



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS - TO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO AMBIENTE

FEDLY SUFRA

**SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E TECNOLOGIAS AMIGÁVEIS PARA PEIXES EM
HIDRELÉTRICAS NO RIO TOCANTINS COM APLICABILIDADE AMBIENTAL**

Palmas, TO

2025

Fedly Sufra

**Soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes em hidrelétricas no Rio
Tocantins com aplicabilidade ambiental**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Ciências do Ambiente da Universidade Federal do
Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de
Mestre em Ciências do Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcos André de Oliveira.

Palmas, TO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S946s Su fra, Fedly.

Soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes em hidrelétricas no Rio Tocantins com aplicabilidade ambiental. / Fedly Su fra. – Palmas, TO, 2025.

134 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Ciências do Ambiente, 2025.

Orientador: Dr. Marcos André de Oliveira

1. Tecnologia amigável aos peixes. 2. Hidroeletricidade.. 3. Turbinas e vertedouros. 4. Tocantins. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fedly Sufra

**Soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes em hidrelétricas no Rio
Tocantins com aplicabilidade ambiental**

Dissertação apresentada à UFT - Universidade Federal do Tocantins - Campus Universitário de Palmas, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente. Foi avaliada para obtenção do título de Mestre em Ciências do Ambiente e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de Aprovação: /07/2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos André de Oliveira (UNESP) - Orientador

Profa. Dra. Carla Simone Seibert (UFT)

Prof. Dr. Ademir Abdala Prata Junior (UNESP)

Dedico este trabalho à minha mãe, Madame Marie Lydia Sufra, que nos deixou ao longo do caminho. Que este trabalho seja uma homenagem à sua memória e a mantenha viva entre nós.

Dedico também a meu pai, Senhor Rolès Sufra, pela sua coragem, dedicação e profundo senso de responsabilidade. Ele e minha mãe cuidaram de nós com amor e abnegação, colocando de lado seus próprios desejos e conforto para garantir o nosso bem-estar. Agradeço-lhe e amo-o.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor Todo-Poderoso por me conceder sabedoria, paciência e perseverança para superar as dificuldades e realizar este trabalho com sucesso. A ajuda do Grande Arquiteto do Universo foi essencial nos momentos de incerteza, guiando-me e me encorajando a seguir em frente em busca dos meus objetivos.

Gostaria também de expressar minha profunda gratidão aos professores do "Programa de Pós-graduação em Ciências do Ambiente da Universidade Federal do Tocantins (PPGCiamb - UFT)", em especial ao meu orientador, Professor Dr. Marcos André de Oliveira, pela paciência infinita e pelo apoio precioso.

Agradeço a meus queridos pais minha mãe Marie Lydia Fortilus e meu pai Rolès Sufra, Embora já não estejam mais entre nós, suas memórias permanecem vivas por meio de seus filhos. Esta obra também lhes pertence, pois ambos dedicaram muito trabalho e esforço para formar o homem que me tornei hoje.

Assim, dedico este trabalho à memória imortal de ambos e também eu sou muito grato de todo o coração, pelo apoio incondicional que me deram ao longo da minha vida. O amor, os incentivos e os sacrifícios de vocês foram minha maior fonte de força, motivação e inspiração. Sou profundamente grato por terem me ensinado valores como a perseverança e a determinação, que me guiaram até aqui. Esta dissertação é o reflexo da confiança que vocês sempre depositaram em mim e do esforço que fizeram ao meu lado. Esta conquista também é de vocês, e dedico-a a vocês com toda minha gratidão e meu carinho.

Meus agradecimentos se estendem também aos meus irmãos e irmãs: Rachelle Sufra Excellent, Rodney Sufra e Jethro Sufra, que nunca me deixaram sozinho e foram uma fonte constante de incentivo nos momentos difíceis.

Agradeço de coração à minha companheira, Rosilda de Jessus Caneiro, pela paciência e pelas palavras de encorajamento diárias que me sustentaram ao longo dessa jornada.

Não posso deixar de expressar minha gratidão à Comissão de Internacionalização da Universidade Federal do Tocantins – RELINTER, especialmente à Madame Adila, Gabriel, Profa. Micaela Fernandes, Prof. Mario Morais e Profa. Clarissa, pelo apoio.

Agradeço também aos meus colegas do PPGCiamb – UFT, turma 2023, que me apoiaram e me ajudaram de todas as formas possíveis.

Finalmente, expresso minha gratidão ao meu amigo e colega, Hélio Geraldo Ubisse, de Moçambique, que conheci aqui no Brasil, assim como aos meus amigos Cajuste Harry

Junior e Rose Beltilde Estimé, que, mesmo à distância, não cessaram de me encorajar. Agradeço também aos meus outros amigos: Luís Jo Inchuca, Raul Flávio Hilário, Georges, Donat Christian Mbimbi Mzuzi, Mogagabe, Francisco e tantos outros.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento recebido por meio de bolsa de pesquisa do Programa GCUB-CAPES de Mobilidade Internacional.

RESUMO

A operação de usinas hidrelétricas (UHE) na bacia do rio Tocantins tem provocado episódios recorrentes de mortalidade de peixes, um impacto ambiental significativo agravado pela ineficiência na fiscalização e pela escassez de ações efetivas por parte do órgão ambiental estadual, o Naturatins, resultando em prejuízos diretos à biodiversidade aquática local. Esta pesquisa teve como objetivos principais: (1) examinar as tecnologias e soluções amigáveis aos peixes disponíveis na literatura científica voltada à mitigação de impactos em empreendimentos hidrelétricos; (2) investigar a existência e aplicação de tecnologias e estratégias construtivas voltadas à proteção da ictiofauna nas usinas instaladas ao longo do rio Tocantins; e (3) indicar, dentre as alternativas identificadas, aquelas mais adequadas às especificidades ecológicas e hidrológicas regionais. Os resultados evidenciam o potencial de tecnologias emergentes, como os sistemas de monitoramento ambiental Peixe Sensor e GelPeixe, capazes de fornecer dados em tempo real sobre o comportamento migratório e as pressões exercidas pelas estruturas hidráulicas. Além disso, foram identificadas turbinas de concepção mais amigável à fauna aquática, como a turbina de Parafuso de Arquimedes, indicada para usinas de baixa queda; a turbina Alden, projetada para reduzir mortalidade de peixes em empreendimentos de maior porte; bem como turbinas Kaplan com pás convencionais e modificadas e Francis com adaptações estruturais. Também foram analisadas soluções complementares, como os Sistemas de Transposição de Peixes (STP) e os sistemas de orientação comportamental, que direcionam os peixes para rotas seguras por meio de estímulos físicos e sensoriais. No estudo de casos múltiplos, constatou-se que, entre as cinco usinas hidrelétricas analisadas no rio Tocantins, apenas as UHE de Peixe Angical e Lajeado possuem sistemas de transposição piscícola confirmados especificamente escadas para peixes embora não tenham sido encontrados dados técnicos disponíveis que comprovem sua eficácia ou desempenho operacional, o que reforça a urgência por monitoramento sistemático, validação técnica e aplicação contextualizada dessas soluções.

Palavras-chave: Rio Tocantins; Tecnologias amigáveis para peixes; Soluções construtivas amigáveis para peixes; Hidrelétricas; Ictiofauna; Sustentabilidade; Amazônia Legal; Energia limpa; Vida na água.

ABSTRACT

The operation of hydroelectric power plants (HPPs) in the Tocantins River basin has led to recurring incidents of fish mortality, a significant environmental impact exacerbated by inadequate regulatory enforcement and the limited effectiveness of the state environmental agency, Naturatins, resulting in direct harm to local aquatic biodiversity. This study aimed to (1) examine fish-friendly technologies and solutions available in the scientific literature for mitigating the environmental impacts of hydropower projects; (2) investigate the existence and implementation of such technologies and design strategies in HPPs along the Tocantins River; and (3) identify the most appropriate alternatives based on the region's ecological and hydrological characteristics. The findings highlight the potential of emerging technologies such as the Sensorfish and Gelfish monitoring systems, which provide real-time data on migratory behavior and hydraulic stressors affecting fish populations. Furthermore, fish-friendly turbine designs were identified, including the Archimedes Screw Turbine, suitable for low-head plants; the Alden Turbine, designed to reduce fish mortality in large-scale facilities; as well as modified Kaplan and Francis turbines, which feature structural adaptations to improve fish passage survival. Complementary mitigation measures were also analyzed, including Fish Passage Systems (FPS) such as ladders, elevators, nature-like fishways, and behavioral guidance systems that use sensory stimuli such as light and sound to direct fish toward safer migration routes. In the multiple-case study analysis, it was observed that, among the five hydroelectric plants examined along the Tocantins River, only the Peixe Angical and Lajeado plants were confirmed to have installed fish ladders; however, no technical data were found regarding their functionality or operational performance, underscoring the urgent need for systematic monitoring, technical validation, and site-specific application of these fish protection strategies.

Keywords: Tocantins River; Fish-friendly technologies; Fish-friendly construction solutions; Hydroelectric dams; Ichthyofauna; Sustainability; Legal Amazon; Clean Energy; Life below Water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de uma Usina hidrelétrica	27
Figura 2 – O Peixe sensor Gen 2 (ou SensorFish Gen II): (a) modelo de CAD e (b) fotografia (Deng et al. 2014b)	32
Figura 3 - Peixe natural (truta arco-íris) e Gelpeixe em diferentes estágios de preparação	34
Figura 4 – Turbina Kaplan	35
Figura 5 – Turbina Francis	36
Figura 6 - Turbina de Parafuso de Arquimedes	37
Figura 7 - Turbina Alden	38
Figura 8 - Grade com barras horizontais espaçadas de 20 centímetros	39
Figura 9 - Passagem de peixes no estilo rústico	41
Figura 10 - Passagem de peixes com tanques sucessivos	41
Figura 11 - Etapas de funcionamento de uma eclusa de transposição de peixes	42
Figura 12 - Distribuição geográfica da produção científica dos documentos analisados	46
Figura 13 - Distribuição geográfica dos estudos por continente	47
Figura 14 – Evolução da produção científica dos últimos (2023-2022)	49
Figura 15 - Recorrência de palavras durante os anos 2013 – 2022	50
Figura 16 - Tendências dos estudos realizados entre 2013 e 2022	52
Figura 17 - Concentração de estudos sobre dispositivos e tecnologias amigáveis para peixes nos periódicos selecionados – Periódicos Capes	53
Figura 18 - Concentração de estudos sobre dispositivos e tecnologias amigáveis para peixes nos periódicos selecionados – Google Acadêmico	54
Figura 19 - Concentração dos temas estudados sobre tecnologias e dispositivos para proteção de peixes	55
Figura 20 – Rede de palavras relacionadas às turbinas amigáveis para peixes	58
Figura 21 – Rede de palavras relaciona as barras hidráulicas	66
Figura 34 – Rede de palavras relaciona as Pequenas centrais hidrelétricas	70
Figura 23 - Etapas principais de uma Análise de Conteúdo	73
Figura 24 – Rede de palavras entre estudos empíricos e teóricos	77
Figura 25 – Rede de palavras sobre o tipo de abordagem utilizada	79
Figura 26 – Rede de palavras sobre conteúdo das abordagens	81
Figura 27 - Rede de palavras sobre o nível das Tecnologias e Soluções Construtivas	82
Figura 28 - Configuração das usinas hidrelétricas em operação no Rio Tocantins	85

Figura 29 - Mapa de localização do estado do Tocantins, rio Tocantins e UHEs instaladas	86
Figura 30 - Localização da UHE Peixe Angical	88
Figura 31 - Arranjo físico da UHE Peixe Angical	90
Figura 32 - Panorama da UHE São Salvador	91
Figura 33 - Imagem do arranjo geral da UHE Estreito	92
Figura 34 – Escada de peixes da UHE Luís Eduardo Magalhães	93
Figura 35– Localização UHE Cana Brava	94
Figura 36 – Arranjo da UHE Cana Brava	95
Figura 37 – UHE Serra Mesa	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Protocolo de Revisão de Escopo	23
Quadro 2 - Formulário de Codificação	25
Quadro 3 – Manual de codificação	25
Quadro 4 - Propriedades básicas das UHEs instaladas no rio Tocantins	79
Quadro 5- Resumo sobre as tecnologias e soluções construtivas ambientalmente aplicáveis a cada Usina Hidreletrica no rio Tocantins	100

LISTA DE SIGLAS

AC	Análise de Conteúdo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CIGB	Comissão Internacional de Grandes Barragens
CMB	Comissão Mundial de Barragens
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LEM	Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães
NATURATINS	Instituto Natureza do Tocantins
NEPA	<i>National Environmental Policy Act</i>
NMFS	<i>National Marine Fisheries Service</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SF	<i>Sensorfish</i>
STP	Sistemas de Transposição de Peixes
UHE	Usina Hidrelétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
DTEC	Dongturbo Elétrica Empresa Ltda
ADTUR	Agência de Desenvolvimento do Turismo do Estado do Tocantins

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Motivações	19
1.2 Objetivos	20
2 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	21
2.1 Revisão de Escopo: Protocolo e Execução	21
2.2 Análise de Conteúdo do Corpus de Estudos Seleccionados	24
2.3 Revisão Narrativa	27
2.4 Análise de Casos Múltiplos	28
2.5 Estrutura da Dissertação.....	28
3 SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E TECNOLOGIAS AMIGÁVEIS PARA PEIXES EM HIDRELÉTRICAS: REVISÃO DE ESCOPO	29
3.1 Panorama das soluções	31
3.2 Resultados e Discussão Bibliométrica	43
3.3 Análise de Conteúdo	70
4 MORTANDADE DE PEIXES EM HIDRELÉTRICAS INSTALADAS NO RIO TOCANTINS: ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS	77
4.1 As Hidrelétricas no Rio do Tocantins	78
4.2 Levantamento de dados sobre a mortandade de peixe no rio do Tocantins.....	91
4.3 Casos de mortandade em hidrelétricas no rio Tocantins	93
4.4 Resultados e Discussão	97
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103

REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE.....	116
ANEXO - PARECER TÉCNICO	138

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso fundamental para o desenvolvimento social e econômico, impulsionando a produtividade e a qualidade de vida. A eletrificação de áreas remotas, por exemplo, possibilita o acesso a serviços essenciais como educação, saúde e comunicação. Além disso, a energia elétrica é um dos principais vetores para a transição para uma economia de baixo carbono, ao possibilitar a integração de fontes renováveis de energia.

