo os espectrogramas do som dominados pelo farfalhar das folhas das árvores e a vocalização de pássaros. Nas

margens do rio Madeira a jusante e a montante do eixo do barramento o som ambiente é dominado por baixas frequências (menores que 1 kHz), características da água corrente do rio e do vento.

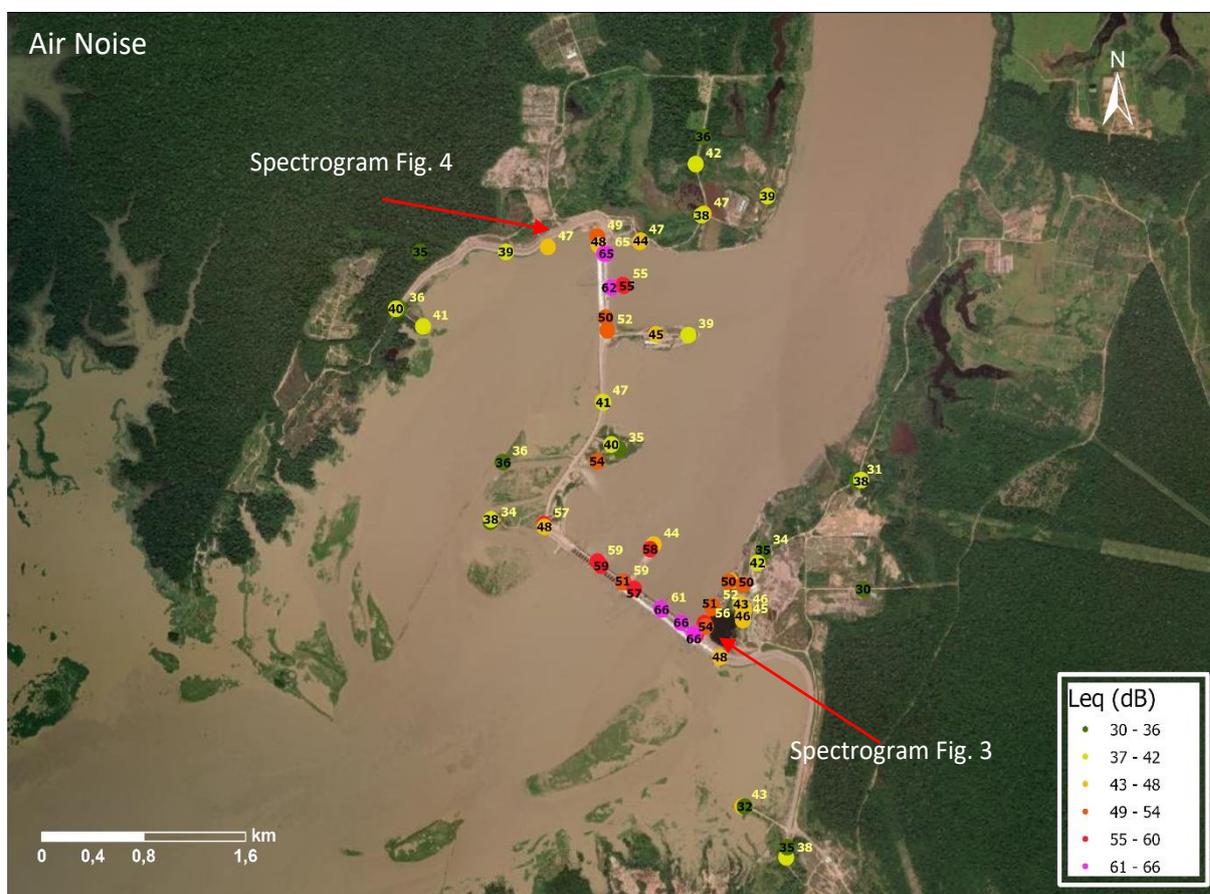


Figura 3.2 – Distribuição das medidas de ruído aéreo ao longo do eixo do barramento da UHE Jirau, no período hidrológico de seca (setembro a novembro/2021 - L_{eq} em preto no centro) e cheia (março a maio/2022 - L_{eq} em amarelo deslocado do centro) do rio Madeira.

O espectrograma do ruído aéreo (**Figura 3.3**) obtido na margem direita do rio Madeira a jusante da casa de força – CF1, mostra NPS de 54 dB no período hidrológico de seca de 2021 (baixo número de unidades geradoras em operação), sendo semelhante ao espectrograma obtido na margem esquerda do rio Madeira a montante da casa de força – CF2, com NPS de 47 dB no período hidrológico de cheia de 2022 (elevado número de unidades geradoras em operação). O som dominante é o de baixa frequência, sendo possível inferir a vocalização de pássaros em alta frequência. A avaliação do espectro e a audição do som gravado mostra que a vocalização de pássaros é intensa, pois as medidas foram realizadas em horário próximo ao final da tarde.

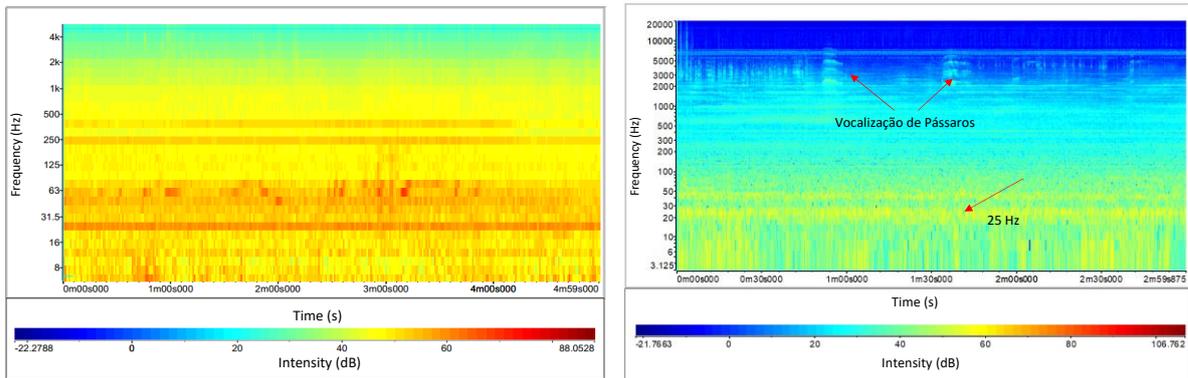


Figura 3.3 – Espectrogramas típicos dos ruídos aéreos nas margens direita (a) e esquerda (b) do rio Madeira próximo a casa de força da UHE Jirau. Obs: escala de frequências em bandas de 1/3 de oitava no espectro na margem direita; escala de frequências linear no espectro na margem esquerda; setas na parte superior indicam o som de alta frequência proveniente da vocalização de pássaros; seta na parte inferior da imagem indica o som de baixa frequência. Fonte: Autores.

Os espectrogramas dos ruídos aéreos das margens direita e esquerda do rio Madeira próxima as casas de força da UHE Jirau, mostram uma linha forte na banda de 25 Hz, a qual também foi observado nos espectros dos ruídos subaquáticos (**Figura 3.5(a)**) estando possivelmente relacionado a operação das unidades geradoras da UHE Jirau.

Os pontos de medição de ruído subaquático contemplam todas as estruturas civis da UHE Jirau, delimitada pela floresta nativa nas margens esquerda e direita do rio Madeira. A **Figura 3.4**, mostra a distribuição dos pontos de medição e suas respectivos NPS subaquáticos durante as distintas fases operativas da UHE Jirau.

