



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - CEUB
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

LETÍCIA DE PAULA LUCENA MOTA

**BARREIRA ACÚSTICA PARA A PROTEÇÃO
DA ICTIOFAUNA EM HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS**

BRASÍLIA

2021



LETÍCIA DE PAULA LUCENA MOTA

**BARREIRA ACÚSTICA PARA A PROTEÇÃO
DA ICTIOFAUNA EM HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa.

Orientação: Sérgio Garavelli

BRASÍLIA

2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, agradecer a Deus. Por me dar saúde e me fortalecer, em cada etapa, para vencer todos os obstáculos.

Agradecer aos meus familiares por nos apoiarem e permitirem a construção da minha aventura na construção do conhecimento.

Agradecer ao meu brilhante orientador, Sérgio Garavelli, por aceitar me orientar nessa pesquisa, e por se mostrar sempre disponível, com muita dedicação e comprometimento em me desenvolver.

Queria deixar meus agradecimentos também, ao UniCEUB e à Assessoria de Pós- Graduação e Pesquisa, pela ajuda em cada fase do projeto e não medir esforços em amparar seus alunos pesquisadores.

E por fim, gostaríamos de agradecer ao professor Armando Maroja, por contribuir no desenvolvimento da metodologia, auxiliando na construção dos resultados mediante as simulações do SoundPLAN®.

RESUMO

A energia elétrica representa um papel importante na história, alterou comportamentos e propiciou melhorias significativas na qualidade de vida da sociedade. Por conseguinte, esse tipo de energia hoje é de fundamental para os seres humanos e há uma busca constante para o aumento do potencial elétrico no mundo. Atualmente a energia hidráulica no Brasil representa mais de 65% na matriz elétrica. Entretanto, a produção desta energia tem como consequências impactos ambientais nos cursos d'água e prejuízos a população de peixes. Para preservar rotas migratórias de peixes, usinas hidrelétricas têm adotado sistemas de transposição e avaliado alternativas para a repulsão da ictiofauna visando evitar o acúmulo de peixes no sopé das barragens que resultam na mortandade em turbinas e vertedouros, em especial durante as manutenções periódicas e intempestivas das turbinas. Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento que irá propor e testar uma barreira acústica que atenda as particularidades das espécies de peixes pertencentes a área de estudo, Usina Hidrelétrica de Jirau, situada em Roraima, na região amazônica. A tarefa específica deste trabalho foi simular diferentes configurações de barreiras acústicas com o objetivo de encontrar uma barreira ideal, com potencial de afugentar a ictiofauna a jusante dos tubos de sucção durante a manobra de parada, evitando o aprisionamento, o sofrimento de injúrias ou morte dessas espécies. A elaboração do projeto desse mecanismo de proteção, teve como ponto de partida dois parâmetros acústicos, determinados anteriormente pelo grupo de pesquisa responsável pelo projeto: o menor nível de estímulo sonora detectável, de 120 dB, re: 1 μ Pa e faixa de frequência entre 100 e 5000Hz, faixa de audição dos peixes amazônicos mais comuns encontrados no local de estudo. Na simulação da barreira ideal, além do limiar de audibilidade da ictiofauna e os limites de frequências audíveis, foi levado em conta o som residual produzido pela operação das turbinas, a relação sinal/ruído e o decaimento da intensidade do som na água, chegando a uma barreira com intensidade acima de 160 dB, re: 1 μ Pa. Por fim, com a utilização de um software adequado, simulou-se dois tipos de arranjos de fontes sonoras, o primeiro com uma única fonte e segundo com quatro fontes. Os resultados indicaram que os dois arranjos propostos são eficientes e tem potencial de afugentamento e proteção da ictiofauna a jusante de barragens de usinas hidroelétricas, localizadas na região amazônica. Como resultado do projeto teve-se a indicação do arranjo com uma fonte sonora, como suficiente para o propósito, pois apresenta o melhor custo-benefício.

Palavras-chave: Usinas hidrelétricas brasileiras; Ictiofauna; Barreira acústica.

SUMÁRIO

1	Introdução	6
2	Fundamentação Teórica	8
	2.1 Hidroelétricas de acumulação x fio d'água	8
	2.2 Efeitos negativos à ictiofauna.....	9
	2.3 Barreiras acústicas	10
3	Metodologia	12
4	Resultados e Discussões	15
5	Conclusões	22
	Referências	24

1 INTRODUÇÃO

Sob a perspectiva histórica podemos observar como a energia elétrica vem se tornando cada vez mais indispensável para a humanidade. A grande maioria das atividades realizadas pelo homem tangem a utilização da eletricidade, seja para a iluminação durante períodos diurnos, utilização de eletrodomésticos para atividades domésticas, acesso aos recursos tecnológicos, como: televisões, aparelhos celulares, computadores e entre outros. É possível averiguar a essencialidade da energia em tempos de pandemia pela Covid-19 no qual a sociedade permaneceu em quarentena em suas casas e para a realização de suas atividades, e se conectar com o mundo, precisou-se, como nunca, do acesso a eletricidade.

A presente pesquisa está inserida nos estudos relacionados ao sistema de produção elétrica brasileira. Como descrito anteriormente, grande maioria das atividades humanas envolvem o uso de eletricidade, dessa maneira, o ser humano tem procurado aumentar sua matriz elétrica. No Brasil, a geração de energia elétrica é prevalentemente composta por usinas hidroelétricas, e apresenta outros setores de produção de energia, como: energia eólica, energia termelétrica, gás natural, biomassa e entre outros. As hidroelétricas são representantes mais de 65% da matriz elétrica (EPE, 2020), uma vez que, esse tipo de geração de energia é uma fonte renovável, e assegura a demanda elétrica necessária para a população.

As usinas hidroelétricas produzem energia elétrica mediante a utilização do potencial hidráulico do rio. Conseqüentemente, se faz necessário o alagamento de grandes áreas e/ou mudanças nos cursos dos rios para a construção deste sistema de produção, e por conseguinte, ocasiona grandes impactos a vida da ictiofauna presente nos rios. As hidrelétricas influenciam de diversas maneiras a vivência dos peixes em sua esfericidade, desde a sua construção até o seu modo produtivo, podendo afetar seu estilo de vida reprodutivo, sua permanência no seu habitat natural, e o sofrimento de injúrias, ou até mesmo, ocasionar a morte e extinção dessas espécies de peixes ribeirinhos as barragens das hidroelétricas.