A transição energética para um modelo mais sustentável e resiliente exige a eletrificação da economia, com base em fontes renováveis e produção local de energia, como forma de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir a dependência externa. Os riscos da dependência externa para suprimento das demandas energéticas internas de um país voltaram a ser foco de discussões devido à recente crise energética na Europa, intensificada pela guerra entre a Rússia e a Ucrânia. Assim, os países têm buscado adquirir os meios técnicos para garantir ou aumentar a disponibilidade da energia. A geração de eletricidade nas principais potências mundiais caracteriza-se pela diversidade de tecnologias empregadas.

O Brasil, apesar de figurar entre os países com matriz energética diversificada, ainda concentra sua produção em fonte hídrica. Segundo a EPE (2021), a demanda nacional por energia elétrica crescerá cerca de 3,1% ao ano entre 2019 e 2030, o que reforça o interesse público no seu suprimento. Contudo, a construção e a operação de reservatórios de hidrelétricas podem gerar significativos problemas ambientais, com destaque para fragmentação de habitats, destruição da biodiversidade e mortalidade em diferentes escalas de espécies aquáticas.

Neste sentido, apesar dos benefícios associados à hidreletricidade, os desafios ambientais e sociais são expressivos neste setor. No caso da Amazônia brasileira, a construção de barragens tem resultado na remoção de comunidades locais, na perda de biodiversidade e na emissão de gases de efeito estufa (Fearnside, 2016). Além disso, em ecossistemas sensíveis como o Cerrado, a implantação de usinas hidrelétricas tem provocado mudanças no uso da terra e acelerado o desmatamento (Ferreira et al., 2022).

O funcionamento de uma usina hidrelétrica baseia-se no armazenamento e na liberação controlada da água para a geração de eletricidade. A classificação dos barramentos hidráulicos é essencial para compreender seus modos de operação e impactos ecológicos. Nacionalmente, a Resolução Normativa nº 482, publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2012, estabelece a classificação das instalações hidrelétricas com base na potência instalada. Segundo a normativa, as usinas são classificadas em três categorias: Usina Hidrelétrica (UHE), com potência superior a 30 MW; Pequena Central Hidrelétrica (PCH), com potência superior a

5 MW e igual ou inferior a 30 MW; e Central Geradora Hidrelétrica (CGH), com potência igual ou inferior a 5 MW (Oliveira; Oliveira, 2021; Oliveira, 2012).

As vantagens da implantação de uma grande Usina Hidrelétrica (UHE), no Brasil, se alicerçam historicamente na importância da reserva estratégica em seu reservatório de acumulação, no seu custo competitivo, no seu alto fator de capacidade frente às outras fontes renováveis intermitentes e na sua capacidade de atendimento na ponta do consumo. Por outro lado, existem as desvantagens da multiplicidade de impactos ambientais negativos que se consolidam durante o ciclo de vida desse empreendimento. Estes dois aspectos antagônicos constituem debates e controvérsias históricas no planejamento energético brasileiro (Oliveira et al., 2022).

Os impactos ambientais provocados pela implantação de uma hidrelétrica, nos meios físico, biótico e antrópico, relacionam-se, principalmente, com a sua localização geográfica e as características do seu reservatório, tais como a área alagada, a área alagável, o volume útil, o tempo de retenção, a capacidade de amortecimento de cheias e etc. (Oliveira et al., 2022). Tendo em vista tais impactos, a construção de hidrelétricas apresenta desafios ambientais significativos, como destacado por Corà et al. (2020). Os autores identificam cinco áreas principais de atenção: a manutenção da continuidade ecológica, que abrange a migração de peixes e o transporte de sedimentos; a preservação da qualidade da água; a garantia de vazão ecológica; o controle do pico de vazões a jusante, que pode impactar a estrutura do rio e a vida aquática, causando mortalidade de peixes, alteração de habitat e deterioração da qualidade da água; e a implementação de medidas de mitigação para proteger a biodiversidade.

Outros pesquisadores, como Pinto e Oliveira (2013), apontam para a ocorrência de injustiça ambiental, argumentando que o modelo de desenvolvimento brasileiro prioriza o crescimento econômico em detrimento da proteção socioambiental. Essa injustiça ambiental, característica marcante do modelo de desenvolvimento nacional, conforme Aceslrad et al. (2004), afeta principalmente comunidades extrativistas tradicionais e agricultores familiares, que sofrem as maiores perdas. Ademais, a implantação de UHEs acarreta impactos socioambientais interdependentes, comumente analisados em conjunto e, frequentemente, implica no deslocamento populacional, expropriação de terras e expulsão de habitantes, gerando graves consequências sociais.

A complexidade e a magnitude dos aproveitamentos hidrelétricos não devem ser utilizadas como justificativa para negligenciar os aspectos de sustentabilidade inerentes a esses projetos (Liu et al., 2013). A avaliação de questões socioambientais, frequentemente tratadas como externalidades, apresenta desafios consideráveis. Conflitos e contradições de interesse

emergem mesmo em tópicos que deveriam ser explicitamente definidos durante o processo de licenciamento ambiental no Brasil, o que evidencia a complexidade da questão (Oliveira et al., 2022).

Um dos aspectos fundamentais que integram as dimensões ambiental e econômica das regiões afetadas pela construção de usinas hidrelétricas é a fauna local, em particular a ictiofauna. No contexto específico deste estudo, destaca-se que a fauna de peixes neotropicais é extraordinariamente diversa, representando entre 20% e 25% da biodiversidade global de peixes de água doce (Reis et al., 2016), com mais de 6.200 espécies nomeadas e atribuídas por taxonomistas (Albert et al., 2020). A maior parte dessa diversidade é encontrada na bacia do rio Amazonas, que abriga a ictiofauna de água doce mais rica do planeta, com mais de 2.700 espécies conhecidas (Dagosta e Pinna 2019). Contudo, vários relatórios indicaram grandes mudanças na composição das espécies de peixes devido às barragens, um aumento nas espécies consideradas em risco e uma redução nas espécies comerciais devido à restrição e à perda de espécies migratórias (Lucinda et al. 2007).

O rio Tocantins, localizado no leste da Amazônia, é o recorte geográfico da presente pesquisa. Este sistema fluvial é influenciado por dois regimes hidrográficos distintos, o equatorial e o do Centro-Norte do Brasil, drenando tanto áreas da Floresta Amazônica quanto do Cerrado (Jandessa, et al., 2021). Tais processos geomorfológicos e geológicos (Jandessa et al., 2021; de Jesus et al., 2020; Dilve et al., 2007) moldaram um ambiente de alta biodiversidade, fundamental para a conservação dos ecossistemas ripários e para o uso sustentável dos recursos naturais da região (Jandessa Silva et al. 2020). Os principais afluentes da margem direita do rio Tocantins são os rios Bagagem, Tocantinzinho, Paranã, Manoel Alves e Farinha; enquanto que os principais afluentes da margem esquerda são os rios Santa Tereza, Araguaia e Itacaiúnas (MMA, 2006; ANA, 2020).

Embora a mortalidade massiva de peixes seja uma ocorrência frequente em usinas hidrelétricas, sua importância como impacto na conservação dos mesmos varia consideravelmente. Em geral, está associada ao projeto, à operação das estruturas hidráulicas da barragem e às características da biota local (composição, abundância e estratégias de vida), bem como às características físicas do ambiente (condições climáticas, hidrológicas, topográficas e oxigênio dissolvido) (Agostinho et al., 2021).

A mortalidade de peixes, em hidrelétricas, pode ter várias origens: impacto dos peixes nas estruturas e sistemas hidráulicos (vertedores, comportas, canais, tubulações, grades e turbinas); condições hidrodinâmicas adversas, como turbulência (Oliveira et al., 2024; Oliveira; Alcântara Pereira, 2022) e forças de cisalhamento (Oliveira et al., 2020); cavitação; e variações

bruscas na pressão hidrostática à montante (reservatório) ou à jusante (canal de restituição) (Moraes et al., 2021; Oliveira, 2018).

Além disso, o confinamento de águas rasas dentro dos componentes das turbinas, como o tubo de sucção, o revestimento em espiral e o rotor, é uma das principais causas de lesões e mortalidade de peixes. Especificamente, as variações súbitas no nível d'água de jusante podem aprisionar organismos em pequenas poças, enquanto a supersaturação de gases pode ter efeitos catastróficos, resultando em mortalidade em larga escala. Enquanto a entrada de peixes nas turbinas, seguida por confinamento e redução dos níveis de oxigênio que pode levar à hipóxia ou anoxia, é considerada a principal causa de mortalidade em barragens (Agostinho et al., 2007; Andrade et al., 2012).

1.1 Motivações

Conforme observado em outras nações latino-americanas, a proliferação de barragens hidrelétricas no Brasil resultou na fragmentação dos principais sistemas fluviais. Essa intervenção substituiu os gradientes fluviais lóticos por uma sucessão de reservatórios lênticos, alterando fundamentalmente a dinâmica ecossistêmica (Agostinho et al., 2008). A Bacia Tocantins-Araguaia exemplifica essa realidade. O Rio Tocantins, com 2.400 km de extensão, é um dos afluentes mais significativos do Baixo Amazonas. Juntamente com seu principal afluente, o Rio Araguaia (2.200 km de extensão), essa bacia drena uma vasta área de 760.000 km² no Brasil central. Atualmente, o Rio Tocantins encontra-se fragmentado por sete grandes barragens hidrelétricas, estrategicamente localizadas em seus trechos médio e superior (Agostinho et al., 2011). Considerando sua importância ecológica para a Amazônia Legal e a subnotificação de eventos de mortandade de peixes reportados por populações locais, o Rio Tocantins foi selecionado como objeto de estudo para esta pesquisa.

Neste sentido, faz-se necessário avançar com pesquisas científicas que sirvam de suporte para tomada de decisão no contexto regional, sobre as soluções disponíveis e ambientalmente amigáveis para peixes (fish-friendly). Portanto, o problema de pesquisa a ser explorado nasce da seguinte pergunta: como evitar ou reduzir a mortandade de peixes associada às usinas hidrelétricas no rio Tocantins? Logo, a presente dissertação tornará possível indicar as principais soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes, emergentes, para usinas hidrelétricas, que poderiam ser aplicadas às especificidades ambientais do Tocantins, considerando as características da sua ictiofauna, regime do rio, relevo, características climáticas e questões socioambientais.

Uma tecnologia amigável para peixes é definida como um componente técnico instalado em uma usina hidrelétrica, que permite que a planta opere sem problemas e, simultaneamente, atenua os seus impactos negativos na ictiofauna. Por outro lado, uma solução construtiva amigável para peixes é uma realização de engenharia, interna ou próxima a uma usina hidrelétrica, com o mesmo objetivo.

Para contribuir com a indicação de possíveis soluções para as hidrelétricas do rio Tocantins é fundamental investigar na literatura internacional a existência de tecnologias e soluções sustentáveis capazes de mitigar ou evitar a mortalidade de peixes nesses sistemas. A identificação e catalogação destas soluções devem considerar sua eficácia, viabilidade ambiental e aplicabilidade no contexto hidroenergético. Neste recorte, a Revisão de Escopo surge como uma metodologia essencial para estruturar a pesquisa, permitindo uma análise abrangente das tecnologias disponíveis e de seus impactos ecológicos. Sendo que, a partir desta investigação, os resultados poderão oferecer subsídios para políticas públicas que conciliem a geração de energia hidrelétrica e a conservação da biodiversidade aquática, contribuindo para uma abordagem mais sustentável e ambientalmente responsável dos stakeholders.

Nesta perspectiva, este estudo teve como tema soluções construtivas, dispositivos e tecnologias fish-friendly em hidrelétricas. A pesquisa fundamentou-se em textos (científicos, acadêmicos e técnicos) internacionais publicados entre 2013 e 2022, e foram avaliados os resultados para aplicação no contexto do rio Tocantins. O suporte metodológico incluiu revisão de escopo, revisão narrativa e estudo de casos múltiplos de usinas hidrelétricas implantadas.

1.2 Objetivos

O objetivo da pesquisa é investigar as soluções construtivas, dispositivos e tecnologias hidrelétricas amigáveis para peixes, com aplicabilidade ambiental para o rio Tocantins.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Avaliar quais as tecnologias e soluções construtivas "*fish-friendly*" existentes estão descritas na literatura científica;
- Analisar os casos de mortalidade de peixes ocorridos em hidrelétricas no Rio Tocantins;
- Avaliar a aplicabilidade das soluções identificadas no contexto das hidrelétricas do Rio Tocantins, considerando os desafios e as particularidades regionais.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta dissertação realizou uma pesquisa exploratória que integra **quatro** aportes metodológicos, a saber: a Revisão de Escopo da literatura (Rammal, 2023) alida a Análise de Conteúdo (Sampaio, 2021; Bardin, 2016); a Revisão Narrativa da literatura (Varpio et al., 2024); e o Estudo de Casos Múltiplos (Hunziker; Blankenagel, 2021). A seguir, são descritos os métodos utilizados em cada etapa da pesquisa.

2.1 Revisão de Escopo: Protocolo e Execução

As revisões de literatura são essenciais na pesquisa acadêmica, atendendo a diversos propósitos e metodologias. Elas podem ser categorizadas por objetivos e abordagens distintas. Em particular, as revisões de escopo mapeiam a literatura existente sobre um tópico amplo, identificando lacunas e áreas para futuras pesquisas; as revisões narrativas fornecem uma visão geral ampla de um tópico, sintetizando a literatura existente sem diretrizes metodológicas rígidas. Estas últimas podem incluir subtipos como as avaliações de última geração, que acompanham a evolução de conceitos, e as revisões críticas, que desafiam as suposições existentes (Ebido; Ikhida, 2024; Varpio et al., 2024).

