

**Sistema para repulsão de ictiofauna em hidroelétricas brasileiras**

*Ichthyofauna repulsion system in Brazilian hydroelectric plants*

*Sistema de repulsión de ictiofauna en centrales hidroeléctricas brasileñas.*

**Mônica Ferreira Dias**

Doutoranda em Ciências Ambientais, UnB, Brasil.  
monicadias2009@gmail.com

**Armando de Mendonça Maroja**

Professor Doutor, UnB, Brasil.  
amaroja@unb.br

**Sérgio Luiz Garavelli**

Professor Doutor, UniCEUB, Brasil.  
sergio.garavelli@ceub.edu.br

## RESUMO

A energia hidráulica representa mais de 65% na matriz elétrica brasileira. Para preservar rotas migratórias de peixes, usinas hidroelétricas têm adotado sistemas de transposição de peixes e estudado alternativas de repulsão para evitar o acúmulo de peixes próximo ao paramento de jusante das barragens que podem resultar na mortalidade nas unidades geradoras e vertedouros, em especial durante as manutenções periódicas das turbinas. Este trabalho é parte de um projeto de P&D que irá construir uma barreira acústica que atenda as particularidades das espécies de peixes amazônicos da área de estudo – Usina Hidroelétrica Jirau (RO). A barreira irá evitar e/ou minimizar a entrada de espécies nos tubos de sucção durante a parada e retomada das turbinas. Esta etapa teve como objetivo selecionar os parâmetros acústicos ao menor nível de estímulo detectável e faixa de frequência de audição dos peixes para a construção da barreira. Para tanto foram coletados dados do inventário das espécies detectadas nos tubos de sucção ao longo dos últimos anos e feita uma comparação com dados obtidos por estudos em outros países levando em conta a ordem/família de peixes equivalentes, pois os dados não estão disponíveis para peixes amazônicos. Os resultados indicaram que a intensidade da fonte deve ser acima de 161 dB e reproduzir sons no intervalo de 100 a 5 kHz. Tendo como base estes dados o projeto da barreira acústica está sendo elaborado, a qual será testada *in situ* na próxima etapa do projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** barreira sonora, reservatórios e peixes amazônicos, turbinas, hidrelétrica, STP.

## ABSTRACT

*Hydraulic energy represents more than 65% in the Brazilian electric matrix. In order to preserve fish migratory routes, hydroelectric power plants have adopted fish transposition systems and studied repulsion alternatives to avoid the accumulation of fish close to the dam's downstream face, which can result in mortality in the generating units and spillways, especially during maintenance of the turbines. This work is part of a R&D project that will build an acoustic barrier that meets the particularities of Amazonian fish species in the study area - Jirau Hydroelectric Plant (RO). The barrier will prevent and / or minimize the entry of species in the suction tubes during the stop and restart of the turbines. This step aimed to select the acoustic parameters at the lowest level of detectable stimulus and the frequency range of fish hearing for the construction of the barrier. For this purpose, data from the inventory of species detected in the suction tubes were collected over the past few years and a comparison was made with data obtained from studies in other countries taking into account the order / family of equivalent fish, as the data are not available for fish. Amazonians. The results indicated that the source intensity must be above 161 dB and reproduce sounds in the range of 100 to 5 kHz. Based on these data, the design of the sound barrier is being elaborated, which will be tested *in situ* in the next stage of the project.*

**KEY-WORDS:** sound barrier, reservoirs and Amazonian fish, turbines, hydroelectric, STP

## RESUMEN

*La energía hidráulica representa más del 65% en la matriz eléctrica brasileña. Para preservar las rutas migratorias de los peces, las centrales hidroeléctricas han adoptado sistemas de transposición de peces y estudiaron alternativas de repulsión para evitar la acumulación de peces cerca de la presa aguas abajo, lo que puede provocar la mortalidad en las unidades generadoras y en los vertederos, especialmente durante el mantenimiento de las turbinas. Este trabajo es parte de un proyecto de I&D que construirá una barrera acústica que cumpla con las particularidades de las especies de peces amazónicos en el área de estudio - Planta Hidroeléctrica de Jirau (RO). La barrera evitará y / o minimizará la entrada de especies en los tubos de succión durante la parada y reinicio de las turbinas. Este paso tuvo como objetivo seleccionar los parámetros acústicos en el nivel más bajo de estímulo detectable y el rango de frecuencia de la audición de los peces para la construcción de la barrera. Para este propósito, los datos del inventario de especies detectadas en los tubos de succión se recolectaron en los últimos años y se realizó una comparación con los datos obtenidos por estudios en otros países teniendo en cuenta el orden / familia de peces equivalentes, ya que los datos no están disponibles para peces. Amazónicos. Los resultados indicaron que la intensidad de la fuente debe estar por encima de 161 dB y reproducir sonidos en el rango de 100 a 5 kHz. En base a estos datos, se está elaborando el diseño de la barrera del sonido, que se probará *in situ* en la siguiente etapa del proyecto.*