No ambiente subaquático próxima a UHE Jirau, nos dois períodos hidrológicos do rio Madeira (seca/2021 e cheia/2022), foram verificadas diferenças maiores que 30 dB re:1 μ Pa entre os valores medidos nas proximidades do eixo do barramento quando comparado aos níveis na calha do rio Madeira, em pontos distantes da UHE Jirau. Na região subaquática a jusante das casas de força os NPS são elevados, atingindo valores superiores a 150 dB re:1 μ Pa no canal de fuga das unidades geradoras, sendo observado NPS no patamar de 132 dB re:1 μ Pa a distâncias de 1.500 m em relação ao eixo do barramento da UHE Jirau.

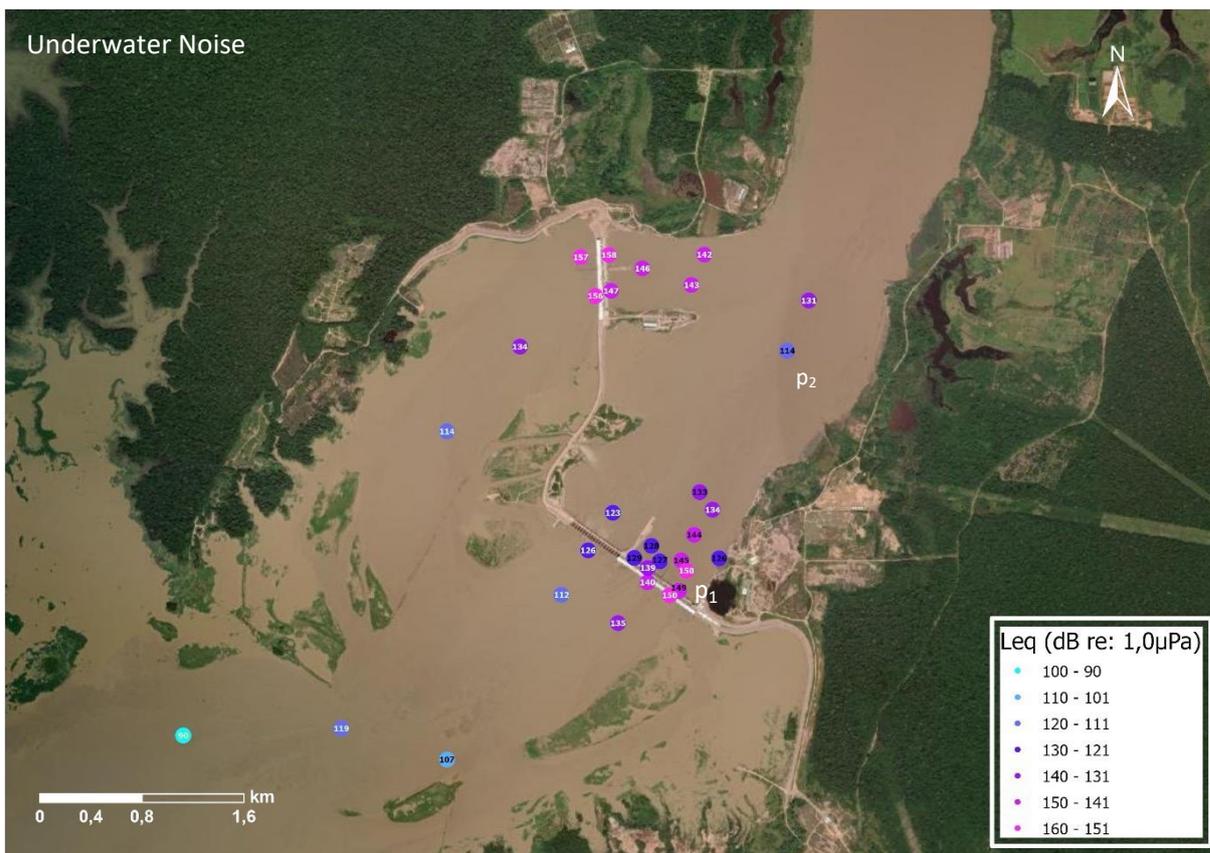


Figura 3.4 – Distribuição das medidas de ruídos subaquáticos na UHE Jirau, no período hidrológico de seca (setembro a novembro/2021 - Leq em preto no centro) e cheia (março a maio/2022 - Leq em branco) do rio Madeira. Obs: p1 e p2 – pontos dos espectros de ruído subaquático.

Os espectros do ruído subaquático obtidos em dois pontos a jusante da casa de força – CF1, sendo o primeiro ponto (p1) no canal de fuga das unidades geradoras e segundo ponto (p2) a cerca de 2,0 km da CF1, na calha do rio, apresentam características distintas (**Figura 3.4**). No espectro da região do canal de fuga predominam baixas e médias frequências, enquanto na calha do rio predomina apenas as baixas frequências. O espectro sonoro subaquático no canal de fuga da CF1 (**Figura 3.5(a)**) caracteriza o som emitido pelas unidades geradoras, sendo um tom forte de baixa frequência seguido de um patamar na faixa próxima a 1.000 Hz, enquanto na calha do rio Madeira (**Figura 3.5(b)**) o som é caracterizado pelo ruído de origem geofonia, de baixa frequência.

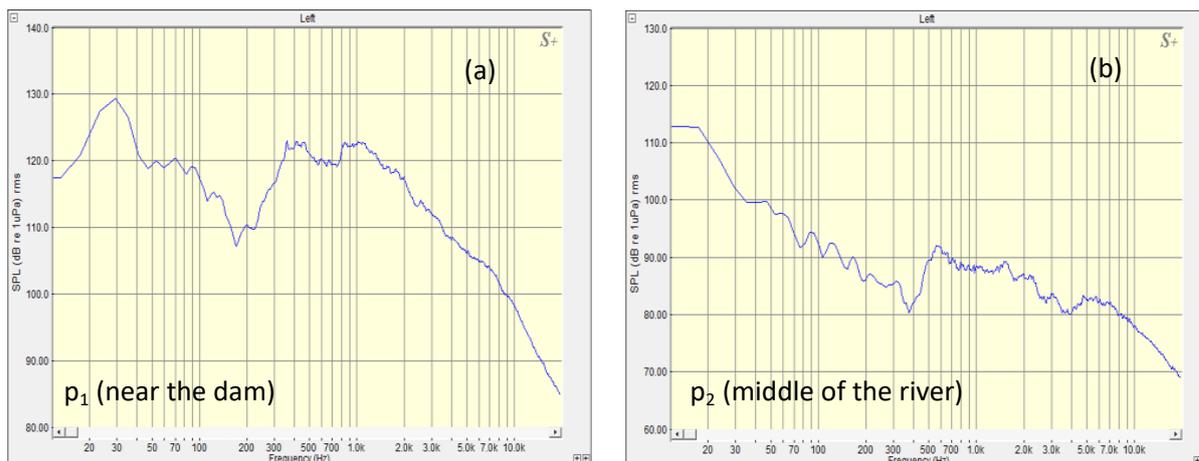


Figura 3.5 – Espectro do ruído subaquático no canal de fuga da casa de força – CF1 (a) e na calha do rio Madeira (b) a jusante da UHE Jirau.

Fonte: Autores.