Tendo em vista, todos esses processos prejudiciais a sobrevivência da ictiofauna e considerando que esses processos podem ocasionar gravíssimas multas as concessionárias, como descrito por Andrade e Araújo (2011) é de extrema importância 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.

Trabalho esse complexo, mas muito necessário para todas as partes envolvidas para a produção de energia elétrica por UHE.

Figura 1.– Área de estudo: Usina Hidrelétrica de Jirau (RO)



(Fonte: Google Maps, 2021)

Existem técnicas e mecanismos, como descrito no Programa Peixe Vivo por Loures *et al.* (2016), para a minimização dos efeitos causados pelas usinas aos peixes, essas principais técnicas são: barreiras físicas (como grades e telas), barreiras elétricas, uso de som para afastamento, sistema de transposição de peixes (SPT), luz estroboscópica e cortina de bolhas.

Por conseguinte, o presente trabalho tem como objeto de estudo a Usina Hidrelétrica (UHE) de Jirau (RO), que é a segunda maior instalada no Brasil, e que está em operação desde outubro de 2013. O intuito da pesquisa é produzir e simular uma barreira acústica para a repulsão dos peixes aprisionados nos canais de fuga das UHE brasileiras, localizadas na região amazônica, mediante a determinação do menor nível de estímulo e da faixa detectável da audição dos peixes e, em conjunto, da definição do som residual subaquático produzido pelas

turbinas nas usinas hidroelétricas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Hidroelétricas de acumulação x fio d'água

Para iniciar o assunto é interessante frisar o conceito de uma usina hidrelétrica. Usinas hidrelétricas são obras desenvolvidas pela engenharia a qual utiliza-se dos impulsos e movimentos produzidos pela água para a geração de energia elétrica. Esse tipo de energia é considerado “limpa”, uma vez que, não há a liberação de substâncias poluentes na atmosfera, entretanto, causa muitos impactos a natureza devido a necessidade de alagamento de grandes áreas para seus reservatórios e alteração do habitat natural anteriormente existente.

As usinas hidrelétricas mais comuns são as de acumulação, estas dispõem de grandes reservatórios, porque as vazões de período seco são inferiores a vazão essencial para o cumprimento da matriz energética necessária para o atendimento populacional. Portanto, o estoque de água e o desnível das vazões afluente e defluente conferem garantia da produção de eletricidade. Entretanto, para a construção desse tipo de usina é inevitável o desmatamento e alagamento das regiões vizinhas para a execução do depósito para água, essa ação causa imensos e até irreversíveis danos ao meio ambiente.

Por outro lado, existem as usinas fio d'água, as quais dispensam reservatórios ou quando utilizam são em pequenas dimensões. A sua seleção decorre de vazões que são iguais ou superiores a vazão essencial para o atendimento da produção de energia necessária. Portanto, não há necessidade de estocagem de água, uma vez que, as vazões afluentes e defluentes são iguais. Apesar de ser menos invasiva ao meio ambiente, pela inexistência de um reservatório, a usina hidrelétrica de fio d'água produz uma menor quantidade de energia. A UHE Jirau, objeto de estudo do presente trabalho, é classificada como usina fio d'água. E segundo Dias, Maroja e Garavelli (2020):

A Hidroelétrica de Jirau (UHE Jirau), segunda maior hidrelétrica instalada no Brasil, 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 km² e 207,7 km², e a área do reservatório é de 361,6 km². A UHE de Jirau é gerida pela empresa Energia Sustentável do Brasil S.A (ESBR), que 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.

2.2 Efeitos negativos à ictiofauna

A atividade de produção de energia hidráulica é um dos fatores que mais impacta negativamente a vida da ictiofauna presente nos rodapés das barragens das UHE. Como mencionado na introdução, as usinas hidrelétricas afetam os peixes presentes nos rios em todos os seus processos e cabe ressaltar que, além das repercussões desfavoráveis causadas a fauna da região, as empresas hidroelétricas sofrem prejuízos econômicos mediante as multas e processos judiciais os quais mancham a imagem do negócio e podem provocar, em alguns casos específicos, um período de paralisação das atividades desses empreendimentos.

A implementação de uma usina hidrelétrica em um rio pode afetar o habitat dos peixes (LOURES *et al.*, 2016), uma vez que, a água deixa de ser lótica e torna-se uma água lântica proveniente da barragem e esta mudança no curso da água é capaz de ocasionar o extermínio de territórios cruciais como, por exemplo, os berçários. Outro fator a ser averiguado é a qualidade da água a jusante do rio, tendo em vista que esta pode apresentar fatores diferentes da água a montante da barragem, sendo eles: apresentar menor percentual de oxigênio, possuir menores temperaturas, manifestar-se com menor turbidez, menor quantidade de cheias e entre outros fatores. Todos os fatores mencionados provocam mudanças drásticas no estilo de vida dos peixes ribeirinhos a jusante da barragem, como: a abandono do habitat natural, impactos nos períodos de desova, dificuldade de sobrevivência dos filhotes e possível extinção de algumas espécies.

Os peixes presentes nas vizinhanças da barragem das usinas hidrelétricas podem sofrer injúrias e até mesmo o perigo de morte, uma vez que, são várias as manobras praticadas pelas UHE que prejudicam os peixes diretamente, como mencionado por Andrade et al. (2012). De acordo com Loures e Godinho (2016):

Durante a operação e manutenção programada ou intempestiva de usinas hidrelétricas, peixes correm risco de injúria e morte por aprisionamento, choque mecânico, descompressão, hipóxia e dessecação. As principais

manobras nas unidades geradoras (UG) que geram esses riscos são drenagem, giro a vazio, partida, reversão síncrono-gerador, teste de recomposição (blackstart) e variação de carga. Além dessas, deplecionamento e vertimento também são manobras que podem afetar os peixes.

A manobra que apresenta maior risco a ictiofauna é a parada da unidade geradora, em razão da vazão turbinada ser reduzida a zero provocando, desse modo, a possibilidade dos peixes subirem para o tubo de sucção e ficarem aglomerados. A partir da reiniciação do sistema, os peixes aprisionados podem sofrer danos físicos ou morrer por choques físicos nas pás ou nas paredes do conduto de sucção. Os peixes, em grande parte do tempo, se acumulam em toneladas tornando o trabalho de resgate uma tarefa complicada e que demanda muito tempo e esforço da equipe técnica para ser finalizada, aumento, desta maneira, o risco de morte da ictiofauna confinada. Mortes ou injúrias são comuns também por barotrauma (como exoftalmia, eversão do estômago, embolia, rompimento da bexiga natatória, hemorragia interna e entre outros) provocada pela variação bruta de pressão no interior da UG (Brown *et al.*, 2009).