**PALABRAS CLAVE:** barrera acústica, embalses y peces amazónicos, turbinas, hidroeléctricas, STP

## INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica direciona o planejamento e a execução de grandes unidades hidrelétricas. No Brasil o maior potencial inventariado para estes empreendimentos encontra-se na região norte com 63% de participação (EPE, 2018). Para Queiroz *et al.* (2013), o maior desafio ambiental gerado pelos empreendimentos hidrelétricos instalados no rio Madeira é manter a funcionalidade do contínuo fluvial, permitindo o trânsito de peixes entre as áreas alteradas pelos barramentos do rio (por meio de migrações ascendentes e pela deriva de ovos e larvas a jusante) e, ao mesmo tempo, evitando que a perda das barreiras naturais resulte em um processo de invasão dos ambientes a montante por espécies das terras baixas da Amazônia.

Andrade e Araújo (2011) destacam que é importante a adoção pelas usinas de sistemas de monitoramento e contenção eficazes com o objetivo de mitigar possíveis danos à ictiofauna e ao mesmo tempo permitir o funcionamento das unidades geradoras. Devido a diversidade de espécies presentes nos rios brasileiros e efetivação desses sistemas é um grande desafio.

O objeto do estudo é a Hidroelétrica Jirau (UHE Jirau), localizada no rio Madeira a 120 Km da capital Porto Velho, no estado de Rondônia que iniciou sua construção em 2010 e está em operação plena desde outubro de 2013. A UHE Jirau possui 50 unidades geradoras (UG) com turbinas tipo bulbo, potência instalada de 3.750 MW, situada dentre os dez maiores agentes de capacidade instalada conforme informações publicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), permitindo que 10.000.000 de casas sejam abastecidas. A área inundada com a instalação da UHE varia ao longo do ano, a depender dos ciclos hidrológicos da região, entre 21,0 km<sup>2</sup> e 207,7 km<sup>2</sup>, e a área do reservatório é de 361,6 km<sup>2</sup>. A UHE de Jirau é gerida pela empresa Energia Sustentável do Brasil S.A (ESBR), a qual é uma Sociedade de Propósito Específico (SPE) e tem como acionistas as empresas ENGIE (40%), Eletrobras CGT Eletrosul (20%), Eletrobras Chesf (20%) e Mizha Participações S.A. (20%), subsidiária da Mitsui & CO., LTD.

Na UHE Jirau, assim como nas demais hidrelétricas instaladas no País, um dos grandes desafios na operação está relacionado ao resgate da ictiofauna confinada nos tubos de sucção durante as paradas das unidades geradoras (UG). No cronograma de manutenção anual a parada das unidades geradoras envolve uma logística de diversas áreas da empresa e profissionais, tendo sido estimado, durante o período de novembro de 2013 e abril de 2019, 317 dias de trabalho efetivo para fazer os resgates da ictiofauna confinada (ESBR, 2019). O empreendimento busca apoiar projetos de P&D que desenvolvam tecnologia inovadoras a fim de otimizar o tempo de resgate da ictiofauna nas UG, evitando a perda de espécies com a redução do tempo necessário para a atividade. Essa não é uma preocupação exclusiva da UHE Jirau, no Brasil temos o exemplo do projeto Peixe Vivo da CEMIG que avalia o risco de morte de peixes em usinas hidroelétricas em Minas Gerais (Loures e Godinho, 2016).

A literatura sobre a ictiofauna do rio Madeira resumia-se a um trabalho de Fowler (1913) e, posteriormente com Cox-Fernandes *et al.* (2004) que listou 63 espécies nas proximidades da foz do rio Madeira. Existia uma lacuna de aproximadamente 600 km, entre a região de Trinidad (Bolívia) e Porto Velho (Brasil) que começou a ser suprida com os estudos de impacto ambientais

para instalação das usinas hidrelétricas no rio Madeira. Além disto, diversos autores produziram estudos específicos de inventário da ictiofauna como Torrente-Vilara *et al.* (2008), Araújo *et al.* (2009) e a tese de Torrente-Vilara (2009); Farias *et al.* (2010); Torrente-Vilara *et al.* (2011) e Ohara *et al.* (2013), os quais registraram uma ictiofauna composta por 920 espécies para a bacia do rio Madeira em território brasileiro. O Quadro 1 compara a diversidade de espécies do rio Madeira com outros rios da Amazônia e do mundo.