4. DICUSSÕES

O parâmetro L_{Aeq} (nível de pressão sonora equivalente) foi selecionado para quantificar a paisagem sonora no entorno da UHE Jirau, e é definido como sendo o nível sonoro estacionário, que se ocorresse durante o intervalo de registro, geraria a mesma energia sonora produzida pelos eventos sonoros registrados (BISTAFA, 2018). Os níveis de referência para medidas no ambiente aéreo e subaquático são diferentes, assim não é possível uma comparação direta entre os valores medidos em cada caso (FINFER *et al.*, 2008). A medida do NPS aéreo na laje de jusante da casa de força da UHE Jirau é representada por 65 dB, enquanto que na região do canal de fuga (jusante da casa de força) o ruído subaquático é representado como 150 dB re:1 μ Pa, ou seja, apenas nas medidas do som subaquático é destacado o nível de referência.

A norma ABNT NBR 10151 (2020): Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas de uso geral, foi utilizada como referência para avaliação do ruído ambiental aéreo, sendo preconizado os limites de NPS conforme o tipo de área habitada e o período. No caso da UHE Jirau, área predominantemente industrial, o limite para o período diurno estabelecido pela norma é de 70 dB.

Finfer e colaboradores (2008) destacam que a diferença entre o som aéreo e o som subaquático pode ser explicada pela aplicação de um fator de comparação de 61,5 dB, que compensa as diferentes impedâncias acústicas e convenções de nível de referência de dB, que caracterizam a acústica no ar e na água. No caso do ruído subaquático não existe uma norma específica na legislação brasileira, portanto foi

estipulado o limite para o NPS subaquático como ~132 dB re:1 μ Pa (SLABBEKOORN *et al.*, 2010; FINFER *et al.*, 2008), sendo compatível com os valores estabelecidos para proximidades de navios pelo *International Council for the Exploration of the Sea* (ICES), para que o ruído irradiado pela embarcação cause comportamento de evasão de peixes sensíveis a distâncias superiores a 20 m da embarcação (WOOD, 2011).

Os impactos do ruído ambiental para fauna terrestres, de forma geral, são dependentes da frequência e do tipo de ruído, os efeitos adversos podem aparecer a partir de NPS tão baixos como 40 dB(A) (POPPER *et al.*, 2020). Portanto no limite da floresta, distante das fontes de ruído industrial, é desejável que os NPS sejam menores que 40 dB.

No período hidrológico de cheia de 2022 (elevado número de unidades geradoras em operação) os valores medidos para os NPS aéreo variam de poucas unidades em relação aos medidos no período hidrológico de seca de 2021 (baixo número de unidades geradoras em operação). Na região da casa de força – CF1 (margem direita) os valores de NPS pouco acima de 50 dB são explicados pelo trânsito de veículos próximo ao edifício comando/administração da UHE Jirau. Portanto, não foram observadas diferenças significativas entre os NPS obtidos nas duas etapas de medida (seca de 2021 e cheia de 2022), mesmo com a diferença no número de unidades geradoras em operação. O ruído ambiental aéreo das unidades geradoras do tipo bulbo é contido com eficiência pela estrutura civil das casas de força da UHE Jirau, conduzindo a ambiente sonoro compatível com uma área industrial. A avaliação da paisagem sonora aérea não indica potencial de atingir negativamente de forma contínua o ambiente sonoro das interfaces do empreendimento com a floresta que circunda a UHE Jirau.

No ambiente subaquático, o ruído é intenso no canal de fuga próximo ao desemboque do tubo de sucção das unidades geradoras (cerca de 30 m do paramento), ao contrário do aéreo onde a maior parte do maquinário pesado está confinado nas casas de força e não produz efeitos significativos para o ruído ambiental. Entretanto, este efeito é diminuindo gradativamente quando se afasta do eixo do barramento da UHE. A montante, no ponto de medida mais distante, a 4 km de distância da usina, o NPS é de 90 dB e o espectro é semelhante ao mostrado na **Figura 3.5(b)**.

Outro ponto, está associado as baixas frequências observadas nos espectros dos ruídos subaquáticos, estando fora da provável faixa audível de média e altas frequências da maioria das espécies de peixe do rio Madeira. Dias e colaboradores (2020), analisaram os relatórios do Programa de Conservação da Ictiofauna (PCI) da UHE Jirau ao longo de 10 anos (março/2009 a abril/2019) e constataram que mais de 500 espécies de peixes foram identificadas nas cercanias da UHE Jirau. Os resultados obtidos a partir da comparação com dados de estudos realizados em outros países, levando em conta a ordem/família de peixes equivalentes, indicaram que a fonte sonora para produção da barreira acústica adequada à repulsão da ictiofauna do rio Madeira deve ter intensidade de pelo menos 161 dB (re:1 μ Pa) e ser capaz de reproduzir tanto baixas como médias frequências no intervalo de 100 a 5000 Hz (LADICH & FAY, 2013). Fato é que conhecer a paisagem sonora no entorno da área de interesse é crucial para o desenvolvimento de métodos de repulsão de ictiofauna baseados na emissão de ruídos sonoros, tendo em vista que paisagem sonora ambiental existente impacta diretamente na capacidade dos peixes detectarem sons (POOPER *et al.*, 2020).

5. CONCLUSÕES

A sustentabilidade do setor hidrelétrico requer o contínuo desenvolvimento de novas tecnologias e informações aplicadas a proteção à ictiofauna, minimizando os possíveis impactos ambientais em áreas de influência direta das hidrelétricas.

A avaliação da paisagem sonora aérea da UHE Jirau, a qual conta com 50 unidades geradoras tipo bulbo distribuídas em duas casas de força (CF1 e CF2), não indica potencial de atingir negativamente as áreas de fronteira com a floresta amazônica, sendo a paisagem sonora nesta interface dominada pelo farfalhar das folhas das árvores e a vocalização de pássaros.

A entrada em operação das unidades geradoras do tipo bulbo altera a paisagem sonora subaquática somente em uma área próxima ao empreendimento, estima-se o retorno ao nível basal do rio Madeira a cerca de 5 km da fonte emissora. Associado a este fato, as baixas frequências observadas nos espectros estão fora da provável faixa audível da maioria das espécies de peixe do rio Madeira, minimizando os impactos negativos para a ictiofauna.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, T.R.; CELLA-RIBEIRO, A.; DORIA, C.R.C. & TORRENTA-VILARA, G. Composição e estrutura trófica da ictiofauna de um igarapé a jusante da cachoeira de Santo Antônio no rio Madeira. **Biota Neotropica**, v. 9, n. 3, p. 21-29, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.151: Acústica — Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas de uso geral**. Rio de Janeiro, 2000.

BARBOSA, J.G., GUIMARÃES, J.R.D. AND BRAGA, A.C. Análise da turbidez da água na bacia do rio das Almas, Goiás. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.22, n. 2, p.620 - 628, 2018.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Editora Blucher, 2018. 9788521212843. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521212843/>> Acesso em: 13 Jul 2022.

DIAS, M. F.; MAROJA, A. M. E GARAVELLI, S. L. Sistema para repulsão de ictiofauna em hidroelétricas brasileiras. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 16, n. 5, p. 180-191, 2020. <https://doi.org/10.17271/1980082716520202657>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2021. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico168/Anuario_2021.pdf>

EEA - European Environmental Agency, 2020. **Noise in Europe 2020**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>>

ESBR - Energia Sustentável do Brasil. 2022. Available in: <<https://www.esbr.com.br/empresa#a-usina-hidreletrica-jirau>>. Access: jun. 2022

FARIAS, I. P., TORRICO, J. P., GARCÍA-DÁVILA, C., SANTOS, M. C. F, HRBEK, T. & RENNO, J. F. 2010. Are rapids a barrier for floodplain fishes of the Amazon basin? A demographic study of the keystone floodplain species *Colossoma macropomum* (Teleostei: Characiformes). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 56, n. 3, p. 1129 – 1135, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2010.03.028>

FINFER, D.C.; LEIGHTON, T.G.; WHITE, P.R. Issues relating to the use of a 61.5dB conversion factor when comparing airborne and underwater anthropogenic noise levels, **Applied Acoustics**, v. 69, n. 5, p. 464-471, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.008>.