Conseqüentemente, observa-se a necessidade da implementação pelas usinas hidrelétricas de mecanismos que venham mitigar as injúrias e mortes. Desta maneira, irá se proporcionar a garantia de proteção para a população de peixes aos pés da barragem da UHE e reduzir-se-ia o trabalho de resgate do tubo de sucção.

2.5 Barreiras acústicas

Estudos relacionados a simulação de barreiras acústicas, desempenhadas mediante a utilização uma fonte sonora para emissão de som para o afastamento dos peixes, é uma área de pesquisa nova e com estudos incipientes. Efetuou-se pesquisas de artigos relacionados e praticamente não foram encontrados estudos sobre, principalmente projetos desenvolvidos no Brasil. Portanto, esta área de pesquisa é um avanço para as técnicas de estudo de mecanismos de barreiras de proteção a ictiofauna presente a jusante da barragem das usinas hidrelétricas.

O estudo realizado por Loures *et al.* (2016) menciona o uso de barreiras de som para o afastamento dos peixes e possível adoção do mecanismo nas usinas hidroelétricas para proteção e preservação da ictiofauna local. Entretanto, o artigo evidenciou que, apesar de

estudos sobre barreiras acústicas serem realizados desde 1980, os resultados da aplicação do som para a repulsão de peixes têm evidenciado dados variáveis, inconstantes e com pouca eficácia em alguns casos. Essa inconsistência de dados é proveniente da especificação de cada espécie, devido à grande variação da faixa detectável audível pelos peixes, trazendo um grau de complexidade de atender a variedade de espécies (sensíveis a baixas, médias ou altas frequências) que podem estar presentes no rio.

Logo, o entendimento dos parâmetros acústicos da ictiofauna local é imprescindível para construção da barreira acústica, uma vez que, o ruído produzido pela barreira deve ser específico para as espécies de peixes mais abundantes no local de estudo, evitando sons com frequência próxima produzidas pelas turbinas hidrelétricas, como também, sons com alta intensidade capazes de prejudicar a saúde dos peixes. Outra consideração a se fazer é em relação aos sons residuais subaquáticos praticados nos locais com altos NPS (tomadas d'água e tubos de sucção) que podem dificultar a percepção pelos peixes (HAWKINS, 1986).

As barreiras acústicas exibem diversas características adequadas para a repulsão dos peixes, como a independência da luminosidade e turbidez do rio, reduzida atenuação conforme a profundidade e a habilidade de ser direcionada. Por consequência, a barreira sonora é uma excelente opção de mecanismo para o caso do local de estudo – Usina Hidrelétrica de Jirau (RO). Visto que, a água do Rio Madeira é procedente do regime local de chuvas e do degelo das encostas dos Andes, o que provoca o transporte de parcela de sedimentos em suspensão, sendo eles: silte, argila e areia os quais vão depositando-se às margens do rio, sem contar o amplo agrupamento de árvores inteiras, grandes troncos e/ou galhos, comprometendo a turbidez e luminosidade das águas do rio do local de estudo.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa teve como objetivo a proposição de uma barreira acústica para o afugentamento dos peixes retidos no tubo de sucção das usinas hidrelétricas brasileiras, localizadas na região amazônica. O local de estudo para o desenvolvimento do trabalho teve como alvo a UHE de Jirau, em Rondônia, localizada no Rio Madeira. A pesquisa foi voltada para as saídas da barragem a jusante do rio, pois a tendência é o interrompimento da subida dos peixes pelo tubo de sucção impedindo, dessa maneira, o seu aprisionamento, injúrias e morte.

Inicialmente, foi efetuada uma pesquisa de revisão bibliográfica a respeito das

espécies de peixes ribeirinhos a jusante da UHE de Jirau, visto que é essencial ter conhecimento a respeito da ictiofauna presente para a construção de uma barreira de som adequada. Obtendo-se a composição das linhagens de peixes mais frequentes encontradas no STP e resgatadas na manutenção das unidades geradoras, foi feita a um estudo complementar para a determinação de duas características importantes da audição dos peixes, sendo elas: o menor nível de estímulo detectável e a faixa detectável de frequência de audição dos peixes (Ladich & Fay, 2013). Não foram encontrados estudos a respeito das espécies do Rio Madeira, portanto foi utilizado o estudo dos autores Dias, Maroja e Garavelli (2020) no qual cruzou a árvore genealógica das espécies da UHE de Jirau com outros trabalhos e obteve-se, dessa maneira, o menor estímulo detectável e a faixa detectável de frequência da ictiofauna ribeirinha a barragem do rio madeiro.

Posteriormente, a equipe técnica da usina hidrelétrica de Jirau efetuou a coleta de dados referentes aos sons residuais do som aéreo na vizinhança da UHE Jirau. A coleta foi feita utilizando sonômetro Fusion, da 01 dB, enviado previamente pelo grupo de pesquisa, o qual extraiu os valores referentes ao NPS do ruído de fundo aéreo da usina nos pontos localizados na Figura 2, utilizando do Google Earth para a melhor visualização das coordenadas. Com as medidas in situ em mãos, foi realizado o processamento e tabelamento dos resultados coletados. Para a obtenção dos sons residuais subaquático, foi efetuado um estudo bibliográfico para a obtenção destes dados.