A revisão da literatura auxilia o investigador a evitar a duplicação de pesquisas ou, quando isso for de interesse, a reutilização e aplicação da pesquisa em diferentes escalas e contextos (Galvão; Ricarte, 2019). Contudo, frisa-se que a revisão de escopo não deve ser considerada como uma revisão de literatura tradicional, mas como um projeto de pesquisa em si, que parte de um protocolo de busca e explora uma questão claramente especificada, primando pela reprodutibilidade de seus procedimentos investigativos.

A presente investigação foi conduzida utilizando a revisão de escopo para mapear o campo de estudo e análise de conteúdo (AC) dos documentos selecionados para categorizar e sintetizar as evidências encontradas. A revisão de escopo foi utilizada para o levantamento das soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes na literatura, pois como metodologia de pesquisa distintiva, atende ao objetivo primordial de delinear e sumarizar o panorama da literatura existente sobre o tópico específico. Divergindo da revisão sistemática, que se concentra em responder a uma pergunta de pesquisa precisa, a revisão de escopo adota uma abordagem mais ampla e exploratória. Sua finalidade precípua consiste em identificar os conceitos-chave, as lacunas e as tendências que emergem da pesquisa realizada, proporcionando, desse modo, uma visão panorâmica e abrangente do campo de estudo em questão. Na sequência, a análise de conteúdo dos documentos selecionados foi utilizada para categorizar e sintetizar as evidências encontradas. A seguir, são descritos os protocolos e

procedimentos de cada etapa.

Buscando uma abordagem estruturada para identificar, analisar e sintetizar pesquisas existentes sobre um tópico específico de interesse, a revisão de escopo da literatura, normalmente, envolve as seguintes etapas metodológicas:

- i) Definição do tópico de pesquisa e dos critérios de elegibilidade. Estabelecimento de uma pergunta de pesquisa clara para orientar a revisão. Embora de natureza mais ampla do que em uma revisão sistemática, a revisão de escopo ainda requer uma pergunta norteadora evidente e concisa, que delimite o escopo da investigação. Em sequência deve-se estabelecer os critérios de elegibilidade explícitos para determinar quais estudos serão incluídos (Brignardello et al. 2024). A realização de uma pesquisa bibliográfica abrangente, para tal fim, exige a utilização de bancos de dados (por exemplo, Scopus, Web of Science, Medline e etc.) para reunir a literatura relevante, empregando palavras-chave específicas relacionadas ao tópico para garantir uma pesquisa minuciosa (Thakur et al., 2024).
- ii) Seleção e abstração de dados de estudos. Consiste, primeiramente, na seleção dos estudos identificados com base nos critérios de elegibilidade e, posteriormente, na extração dos dados relevantes, incluindo características e resultados dos estudos (Brignardello et al. 2024).
- iii) Sintetização e análise das descobertas. Consolida-se com o resumo dos dados, qualitativo e quantitativamente, identificando os principais temas e tendências. Normalmente são utilizados formatos estruturados, como tabelas e quadros, por exemplo, para apresentar as descobertas de forma explícita (Shah et al., 2023).
- iv) Estruturação das conclusões. Inclui a explanação de evidências gerais e discussão das implicações para a prática e futuras direções de pesquisa (Brignardello et al. 2024).

Portanto, embora as revisões sistemáticas forneçam uma estrutura rigorosa para sintetizar a literatura, as revisões de escopo oferecem flexibilidade na exploração de tópicos mais amplos sem o mesmo nível de detalhe, permitindo que os pesquisadores identifiquem lacunas de conhecimento e temas emergentes (Kostense, 2024). Neste sentido, para atender aos objetivos deste estudo, foi elaborado um protocolo de revisão de escopo, detalhado no

Quadro 1, com base nas recomendações de Petticrew e Roberts (2006), bem como de Miranda e Assis (2023).

Quadro 1 – Protocolo de Revisão de Escopo

Dados	Descrição
Título	Soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes em hidrelétricas.
Questão da revisão	Quais são as soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes disponíveis atualmente para serem empregadas em usinas hidrelétricas?
Tipos de documentos	Artigos de periódicos e de congressos, teses, dissertações e relatórios técnicos.
Tipos de estudos	Primários e Secundários.
Idioma	Português, inglês e francês.
Banco de dados	Portal de periódicos da CAPES e Google acadêmico.
Palavras-chave	<i>Fish-friendly hydropower technologies</i>
Delimitação temporal	Textos publicados entre janeiro de 2013 e dezembro de 2022.

Fonte: elaborado pelo autor.

O levantamento dos documentos de interesse foi realizado no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e no Google Acadêmico, considerando os últimos 10 anos, nos idiomas inglês, português e francês. A escolha dessas plataformas deveu-se à sua abrangência e acesso a uma variedade de documentos, como artigos, dissertações, teses e relatórios técnicos (CAPES, 2023; GOOGLE, 2023).

O Portal de Periódicos da CAPES centraliza mais de 39 mil periódicos com texto completo e 396 bases de dados (CAPES, 2023). O Google Acadêmico é um mecanismo virtual de pesquisa, livremente acessível, que organiza e lista textos completos ou metadados da literatura acadêmica em uma extensa variedade de formatos de publicação (Google, 2023). Note que essas duas grandes plataformas têm conexões diretas com outras plataformas ou indexadores científicos, como, por exemplo: Scopus, Sciendirect, MDPI e etc.

Para operacionalizar os critérios de elegibilidade, adotou-se um conjunto de três perguntas: (1) o título é relevante para o tema?; (2) o resumo e o foco da pesquisa estão alinhados com o escopo do estudo?; e (3) o documento está redigido em um dos idiomas definidos no protocolo? Apenas os documentos que resultaram em respostas afirmativas as três questões foram incluídos na pesquisa; caso contrário, foram excluídos

Após essa filtragem inicial, os textos selecionados foram avaliados para determinar sua relevância para o presente estudo. Em seguida, foram realizadas análises quantitativas e qualitativas para a formulação dos resultados e conclusões desta etapa da pesquisa.

2.2 Análise de Conteúdo do Corpus de Estudos Selecionados

Para analisar e sintetizar o corpus de documentos resultante da revisão de escopo, optou-se pela técnica de análise de conteúdo (AC). A AC é uma metodologia que permite a interpretação sistemática de textos, identificando temas, padrões e categorias de forma objetiva (SAMPAIO, 2021). Conforme Bardin (2016), essa abordagem segue etapas estruturadas, como a definição de categorias de análise e a codificação dos dados, o que garante rigor à investigação. A AC foi escolhida por viabilizar tanto uma descrição qualitativa quanto quantitativa dos fenômenos analisados, adequando-se ao objetivo de catalogar e caracterizar as soluções e tecnologias identificadas.

Segundo Bardin (2016), a AC geralmente segue etapas estruturadas (Figura 1), incluindo a seleção do corpus, a definição das categorias de análise, a codificação dos textos e a posterior interpretação dos dados para extrair significados e identificar tendências. Embora a categorização não seja obrigatória, a maioria dos estudos a adota para facilitar a compreensão e organização dos dados brutos, garantindo maior rigor e coerência na análise.

Figura 1- Etapas principais de uma Análise de Conteúdo



Fonte: elaborado pelo autor.

No presente estudo, os objetivos foram reafirmados com base nos índices estabelecidos

na ficha de codificação, permitindo examinar e catalogar as soluções construtivas e tecnologias hidrelétricas compatíveis com a preservação da fauna aquática. Para isso, foram analisadas: a natureza das pesquisas; a abordagem metodológica na coleta e análise dos dados; os tipos de tecnologias e soluções construtivas amigáveis aos peixes identificadas em cada estudo; e o nível de maturidade dessas inovações. A estrutura detalhada do Formulário de Codificação (Miranda; Assis, 2023) é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Formulário de Codificação

Revista:		Título:		
Autor:		Ano:		
Palavras-chave:				
Qual a natureza da pesquisa?				
Empírica		Teórica		
Qual o tipo de abordagem utilizada?				
Qualitativa	Quantitativa		Mista	
Qual é conteúdo das abordagens?				
Soluções construtivas		Tecnologias		Avaliações
Qual é a maturidade das tecnologias e soluções construtivas?				
Teórico	Acadêmico	Protótipo	Experimental	Comercial

Fonte: Elaborado pelo autor a partir das recomendações de Bauer (2002) e Fonseca Junior (2012).

Krippendorff (2018) destaca que os erros de codificação frequentemente resultam de variáveis mal definidas e instruções pouco claras para os codificadores. Para garantir uma codificação precisa, Miranda (2023) propôs o uso de um manual de codificação com descrições verbais precisas para orientar os codificadores. Esse manual de codificação, apresentado no Quadro 3, foi criado para servir como referência, garantir a transparência do processo de análise e assegurar sua reprodutibilidade.

Quadro 3 – Manual de codificação

Índices	Categorias	Descrição
Natureza da pesquisa	Empírico (E)	Uma pesquisa empírica é aquela que utiliza dados e observações do mundo real para testar hipóteses ou explorar fenômenos. Ao contrário de estudos teóricos, que se concentram no desenvolvimento de modelos ou

		conceitos abstratos, estudos empíricos fundamentam-se em evidências tangíveis e mensuráveis para formular conclusões. (Creswell, 2013).
	Teórico (T)	Artigo baseado exclusivamente em uma revisão da literatura.
Tipo de abordagem utilizada	Qualitativo (Ql)	Análise das características objetivas ou subjetivas dos objetos e/ou temas de pesquisa
	Quantitativo (Qt)	Análise realizada com o uso de indicadores numéricos.
	Mista (Mx)	Pesquisa que combina tanto indicadores numéricos quanto a análise das características dos objetos e/ou temas de pesquisa.
Conteúdo das abordagens	Soluções construtivas (Sl)	Uma solução construtiva na área da hidroeletricidade é geralmente definida como modificações estruturais ou instalações projetadas para mitigar os impactos ambientais negativos de barragens e centrais hidrelétricas. Essas soluções visam melhorar a compatibilidade ecológica das infraestruturas hidrelétricas, ao mesmo tempo em que mantêm sua eficácia operacional (Coutant, et al., 2000).
	Tecnologias (Tc)	Uma tecnologia amigável para peixes refere-se a dispositivos e métodos projetados para minimizar o impacto negativo das instalações de engenharia nas populações de peixes. Isso inclui sistemas para facilitar a migração dos peixes, reduzir lesões e mortalidade causadas pelas turbinas, e preservar habitats aquáticos (Larinier, 2000).
	Avaliações (Av)	As avaliações são tipos de pesquisa que avaliam a rota migratória, as lesões, o efeito de cisalhamento e outros tipos de avaliação dos peixes que passam pelas centrais hidrelétricas.
Nível tecnológico	Teórica (Te)	É uma inovação que existe principalmente no domínio das ideias, dos conceitos ou dos modelos, sem ter sido ainda posta em prática ou testada de forma empírica (Tidd, et al., 2013).
	Acadêmica (Ac)	Definido como uma inovação ou solução técnica que já

	superou a fase puramente teórica e está em processo de validação e avaliação no contexto de pesquisa acadêmica (Etzkowitz, et al., 2000).
Protótipo (Pr)	Quando uma inovação ou solução técnica supera as fases teórica e acadêmica, entrando em desenvolvimento prático e experimental. Esse estágio envolve testes rigorosos, iterações de design e melhorias baseadas em dados empíricos. O objetivo é validar a inovação em condições reais e prepará-la para comercialização ou aplicação prática (Thomke, 2003).
Experimental (Ex)	O estágio experimental é quando uma inovação é testada em condições reais ou simuladas para validar seu desempenho e viabilidade prática. Isso envolve testes em situação real, coleta e análise detalhada de dados, resolução de problemas identificados e integração do feedback dos usuários. O objetivo é garantir que o funcionamento seja confiável e eficiente antes da comercialização ou implantação em larga escala (Garcia, et al., 2002).
Comercial (Co)	Inovação totalmente desenvolvida e pronta para uso generalizado no mercado. Esse estágio envolve a disponibilidade no mercado, produção em massa, suporte e manutenção, conformidade regulatória, esforços de marketing, avaliação contínua de desempenho e integração do feedback dos usuários. Neste estágio, a tecnologia é acessível aos consumidores e cumpre as normas de qualidade e segurança, garantindo sua viabilidade e sucesso comercial. (Golder, et al., 1993)

2.3 Revisão Narrativa

Os casos de mortandade de peixes, circunscritos às hidrelétricas no rio do Tocantins, foram avaliados com o suporte da revisão narrativa da literatura, também conhecida como revisão tradicional ou descritiva, que consiste em um tipo de pesquisa bibliográfica que visa sintetizar e interpretar criticamente o conhecimento existente sobre um determinado tema, sem a pretensão de esgotar todas as fontes de informação disponíveis. Esta opção foi feita após a

realização de pesquisas preliminares exploratórias de trabalhos anteriores, que revelaram que existem pouquíssimos estudos sobre este recorte regional. O que impede uma revisão de escopo ou sistemática, por causa do risco de viés.

2.4 Análise de Casos Múltiplos

O estudo de casos múltiplos foi empreendido para considerar as Usinas Hidrelétricas em operação no rio Tocantins. Um estudo de caso múltiplo é uma metodologia de pesquisa que envolve o exame de várias instâncias ou casos para obter *insights* e desenvolver teorias sobre um fenômeno específico. Tal abordagem permite que os pesquisadores analisem semelhanças e diferenças entre os casos, aprimorando a compreensão de questões complexas.

A análise cruzada de casos é uma vantagem significativa, permitindo que os pesquisadores tirem conclusões mais amplas sobre os fatores que influenciam as práticas de engenharia (Hunziker; Blankenagel, 2021) e ciências ambientais. Ademais, vários estudos de caso aumentam a transferibilidade das descobertas, tornando-as aplicáveis a diferentes ambientes, ao contrário dos estudos de caso único que podem não ter condições de generalização (Bass, Beecham, e Noll 2018).