KNUDSEN, F. R.; SCHRECK, C. B.; KNAPP, S. M.; ENGER, P. S.; SAND, O. Infrasound produces flight and avoidance responses in Pacific juvenile salmonids. **Journal of Fish Biology**, v.51, n. 4, p. 824 – 829, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1997.tb02002.x>

LADICH, F.; FAY, R. R. Auditory evoked potential audiometry in fish. **Rev Fish Biology Fisheries**, v. 23, n.3, p. 317–364, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11160-012-9297-z>

OHARA, W. M.; DE QUEIROZ, L. J.; ZUANON, J.; TORRENTE-VILARA, G.; VIEIRA, F. G.; PIRES, T.; DORIA, C. R. C. O rio com a maior diversidade de peixes do mundo. In: XX Encontro Brasileiro de Ictiologia. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2013.

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, n. 2, p. 192 – 203, 2014. <https://doi.org/10.1002/rra.2628>

POPPER, A. N.; HAWKINS, A. D.; JACOBS, F.; JACOBSON, P. T.; JOHNSON, P.; KREBS, J. Use of sound to guide the movement of eels and other fishes within rivers: a critical review. **Rev Fish Biol Fisheries**, v.30, p.605–622, (2020). <https://doi.org/10.1007/s11160-020-09620-0>

SLABBEKOORN, H.; BOUTON, N.; OPZEELAND, I.; COERS, A.; CATE, C.; POPPER, A. N. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 25, n. 7, p. 419–427, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005>

TORRENTE-VILARA, G.; ZUANON, J.; AMADIO, S. A.; DORIA, C. R. C. Biological and ecological characteristics of *Roesthesmolossus* (Cynodontidae), a night hunting characiform fish from upper Madeira River, Brazil. **Ichthyological Exploration of Freshwaters**, v.19, n. 2, p. 103 – 110, 2008.

TORRENTE-VILARA, G.; ZUANON, J.; LEPRIEUR, F.; OBERDORFF, T.; TEDESCO, P. A. Effect of natural rapids and waterfalls on fish assemblage structure in the Madeira River (Amazon Basin). **Ecology of Freshwater Fish**, v. 20, n. 4, p. 588 – 597, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2011.00508.x>

VIEIRA, M.; FONSECA, P. J. AMORIM, M. C. P. Fish sounds and boat noise are prominent soundscape contributors in an urban European estuary. **Marine Pollution Bulletin**, v. 172, p. 112845, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112845>.

WOOD, B. R. (Dick). Fish reaction to tonal vessel noise – Comparison with ICES CRR 209 methodology. **Applied Acoustics**, v. 72, n.7, p. 399–411, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.12.002>

CAPÍTULO 4

Este capítulo aborda a viabilidade da estratégia de barreira acústica em ambiente aquático com elevada turbidez para proteção da ictiofauna. Portanto, é apresentado o artigo, intitulado "*Reação da ictiofauna da região amazônica a impulsos sonoros*", foi apresentado no **XII Congresso Iberoamericano de Acústica e XXIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC**, 2022, e aceito para publicação no periódico **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research** (ISSN 2595-573X), 2023.

REAÇÃO DA ICTIOFAUNA DA REGIÃO AMAZÔNICA A DIFERENTES IMPULSOS SONOROS

RESUMO

Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D - 06631-0009/2019), que tem como objetivo desenvolver e validar estratégias tecnológicas integrando sistemas físico-químicos para a repulsão da ictiofauna do tubo de sucção durante o desligamento das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica Jirau, localizada no rio Madeira, estado de Rondônia, Brasil. Uma das estratégias é a barreira acústica, que está sendo desenvolvida de forma a atender as particularidades das espécies de peixes amazônicos da área de estudo. A barreira irá evitar e/ou minimizar a entrada de peixes nos tubos de sucção durante paradas e retomadas das turbinas. Na primeira etapa, foram identificados parâmetros acústicos: limiar auditivo e faixa de frequência de audição dos peixes mais comuns capturados na Usina. Na segunda etapa foram realizadas simulações computacionais que definiram a configuração e a potência da fonte sonora necessária para a barreira. Na terceira etapa foi realizada a caracterização dos sons aéreos e subaquáticos nas imediações da Usina. Nesta etapa foram realizados testes *in situ* utilizando o arranjo simulado com a fonte sonora da Lubell LL916 e o hidrofone C75 da Cetacean Research, testando a eficiência de 4 diferentes configurações de ruído: rosa; trovão; tiro e com componentes tonais bem definidos. Os testes foram realizados no vertedouro da Usina hidrelétrica Jirau, onde foram monitoradas a movimentação de peixes antes e durante o acionamento da fonte sonora. Os resultados indicaram que todos os diferentes tipos de sons têm potencial de aumentar a movimentação dos peixes, entretanto com desempenhos diferentes. O som gerado com componentes tonais aumentou em 57% a movimentação, o ruído de trovão em 43%, o ruído de tiro em 37% e o ruído rosa em 29%. Esses resultados são promissores e serão aplicados em testes nos tubos de sucção na próxima etapa do estudo.

Palavras-chave: barreira sonora, peixes amazônicos, turbinas, hidrelétrica, ruído subaquático

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil vem apresentando significativos avanços na produção de energia eólica e solar. Apesar disso, a energia hidráulica, proveniente das usinas hidrelétricas, ainda representa uma parcela relevante da matriz elétrica brasileira, correspondendo a cerca de 65% (ANEEL, 2020). Embora seja considerada uma fonte de energia limpa e renovável (BONDARIK, 2018), a operação desses empreendimentos pode gerar impactos ambientais significativos, tais como alterações nos cursos d'água e na fauna aquática local (CEMIG, 2015).

Impactos adversos nas populações de peixes tais como mudanças na distribuição espacial e no comportamento, estresse, perda temporária da audição e outros danos ao sistema auditivo, decorrentes da operação e manutenção de usinas hidrelétricas são relatados na literatura (REIS *et al.*, 2016; EEA, 2020). No caso desses empreendimentos, um grande desafio ambiental é manter a funcionalidade do contínuo fluvial, permitindo o trânsito de peixes entre as áreas alteradas pelo barramento no rio (DE QUEIROZ *et al.*, 2013).

Para preservar rotas migratórias de peixes e minimizar possíveis impactos, usinas hidrelétricas têm adotado sistemas de transposição de peixes e estudado alternativas de repulsão para evitar o acúmulo de espécimes no sopé das barragens, o que podem resultar em mortandades em turbinas e vertedouros, em especial durante manutenções programadas ou intempestivas (CEMIG, 2015).

Diversas estratégias têm sido desenvolvidas com o objetivo de repelir peixes, e estudos recentes demonstram que a utilização de barreiras acústicas pode ser uma técnica altamente eficaz no setor hidrelétrico. As barreiras acústicas têm sido aplicadas para evitar que peixes entrem em tubos de sucção de usinas hidrelétricas e fábricas, além de orientá-los para rotas seguras, minimizando potenciais danos à ictiofauna (JESUS *et al.*, 2019).

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D ANEEL-06631-0009/2019) cujo objetivo é criar e validar estratégias tecnológicas que integrem sistemas físico-químicos para repelir a ictiofauna do tubo de sucção durante o desligamento das unidades geradoras em usinas hidrelétricas. Uma dessas estratégias é a barreira acústica, que está sendo desenvolvida para atender às particularidades das espécies de peixes amazônicos presentes na área de estudo.