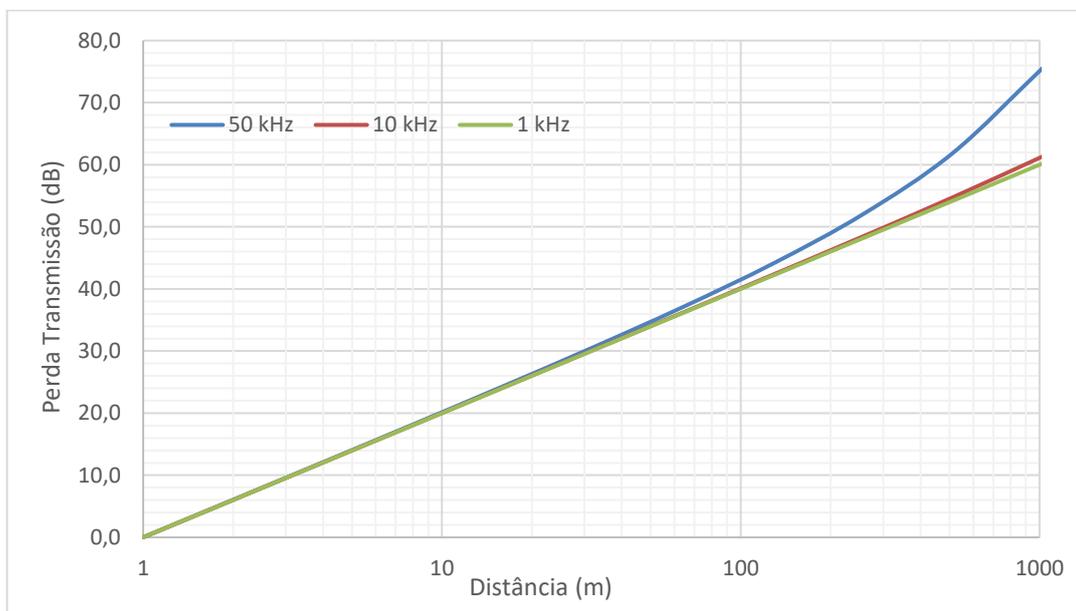
Tendo as variáveis fundamentais, foi iniciado o processo de simulação da barreira acústica. Levando em consideração do som residual produzido pelas turbinas, é necessário como pontuado por Dias, Maroja e Garavelli (2020) adicionar 15 dB considerando a relação sinal/ruído para que o som gerado pela fonte sonora da barreira acústica seja realmente percebido pela ictiofauna até no mínimo 20 metros (distância máxima entre os peixes e a fonte sonora nas proximidades do tubo de sucção), e em conjunto, precisa haver a consideração como descrito por Kinsler *et al.* (1999) do decaimento do som conforme a distância, acrescentando, de acordo com a equação 1 e a Figura 3, outro incremento de valor ao som residual subaquático

Figura 2 – Identificação dos locais da coleta de dados do som residual aéreo



(Fonte: Autor)

Figura 3 – Perda de transmissão para uma fonte pontual na água



Utilizando-se da equação 1, foi calculado o incremento necessário para a consideração da perda de transmissão do som no ambiente subaquático. Em seguida, somou-se o som residual subaquático, ocasionado pelas turbinas da UG, com os dois acréscimos interiormente

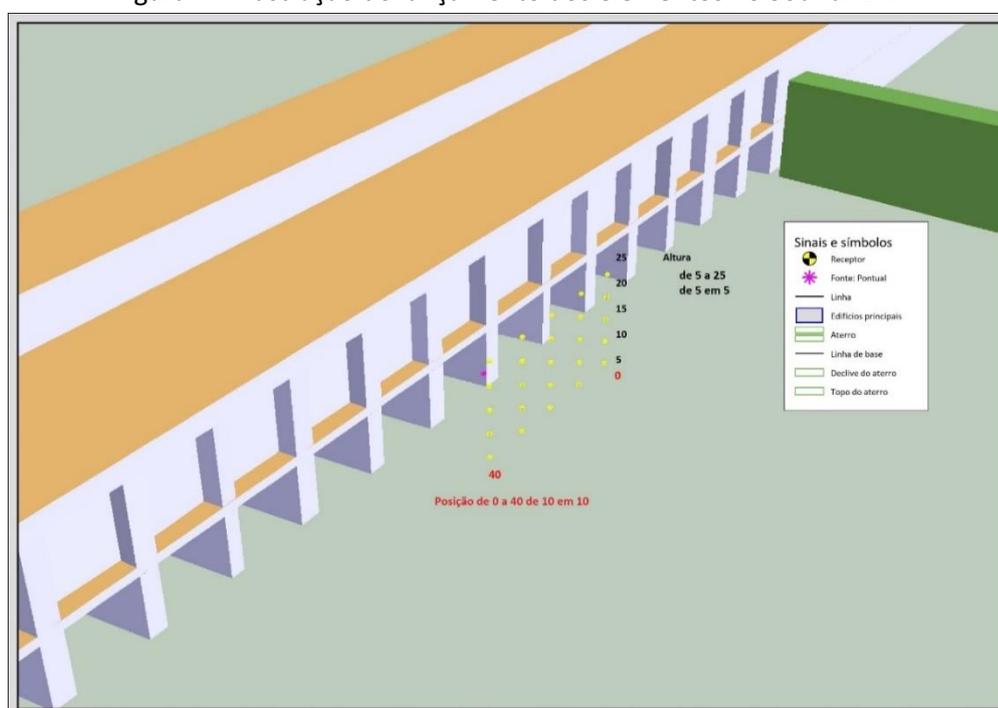
descritos (relação sinal/ruído e decaimento do som com a distância) e, deste modo, obteve-se o valor mínimo substancial para a fonte para a produção da barreira de som.

$$PT(1 \text{ kHz}) = 20 \cdot \log (r) + 0,063 \times 10^{-3} \cdot r \quad (1)$$

E, por fim, empregou-se do software SoundPLAN para a simulação e otimização da barreira acústica para a repulsão da ictiofauna. Para a efetuação da simulação, lançou-se os elementos da barragem e suas saídas a jusante do rio, o fundo do rio e a fonte sonora como se estivessem contidas em uma grande sala, simulando em um ambiente subaquático, como evidenciado na Figura 3.

Aplicou-se um plano X e Y, malha de receptores, com distâncias de 5, 15 e 30 m da fonte sonora para a averiguação do nível de pressão sonora (NPS) com a perda de transmissão sofrida pela distância e com o efeito do incremento das reflexões sofridas no fundo do rio Madeira. Em cada malha há a disposição de 25 receptores que são posicionados verticalmente nas alturas de 5 m, 10 m, 15 m, 15 m, 20 m e 25 m, e posicionados horizontalmente, da direita para esquerda de 0 m, 10 m, 20 m, 30 m e 40m, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração do lançamento dos elementos no SoundPLAN



(Fonte: Autor)

Foram realizadas simulações com dois diferentes de arranjos de barreiras acústicas para ver a eficiência das barreiras de som na proteção da ictiofauna e averiguação de qual arranjo seria

suficiente para o cumprimento desta função. Os dois arranjos simulados foram: um arranjo com apenas uma fonte pontual de 175 dB (re: 1 μ Pa) e outro arranjo com quatro fontes pontuais de 169 dB (re: 1 μ Pa) que somadas verificam 175 dB no eixo central.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, elaborou-se a ponderação dos dados referentes as características da audição dos peixes. Os dados foram alcançados mediante o estudo bibliográfico do Fórum Ambiental (2020), o qual forneceu o menor nível de estímulo detectável e a faixa detectável de frequência da audição dos peixes através do cruzamento das famílias presentes no rio madeiro com trabalhos de outros autores à disposição.