**Quadro 1. Número de espécies de peixes inventariadas no rio Madeira e em diversos locais da Amazônia e do mundo**

Local	Riqueza inventariada	Fonte
Rio Madeira	920	Ohara et al. (2013)
Rio Congo	700	Skelton (2001)
Rio Orinoco	658	Maldonado-Ocampo <i>et al.</i> (2008)
Rio Branco	584	Ferreira <i>et al.</i> (2007)
Rio Tocantins	520	Lima & Caires (2011)
Rio Xingu (PA)	467	Camargo <i>et al.</i> (2004)
Rio Negro	450	Goulding <i>et al.</i> (1998)

Fonte: QUEIROZ *et al.*, 2013

Na região do rio Madeira onde está instalada a UHE JIRAU, os monitoramentos feitos desde maio de 2010 registraram 290 espécies de peixes taxonomicamente confirmadas (ESBR, 2019).

O presente estudo é parte de um projeto de P&D que tem como objetivo o desenvolvimento e validação de estratégias tecnológicas integrando sistemas físicos e químicos para repulsão da ictiofauna do tubo de sucção durante paradas previstas ou imprevistas de unidades geradoras de energia de hidroelétricas na Bacia Amazônica. Esse trabalho é parte do projeto e tem o objetivo de fazer o estudo inicial, revisão bibliográfica, para determinar os parâmetros acústicos: O menor nível de estímulo detectável e a faixa detectável de frequência de audição dos peixes adequados para construção de barreira acústica e método físico de repulsão da ictiofauna do tubo de sucção.

A literatura descreve duas metodologias para determinar os parâmetros de dois aspectos fundamentais das capacidades auditivas de um organismo: i) a faixa detectável de frequência ou largura da banda) e ii) sensibilidade absoluta ou o menor nível de estímulo detectável: a comportamental e o Potencial Evocado Auditivo (PEA) (Ladich & Fay, 2013). O PEA é um método de eletro diagnóstico não invasivo que permite avaliação objetiva do estado auditivo, da orelha média ao tronco encefálico, captando a atividade elétrica do sistema auditivo, gerada a partir de um estímulo sonoro específico, teste este não difundido em animais no Brasil. (PALUMBO *et al.*, 2010), ao passo que as técnicas comportamentais de observação frente a determinado estímulo são desenvolvidas desde anos 60 com condicionamento instrumental (Tavolga e Wodinsky 1963), condicionamento clássico ou pavloviano (Fay e MacKinnon 1969) ou condicionamento operante (Yan e Popper 1991) (Ladich & Fay, 2013).

As barreiras sonoras possuem várias características favoráveis para modificação dos padrões de movimentação dos peixes, como por exemplo: independência da turbidez e da luminosidade do rio, a capacidade de ser direcionada e a reduzida atenuação com a profundidade. A intensidade de uma onda diminui ao se propagar num meio devido a diversos fatores. O aumento da

distância entre a fonte e o receptor é um dos deles, no caso de uma propagação esférica a superfície da frente de onda aumenta com o quadrado da distância, o que provoca uma diminuição da densidade de energia disponível, na taxa de 6 dB cada vez que a distância é duplicada. A atenuação depende ainda da frequência do som, da temperatura e da densidade do meio. Frequências mais elevadas experimentam decaimentos maiores em função dos efeitos termodinâmicos, maiores frequências provocam vibrações mais rápidas, levando assim a maiores perdas de energia (Kinsler, 1999). A perda de transmissão para propagação esférica na água considerando a frequência de 1 kHz, é apresentada na Figura 1.

**Figura 1 – Perda de transmissão em função da distância, para a frequência de 1 kHz.**



Fonte: KINSLER *et al.* (1999), adaptado

Observa-se que esse tipo de barreira é adequada ao estudo no Rio Madeira, cuja água resultante do regime local de chuvas e do degelo das encostas dos Andes, o que causa o transporte de quantidade de sedimentos em suspensão – silte, argila e areia que vão depositando-se às margens do rio, além de grande quantidade de troncos, árvores inteiras ou galhos. O conhecimento dos parâmetros acústicos é importante para construção da barreira acústica, pois o ruído produzido pela barreira deve ser específico para as espécies de peixes mais abundantes na área de estudo, evitando sons com frequência próxima as geradas pelas turbinas bem como sons de alta intensidade podem ser prejudiciais aos peixes. Deve-se considerar também os sons gerados artificialmente em locais com altos níveis de ruído (tomadas d'água e tubos de sucção) que podem dificultar a percepção pelos peixes (HAWKINS, 1986).