Nessa perspectiva, este trabalho apresenta os resultados da quarta etapa do desenvolvimento da barreira acústica. Foram realizados testes *in situ* com uma fonte acústica subaquática e um hidrofone para verificar a eficiência de quatro configurações de ruído diferentes. Os resultados apresentados são preliminares, mas fornecem uma avaliação inicial satisfatória da efetividade de cada tipo de ruído utilizado.

A seleção e desenvolvimento dos ruídos utilizados neste trabalho foram baseados nos resultados obtidos nas etapas anteriores do desenvolvimento da barreira acústica. Na primeira etapa, foi feito um levantamento das espécies detectadas nos tubos de sucção da Usina Hidrelétrica (UHE) Jirau nos últimos anos e comparado com dados de estudos em outros países, considerando a ordem/família de peixes equivalentes, uma vez que os dados específicos para peixes amazônicos não estão disponíveis. Os resultados indicam que a fonte sonora para produção da barreira acústica adequada à ictiofauna do rio Madeira deve ter intensidade de pelo menos 161 dB (re 1 μ Pa) e ser capaz de reproduzir tanto baixas como médias frequências, no intervalo de 100 a 5.000 Hz, faixa audível das espécies detectadas na usina (DIAS et al., 2020).

Na segunda etapa do projeto, foram realizadas simulações computacionais para definir a configuração e a potência da fonte sonora necessária para a construção da barreira acústica. Como resultado, foi verificado que, em princípio, uma única fonte sonora subaquática de alta potência (180 dB re 1 μ Pa) seria suficiente para produzir a barreira acústica.

Na terceira etapa, foi realizada a caracterização dos sons aéreos e subaquáticos nas proximidades da UHE Jirau. Os resultados indicam que os ruídos ambientais aéreos (NPS) na área externa da usina e na área de floresta circundante estão dentro dos valores estabelecidos pelas normas vigentes. O espectro sonoro não apresenta sons tonais, mesmo nas medições realizadas em pontos próximos às unidades geradoras. Os níveis sonoros variam de 65 dB nas proximidades da casa de força, onde há fluxo de veículos, a valores próximos a 40 dB na área de floresta que circunda a usina. Adicionalmente, verificou-se que o ruído subaquático gerado pelas unidades geradoras da usina hidrelétrica tem um impacto limitado em sua área de influência imediata, com a paisagem sonora subaquática retornando ao seu nível basal a cerca de 5 km de distância da fonte emissora.

2. METODOLOGIA

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a UHE Jirau, quarta maior hidrelétrica em geração de energia instalada no Brasil, com 50 unidades geradoras (UG) do tipo bulbo, resultando na potência instalada de 3.750 MW. A Usina foi implementada em 2010 no rio Madeira, a 120 km de Porto Velho, no estado de Rondônia, estando em operação desde setembro de 2013. A área inundada varia ao longo do ano (21,0 km² a 207,7 km²), a depender dos ciclos hidrológicos da região, contudo a área do reservatório é de 361,6 km² (DIAS *et al.*, 2020).

A Usina Hidrelétrica de Jirau é composta por 50 unidades geradoras distribuídas em duas casas de força: uma localizada na margem direita, compreendendo as unidades geradoras de UG01 a UG28, e outra localizada na margem esquerda, compreendendo as unidades geradoras de UG29 a UG50. Entre as duas casas de força, encontra-se o vertedouro, que é composto por 18 vãos (ESBR, 2021). A **Figura 4.1** ilustra a casa de força da margem direita, bem como o vertedouro.



Figura 4.1 – Estrutura das áreas de estudo da UHE Jirau (Fonte: Google Earth) com destaque da (a) Vista vão 18 do vertedouro, com comporta fechada a montante, impedindo o fluxo de água através da abertura a jusante (Fonte: Autores), e da (b) Vista frontal dos tubos de sucção (Fonte: ESBR, 2021).

No processo de seleção do local para o teste piloto, foram utilizados critérios de segurança, semelhança com os tubos de sucção das unidades geradoras em

relação às dimensões, e a presença de peixes. Dessa forma, o local escolhido foi o vão 18 do vertedouro da usina. As medidas foram realizadas durante o período hidrológico de seca, quando o vertedouro permanece a maior parte do tempo fechado a montante. Os vãos do vertedouro da UHE Jirau possuem dimensões semelhantes ao tubo de sucção. A abertura frontal para jusante do vão 18 possui 12 metros de largura, 14 metros de comprimento e 18 metros de profundidade (**Figura 4.2**).



Figura 4.2 – Dimensões do vão 18 do vertedouro da UHE Jirau. Fonte: Autores.

2.2. MONITORAMENTO DA ICTIOFAUNA

Para avaliar em tempo real a movimentação da ictiofauna presente na parte interna do vão 18 do vertedouro da UHE Jirau, foi utilizado o sistema hidroacústico de varredura de baixa e alta frequência desenvolvido pela Venturo Consultoria Ambiental e adaptado para as condições do vão do vertedouro. Para isso, foi posicionado um transdutor próximo à linha d'água na região a jusante do vertedouro, que foi conectado por um cabo específico e resistente ao equipamento hidroacústico (DA SILVA et al., 2022).

O sistema de geração de imagens utilizou frequências distintas, permitindo a demarcação de áreas de cobertura específicas da movimentação da ictiofauna na parte interna do vão. O sistema hidroacústico foi ajustado para frequências de 455 a 880 kHz, com largura de feixe horizontal de 0,9 graus, largura de feixe vertical de 39 graus e ângulo de inclinação na vertical de 26 graus (DA SILVA et al., 2022).

As imagens obtidas foram analisadas, e a contagem de movimentações por minuto foi realizada para cada medida. A **Figura 4.3** apresenta os traços brancos sobrepostos ao fundo, que representam a movimentação da ictiofauna registrada pelo sonar.