Analisando o Quadro 1, é possível verificar que a espécie *Lepomis macrochirus* é a única que a intensidade ultrapassa 100 dB (re: 1 μ Pa), por outro lado, as demais espécies apresentam valores de 60, 75 e 90 dB (re: 1 μ Pa). Outra análise, é em relação a faixa de frequência percebida pelos peixes que apresenta valores a partir de 100 Hz a no máximo 5000 Hz, conseqüentemente, a ictiofauna da UHE de Jirau possui maior aptidão a escutar sons de baixa e média frequência. Com os dados propostos, conclui-se e estipula-se que para a produção da barreira acústica irá se considerar como padrão o menor nível de estímulo de 120 dB (re: 1 μ Pa) e a faixa de frequência detectável de 100 Hz a 5000 Hz.

Quadro 1 – Equivalência entre as espécies do Rio Madeira e espécies estudadas.

Espécies do Rio Madeira				Ladich e Fay, 2013
Ordem	Família	Espécie (Nome Comum)	LOCAL	<i>f_{min}</i> - <i>f_{máx}</i> (Hz) / Limiar (dB)
Characiformes	Prochilodontidae	<i>Prochilodus nigricans</i> (Curimatã)	UG	Piranha Vermelha (<i>Pygocentrus nattereri</i>) / Família Characidae (100-5.000 /70)
		<i>Semaprochilodus insignis</i> (Jaraqui)	UG	
	Serrasalminidae	<i>Colossoma macropomum</i> (Tambaqui)	UG	
		<i>Piaractus brachipomus</i> (Pirapitinga)	STP	
Gymnotiformes	Apterontidae	<i>Sternarchogiton nattereri</i> (Ituí Espada)	UG	Glass knifefish (<i>Eigenmannia virescens</i>) / Família Sternopygidae (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)

<i>Siluriformes</i>	<i>Doradidae</i>	<i>Pterodoras granulosus</i> (Abotoado)	UG	Bagre listrado de Rafael (<i>Platydoras armatulus</i>) (200-5.000/ 60)
<i>Siluriformes</i>	<i>Pimelodidae</i>	<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	

(Fonte - adaptada: Fórum Ambiental, 2020)

Posteriormente, foi efetuado a pesquisa do som residual aéreo no local de estudo. As medidas foram retiradas *in loco* pela equipe técnica da UHE, com a utilização do sonômetro (Fusion, da 01 dB), e enviados a equipe de trabalho. Com as medidas promovidas, procedeu-se para o processamento dos dados do som residual, fazendo-se a consideração dos NPS avaliados em cada ponto do mapa de extração de medidas.

Tabela1 - Processamento de medidas do som de fundo aéreo

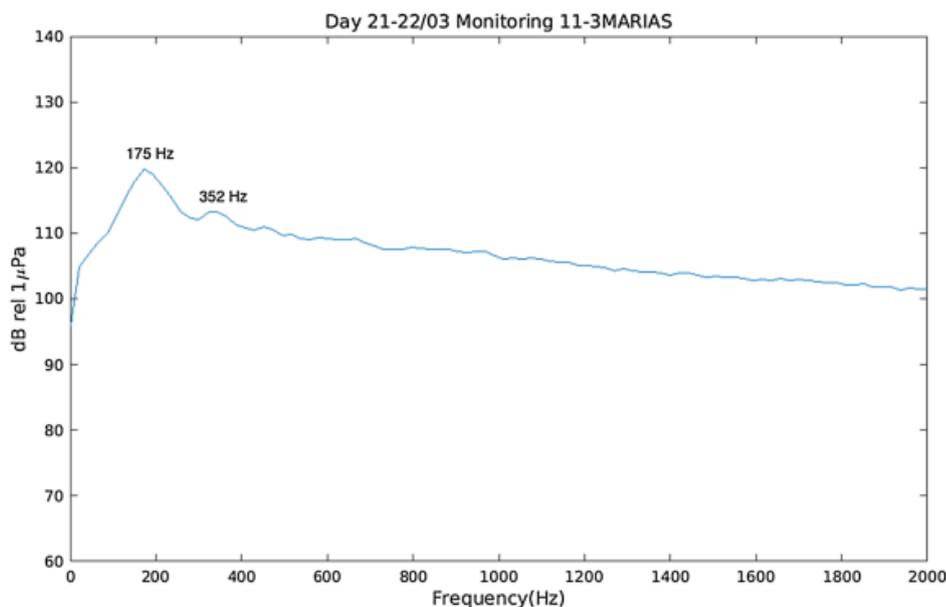
Data	Ponto de medida	Horário de início BSB	Coordenadas		NPS
			X	Y	Leq
2021.07.01	Ponto 1	12:21:00	320132	8973429	31,7
2021.07.01	Ponto 2	12:36:00	320480	8973042	34,6
2021.07.01	Ponto 3	12:57:00	321118	8975074	30,3
2021.07.01	Ponto 4	13:20:00	321038	8975890	38,2
2021.07.01	Ponto 5	13:36:10	320297	8975363	34,9
2021.07.01	Ponto 6	16:00:00	320045	8975135	49,8
2021.07.01	Ponto 8	16:10:00	319835	8974816	53,6
2021.07.01	Ponto 7	16:19:00	319903	8974947	50,8
2021.07.01	Ponto 28	16:29:00	320144	8974903	43,0
2021.07.01	Ponto 27	16:41:00	320138	8974840	46,0
2021.07.01	Ponto 9	16:53:50	319497	8974926	66,3
2021.07.01	Ponto 9	17:00:00	319497	8974926	61,2
2021.07.01	Ponto 32	17:09:00	319440	8975412	58,4