Para análises, no âmbito dos estudos de caso, foram coletados dados sobre a construção e a operação das UHE dentro do recorte geográfico-ambiental (rio Tocantins), a fim de verificar quais delas estão equipadas com soluções amigáveis aos peixes e avaliar seus principais aspectos ambientais. Tais informações foram obtidas a partir de relatórios técnicos e trabalhos acadêmicos coletados, com destaque para documentações fornecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Neste sentido, o estudo de casos múltiplos, permitiu correlacionar os arranjos construtivos e os padrões operacionais das usinas hidrelétricas (UHE) com as características ambientais relevantes, especialmente no que se refere à interação com a ictiofauna regional. Este procedimento possibilitou a identificação das tecnologias mais sustentáveis para mitigar impactos ambientais.

2.5 Estrutura da Dissertação

Tendo em vista o objetivo da presente pesquisa, as revisões de literatura, de escopo (ver Capítulo 4) e narrativa (ver Capítulo 5), para abordagem das soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes no cenário global e dos casos de mortandade de peixes em hidrelétricas

do rio Tocantins, respectivamente, foram correlacionadas para indicação das soluções ambientalmente aplicáveis localmente, considerando o estudo de casos múltiplos das usinas hidrelétricas do rio Tocantins (ver Capítulo 5).

Neste contexto, a dissertação está estruturada como descrito a seguir. O Capítulo 1, Introdução, apresenta o panorama da pesquisa, sua relevância e os objetivos propostos, assim como um primeiro contato com o problema da interação entre hidrelétricas e a ictiofauna, e a importância de buscar soluções para mitigar os impactos. No Capítulo 2, Metodologia de Pesquisa, é detalhada a abordagem de pesquisa utilizada, incluindo os métodos de levantamento bibliográfico para identificar as tecnologias disponíveis, bem como a individualização das tecnologias já empregadas no Rio Tocantins, e os critérios para a análise e proposição das soluções mais adequadas às especificidades regionais. Em seguida, o Capítulo 4, Soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes em hidrelétricas: Revisão de Escopo, apresenta um levantamento das soluções e tecnologias disponíveis na literatura. Este capítulo cumpre o objetivo específico de identificar o que já existe globalmente em termos de dispositivos e projetos que visam a proteção dos peixes em ambientes hidrelétricos.

O Capítulo 5, Mortandade de peixes em hidrelétricas instaladas no rio Tocantins: estudo de casos múltiplos, direciona a investigação para o contexto regional, analisando estudos de caso de mortandade de peixes. Este capítulo explicita os resultados das investigações sobre quais tecnologias amigáveis já foram empregadas, cumprindo o segundo objetivo específico. O terceiro objetivo específico também é satisfeito neste capítulo. Por fim, o Capítulo 6, Considerações finais, apresenta as conclusões da pesquisa, sintetizando os achados.

3 SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E TECNOLOGIAS AMIGÁVEIS PARA PEIXES EM HIDRELÉTRICAS: REVISÃO DE ESCOPO

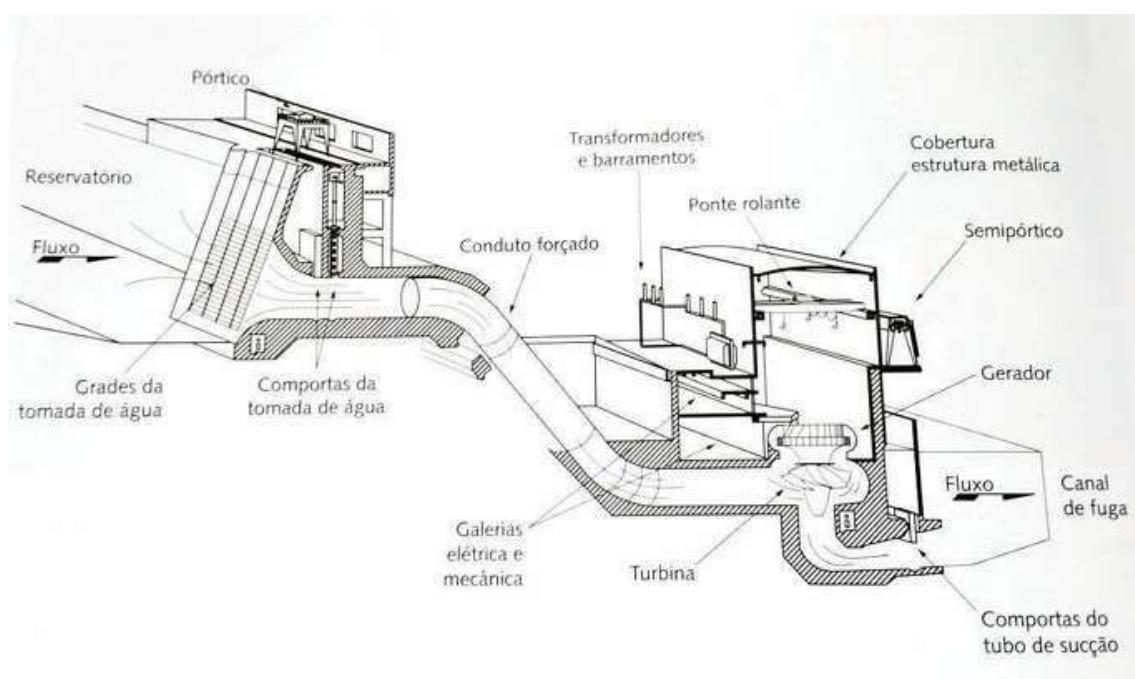
É amplamente reconhecido na literatura científica que as barragens de usinas hidrelétricas, devido às suas estruturas físicas e dimensões, representam obstáculos significativos à migração de peixes, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. A construção dessas barragens pode contribuir para a extinção de espécies de diversas maneiras, incluindo a mortalidade direta durante a passagem pelas estruturas das usinas e o aumento da predação decorrente do bloqueio dos habitats aquáticos, o que torna certas espécies mais vulneráveis.

As usinas hidrelétricas consistem em obras de engenharia voltadas ao aproveitamento do potencial hidráulico de uma região, geralmente utilizando o desnível natural de um rio ou, quando necessário, criando esse desnível por meio da construção de uma barragem (Oliveira,

2018). Essa estrutura permite captar e direcionar a água para as turbinas, que transformam a energia hidráulica em energia mecânica, posteriormente convertida em eletricidade pelos geradores. Há diversos tipos de equipamentos para a geração e o vertimento da água, cada qual com características específicas que atendem às variadas demandas das unidades de geração.

A Figura 1 apresenta de forma esquemática as principais partes constituintes de uma usina hidrelétrica, destacando os elementos essenciais para o seu funcionamento, como o reservatório, a barragem, o vertedouro, o conduto forçado, a casa de força, a turbina e o gerador. Estes últimos, operam de maneira integrada para transformar a energia hidráulica (potencial e cinética) em energia elétrica de forma eficiente e controlada.

Figura 2 – Componentes de uma usina hidrelétrica



Fonte: Pereira, 2015.

O conhecimento técnico dessas estruturas é essencial para subsidiar pesquisadores e engenheiros na busca por soluções eficazes de mitigação dos impactos sobre a ictiofauna. Contudo, é fundamental que a escolha dos equipamentos não se baseie exclusivamente em critérios econômicos, mas leve em consideração também os aspectos ambientais e ecológicos. Por exemplo, o vertedouro é essencial não apenas para a segurança da barragem, mas também para a gestão dos ecossistemas locais, pois um fluxo de água controlado minimiza os impactos ecológicos, como melhora a qualidade da água por meio do aumento da concentração de oxigênio dissolvido (Wera et al., 2019). Esta estrutura pode ainda dissipar a energia do fluxo de

água, reduzindo, assim, a erosão e os potenciais danos à jusante (Bainwad, 2024). Estes são aspectos fundamentais para a gestão sustentável dos recursos hídricos em sistemas hidrelétricos. Portanto, o dimensionamento desta estrutura deve atender a critérios técnicos, de segurança e econômicos, mas também ecológicos.

Com o objetivo de mitigar os impactos negativos das barragens sobre a ictiofauna, diversas estratégias vêm sendo implementadas para facilitar a transposição desses obstáculos pelos peixes. A manutenção da conectividade dos habitats aquáticos, permitindo o deslocamento tanto a montante quanto a jusante, é essencial para reduzir os impactos ambientais associados a esses empreendimentos. Nesse contexto, soluções construtivas inovadoras e tecnologias classificadas como "amigáveis aos peixes" (*fish-friendly*) têm sido desenvolvidas, investigadas e aplicadas para minimizar os efeitos adversos de barragens em geral.

As tecnologias hidrelétricas amigáveis aos peixes englobam práticas e soluções projetadas para reduzir os impactos das instalações sobre a vida aquática, especialmente os peixes. Um exemplo é a turbina parafuso de Arquimedes, que apresenta baixa taxa de mortalidade devido ao seu funcionamento suave e menor geração de turbulência (Purece; Corlan, 2021a). Além disso, técnicas avançadas de modelagem computacional têm sido empregadas para otimizar o design das turbinas, tornando-as mais compatíveis com a fauna aquática (Koukouvini; Anagnostopoulos, 2023).

Neste trabalho, no contexto hidrelétrico, o termo "solução construtiva" refere-se às modificações estruturais ou instalações projetadas para mitigar os impactos ambientais negativos das barragens e outras infraestruturas. Essas soluções visam melhorar a compatibilidade ecológica dos empreendimentos hidrelétricos, mantendo sua eficiência operacional. Entre as principais estratégias adotadas, destacam-se os sistemas de transposição de peixes, que ao longo do último século se consolidaram como a principal alternativa para reduzir os impactos da fragmentação dos habitats aquáticos (Soares, 2012).

Para que esses sistemas sejam eficazes, é fundamental que atendam a critérios essenciais, tais como: (1) permitir a passagem de todas as espécies migratórias; (2) garantir a transposição de indivíduos de diferentes classes de tamanho; (3) operar durante todo o período de migração; e (4) minimizar atrasos no deslocamento das espécies. Além disso, é crucial considerar as condições ambientais e as características da ictiofauna local durante a implementação dessas medidas, garantindo que os mecanismos empregados sejam adequados às necessidades das espécies-alvo e maximizem sua efetividade na conservação da biodiversidade aquática.

3.1 Panorama das soluções

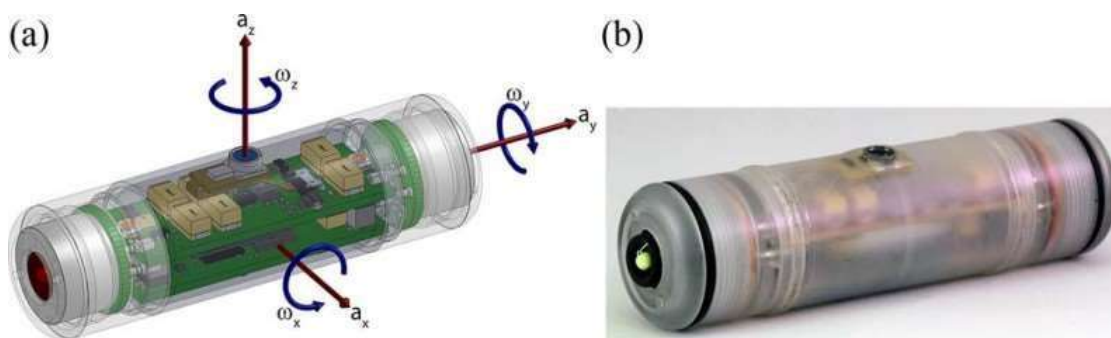
3.1.1 Tecnologias amigáveis para peixes

3.1.1.1 Peixe Sensor

O termo Peixe Sensor, comumente chamado de SensorFish, refere-se a um dispositivo autônomo utilizado para medir as condições físicas às quais os peixes são expostos ao atravessar estruturas hidráulicas complexas, como turbinas hidráulicas (Hou et al., 2018). Esse dispositivo é fundamental para avaliar e aprimorar a segurança dos peixes em ambientes hidrelétricos. O Peixe Sensor é capaz de registrar acelerações lineares tridimensionais, velocidades de rotação, orientação, pressão e temperatura com alta frequência de amostragem. Além disso, ele é equipado com um sistema de flutuação automática e um transmissor de rádio, facilitando sua recuperação após a coleta de dados (Deng et al., 2014a; Deng et al., 2007). Sua aplicação inclui a caracterização das condições hidráulicas dentro das turbinas e outras estruturas, permitindo a identificação de áreas e operações em que as condições são suficientemente severas para causar lesões ou mortalidade nos peixes.

O Peixe Sensor (Figura 3) tem sido amplamente utilizado em diversas usinas hidrelétricas nos Estados Unidos, para avaliar o desempenho biológico das turbinas (Deng et al., 2007; Martinez et al., 2019). Embora seu uso seja predominante nos Estados Unidos, ele também tem sido empregado em outros países (Deng et al., 2014a).

Figura 3 – Peixe sensor Gen 2 (SensorFish Gen II): (a) modelo de CAD e (b) fotografia



Fonte: Deng et al. (2014a; 14b).