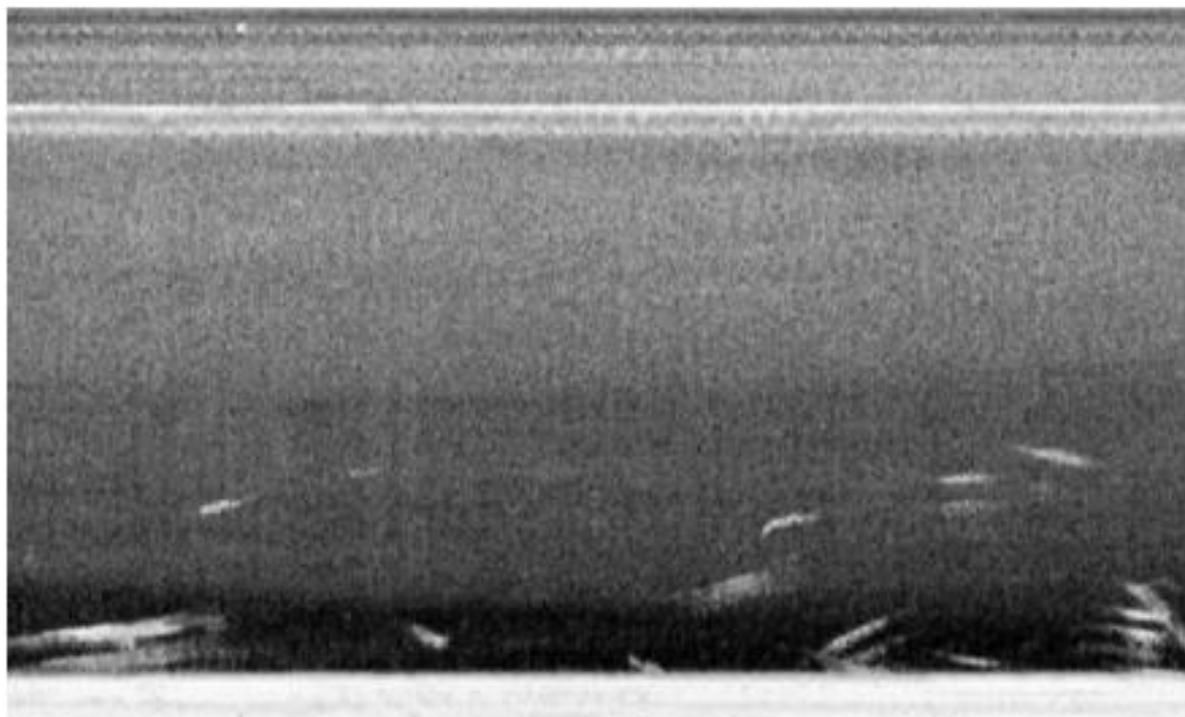


Figura 4.3 – Imagem da tela do sistema de contagem de movimentação de peixe utilizando sonar na parte interna do vertedouro. Fonte: Autores.

2.3. RUÍDOS PRODUZIDOS PARA TESTE DA BARREIRA ACÚSTICA

Com base nos resultados obtidos na primeira e na terceira etapa do projeto, foram produzidos quatro tipos de ruído para o teste da barreira acústica: Ruído Rosa (Padrão), Ruído Rampa (500 a 4000Hz), Trovão (baixas e médias frequências) e Tiro (baixas e médias frequências - Pulso). Para tanto, os ruídos foram produzidos utilizando os editores de áudio FL Studio e Audacity. Foram utilizados sons gerados nos editores e sons disponíveis no repositório de efeitos sonoros da BBC *Sound Effects* (BBC, 2022).

Para a emissão dos ruídos durante o teste, foi utilizada uma fonte acústica composta por um alto-falante subaquático Lubell LL916 (com nível máximo de saída de 180 dB/ μ Pa/m @ 1kHz e resposta de frequência de 200Hz-23kHz), um amplificador AC1400 e acessórios. O alto-falante foi posicionado de forma centralizada, na entrada do vertedouro, a jusante, em uma profundidade de 9 metros. Próximo ao alto-falante, foi posicionado o hidrofone, a 9 metros de profundidade e 1 metro à direita da fonte.

O conjunto do hidrofone C75 da *Cetacean Research Technology* foi conectado à interface SpectraDAQ-200 USB calibrada. A interface, coletou os dados de medida por meio do *software* Spectra Plus-SC. Tanto a fonte quanto o hidrofone foram controlados por um computador na parte superior do vertedouro (**Figura 4.4**).



Figura 4.4 – Sistema acústico e de monitoramento da ictiofauna implementado no vertedouro da UHE Jirau. Fonte: Autores.

2.4. TESTE PILOTO DA BARREIRA ACÚSTICA NO VERTEDOURO

Os testes foram feitos entre os dias 04 e 12 de novembro de 2021, período hidrológico de seca do rio Madeira. A fim de verificar a existência de influência do sonar no ruído residual subaquático, no primeiro dia de experimento foram feitas medidas iniciais nas faixas de frequência de 10 Hz a 20 kHz. Para tanto, foram feitas medidas do ruído residual com o sonar ligado e desligado, para posterior comparação.

Para o teste da barreira acústica, os ruídos foram divididos em dois grupos: GRUPO 1: (i) Rosa e (ii) Rampa; e GRUPO2: (iii) Trovão e (iv) Tiro. Os grupos foram testados em dias alternados, com quatro medições de um mesmo grupo de ruídos em cada dia: duas pela manhã e duas à tarde. Foi obtido um total de seis medições para cada tipo de ruído, totalizando 24 medições.

O procedimento experimental para as medidas seguiu o seguinte protocolo: Inicialmente, foi feita a medição do ruído residual subaquático durante três minutos com o hidrofone para avaliar a variação da intensidade do ruído residual ao longo do tempo. Em seguida, iniciou-se o monitoramento da movimentação dos peixes na parte interna do vão. Após 15 minutos de monitoramento, iniciou-se a emissão do primeiro som, que se manteve por 15 minutos. Ao final desse período, o som foi desligado e o monitoramento dos peixes foi mantido por mais 30 minutos. O mesmo procedimento

foi então repetido para o segundo som da manhã. À tarde, repetiam-se as medições realizadas pela manhã.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o teste realizado no vertedouro para avaliar a influência do sonar nas medidas do ruído ambiental subaquático, não foi observada qualquer alteração na intensidade e no espectro do ruído residual quando o sonar estava operando, no intervalo de 10 Hz a 40 kHz.

Contudo, durante o primeiro dia de experimento, foram observados valores superiores aos das medidas iniciais realizadas próximas à barragem, com forte tom harmônico em 60 Hz. Esse tom aparece repentinamente, acarretando o aumento dos NPS globais da medida de patamares em torno de 120 dB re 1 μ Pa (medida (i)) para 160 dB re 1 μ Pa (medida (ii)) (**Figura 4.5**), sendo que o pico discreto em 60 Hz é substituído por um forte tom ressonante em 60 Hz.

O som reproduzido é claro e semelhante ao de um motor em funcionamento. No entanto, nenhuma fonte de ruído externa foi observada nas proximidades da área monitorada durante os experimentos. Dessa forma, é possível que este ruído tenha origem no maquinário das comportas do vertedouro, dado que a frequência do som de 60 Hz e o aumento repentino da intensidade sugerem essa possibilidade. É importante destacar que nenhum pico em 60 Hz foi observado nas medidas do ruído ambiental subaquático realizadas nas proximidades da barragem, o que pode indicar que o ruído das comportas não se propagou até lá, ou que outros fatores influenciaram a sua detecção.

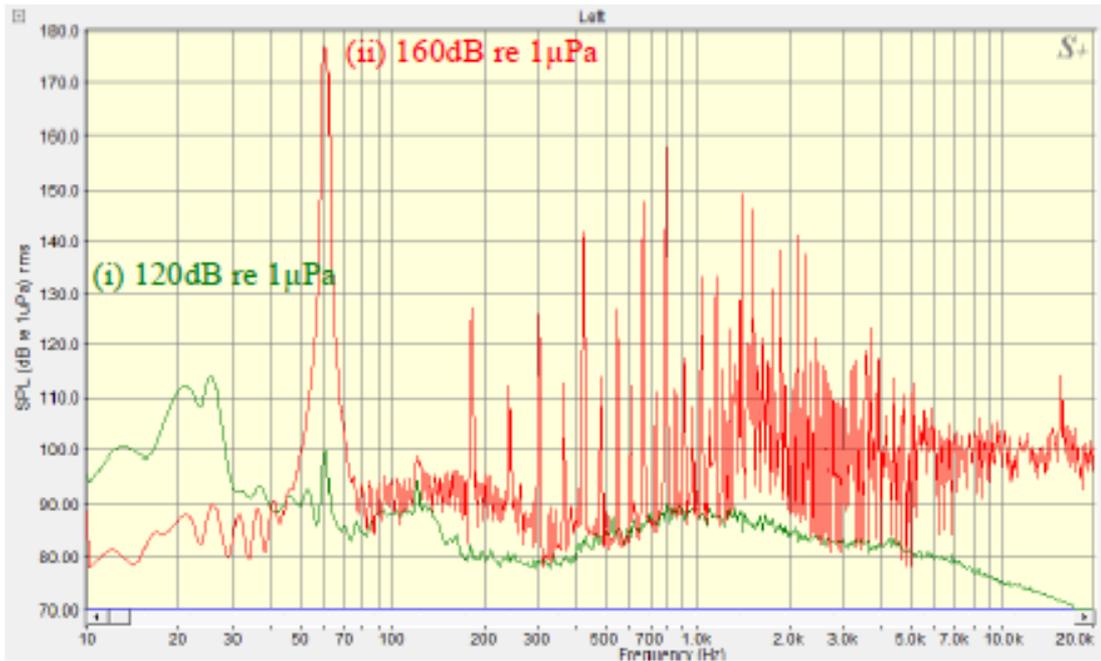


Figura 4.5 – Ruído residual no vertedouro da UHE Jirau. NPS globais em destaque para cada medida. Fonte: Autores.