2021.07.01	Ponto 10	17:18:00	318999	8975283	58,6
2021.07.01	Ponto 11	17:27:20	318578	8975568	47,6
2021.07.01	Ponto 12	17:37:00	318155	8975583	37,9
2021.07.01	Ponto 13	17:51:10	318251	8976036	36,0
2021.07.02	Ponto 14	10:45:00	319163	8976137	39,5
2021.07.02	Ponto 15	11:01:00	319037	8976493	40,6
2021.07.02	Ponto 16	12:10:00	319711	8976997	45,2
2021.07.02	Ponto 17	12:28:00	319068	8977381	61,8
2021.07.02	Ponto18	12:36:00	319195	8977375	54,7
2021.07.02	Ponto 23	14:47:10	318996	8977744	47,9
2021.07.02	Ponto 19	14:56:00	319331	8977702	44,3
2021.07.02	Ponto 20	15:05:00	319833	8977914	38,0
2021.07.02	Ponto 21	15:31:00	319768	8978290	36,1
2021.07.02	Ponto 22	15:52:10	320339	8978047	39,3
2021.07.02	Ponto 24	16:20:00	318609	8977664	39,3
2021.07.02	Ponto 25	16:31:00	317627	8977062	35,4
2021.07.02	Ponto 26	16:47:00	317439	8977196	40,1

Conforme Tabela 1, pode-se observar que a média dos valores do nível de pressão sonora é de 44,7 dB e o maior valor apresentado foi de 66,3 dB. Por outro lado, para a análise do som residual de fundo foi efetuado uma revisão bibliográfica. Encontrou-se dois artigos que forneceram o estudo necessário para as medidas do ruído de fundo. O primeiro artigo, Finger *et al.* (2007) trata a respeito da relação do NPS dentro e fora da água, e fazendo as considerações que permitem a utilização de tal comparação, evidenciou-se que no caso proposto na presente pesquisa basta somar 61,5 dB ao ruído aéreo para obter-se os NPS subaquático. Por conseguinte, pegando o maior valor das medidas retiradas *in loco* e somando-se 61,5 dB, atingir-se-ia 127,8 dB (re: 1 μ Pa) para o som residual produzido pelas turbinas.

Fazendo a consideração do segundo artigo, Duarte *et al.* (2018) a qual realizou medidas do som residual na UHE Três Marias em Minas Gerais, adquiriu-se dos NPS produzidos pela turbina hidroelétrica dessa usina hidroelétrica brasileira. Analisando -se a Figura 5, conclui-se que os maiores NPS chegou a 120 dB (re: 1 μ Pa), para a faixa de frequência de 175 Hz. Dessa maneira, ambos os artigos, evidenciaram valores aproximados em torno de 120/130 dB (re: 1 μ Pa) para o ruído subaquático.

Figura 5 – NPS produzidos pelas turbinas na UHE Três Marias



(Fonte: Duarte *et al.*)

Com os dados do ruído de fundo em mãos, iniciou-se a verificação do NPS necessário para a fonte da barreira acústica. Utilizando o maior ruído de fundo de 127,8 dB (re: 1 µ Pa), considerou-se dois fatores importantes, sendo eles: a relação sinal/ruído e o decaimento do som com a distância. Em seguida, aplicou-se expressão matemática da equação 1, que faz a consideração do decaimento do NPS mencionado por Kinsler *et al.* (1999), para uma distância de 20 metros da fonte (distância máxima entre a fonte sonora e os peixes) e concluiu-se a necessidade de considerar o aumento de 26 dB (re: 1 µ Pa) no ruído de fundo, além dos 15 dB da relação sinal/ruído mencionados na metodologia. Somando os três valores: do ruído subaquático, relação sinal/ruído e decaimento do som; obteve-se a imposição de uma fonte de no mínimo de 168,8 dB (re: 1 µ Pa) para a repulsão da ictiofauna do rio madeira. Entretanto, nesta pesquisa, majorou-se o valor da fonte e adotou-se a medida de 175 dB (re: 1 µ Pa).

Para a simulação utilizou-se o software SoundPLAN para a otimização dos arranjos das barreiras de som e análise do comportamento do NPS com a distância, e em conjunto, com o acréscimo das reflexões. Foram desenvolvidos dois modelos de barragem, sendo eles: uma fonte pontual única de 175 dB (re: 1 µ Pa) e, a outra, um arranjo de 4 fontes pontuais de 169 dB (re: 1 µ Pa). Para a análise da eficiência das barreiras com a distância foram efetuadas verificações de NPS a 5, 15 e 30 metros da fonte sonora, os dados obtidos das simulações

foram expressos na Tabelas 2.

Tabela 2 – Comparação dos resultados da simulação com os dois diferentes arranjos