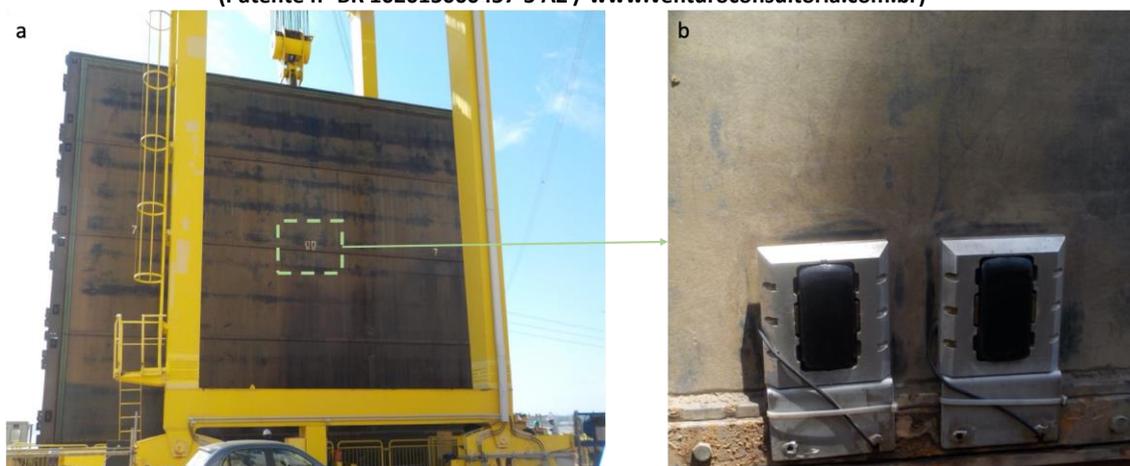
Outro dado importante citado por Kalmijn (1988), é a movimentação de partículas de pressão acústica que pode influenciar a resposta do peixe ao som; esse movimento das partículas é acentuado quando próximo de uma fonte sonora afetando os peixes com maior sensibilidade a infrassons (frequência inferior a 50 Hz). Embora os estudos com essa frequência feitos por Knudsen *et al.* (1992, 1997), para repulsão de salmões jovens tenham tido resultados positivos em ambiente controlado, o uso do infrassom ainda necessita de estudos complementares para ser adotado generalizadamente como um eficaz repelente para peixes.

## Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

O procedimento adotado para fazer as paradas das Unidades Geradoras (UG) da UHE Jirau inicia com a dessincronização da unidade do sistema brasileiro de geração, procedimento comunicado e aprovado pela ANEEL. Em seguida é feita uma vazão turbinada imediatamente antes da vedação do distribuidor e da descida da comporta vagão a jusante. Neste momento sistemas hidroacústicos instalados na comporta vagão (Figura 02) monitoram a ictiofauna confinada e, a depender do padrão estabelecido de estimação do quantitativo define-se dois caminhos.

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



Fonte: Acervo Venturo Consultoria Ambiental

Estando o quantitativo da ictiofauna confinada em padrão de imagem mensurável, ou seja, alta concentração faz-se então a abertura do tubo de sucção a jusante, abertura do distribuidor e reinicia-se o procedimento. Caso o padrão de imagem seja incipiente, é dado continuidade ao procedimento fazendo o isolamento a montante, em seguida o esgotamento da UG, a abertura da escotilha e liberação para equipe de resgate descer no tudo de sucção para a captura da ictiofauna remanescente. Andrade *et al.* 2012 apud Loures e Godinho 2016 também mostraram a efetividade da vazão turbinada em estudo feito na UHE Três Marias em Minas Gerais.

Este procedimento de manutenção tem custos não apenas econômicos envolvidos, com a parada da unidade, mas também para as equipes responsáveis pela atividade em espaço confinado e condições insalubres, além de preservar algumas espécies identificadas como super exploradas ou categorizadas como quase ameaçada (NT), conforme Anexo I da Portaria nº 445, de 17/12/2014 (MMA, 2014), como o tambaqui (*Colossoma macropomum*).

A usina conta também com outro importante sistema que tem objetivo de reduzir os impactos sobre a ictiofauna migradora, o Sistema de Transposição de peixes (STP) o qual foi construído com características específicas para determinadas espécies.

### OBJETIVOS

Esse trabalho é parte de um projeto de P&D que tem como objetivo o desenvolvimento e validação de estratégias tecnológicas integrando sistemas físicos e químicos para repulsão da

ictiofauna do tubo de sucção durante paradas previstas ou intempestivas de unidades geradoras de energia de hidroelétricas na Bacia Amazônica. Tem como objetivo fazer o estudo inicial, revisão bibliográfica, a fim de determinar os parâmetros acústicos: o menor nível de estímulo detectável e a faixa detectável de frequência de audição dos peixes, adequados para construção de barreira acústica e método físico de repulsão da ictiofauna do tubo de sucção.

### METODOLOGIA / MÉTODO DE ANÁLISE

A metodologia adotada foi de revisão bibliográfica que abrangeu artigos de experimentos em ambiente controlado, como tanques e gaiolas, nas universidades de Maryland (MANN *et al.*, 2001), Oregon (KNUDSEN *et al.*, 1993) e Nova York (EUA) (DUNNING *et al.*, 1992) e centros de pesquisas nas imediações de Oslo, Noruega (KNUDSEN *et al.*, 1992; 1993; BUI, *et al.*, 2013), com resultados sobre as faixas detectáveis de frequência das espécies e o menor nível de estímulo detectável. Também foram incluídos resultados de ampla revisão de artigos sobre potencial evocado auditivo de peixes realizada por Ladich e Fay (2013), que abrange mais de 100 espécies. Foram selecionados tanto resultados de experimentos comportamentais como os obtidos a partir da técnica AEP, quando o resultado comportamental não estava disponível.