Na **Figura 4.6**, a parte superior mostra o espectro do ruído ambiental no vertedouro quando a fonte acústica reproduz cada um dos ruídos pré-definidos (com o sonar desligado): ruído Rosa (rosa), ruído Rampa (vermelho), ruído Trovão (azul) e ruído tiro (laranja). Em verde é apresentado o ruído residual, quando nenhum som é reproduzido pela fonte. As duas curvas na parte inferior da figura apresentam os espectros apenas para o ruído rosa e o ruído tiro. Observa-se claramente forte ressonância dos diversos tipos de ruído no tubo de sucção para altas frequências, mesmo para o ruído Rampa (500 Hz - 4000 Hz). Nas curvas inferiores a ausência de sons abaixo de 20 0Hz é devido ao limiar inferior de resposta de frequência do alto-falante subaquático ser de 200 Hz (LUBELL, 2022).

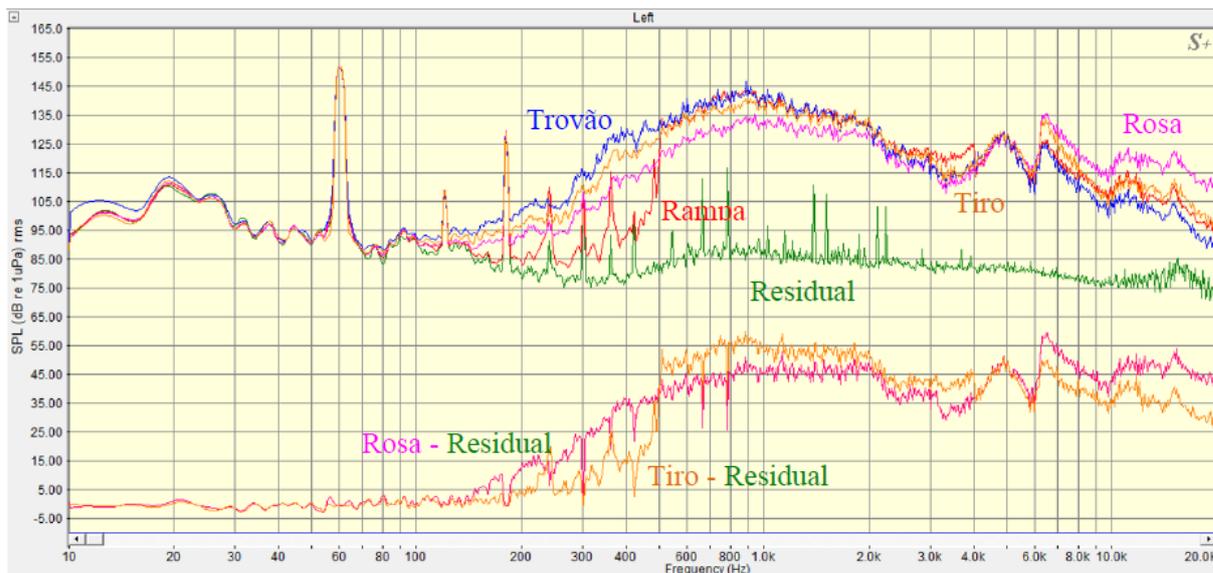


Figura 4.6 – Espectro do ruído ambiental no vertedouro quando a fonte acústica reproduz cada um dos ruídos pré-definidos (com sonar desligado): ruído Rosa (rosa), ruído Rampa (vermelho), ruído Trovão (azul) e ruído tiro (laranja). Fonte: Autores.

Em relação à movimentação de peixes durante a emissão dos ruídos, o som gerado com componentes tonais aumentou em 57% a movimentação de peixes; o ruído de trovão aumentou em 43%; o ruído de tiro aumentou em 37%; e o ruído rosa aumentou em 29%. Os números representam a variação média da movimentação de peixes monitorada nos 5 minutos antes da fonte sonora ser ligada, comparada com o pico das movimentações durante os 15 minutos em que a fonte acústica permaneceu funcionando.

Os resultados preliminares apresentados anteriormente indicam que os ruídos produzidos pela fonte acústica têm o potencial de gerar respostas comportamentais dos peixes presentes no vertedouro. Esse resultado é apoiado por outros estudos que mostram a incidência e aumento de respostas comportamentais em peixes em decorrência do aumento de sons específicos (HAWKINS et al., 2014; DELEAU *et al.*, 2019). É importante destacar que o sonar é um sistema de detecção de movimentos, que utiliza transdutores para enviar e receber ondas sonoras. Isso significa que um mesmo peixe pode ser detectado várias vezes pelo transdutor. Dessa forma, em um ambiente aberto, não é possível quantificar com precisão o número de peixes durante os testes da barreira acústica.

4. CONCLUSÕES

Considerando os resultados apresentados, pode-se inferir que a barreira acústica é eficiente em gerar respostas comportamentais em peixes no ambiente subaquático. Os experimentos realizados demonstraram que os diferentes tipos de ruídos produzidos pela fonte acústica foram capazes de aumentar a movimentação dos peixes no vertedouro. Esses resultados são relevantes para o setor hidrelétrico, já que a movimentação dos peixes pode ser direcionada para locais seguros e afastados das áreas de risco, minimizando os possíveis impactos ambientais da geração de energia elétrica. Além disso, a utilização de barreiras acústicas pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de monitoramento e conservação de espécies aquáticas, tornando-se uma ferramenta importante para a gestão de recursos hídricos.

Porém, é importante ressaltar que a pesquisa apresenta algumas limitações que devem ser consideradas em trabalhos futuros. Uma das limitações é a impossibilidade de quantificar com precisão o número de peixes no ambiente subaquático aberto, o que pode afetar a análise dos dados e a interpretação dos resultados. Dessa forma, novos estudos são necessários para avaliar a eficácia da barreira acústica em ambientes naturais e em diferentes condições ambientais, considerando diferentes espécies de peixes e variáveis ambientais relevantes.

De modo geral, os resultados desta pesquisa apresentam importantes implicações para o setor hidrelétrico e para a academia. A utilização de barreiras acústicas pode contribuir para minimizar os impactos ambientais da geração de energia elétrica, preservando a ictiofauna e os recursos hídricos. Além disso, os resultados obtidos podem subsidiar o desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias de gestão de recursos hídricos, bem como contribuir para o avanço do conhecimento científico na área de ecologia acústica e comportamento animal.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Panorama do setor elétrico brasileiro: Ano base 2019**. Brasília: ANEEL, 2020. Disponível em: <<https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2020/04/PanoramaDoSistemaEletricoBrasileiro2019.pdf>> Acesso e junho de 2022.