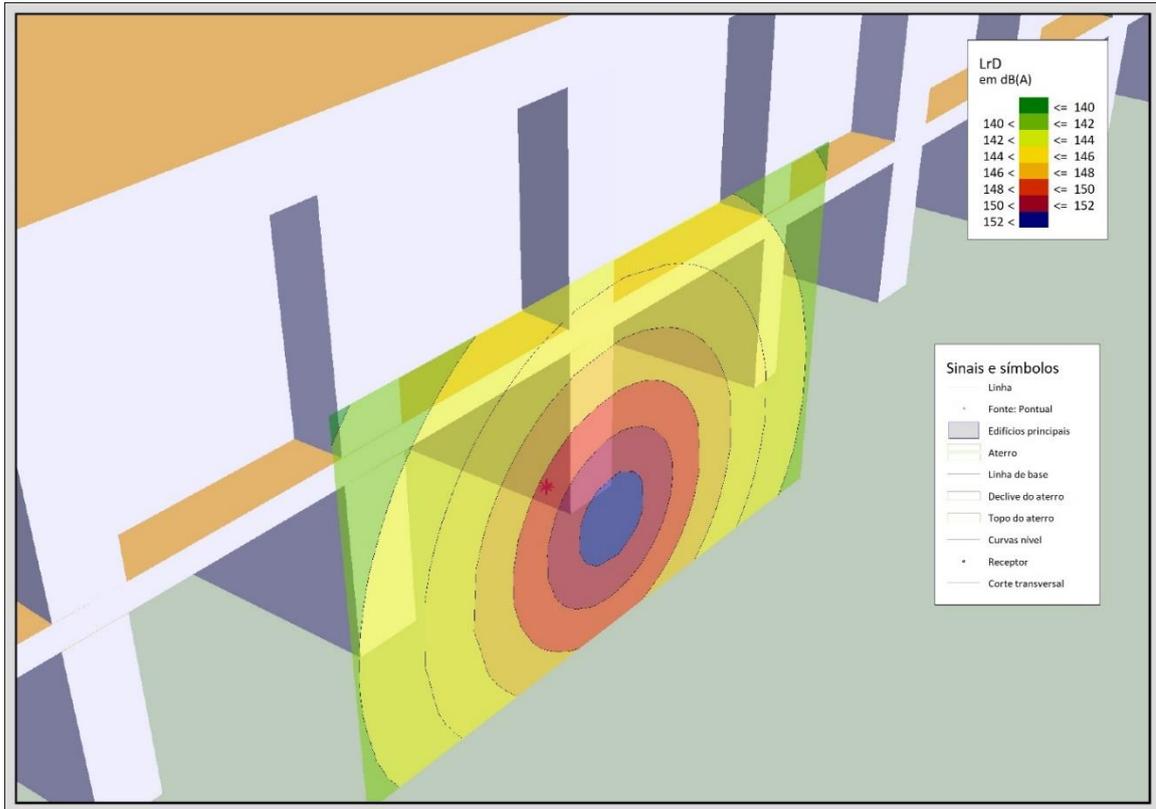
Distância da fonte (m)	Receptor	Posição dos receptores		NPS (re: 1 μ Pa)	
		P	Z	1 Fonte	4 Fontes
5	R1	0	5	141,7	141,7
	R2	0	10	141,7	141,8
	R3	0	15	141,3	141,4
	R4	0	20	140,6	140,6
	R5	0	25	139,6	139,6
	R6	10	5	146,4	146,5
	R7	10	10	146,6	146,6
	R8	10	15	145,5	145,5
	R9	10	20	143,8	143,8
	R10	10	25	142,0	142,0
	R11	20	5	152,0	152,0
	R12	20	10	152,6	152,6
	R13	20	15	149,1	149,1
	R14	20	20	145,9	145,9
	R15	20	25	143,3	143,3
	R16	30	5	146,9	147,0
	R17	30	10	147,1	147,1
	R18	30	15	145,9	145,9
	R19	30	20	144,0	144,1
	R20	30	25	142,2	142,2
	R21	40	5	141,8	141,8
	R22	40	10	141,8	141,9
	R23	40	15	141,4	141,5
	R24	40	20	140,7	140,7
	R25	40	25	139,7	139,7
15	R26	0	5	139,8	139,9
	R27	0	10	139,9	139,9
	R28	0	15	139,6	139,6
	R29	0	20	139,1	139,1
	R30	0	25	138,3	138,4
	R31	10	5	142,5	142,5
	R32	10	10	142,6	142,6
	R33	10	15	142,1	142,1
	R34	10	20	141,2	141,2
	R35	10	25	140,1	140,1
	R36	20	5	144,2	144,2
	R37	20	10	144,3	144,3
	R38	20	15	143,6	143,6
	R39	20	20	142,4	142,4
	R40	20	25	141,0	141,0
	R41	30	5	142,9	142,9
	R42	30	10	142,9	142,9
	R43	30	15	142,4	142,4
	R44	30	20	141,4	141,5
	R45	30	25	140,3	140,3
	R46	40	5	140,1	140,1
	R47	40	10	140,1	140,1
	R48	40	15	139,8	139,8
	R49	40	20	139,3	139,3

	R50	40	25	138,5	138,5
30	R51	0	5	136,5	136,5
	R52	0	10	136,5	136,6
	R53	0	15	136,4	136,4
	R54	0	20	136,1	136,1
	R55	0	25	135,7	135,7
	R56	10	5	137,7	137,7
	R57	10	10	137,7	137,7
	R58	10	15	137,5	137,5
	R59	10	20	137,2	137,2
	R60	10	25	136,7	136,7
	R61	20	5	138,2	138,2
	R62	20	10	138,2	138,3
	R63	20	15	138,0	138,1
	R64	20	20	137,7	137,7
	R65	20	25	137,1	137,1
	R66	30	5	137,9	137,9
	R67	30	10	137,9	137,9
	R68	30	15	137,7	137,7
	R69	30	20	137,3	137,4
	R70	30	25	136,8	136,8
	R71	40	5	136,7	136,8
	R72	40	10	136,8	136,8
	R73	40	15	136,6	136,6
	R74	40	20	136,3	136,3
	R75	40	25	135,9	135,9

Os resultados da Tabela 2 indicam que as duas configurações apresentam resultados semelhantes, o que se pode concluir que ambas serão eficientes, pois até mesmo em 30 metros o som produzido pela fonte sonora será percebido pelos peixes e cumprirá a sua função de afugentar os peixes do canal do tubo de sucção. Entretanto, não irá incomodar a ictiofauna local além do necessário.

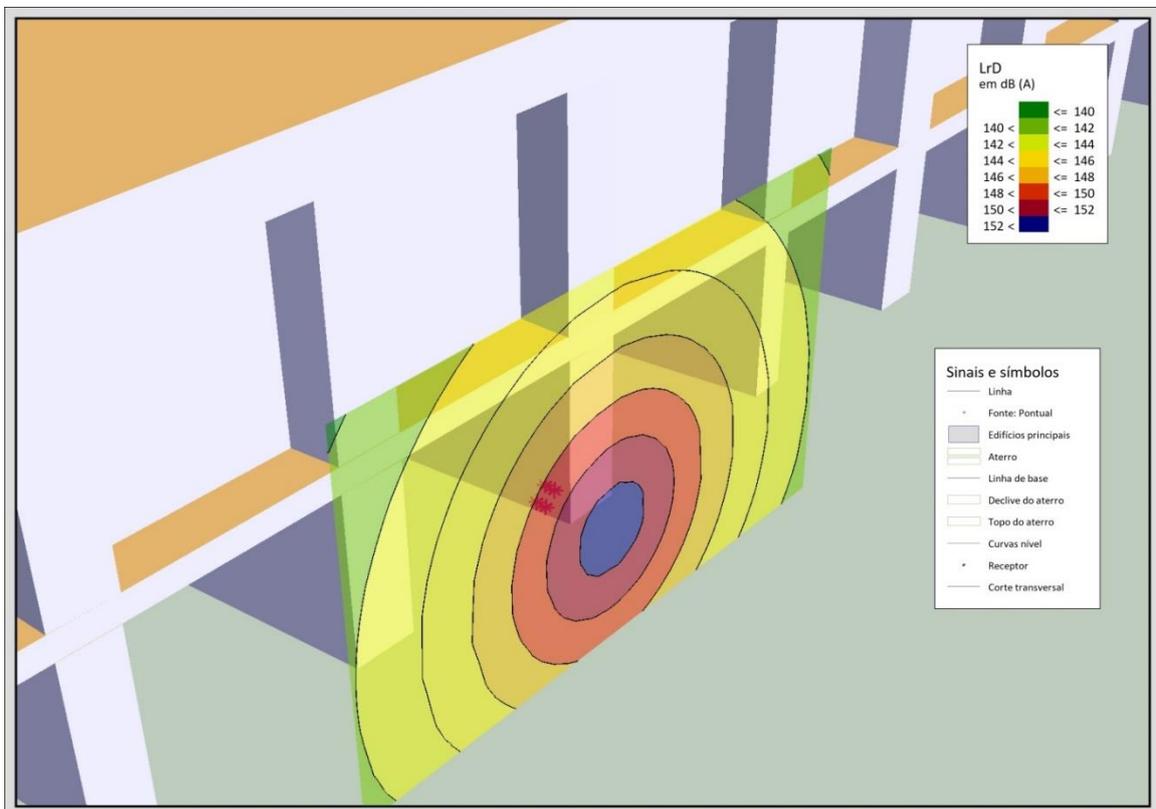
A partir dos dados e simulações acima, nas Figuras 6 e 7, podemos finalizar e deduzir mediante as simulações e operações realizadas, que ambos os arranjos foram eficientes e que não houve grande variação deles. Por esse motivo, conclui-se que a barreira acústica com uma fonte sonora já seria suficiente para servir combatendo a subida dos peixes no tubo de sucção das usinas hidroelétricas brasileiras.