Em seguida foram selecionadas as espécies de peixes que ficam confinados com maior frequência/quantidade nas estruturas internas durante os procedimentos de manutenção das unidades geradoras, bem como os capturados no STP. A partir do cruzamento e análise qualitativa dos dados foi identificada a faixa aproximada de frequência e nível mínimo detectável que possa ser aplicada nos experimentos previstos no projeto no STP (avaliação inicial) e nas unidades geradoras da UHE Jirau.

### RESULTADOS

A análise dos relatórios do Programa de Conservação da Ictiofauna (PCI) previstos na Licença de Operação da UHE Jirau mostra que um número significativo de espécies de peixes é identificado nas cercanias da UHE Jirau, no total, mais de 500 espécies. O Programa de Resgate e Salvamento da Ictiofauna (PRSI) registra em seus relatórios dos últimos 10 anos (março/2009 a abril/2019) a captura de quase dois milhões de espécimes, sendo mais de 1 milhão no STP e quase 100 mil resgatados nos vãos do vertedouro, nas comportas vagão e *stop logs* das unidades geradoras e nas estruturas internas das unidades geradoras, locais que serão caracterizados simplesmente como “Unidade Geradora” (UG) (ESBR, 2019).

É importante ressaltar que cinco espécies registradas durante as atividades de resgate e salvamento da ictiofauna nas UG da UHE Jirau (*Brachyplatystoma rousseauxii*, *Brachyplatystoma vaillantii*, *Colossoma macropomum*, *Semaprochilodus insignis* e *Zungaro zungaro*) são categorizadas como sobre explorada ou ameaçada de sobre exploração (Machado *et al.*, 2008). Além disso, o tambaqui (*Colossoma macropomum*) é categorizado como quase ameaçada (NT), conforme Anexo I da Portaria nº 445, de 17/12/2014 (MMA, 2014).

## Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

A pesquisa bibliográfica não encontrou dados comportamentais de espécies do Rio Madeira, assim buscou-se similaridade com peixes de mesma Ordem e Família nos artigos disponíveis pois, todos os peixes presentes na UG e STP são da Classe *Actinopterygii*. O Quadro 2 resume os resultados do cruzamento das informações da ictiofauna mais abundante nas atividades de resgate em Jirau com a estudada nos artigos. Verificou-se similaridade com duas ordens iguais: *Characiformes* e *Gymnotiformes* e, três ordens e famílias iguais, sendo *Perciformes/Centrarchidae*, *Siluriformes/Doradidae* e *Siluriformes/Pimelodidae*. A faixa detectável de frequência de audição dos peixes ( $f_{min} - f_{max}$ ) e o menor nível de estímulo detectável (Limiar) foram determinados a partir de PEA e audiogramas comportamentais da ampla revisão bibliográfica realizada por Ladich e Fay (2013). Observa-se que para a maioria das espécies a faixa detectável de frequência vai de 100 Hz a alguns KHz com intensidade superior a 100 (dB re: 1  $\mu$  Pa) apenas para a espécie *Lepomis macrochirus* da família *Centrarchidae*.

**Quadro 2 – Equivalência entre as espécies encontradas no encontrados no STP e UG da UHE Jirau no Rio Madeira e espécies estudadas. Faixa de frequência audível ( $f_{min} - f_{max}$ ) limiar de audição (Limiar)**