BBC. **Sound Effects**. Disponível em: <<https://sound-effects.bbcrewind.co.uk/>>.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p 680-688, 2018.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Tópicos de manejo e conservação da Ictiofauna para o setor Elétrico. 1 ed. Belo Horizonte: Cemig, 2015.

DA SILVA, T. M.; FIGUEIREDO W. S.; ZARA, L. F.; SILVA, L. L. O.; MELO JUNIOR, J. O.; RIBEIRO, F. S. L.; OBARA, M. K. T. Deterring fish by increasing the flow rate in bulb turbine. **The International Journal on Hydropower and Dams**, v. 29, n. 4, p. 62-65, 2022.

DE QUEIROZ, L. J.; TORRENTE-VILARA, G.; OHARA, W. M.; PIRES, T. H. S.; ZUANON, J.; DORIA, C. R. C. (Org.) **Peixes do rio Madeira - Volume 1**, Santo Antônio Energia, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.santoantonioenergia.com.br/peixes/doriomadeira/ictio1.pdf>

DELEAU, M. J. C.; WHITE, P. R.; PEIRSON, G.; LEIGHTON, T. G.; KEMP, P. S. Use of acoustics to enhance the efficiency of physical screens designed to protect downstream moving European eel (*Anguilla anguilla*). **Fish Management and Ecology**, v. 27, n.1, p.1–9, 2020. <https://doi.org/10.1111/fme.12362>

DIAS, M. F.; MAROJA, A. M. E GARAVELLI, S. L. Sistema para repulsão de ictiofauna em hidroelétricas brasileiras. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 16, n. 5, p. 180-191, 2020. <https://doi.org/10.17271/1980082716520202657>

EEA - European Environmental Agency, 2020. **Noise in Europe 2020**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>>

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

HAWKINS, A. D.; ROBERTS, L.; CHEESMAN, S. Responses of free-living coastal pelagic fish to impulsive sounds. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 135, n. 5, p. 3101, 2014. doi: 10.1121/1.4870697.

JESUS, J; AMORIM, M. C. P.; FONSECA, P. J.; TEIXEIR, A.; NATÁRIO, S.; CARROLA, J.; VARANDAS, S.; PEREIRA, T. P.; CORTES, R. M. V. Acoustic barriers as an acoustic deterrent for native potamodromous migratory fish species. **Journal of Fish Biology**, v. 95, n.1, p. 247–255, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.11.009>

LUBELL LABS INC. **Lubell Labs LL916H & LL916C Pistonic Piezoelectric Underwater Speakers**. Disponível em: <https://www.lubell.com/LL916.html>

REIS, R. E.; ALBERT, J. S.; DI DARIO, F.; MINCARONE, M. M.; PETRY P.; ROCHA, L. A. Fish biodiversity and conservation in South America. **Journal of Fish Biology**, v. 89, n. 1, p. 12–47, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfb.13016>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sustentabilidade do setor hidrelétrico exige o constante desenvolvimento de tecnologias e informações voltadas à proteção ictiofauna, bem como a avaliação contínua dos possíveis impactos ambientais decorrentes da operação e manutenção das usinas. Nesse contexto, este estudo investigou três estratégias de repulsão de peixes em turbinas do tipo bulbo, direcionadas à proteção da ictiofauna no setor hidrelétrico.

A primeira estratégia avaliada consistiu na manobra operativa de elevação do fluxo hidráulico, manobra já adotada pela UHE Jirau durante paradas previstas e não previstas das unidades geradoras. Combinada com o monitoramento em tempo real no tubo de sucção, essa abordagem mostrou-se altamente eficaz na redução do confinamento da ictiofauna, resultando em uma diminuição de cerca de 87% na movimentação dos peixes e na redução da carga de trabalho das equipes responsáveis pelo resgate da fauna em espaços confinados.

No entanto, é importante destacar que cada espécie de peixe pode reagir de forma distinta a diferentes estímulos, o que ressalta a necessidade de desenvolver novos métodos comportamentais para proteger uma ampla variedade de espécies. Uma das técnicas promissoras nesse sentido é a cortina de bolhas, capaz de desencorajar e orientar a movimentação dos peixes por meio de estímulos sensoriais visuais, sonoros e táteis. Levando em consideração essa possibilidade, foi desenvolvida e avaliada uma estratégia de dissuasão de peixes por meio da dispersão de ar comprimido pelo sistema de injeção já embutido ao longo do tubo de sucção da UHE Jirau. Os resultados indicaram que essa abordagem inovadora reduziu em cerca de 42% a movimentação dos peixes dentro do tubo de sucção após o procedimento, demonstrando sua eficácia na proteção da ictiofauna.

Outra estratégia para proteção da ictiofauna em empreendimentos hidrelétricos é o uso de barreiras acústicas. Para desenvolver e aplicar essa tecnologia, é importante caracterizar os sons aéreos e subaquáticos na área ao redor da usina hidrelétrica. A compreensão das fontes sonoras presentes no ambiente, bem como suas frequências e intensidades, e dos padrões de comportamento acústico das espécies de peixes presentes, permite o desenvolvimento de barreiras mais específicas e adaptadas às características locais.

A caracterização da paisagem sonora aérea das áreas próximas à UHE Jirau mostrou que os níveis de ruído ambiental estavam em conformidade com as normas vigentes e não apresentavam sons tonais, mesmo próximos às unidades geradoras. Os níveis de ruído variaram de 65 dB, nas proximidades da casa de máquinas, a cerca de 40 dB, na área de floresta circundante. Por outro lado, a caracterização da paisagem sonora subaquática indicou que a operação das unidades geradoras influencia na paisagem sonora nas proximidades da usina. No entanto, é importante destacar que o ruído subaquático retorna ao seu nível basal a cerca de 5 km da fonte emissora. Além disso, as baixas frequências observadas nos espectros estão fora da faixa audível da maioria das espécies de peixe do rio Madeira, minimizando os impactos negativos para a ictiofauna.

Por fim, foram realizados testes para verificar a eficiência de quatro configurações de ruído - rosa, trovão, de tiro e com componentes tonais bem definidas - na utilização em uma barreira acústica para proteção da ictiofauna. Os resultados obtidos indicaram que todas as quatro configurações de ruído têm potencial para gerar uma perturbação, provocando movimentação dos peixes. O ruído de componentes tonais apresentou o maior impacto, aumentando em 57% a movimentação, seguido pelo ruído de trovão em 43%, ruído de tiro em 37% e ruído rosa em 29%. Esses resultados são promissores e fornecerão subsídios para a próxima etapa de desenvolvimento de uma barreira acústica eficaz na em empreendimentos hidrelétricos.

É importante ressaltar que a eficácia de cada tecnologia para conservação da ictiofauna no setor hidrelétrico é influenciada por múltiplas variáveis, tais como o tipo de turbina, espécies de peixes existentes, fluxo de água e condições ambientais locais. Por conseguinte, é essencial que cada usina hidrelétrica avalie meticulosamente as estratégias de repulsão disponíveis e selecione as mais apropriadas para minimizar os impactos sobre a ictiofauna em sua localização específica. Uma solução personalizada para cada local, envolvendo a combinação de diferentes barreiras comportamentais, pode maximizar a proteção da ictiofauna durante a operação e manutenção das usinas hidrelétricas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de P&D da Energia Sustentável do Brasil (ANEEL/PD-06631-0009/2019) e a equipe da Jirau Energia, que forneceu todo o apoio necessário para o desenvolvimento da pesquisa.