Figura 6 – Simulação no software com uma fonte pontual



(Fonte: Autor)

Figura 7 – Simulação no software com quatro fontes pontuais



(Fonte: Autor)

5 CONCLUSÕES

A ictiofauna é afetada pela construção e operação das usinas hidrelétricas. A morte e danos físicos, neste estudo ocasionadas pela subida dos peixes pelo tubo de sucção, geram impactos negativos para imagem das concessionárias as quais sofrem com altíssimas multas e processos judiciais. Portanto, uma possível mitigação para esse problema é a implementação de barreiras acústicas, estudo pouco explorado, principalmente no Brasil.

Com o intuito de produzir barreiras sonoras eficazes para a repulsão dos peixes confinados no tubo de sucção, em decorrência de manutenções periódicas ou intempestivas na unidade geradora, realizou-se estudos característicos a respeito dos parâmetros acústicos da audição dos peixes e dos sons residuais subaquáticos provenientes da operação das turbinas para a simulação e otimização do mecanismo de proteção da ictiofauna. Analisado todos os componentes indispensáveis para a construção da barreira, observou-se e definiu-se a necessidade de os arranjos das barreiras de som apresentarem intensidade de 175 dB (re: 1 μ Pa) para o cumprimento do objetivo estabelecido em projeto.

Neste trabalho, empregou-se de dois tipos de arranjos de barreira: com uma fonte pontual única e, outro arranjo, com quatro fontes pontuais. Ambas as barreiras acústicas foram verificadas os níveis de pressão sonora nas distâncias de 5, 15 e 30 metros. Decorridas todas as simulações, evidenciou-se que os dois modelos de barreiras se mostraram eficientes para o combate a subida dos peixes pelo conduto de sucção das barragens. Portanto, o arranjo de barreiras acústicas com apenas uma fonte já seria satisfatório para a função de mecanismo de proteção aos peixes.

Com o exposto trabalho, apesar de ser produzido na usina hidroelétrica de Jirau, evidencia-se que a solução das barreiras acústicas pode ser aplicada em outras UHE no Brasil e fora do país, e que o estudo apresentado pode dar origem a novos trabalhos, sendo estes: a coleta *in situ* do som residual subaquático e a experimentação *in situ*, no local de estudo, da barreira acústica.

REFERÊNCIAS

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

ANDRADE F., Prado I.G., Loures R.C. & Godinho A.L. (2012) **Evaluation of techniques used to**

protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil. Neotropical Ichthyology 10 (4), 723-730.

AGOSTINHO, Ângelo. A., GOMES, L. C. & PELICICE, F. M. **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, ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., COMBASE – Comitê Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

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

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/NATURAE. **13º Relatório semestral – Programa de Conservação da Ictiofauna.** Rio de Janeiro, RJ, 2019.

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

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

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

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

KINSLER, Lawrence E., Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, **Fundamentals of Acoustics,** 4th Edition .ISBN: 978-0-471-84789-2 December 1999 560.

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

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

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 445,** de 17 de dezembro de 2014.

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 98,** de 28 de abril de 2015.

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 163,** de 08 de junho de 2015.

OHARA, W.M. et al. **O rio com a maior diversidade de peixes do mundo**. In: XX Encontro Brasileiro de Ictiologia. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2013.

PALUMBO, M.I.P.; RESENDE, L.A.de L.; MACHADO, L.H.de A. e BORGES, A.S. **Potencial evocado auditivo para diagnóstico de surdez bilateral em dois cães**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.3, p.494-497, mar, 2010.

LOURES R.C. & GODINHO A.L. (orgs.) (2016). *Avaliação de Risco de Morte de Peixes em Usinas Hidrelétricas*. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais, (Serie Peixe Vivo, 5). ISBN 978-85-87929-61-7.

QUEIROZ et al. (Org.). **Peixes do rio Madeira Volume 1**. Santo Antônio Energia. São Paulo, 2013.

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*, 2008.

TORRENTE-VILARA, G. **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, G. *et al.* **Effect of natural rapids and waterfalls on fish assemblage structure in the Madeira River (Amazon Basin)**. *Ecology of Freshwater Fish*, 2011.

H.L. DUARTE. *et al.* **Effects of hydroelectric turbine noise on the behaviour of Leporinus taeniatus (Characiformes: Anostomidae) in captivity**. Japan Ethological Society and Springer Japan KK, part of Springer Nature, 2018.

D.C. Finger.; T.G.Leighton & P.R.White. **Issues relating to the use of a 61.5 dB conversion factor When comparing airborne and underwater anthropogenic noise levels**. ScienceDirect, 20007.

Andrade, E.S & Araújo, J.C. **Medidas mitigadoras dos impactos ambientais causados por usinas hidrelétricas sobre peixes**. *Revista electrónica de Veterinária*, 2011.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso: julho de 2021.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Fontes – Tipos e Fontes de Energia. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/>>. Acesso: julho de 2021.

Dias, M.F; Maroja, A.M & Garavelli, S.L. **Sistema para repulsão de ictiofauna em hidroelétricas brasileiras**. XVI Fórum Ambiental, 2020.