Espécies do Rio Madeira				Ladich e Fay, 2013
Ordem	Família	Espécie (Nome Comum)	LOCAL	$f_{min}$ (Hz) - $f_{max}$ (Hz) / Limiar (dB)
Characiformes	Prochilodontidae	<i>Prochilodus nigricans</i> (Curimatã)	UG	Piranha Vermelha ( <i>Pygocentrus nattereri</i> ) / Família <i>Characidae</i> (100-5.000 /70)
		<i>Semaprochilodus insignis</i> (Jaraqui)	UG	
	Serrasalmididae	<i>Colossoma macropomum</i> (Tambaqui)	UG	
		<i>Piaractus brachypomus</i> (Pirapitinga)	STP	
Gymnotiformes	Apteronotidae	<i>Sternarchogiton nattereri</i> (Ituí Espada)	UG	Glass knifefish ( <i>Eigenmannia virescens</i> ) / Família <i>Sternopygidae</i> (100-5.000 /75)
Perciformes	Centrarchidae	<i>Micropterus coosae</i> (Peixe sol)	UG	Sargo ( <i>Lepomis macrochirus</i> ) (300-2.000 /120) Alabama Bass ( <i>Micropterus henshalli</i> ) (100-500/ 90)
Siluriformes	Doradidae	<i>Pterodoras granulosus</i> (Abotoado)	UG	Bagre listrado de Rafael ( <i>Platydoras armatulus</i> ) (200-5.000/ 60)
Siluriformes	Pimelodidae	<i>Brachyplatystoma platynemum</i> (Babão)	STP	Bagre de Bloch ( <i>Pimelodus blochii</i> ) (100-3.000 /70) Bagre Pictus ( <i>Pimelodus pictus</i> ) (100-3.000 /65)
		<i>Brachyplatystoma rousseauxii</i> (Dourada)	UG	
		<i>Brachyplatystoma vaillantii</i> (Piramutaba)	STP/UG	
		<i>Calophysus macropterus</i> (piracatinga)	UG	
		<i>Hemisorubim platyrhynchos</i> (Jurupoca)	UG	
		<i>Leiarius marmoratus</i> (Jundiá)	UG	
		<i>Pimelodus blochii</i> (Mandi)	UG	
		<i>Pinirampus pirinampu</i> (Pirinampu)	STP/UG	
		<i>Pseudoplatystoma punctifer</i> (Surubim)	STP/UG	

## Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

		<i>Pseudoplatystoma tigrinum</i> (Caparari)	STP	
		<i>Sorubim lima</i> (Jurupensém)	UG	
		<i>Zungaro zungaro</i> (Jaú)	STP/UG	

FONTE: Dados do relatório ESBR-13º Relatório semestral – Programa de Conservação da Ictiofauna-Resgate e Salvamento no Vertedouro e Unidades Geradoras e Ladich e Fay, 2013 – adaptado pelos autores, 2020.

O Quadro 3 apresenta a Faixa detectável de frequência de audição ( $f_{min} - f_{max}$ ) e o menor nível de estímulo detectável (Limiar) para peixes típicos da América do Norte. Observa-se que os peixes da família *Salmonidae* tem maior sensibilidade a baixas frequências enquanto os da família *Clupeidae* tem maior sensibilidade a altas frequências com limiares auditivos iguais ou acima de 130dB (re: 1  $\mu$  Pa). Os dados em dB têm como referência 1  $\mu$  Pa, que é o limiar da audibilidade humana na água. Knudsen *et al.* 2005 mostraram que o Salmão Chinook e a Truta Arco Iris têm sensibilidade a infrasons (10Hz), não havendo tolerância com o sinal mesmo depois de repetidos experimentos, no início a resposta dos peixes corresponde a uma fuga rápida, com o passar do tempo os peixes nadam o mais distante possível da fonte sonora.

Por outro lado, os típicos Arenques Americanos têm sensibilidade a altas frequências. Nestler *et al.* (1992) fizeram experimentos comportamentais em ambiente controlado e em áreas abertas, na Barragem Richard B. Russell no rio Savannah, fronteira entre Georgia/South Carolina. Os resultados sugerem que o som de alta frequência pode fornecer um método eficaz e barato, em relação às medidas estruturais, para reduzir aprisionamento do arenque azul nas usinas hidrelétricas.

**Quadro 3: Faixa detectável de frequência de audição ( $f_{min} - f_{max}$ ) e o menor nível de estímulo detectável (Limiar) para peixes típicos da América do Norte.**

Ordem	Família	Espécie	Nome Comum	Artigo	fmin (Hz) - fmax (Hz) / Limiar (dB)
<i>Salmoniformes</i>	<i>Salmonidae</i>	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	Salmão Chinook	Ladich e Fay, 2013	100 – 1.000 /105
		<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truta Arco Iris	Ladich e Fay, 2013	150 – 500 /115
<i>Clupeiformes</i>	<i>Clupeidae</i>	<i>Alosa sapidissima</i>	Savél Americano	Mann <i>et al.</i> , 2001	100 - 80.000 /130
		<i>Alosa pseudoharengus</i>	Arenque Cinzento	Dunning <i>et al.</i> , 1992	~150 kHz / > 150
		<i>Alosa aestivalis</i>	Arenque Azul	Nestler <i>et al.</i> , 1992	

Fonte: Adaptado pelos autores, 2020.

### CONCLUSÃO

É prioritário desenvolver novas tecnologias para solução do problema ambiental do confinamento de peixes em UG de usinas hidroelétricas. Observa-se que os estudos relativos a barreiras acústicas no Brasil e mesmo da acústica relativa à sensibilidade de peixes ao som ainda é incipiente. Entre os rios típicos da Amazônia, o rio Madeira apresenta condições peculiares em função da estrutura morfológica que forma todo o leito do rio desde os Andes com sua característica de amplitude de vazão e a turbidez das águas em função de material particulado. A tecnologia da barreira sonora é adequada a esse tipo de ambiente, águas com grande turbidez.