Cabe citar que o Peixe Sensor foi projetado para apresentar dimensões e densidade similares às de um alevino de salmão, com um ano de idade, possuindo um diâmetro de 24,5 mm, um comprimento de 89,9 mm e um peso de 42,1 g. Além disso, seu corpo apresenta flutuabilidade quase neutra, ou seja, sua densidade é muito próxima à do meio aquático

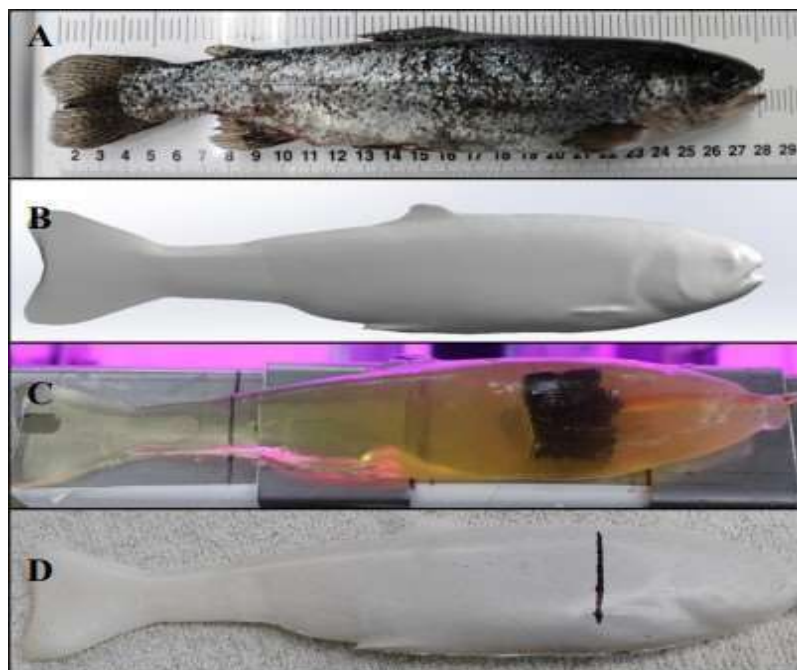
circundante (água doce). Esta característica permite que o dispositivo permaneça em suspensão na coluna d'água, sem afundar ou flutuar excessivamente, garantindo uma simulação mais precisa do comportamento dos peixes ao atravessar estruturas hidráulicas (Hou et al., 2018).

3.1.1.2 Gelpeixe

O Gelpeixe (Figura 4) é um protótipo biomimético desenvolvido a partir de um gel, cuja finalidade é avaliar e otimizar o design de turbinas hidrelétricas para reduzir seus impactos sobre a vida aquática (Saylor et al., 2021). Para aprimorar a semelhança com as propriedades biomecânicas de um peixe real, foi criada uma pele artificial, proporcionando uma estrutura mais fiel à morfologia dos organismos aquáticos. O desenvolvimento do modelo envolveu a digitalização de peixes congelados por meio de scanners a laser de alta precisão, permitindo a criação de um molde reutilizável impresso em 3D, a partir do qual os modelos de gel foram fundidos (Saylor et al., 2021).

Além disso, sensores sofisticados foram incorporados ao Gelpeixe, possibilitando a quantificação das forças físicas exercidas pelas pás das turbinas durante o processo de passagem. Tal abordagem inovadora permite correlacionar forças com taxas de mortalidade dos peixes, fornecendo dados fundamentais para o desenvolvimento de turbinas mais sustentáveis e compatíveis com a preservação da ictiofauna.

Figura 4 - Peixe natural (truta arco-íris) e Gelpeixe em diferentes estágios de preparação



Fonte: Saylor et al. (2021).

3.1.1.3 Turbina Kaplan

As turbinas Kaplan, desenvolvidas pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934), resultaram de pesquisas teóricas e experimentais que levaram à criação de um novo tipo de turbina hidráulica. Derivadas das turbinas hélice, essas turbinas se destacam pela possibilidade de ajuste do ângulo das pás, permitindo maior eficiência operacional em diferentes condições de vazão (Carvalho, 2019).

Projetadas para operar em baixas quedas, geralmente entre 15 e 40 metros, são particularmente adequadas para cenários com vazões médias a altas, apresentando potências unitárias que variam entre 30 e 250 MW. Além disso, sua capacidade de adaptação a uma ampla faixa de vazões proporciona um desempenho eficiente e confiável, tornando-as amplamente empregadas em usinas hidrelétricas ao redor do mundo (Rocha; Noleto, 2015). Estudos recentes indicam que o design de pás Kaplan convencionais e modificadas, mais amigáveis aos peixes, tem sido desenvolvidas com base em abordagens analíticas, considerando, entre outros fatores, o efeito da variação do diâmetro do duto nos parâmetros operacionais e de projeto, como velocidade do fluxo, ângulo de torção e eficiência (Kumar et al., 2021).

Figura 5 – Turbina Kaplan



Fonte: Ajitkumar (2024).

3.1.1.4 Turbina Francis

As turbinas hidráulicas do tipo Francis desempenham um papel fundamental em hidrelétricas, sendo amplamente reconhecidas por sua eficiência operacional e versatilidade. No entanto, a taxa de mortalidade dos peixes associada a estas turbinas depende, principalmente, do

projeto do seu rotor. Para mitigar os impactos negativos, diversos estudos analisam os efeitos do número e do ângulo de inclinação das pás do rotor na probabilidade de danos causados por variações de pressão e tensões de cisalhamento.

A pressão, em particular, é considerada o principal fator a ser abordado no projeto de turbinas Francis mais amigáveis aos peixes. Reduzir o número de pás e aumentar o ângulo de formação do rotor são estratégias promissoras para minimizar os danos decorrentes de regiões de baixa pressão e tensões elevadas de cisalhamento, contribuindo para uma abordagem mais sustentável na geração de energia hidrelétrica (Zhu et al., 2022).

Figura 6 – Turbina Francis



Fonte: Hydropower (2010).

3.1.1.5 Turbina de Parafuso de Arquimedes

A turbina parafuso de Arquimedes (TPA) é uma tecnologia hidrelétrica que tem sido cada vez mais adotada, especialmente em locais com baixa queda d'água, geralmente inferiores a 5 metros. Essas turbinas apresentam eficiência operacional variando entre 60% e 80% e são capazes de gerar até 355 kW de potência, tornando-se uma alternativa viável para pequenos aproveitamentos hidrelétricos (Purece; Corlan 2021a). Além de sua elevada eficiência energética, as TPAs oferecem vantagens ambientais significativas, destacando-se pelo respeito a biota aquática e pela minimização dos impactos sobre a fauna local (Dewi Puspita Sari et al.

2021).

Seu *design* inovador permite uma passagem mais segura para os peixes, reduzindo a taxa de mortalidade em comparação com outras tecnologias convencionais de geração hidrelétrica. Dessa forma, as TPAs representam uma solução promissora para a produção sustentável de energia, equilibrando o aproveitamento hidrelétrico com a preservação dos ecossistemas aquáticos (Purece; Corlan 2021a).

Figura 7 - Turbina de Parafuso de Arquimedes



Fonte: Resources (2014).

3.1.1.6 Turbina Alden

A turbina Alden representa um avanço significativo no setor hidrelétrico, sendo desenvolvida com o objetivo principal de minimizar os impactos ambientais associados à operação de usinas hidrelétricas. Seu *design* inovador foi projetado para reduzir a taxa de mortalidade dos peixes durante a passagem por sua estrutura, contribuindo para a preservação dos ecossistemas aquáticos (Quaranta et al. 2021).

Uma das principais características das turbinas Alden é o formato helicoidal de sua hélice, que possui apenas três pás. Essa configuração reduz significativamente o número de bordas cortantes, minimizando o risco de lesões para os peixes que transitam pela sua estrutura (Dixon 2011). Assim, esta tecnologia se destaca como uma alternativa promissora, que equilibra eficiência energética e conservação ambiental.

Figura 8 - Turbina Alden



Fonte: Perkins et al. (2013).

3.1.1.7 Método dos Elementos Discretos (MED)

A aplicação de modelagem computacional desde as fases iniciais do projeto (Oliveira; Alcântara Pereira, 2024) de turbinas tem se mostrado fundamental para o desenvolvimento de tecnologias mais seguras para os peixes (Richmond e Romero-Gomez 2014). O Método dos Elementos Discretos (DEM) permite a simulação detalhada da interação entre os peixes e os componentes da turbina, avaliando fatores críticos como a frequência de impacto das pás e as variações bruscas de pressão. Ao empregar a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), esse método recria condições hidráulicas realistas e registra as interações entre partículas e estruturas, fornecendo informações essenciais para a otimização dos projetos hidrelétricos.

3.1.2 Soluções Construtivas

3.1.2.1 Grades amigáveis

As grades de retenção de resíduos, projetadas para minimizar os impactos na fauna aquática, representam uma solução eficiente para reduzir a mortalidade dos peixes, oferecendo um custo operacional relativamente baixo (Szabo-Meszaros et al. 2018). Essas estruturas funcionam como barreiras físicas que impedem a entrada dos peixes em áreas de alto risco dentro das usinas hidrelétricas, garantindo maior segurança para a ictiofauna. Diferentes configurações podem ser adotadas na concepção dessas grades, incluindo barras dispostas verticalmente no sentido do fluxo, inclinadas ou horizontalmente alinhadas. Além disso, as grades podem apresentar perfis retangulares ou utilizar barras eletrificadas de baixa tensão, otimizando a eficiência na proteção dos peixes (Meister et al. 2021).

Estudos demonstram que grades compostas por barras verticais alinhadas ao fluxo e horizontais em formato de gota d'água resultam em menores perdas de carga hidráulica, enquanto aquelas com barras inclinadas verticalmente podem apresentar perdas significativamente maiores (Szabo-Meszaros et al. 2018). A Figura 9 ilustra um teste laboratorial no qual um peixe colide contra uma grade com barras horizontais espaçadas de 20 centímetros, sob uma velocidade de aproximação de 0,5 m/s, evidenciando o comportamento hidrodinâmico do sistema de proteção.

Figura 9 - Grade com barras horizontais espaçadas de 20 centímetros



Fonte: Redeker (2013a).

3.1.2.2 Sistemas de Transposição de Peixes (STP)

Os sistemas de transposição de peixes são fundamentais para mitigar os impactos das barragens sobre a migração dos peixes, assegurando a conectividade dos ecossistemas aquáticos. Entre os principais métodos, destacam-se as escadas e os elevadores, que permitem a passagem tanto no sentido de montante quanto no sentido de jusante, garantindo a continuidade dos ciclos reprodutivos e alimentares das espécies migratórias (Silva et al. 2018a).

As escadas para peixes contribuem para combater um dos principais impactos dos barramentos hidrelétricos sobre o ecossistema aquático, que é a fragmentação da ictiofauna. Este fenômeno refere-se à incapacidade da fauna aquática a jusante de se comunicar com a montante e vice-versa, comprometendo processos essenciais como alimentação e reprodução. A barreira física criada pelo barramento modifica o habitat aquático, afetando especialmente as espécies migratórias, cuja reprodução depende de deslocamentos ao longo do rio (Guzmán e

Ramos 2023). Para mitigar tal impacto, diversos Sistemas de Transposição de Peixes (STP) foram desenvolvidos e implementados ao redor do mundo.

Dentre estas soluções, destacam-se as diferentes tipologias de escadas para peixes. A classificação dos tipos de STP apresenta divergências na literatura. Enquanto Guzmán e Ramos (2023) propõem a existência de seis tipos distintos, Arrais (2012) postula quatro categorias principais. Adicionalmente, Larinier (1983) argumenta que a diversidade de STPs existentes globalmente é vasta, porém, passível de agrupamento em categorias mais amplas.

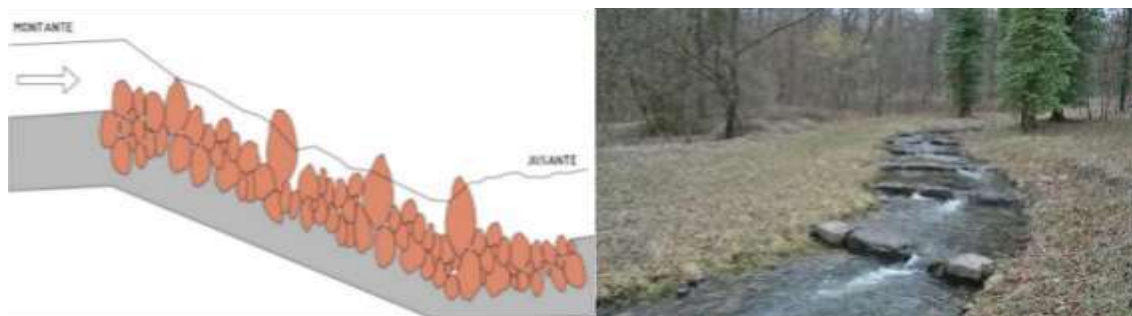
Concordamos com Larinier (1983) em sua constatação sobre a vasta gama de STPs existentes, as quais podem ser convenientemente agrupados em categorias mais amplas. Esta abordagem, demonstra uma capacidade notável de sintetizar as diversas subdivisões de tipos de STP propostas por outros autores, como Guzmán e Ramos (2023) e Arrais (2012). A classificação proposta por Larinier (1983) organiza os STP em quatro categorias principais:

i) Passagens rústicas

As chamadas passagens rústicas compreendem elementos como o leito do rio modelado e rampas, que se caracterizam por sua simplicidade e integração com o ambiente natural. As passagens rústicas são estruturas projetadas para conectar os reservatórios à montante e a restituição para o rio à jusante por meio de um canal escavado em uma das margens, cujo fundo e paredes são revestidos com rugosidades ou obstáculos que simulam as características de um riacho natural. A inclinação dessa estrutura é geralmente reduzida, de modo a permitir a migração dos peixes sem grandes esforços (Larinier, 1983).

Nesta solução, toda a largura do rio é convertida em uma superfície rugosa e suavemente inclinada, facilitando o deslocamento da fauna aquática. Em alguns casos, grandes piscinas podem se formar ao longo do canal, ocupando toda a largura do rio. Tais formações criam segmentos intercalados que reduzem a extensão da barreira imposta pelo barramento, tornando a travessia mais acessível para diferentes espécies de peixes (Arrais, 2012). A Figura 10 é uma representação desta solução construtiva.