Os resultados apresentados indicam que a fonte sonora para produção da barreira acústica adequada a ictiofauna do Rio Madeira deve ter intensidade de pelo menos 161 dB (re: 1  $\mu$  Pa) e ser capaz de reproduzir tanto baixas como médias frequências no intervalo de 100 a 5000Hz, conforme dados apresentados no Quadro 2.

Essa estimativa da intensidade foi realizada considerando que o limiar inferior para a intensidade deve ser de 120 dB (re: 1  $\mu$  Pa), valor obtido na análise do Quadro 2. A relação sinal/ruído deve ser superior a 15 dB, assim para que o som produzido pela fonte sonora da barreira acústica seja efetivamente ouvido pelos peixes a até pelo menos 20 metros (distância máxima entre os peixes e a fonte sonora nas proximidades do tubo de sucção) é necessário acrescentar mais 26 dB, conforme a figura 1, conduzindo a intensidade da fonte de pelo menos 161 dB (re: 1  $\mu$ Pa).

O ambiente amazônico diverso propicia que, a partir dos resultados do projeto de P&D possamos ampliar a metodologia da barreira sonora para as demais UHE instaladas na região tropical brasileira.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de P&D da Energia Sustentável do Brasil (ANEEL/PD-06631-0009/2019), a Universidade de Brasília (UnB) – Campus Planaltina pelo apoio à realização do Projeto e ao biólogo e veterinário Murilo Luiz e Castro Santana pelo suporte na taxonomia.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, Ângelo. Antônio, GOMES, Luiz Carlos & PELICICE, Fernando Mayer. **Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil**. Editora da Universidade Estadual de Maringá -UEM, 2007. 501p.

AGOSTINHO, Ângelo A., **Pesquisa, Monitoramento e Manejo da Fauna Aquática em Empreendimentos Hidrelétricos, Seminário sobre Fauna Aquática e o Setor Elétrico Brasileiro**, MME-Ministério de Minas e Energia.

ANDRADE, Estefânia de Souza e ARAÚJO, Jamile da Costa. **Medidas mitigadoras dos impactos ambientais causados por usinas hidrelétricas sobre peixes**. Revista Electronica de Veterinaria, 2011, v. 12, n. 3, p. 1–30.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações Gerenciais dezembro 2018**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: jul. 2019.

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. Porto Velho/RO, 2009, 9(3): 21-29.

BUI, Samantha; OPPEDAL, Frode; KORSØEN, Øyvind J.; SONNY, Damien & DEMPSTER, Tim. **Group Behavioural Responses of Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) to Light, Infrasound and Sound Stimuli**. PLOS ONE, 2013.

COX-FERNANDES, Cristina; PODOS, Jeffrey. & LUNDBERG, John G. 2004. **Amazonian ecology: tributaries enhance the diversity of electric fishes**. Science, 305: 1960-1962.

## Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

DUNNING, Dennis; ROSS, Quentin; GEOGHEGAN, Paul; REICHLE, James; MENEZES, John & WATSON, John. **Alewives Avoid High-Frequency Sound**. North American Journal of Fisheries Management, 1992.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., COMBASE – Comitê Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Panorama e Perspectivas sobre Integração Energética Regional**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

ESBR – Energia Sustentável do Brasil **13º Relatório semestral – Programa de Conservação da Ictiofauna**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ESBR – Energia Sustentável do Brasil. **13º Relatório semestral – Programa de Conservação da Ictiofauna-Resgate e Salvamento no Vertedouro e Unidades Geradoras**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

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 56, 2010, 1129–1135.

FOWLER, Henry W. **Fishes from the Madeira river, Brazil**. Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1913.

HAWKINS, Anthony D. **Underwater sound and fish behaviour**. In: Picher, T. J. (ed.). The behavior of teleost fishes. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1986, p. 14-51.

IUCN - International Union for Conservation of Nature. **Red List of Threatened Species. Version 2018.2**. Disponível em <http://www.iucn.redlist.org>, 2018.

KALMIJN, A. D. **Acoustic and hydrodynamic field detection**. In Sensory Biology of Aquatic Animals. Springer-Verlag, 1988, pp. 83-131.

KINSLER, Lawrence E., Austin R. Frey, Alan B. Coppers, James V. Sanders, **Fundamentals of Acoustics**, 4th Edition, 1999, 560 Pag. 397-399.

KNUDSEN, Frank Reier, ENGER, Per S. e SAND, Olav. **Awareness reactions and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L.** Journal of Fish Biology, 1992.

KNUDSEN, Frank Reier, ENGER, Per S. e SAND, Olav. **Avoidance responses to low frequency sound in downstream migrating Atlantic salmon, *Salmo salar***. Journal of Fish Biology, 1993.