Figura 10 - Passagem de peixes no estilo rústico

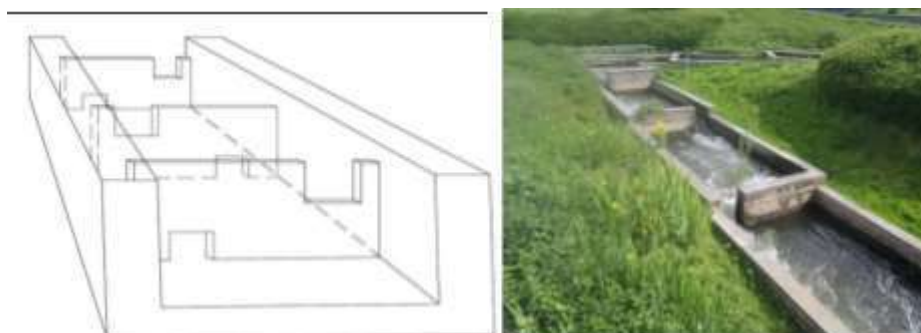


ii) Passagem de peixes com tanques sucessivos

As passagens com piscinas ou tanques sucessivos (Figura 11) englobam estruturas como escadas para peixes e sistemas de reservatórios interligados, projetadas para facilitar a migração da ictiofauna em trechos interrompidos por barramentos. O princípio baseia-se na fragmentação do desnível total a ser transposto em múltiplas quedas de pequena altura, formando uma sequência de piscinas interconectadas.

A comunicação entre essas piscinas ocorre por meio de diferentes mecanismos, como vertedores (finos ou espessos), orifícios ou fendas verticais, que permitem o escoamento da água em velocidades controladas. Esse design visa reduzir o esforço necessário para a ascensão dos peixes, tornando a travessia mais acessível para diferentes espécies, especialmente aquelas com menor capacidade natatória.

Figura 11 - Passagem de peixes com tanques sucessivos



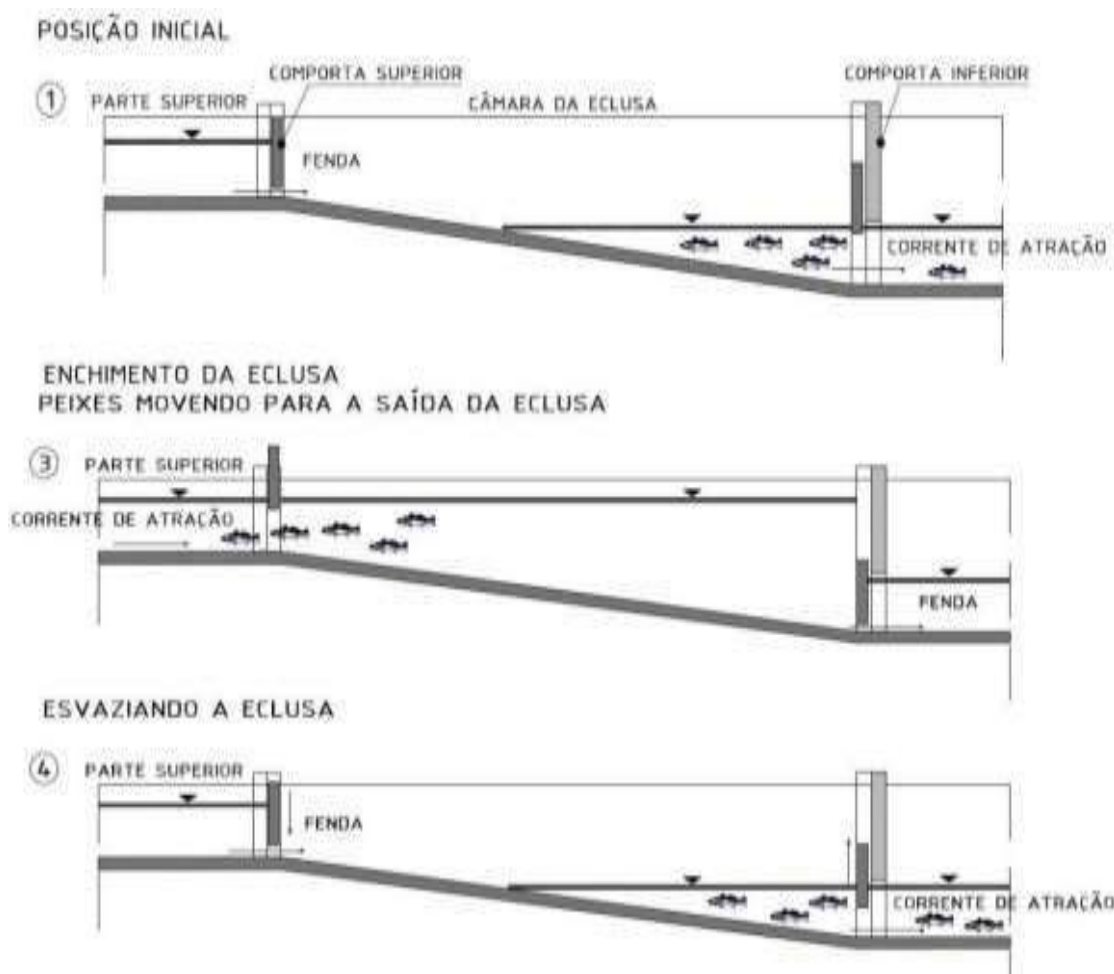
Fonte: Larinier e Travade (2002).

iii) Eclusas para peixes

As eclusas para peixes são dispositivos projetados para viabilizar a transposição de barreiras artificiais, como barragens, por meio da regulação controlada do nível da água. Seu funcionamento baseia-se na atração dos peixes para uma câmara localizada na parte inferior da estrutura, onde, em um determinado momento, o nível da água começa a subir gradualmente até atingir a cota superior do rio. Durante esse processo, os peixes são transportados junto com a coluna d'água, permitindo sua migração para o trecho a montante do curso hídrico.

Este sistema tem se mostrado particularmente eficiente para espécies migratórias que conseguem se adaptar a variações na altura da coluna d'água e apresentam comportamento ativo de natação. Além disso, as eclusas para peixes podem ser combinadas com outros mecanismos de atração, como fluxos direcionais e estímulos ambientais, para maximizar sua eficiência na conservação da ictiofauna (Arrais, 2012).

Figura 12 - Etapas de funcionamento de uma eclusa de transposição de peixes



Fonte: Viana et al. (2006).

iv) Escadas redutoras de velocidade

As escadas com redutores de velocidade são estruturas projetadas para minimizar a velocidade do fluxo de água, facilitando a migração dos peixes a montante. Essas passagens incluem dispositivos como chicanas e o modelo Denil, que auxiliam os organismos aquáticos ao criar condições hidráulicas mais favoráveis para sua progressão. No início da década de 1920, o ictiólogo belga G. Denil propôs um Sistema de Transposição de Peixes baseado em degraus especiais, cuja geometria permitia a dissipação da energia da corrente por meio de refluxo. Essa inovação resultou na criação da escada de Denil, um dos modelos mais utilizados mundialmente (Martins, 2005).

Nas escadas do tipo Denil, defletores são instalados de maneira regularmente espaçada ao longo de um canal retilíneo. Esses elementos estruturais geram correntes em espiral, promovendo intensas transferências de quantidade de movimento que dissipam a energia do fluxo. Como consequência, há uma redução significativa na velocidade da água, tornando o

ambiente mais acessível para diferentes espécies de peixes, especialmente aquelas com menor capacidade natatória.

v) Sistema de captura e transporte

Um sistema de transposição por captura e transporte de peixes é uma estratégia desenvolvida para auxiliar a ictiofauna a contornar barreiras artificiais, como barragens, permitindo a continuidade de processos migratórios essenciais para a alimentação e reprodução das espécies. Essa técnica consiste na captura dos peixes em áreas de retenção, seguida do transporte até pontos adequados para a retomada de sua migração natural, sendo amplamente empregada em diferentes regiões, especialmente para espécies como a enguia europeia (*Anguilla anguilla*) (Tobias J, et al., 2020). No entanto, embora o método seja bem documentado e tenha eficácia reconhecida em sistemas fluviais, sua aplicabilidade em ambientes lacustres ainda é incerta. Isso ocorre porque os estímulos ambientais que geralmente desencadeiam o comportamento migratório dos peixes em rios como variações de vazão, temperatura e sinalizações químicas frequentemente estão ausentes em reservatórios e lagos, particularmente naqueles com fluxo reduzido e baixa conectividade com a bacia hidrográfica, o que pode comprometer a efetividade do sistema (Piper et al. 2020).

vi) Elevadores para peixes

Os sistemas de elevadores para peixes operam por meio da atração dos indivíduos aquáticos até uma zona de coleta, utilizando fluxos de água variáveis que simulam condições naturais de correnteza, incentivando a movimentação dos peixes. Uma vez concentrados nesta área, os peixes são direcionados para um tanque de elevação, onde são periodicamente transportados até a cota superior da barragem. No topo, o tanque é inclinado de forma controlada, permitindo a liberação segura da água e dos peixes no trecho à montante do rio, garantindo a continuidade dos processos migratórios. Em seguida, o tanque retorna à sua posição original para reiniciar o ciclo, permitindo a operação contínua do sistema (Schletterer et al. 2016). Esta tecnologia representa uma alternativa eficiente de transposição vertical, especialmente em barragens de grande altura, promovendo a conectividade ecológica entre diferentes compartimentos fluviais.

vii) Sistemas de guiamento comportamental

Os sistemas de guiamento comportamental representam uma estratégia inovadora que emprega barreiras não físicas, como estímulos acústicos e luminosos, com o objetivo de

modificar o comportamento dos peixes e direcioná-los de forma seletiva para rotas migratórias mais seguras. A aplicação destes sistemas, especialmente em ambientes de água doce, tem se mostrado promissora na proteção de espécies potamódromas, uma vez que contribui significativamente para a redução da mortalidade ao evitar a entrada em estruturas hidráulicas de barragens (McMichael et al. 2010; Jesus et al. 2021). Ademais, tais tecnologias favorecem o redirecionamento dos peixes para sistemas de transposição, como escadas e elevadores, ou ainda para habitats alternativos dentro de corpos hídricos regulados, oferecendo uma abordagem complementar às medidas físicas tradicionais de mitigação dos impactos ambientais causados por empreendimentos hidrelétricos (Barreira, et al., 2021).

3.2 Resultados e Discussão Bibliométrica

Após a análise detalhada dos documentos coletados, verificou-se que estes possuem origens diversificadas, abrangendo uma ampla variedade de países, distribuídos por diferentes continentes. Essa distribuição geográfica evidencia que a preocupação com a preservação da fauna aquática, especialmente no que se refere à mitigação da mortalidade de peixes em instalações hidrelétricas, não se restringe a uma única região, mas constitui uma questão de relevância global.

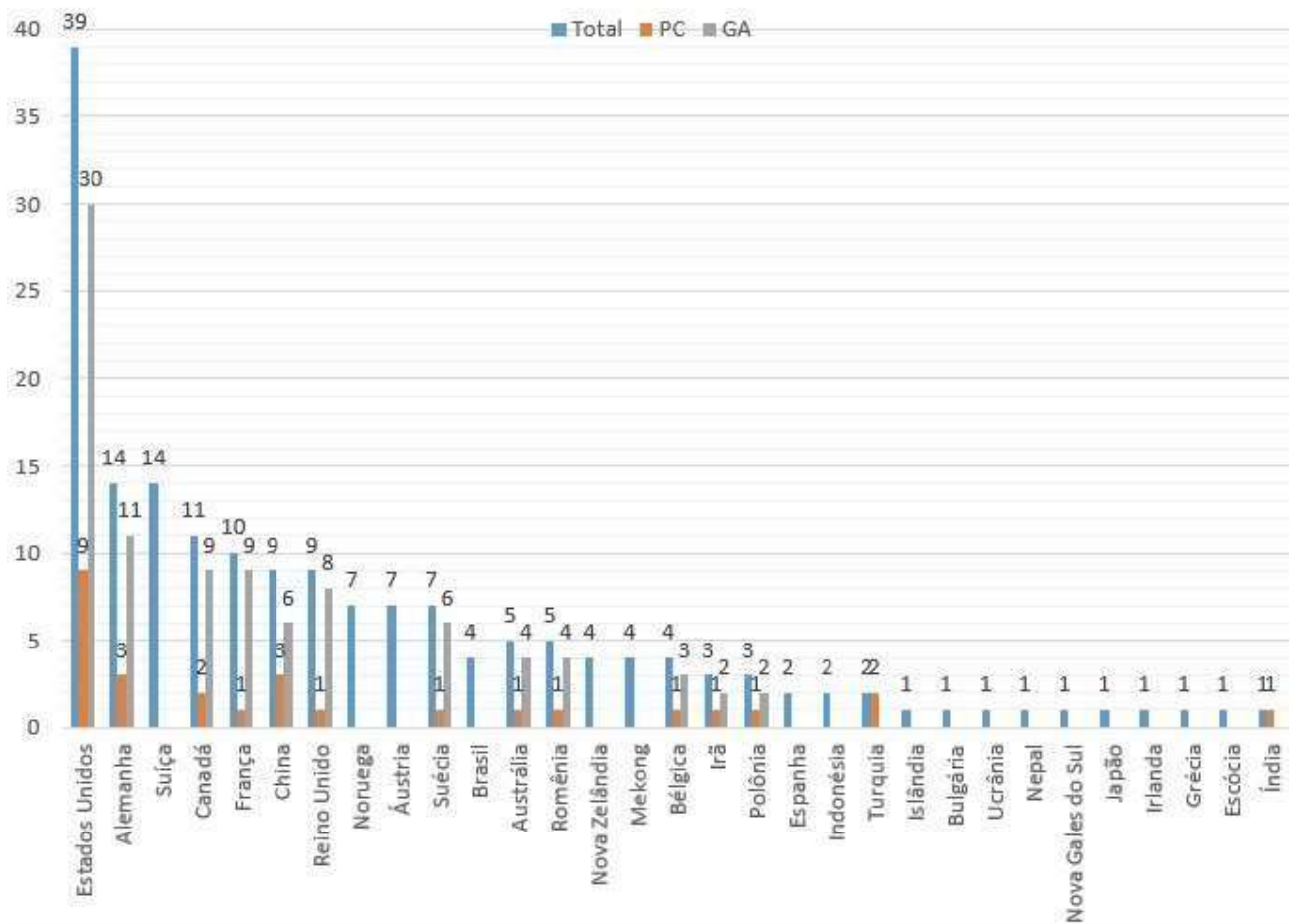
Neste contexto, torna-se evidente que a busca por soluções eficazes para reduzir os impactos ambientais da geração de energia hidrelétrica tem impulsionado avanços científicos e tecnológicos em escala internacional. As pesquisas analisadas indicam que diversos países, independentemente de suas condições climáticas, hidrológicas ou socioeconômicas, reconhecem a importância desse desafio e vêm investindo continuamente no desenvolvimento de tecnologias inovadoras.

O objetivo central de tais iniciativas é promover uma produção de energia mais sustentável, equilibrando a eficiência operacional das usinas hidrelétricas com a conservação dos ecossistemas aquáticos. A Figura 13 ilustra a origem e a quantidade de documentos analisados, considerando as fontes pesquisadas: Periódicos Capes (PE), Google Acadêmico (GA) e a soma de ambas as bases de dados. Os Estados Unidos, a Alemanha, a Suíça e o Canadá destacam-se como os países com maior produção científica sobre o tema, registrando, respectivamente, 39, 14, 14 e 11 publicações científicas. Em contrapartida, países como Japão, Grécia, Irlanda e Islândia apresentaram apenas uma publicação ao longo da última década.

Um fato relevante é que o Brasil, apesar de ser um dos países com maior dependência da energia hidrelétrica, cuja matriz energética é fortemente baseada nesta fonte, tem um número

surpreendentemente reduzido de publicações, com apenas seis estudos identificados. Esta quantidade limitada de pesquisas nacionais, relacionadas às soluções construtivas e tecnologias hidrelétricas amigáveis para peixes, evidencia a necessidade de maior investimento em pesquisa e inovação, considerando a importância da energia hidrelétrica para o desenvolvimento sustentável do país.

Figura 13 - Distribuição geográfica da produção científica dos documentos analisados



Fonte : elaborado pelo autor.

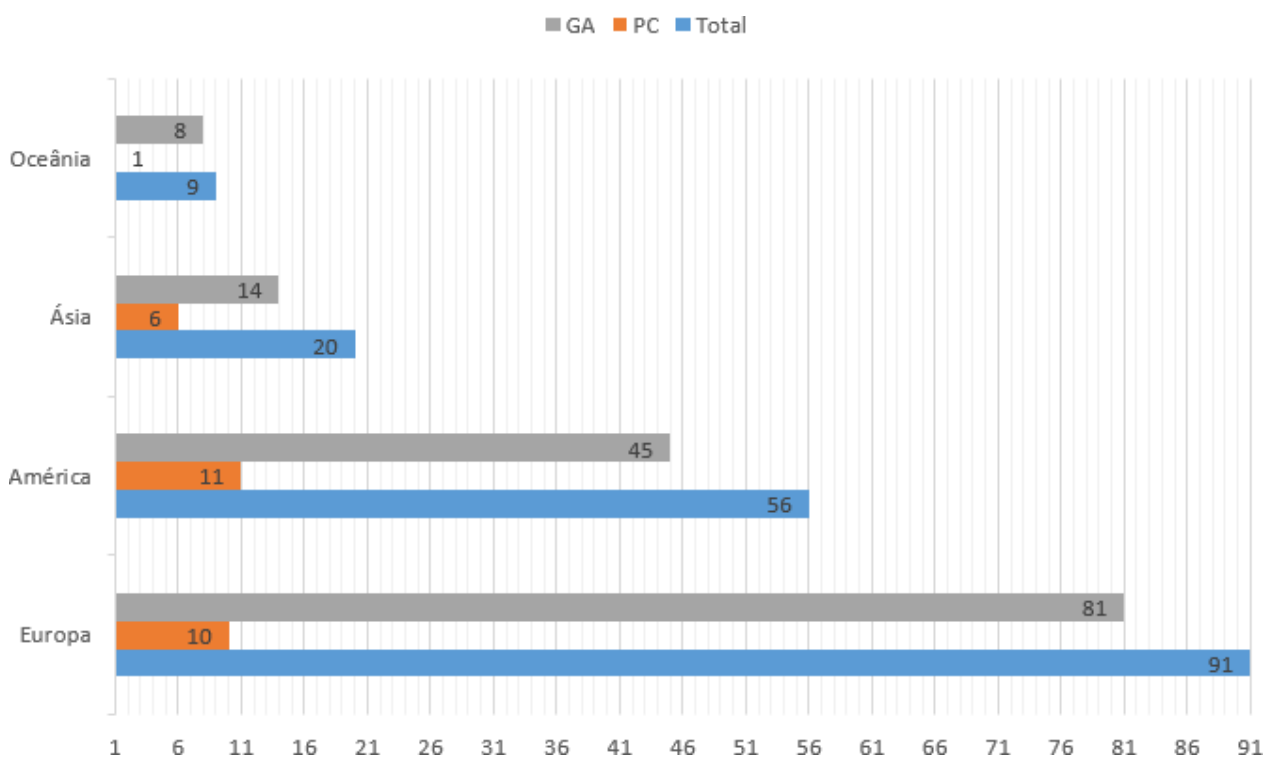
A maioria dos documentos analisados indica que os estudos realizados nos Estados Unidos estão concentrados, predominantemente, na região noroeste do país, com destaque para a bacia do rio Columbia. Este rio, com aproximadamente 2.000 km de extensão, é alimentado por importantes afluentes, como os rios Snake, John Day, Willamette e Canoe, além de receber contribuições das geleiras das Montanhas Rochosas Canadenses (Carvalho, 2019).

A bacia do rio Columbia desempenha um papel fundamental na geração de energia hidrelétrica nos Estados Unidos, sendo responsável por aproximadamente 44% da produção nacional de fonte hídrica, com um total de 56 usinas hidrelétricas em operação (NWCOUNCIL,

2014). Esta relevância energética impulsiona a realização de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de soluções que minimizem os impactos ambientais da atividade hidrelétrica na região.

Ao analisar os estudos em uma perspectiva global, observa-se que, considerando os dois indexadores utilizados na pesquisa, a maior concentração de trabalhos está no continente europeu, totalizando 91 estudos. Em seguida, destacam-se as Américas, com 56 estudos, a Ásia, com 19, e a Oceania, com 9 publicações. Na Figura 14 é apresentada a distribuição dos estudos por continente, para cada indexador analisado. O expressivo interesse do continente europeu no desenvolvimento de soluções construtivas e tecnologias hidrelétricas amigáveis para peixes é um aspecto notável. Esse engajamento reforça a importância da pesquisa e inovação no tema.

Figura 14 - Distribuição geográfica dos estudos por continente



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma análise comparativa da distribuição geográfica dos estudos revela uma assimetria significativa, evidenciando uma forte concentração de pesquisas nos continentes Europeu e Americano. Juntos, esses continentes somam 147 estudos, o que corresponde a 84% do total. Este padrão pode ser explicado por diversos fatores, incluindo a elevada concentração de instituições de pesquisa e universidades de referência, além de substanciais investimentos em

ciência e tecnologia voltados para o setor hidrelétrico nessas regiões (Higgins, 2014).

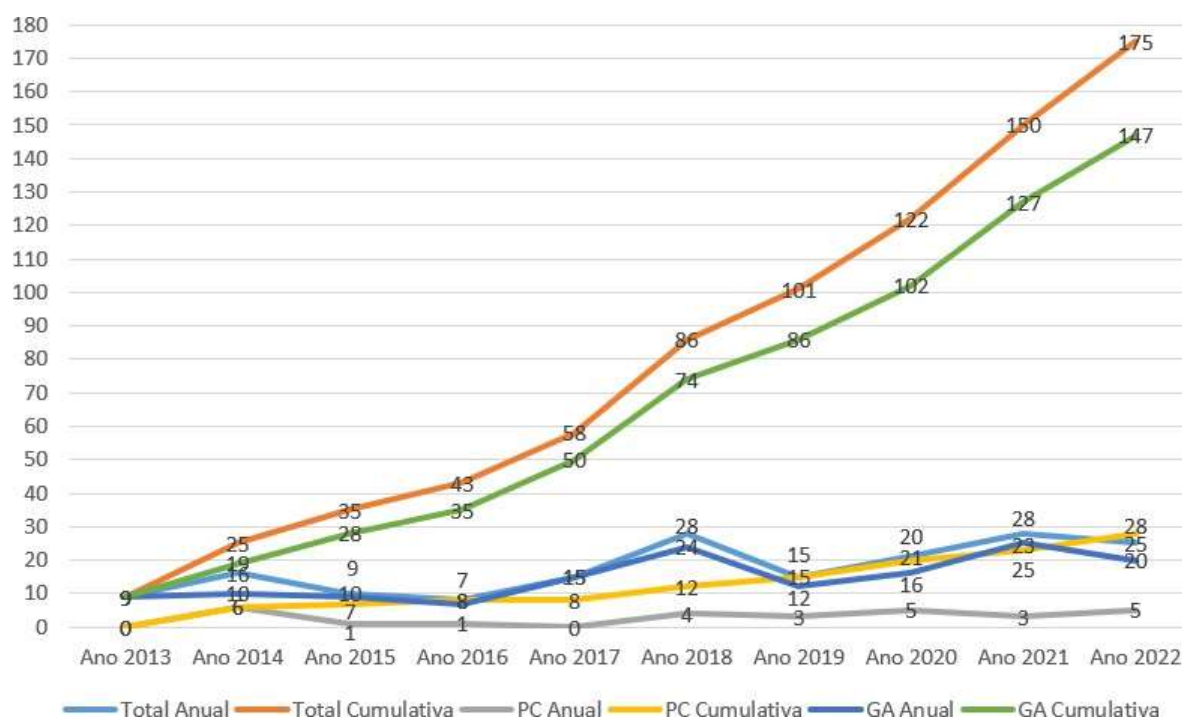
Por outro lado, a Ásia, apesar de abrigar inúmeras barragens de grande porte e desempenhar um papel fundamental na geração de energia hidrelétrica global, é representada por apenas 19 estudos, o que equivale a 10% do total. Essa discrepância pode indicar uma menor produção acadêmica sobre o tema na região ou uma menor acessibilidade desses

estudos em bases de dados internacionais. A lacuna identificada sugere a necessidade de um aprofundamento das investigações científicas no contexto asiático, considerando os desafios específicos enfrentados nesse continente, em termos de gestão da fauna aquática e mitigação dos impactos ambientais da hidreletricidade.

A Figura 15 apresenta a evolução temporal da produção científica ao longo do período analisado. A interpretação desses dados sugere que o indicador Total Cumulativo (linha laranja) demonstra um crescimento contínuo, evidenciando uma tendência positiva na produção científica e reforçando a relevância do tema como objeto de pesquisa. Por outro lado, o indicador Total Anual exibe variações ao longo dos anos, sugerindo que fatores externos ou eventos específicos podem ter influenciado no volume de publicações em determinados períodos. No entanto, não há informações concretas que expliquem de forma precisa estas flutuações.

Nota-se, por exemplo, aumentos pontuais na produção científica nos anos de 2014, 2018 e 2021, enquanto em 2016 e 2019 houve uma redução no número de publicações, sem que haja uma justificativa clara para essas oscilações. Um aspecto relevante a ser destacado é a aceleração da produção científica a partir de 2016, evidenciada pela mudança na tendência da curva do Total Cumulativo. Esse comportamento sugere um aumento no interesse e nos investimentos em pesquisas relacionadas ao tema, indicando uma intensificação dos esforços científicos na busca por soluções inovadoras e sustentáveis para o setor hidrelétrico.

Figura 15 – Evolução da produção científica dos últimos (2023-2022)



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 16 apresenta uma visualização de rede, gerada com o auxílio do software KH Coder, que é uma ferramenta avançada de análise textual. Esse software permite a realização de análises estatísticas e a representação gráfica das relações entre palavras ou conceitos dentro do corpus de pesquisa, facilitando a identificação de padrões e conexões semânticas.

Figura 16 - Recorrência de palavras durante os anos 2013 – 2022

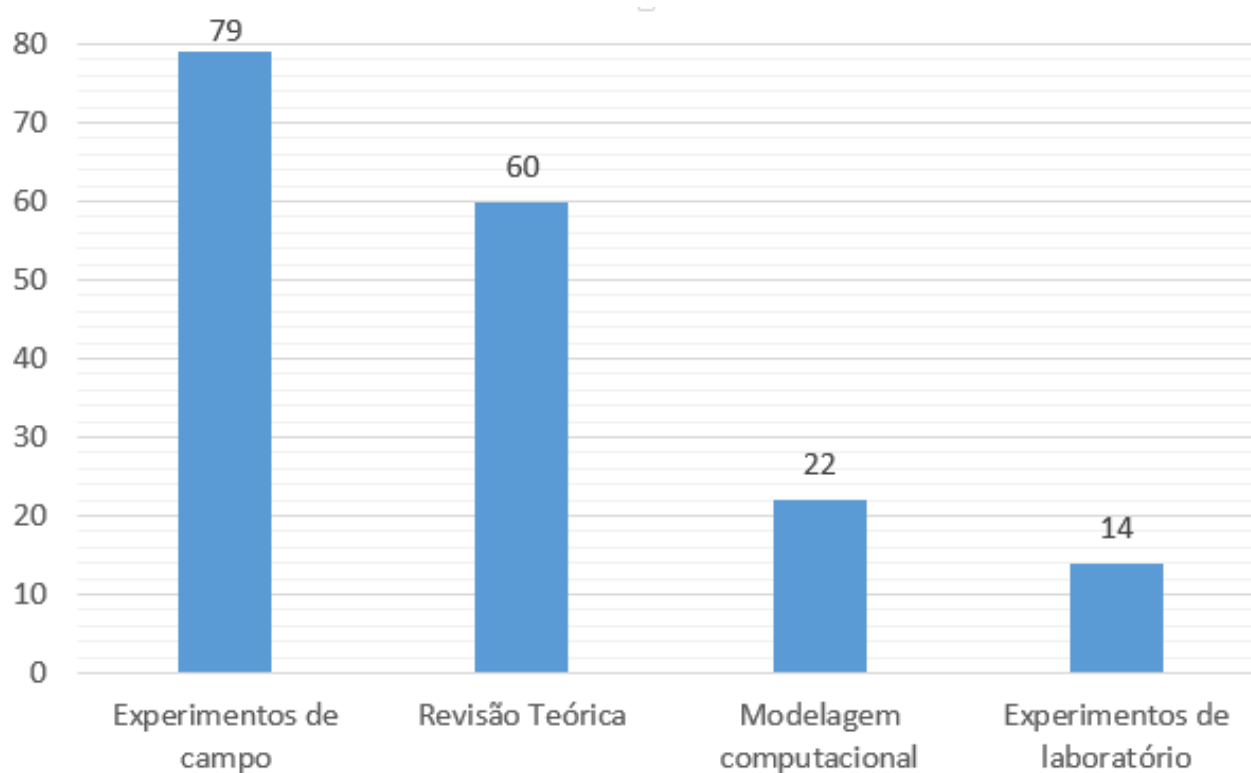
A análise dos temas acionados ao longo dos anos revela uma evolução na abordagem das pesquisas sobre barragens hidrelétricas e seus impactos ambientais. Em 2013, os estudos estavam associados à migração dos peixes e à aplicação de tecnologias ambientalmente sustentáveis. Em 2014, a atenção se voltou para os efeitos das hidrelétricas no desenvolvimento regional e na irrigação, enquanto em 2015 houve um foco na modelagem numérica e na quantificação dos impactos das barragens sobre os peixes. No ano de 2016 o destaque foi para a utilização de sensores para monitoramento hidráulico e os efeitos das turbinas Francis no ambiente aquático, seguido por 2017, cuja ênfase foi nos dispositivos de transposição para peixes e nos impactos das turbinas hidráulicas nos rios.