KNUDSEN, Frank Reier; SCHRECK, Carl B.; KNAPP, S. M.; ENGER, Per S. & SAND, Olav. **Infrasound produces flight and avoidance responses in Pacific juvenile salmonids**. Journal of Fish Biology, 1997/2005, pp. 824-829.

KYNARD, Boyd. E. **Anadromous fish behaviour important for fish passage**. Canadian Technical report of fisheries and Aquatic sciences, 1993, p. 95-104.

LADICH, Friedrich e FAY, Richard.R. **Auditory evoked potential audiometry in fish**. Rev Fish Biology Fisheries, 2013, 23:317–364.

LOURES, Raquel Coelho e GODINHO, Alexandre Lima (org.) **Avaliação de Risco de Morte de Peixes em Usinas Hidrelétricas**. CEMIG-Companhia Energética de Minas Gerais, 2016. 332p.

MACHADO, B. M., DRUMMOND, G. M & PAGLIA, A. P. **Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção**. Fundação Biodiversitas, 2008, 2v., 1420 p..

MANN, David A.; HIGGS, Dennis M.; TAVOLGA, William N.; SOUZA, Marcy J. & POPPER, Arthur N. **Ultrasound detection by clupeiform fishes**. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001.

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 445**, de 17 de dezembro de 2014. Disponível em: <[https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/00-saiba-mais/05\\_-\\_PORTARIA\\_MMA\\_N%C2%BA\\_445\\_DE\\_17\\_DE\\_DEZ\\_DE\\_2014.pdf](https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/00-saiba-mais/05_-_PORTARIA_MMA_N%C2%BA_445_DE_17_DE_DEZ_DE_2014.pdf)>. Acesso em: abr. 2020.

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 98**, de 28 de abril de 2015. Disponível em: <[https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/00-saiba-mais/05.1\\_-\\_PORTARIA\\_MMA\\_N%C2%BA\\_98\\_DE\\_28\\_DE\\_ABR\\_DE\\_2015.pdf](https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/00-saiba-mais/05.1_-_PORTARIA_MMA_N%C2%BA_98_DE_28_DE_ABR_DE_2015.pdf)>. Acesso em: abr. 2020.

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 163**, de 08 de junho de 2015. Disponível em: <[https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/00-saiba-mais/05.2\\_-\\_PORTARIA\\_MMA\\_N%C2%BA\\_163\\_DE\\_08\\_DE\\_JUN\\_DE\\_2015.pdf](https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/00-saiba-mais/05.2_-_PORTARIA_MMA_N%C2%BA_163_DE_08_DE_JUN_DE_2015.pdf)>. Acesso em: abr. 2020.

NESTLER, John M.; PLOSKEY, Gene R.; PICKENS, James; MENEZES, Jonh & SCHILT, Carl **Responses of blueback herring to high-frequency sound and implications for reducing entrainment at hydropower dams**. North American Journal of Fisheries Management, 1992.

OHARA, Willian M.; QUEIROZ, Luiz Jardim de; ZUANON, Jansen; TORRENTE-VILARA, Gislene; VIEIRA, Fabiola G.; PIRES, Tiago & DORIA, Carolina Rodrigues da Costa. **O rio com a maior diversidade de peixes do mundo**. In: XX Encontro Brasileiro de Ictiologia. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2013.

PALUMBO, Mariana Isa Poci; RESENDE, Luiz Antônio de Lima; MACHADO, Luiz Henrique de Araújo & BORGES, Alexandre Secorun. **Potencial evocado auditivo para diagnóstico de surdez bilateral em dois cães**. Ciência Rural, Santa Maria, v.42, n.3, mar. 2010, p.494-497.

QUEIROZ, Luiz Jardim de; TORRENTE-VILARA, Gislene; OHARA, Willian Massaharu; PIRES, Tiago Henrique da Silva; ZUANON, Jansen & DORIA, Carolina Rodrigues da Costa (Org.) **Peixes do rio Madeira Volume 1**, SANTO ANTÔNIO ENERGIA, São Paulo, 2013.

TORRENTE-VILARA, Gislene; ZUANON, Jansen; AMADIO, Sidineia A. & DORIA, Carolina Rodrigues da Costa **Biological and ecological characteristics of Roestesmolossus (Cynodontidae), a night hunting characiform fish from upper Madeira River, Brazil**. Ichthyological Exploration of Freshwaters, 2008.

TORRENTE-VILARA, Gislene. **Heterogeneidade ambiental e diversidade ictiofaunística do trecho de corredeiras do rio Madeira, Brasil**. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2009.

TORRENTE-VILARA, Gislene; ZUANON, Jansen; LEPRIEUR, Fabien; OBERDORFF, Thierry & TEDESCO, Pablo A. **Effect of natural rapids and waterfalls on fish assemblage structure in the Madeira River (Amazon Basin)**. Ecology of Freshwater Fish, 2011.