Em 2018, os estudos abordaram a gestão hidráulica e os problemas de poluição causados pelos barramentos, com destaque para a presença de resíduos. Já em 2019, o enfoque foi na modelagem dos impactos energéticos e migratórios dos peixes, refletindo uma preocupação crescente com a sustentabilidade. O ano de 2020 trouxe uma abordagem mais crítica sobre a mortalidade dos peixes e os impactos ecológicos dos barramentos, tendência que se intensificou em 2021 com a ênfase na biodiversidade e nas estratégias de proteção em áreas de jusante.

No ano de 2022, as pesquisas direcionaram-se para os impactos das alterações nos cursos dos rios e suas consequências para os ecossistemas. De forma geral, a evolução temática pode ser dividida em três períodos: de 2013 a 2015, predominou uma abordagem tecnológica e de modelagem dos barramentos; de 2016 a 2018, houve um foco na vigilância das condições hidráulicas e no desenvolvimento de dispositivos técnicos; e de 2019 a 2022, a preocupação principal passou a ser a mortalidade dos peixes, a biodiversidade e as estratégias de mitigação dos impactos ambientais.

A Figura 17 ilustra a distribuição dos estudos em relação às diferentes metodologias empregadas: pesquisas de campo, revisões de literatura, experimentação em laboratório e modelagem computacional. As pesquisas de campo abrangem, por exemplo, o estudo do comportamento de peixes em relação à rota migratória em usinas hidrelétricas, avaliando-se variáveis como gradientes de pressão, sobressaturação, impactos contra componentes da instalação, turbulência, mortalidade e cisalhamento.

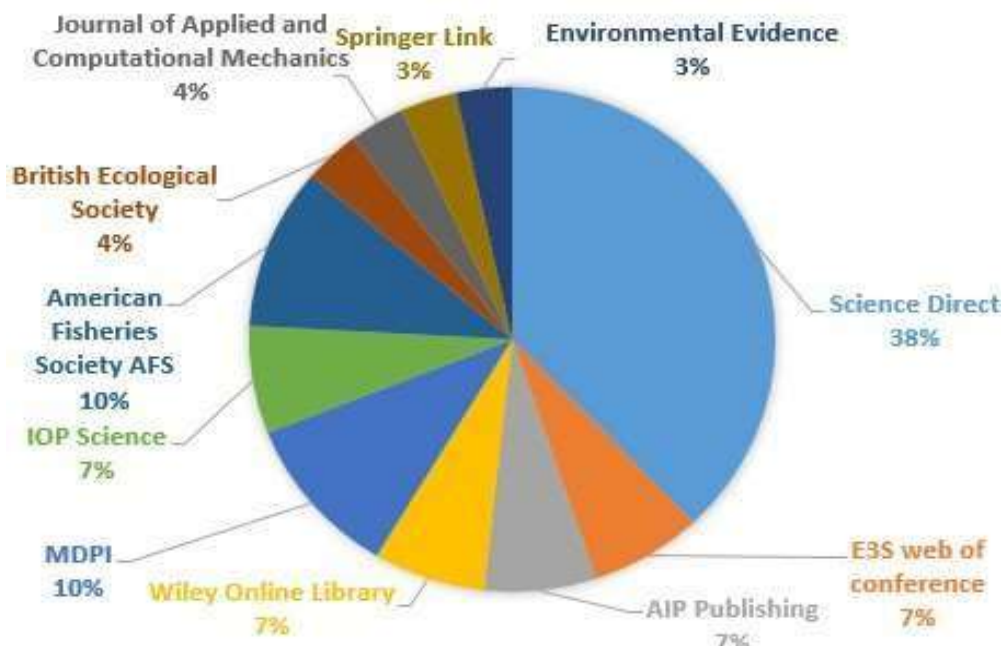
Figura 17 - Tendências dos estudos realizados entre 2013 e 2022



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise dos estudos disponíveis no metabuscador do Periódicos Capes revelou que a maior parte das publicações se concentra na *ScienceDirect*, representando 38% do total, seguida pela *American Fisheries Society* (AFS) e MDPI, ambas com 10%. Outras fontes relevantes incluem *Wiley Online Library*, *IOP Science*, *E3S Web of Conference* e *AIP Publishing*, cada uma contribuindo com 7% das publicações, enquanto os demais periódicos representam individualmente menos de 5%. A apresenta uma visão detalhada desta distribuição, evidenciando a predominância de plataformas reconhecidas na disseminação do conhecimento científico sobre o tema *Fish friendly hydropower technology*.

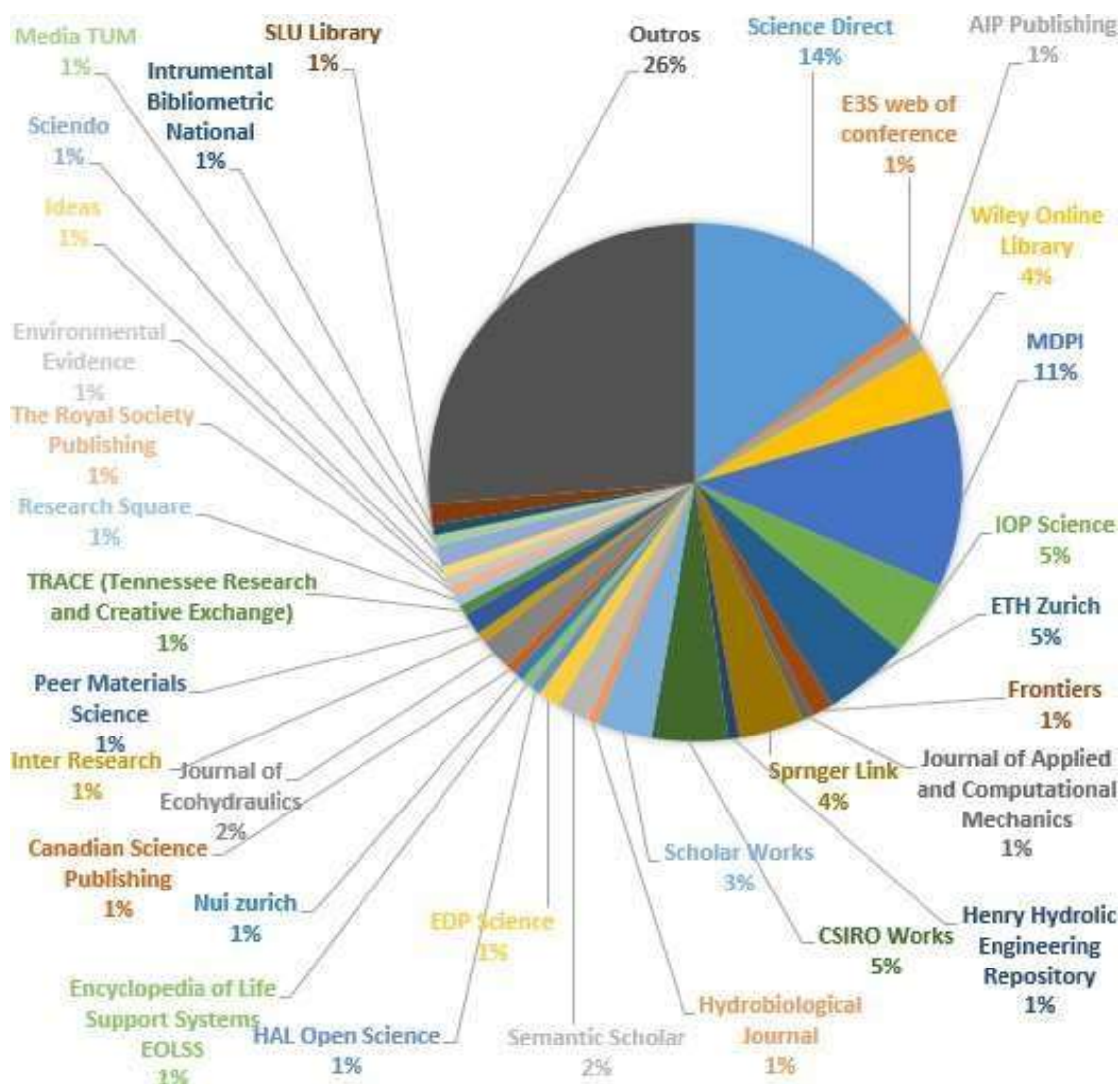
Figura 18 - Concentração de estudos sobre dispositivos e tecnologias amigáveis para peixes nos periódicos selecionados – Periódicos Capes



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise realizada na plataforma Google Acadêmico revelou uma distribuição diversificada da origem dos documentos encontrados, com a ScienceDirect representando 14% das publicações, seguida pela MDPI com 11%, enquanto IOP Science e ETH Zurich contribuem com 5% cada. A Springer Link corresponde a 4%, e diversas outras fontes aparecem com apenas 1% de representatividade. Além disso, a categoria "Outros" engloba mais de uma dezena de fontes individuais, cada uma com menos de 1%, tornando inviável sua representação separada no esquema. Dessa forma, esses periódicos foram agrupados em uma única categoria para melhor visualização, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Concentração de estudos sobre dispositivos e tecnologias amigáveis para peixes nos periódicos selecionados – Google Acadêmico



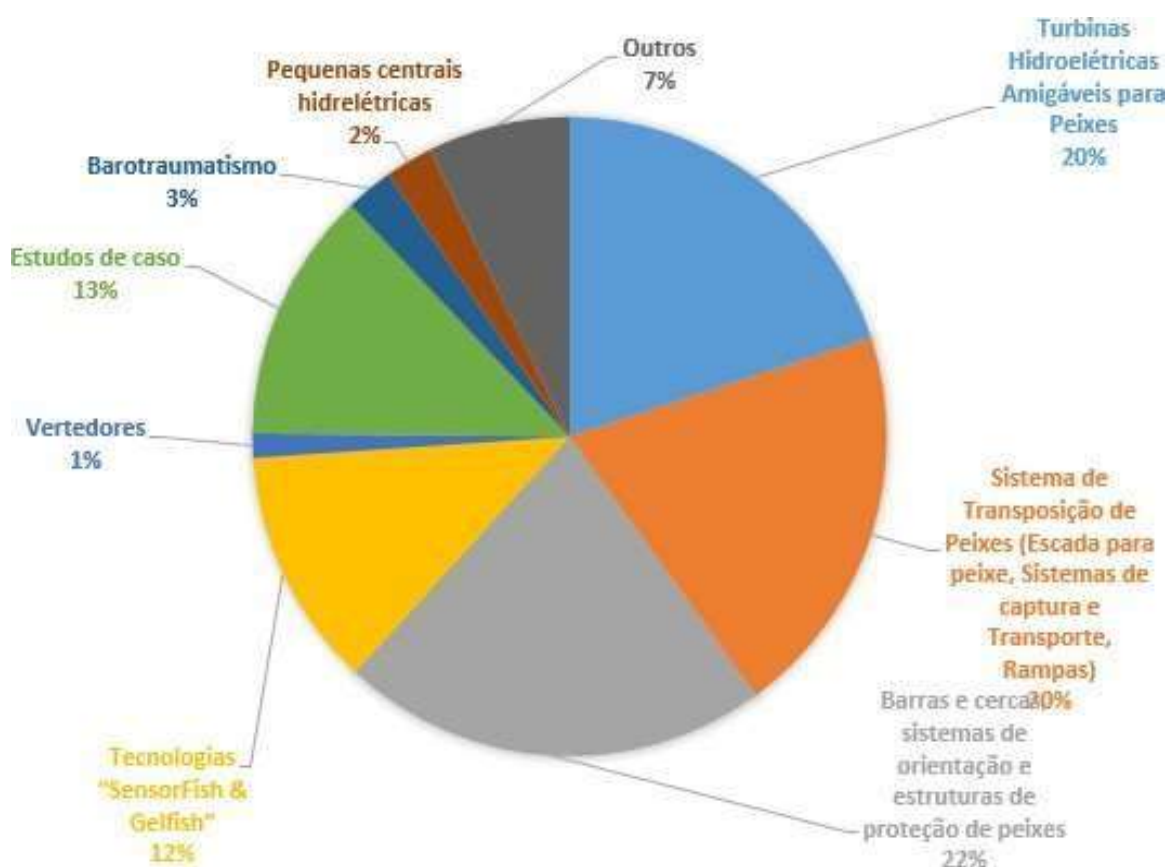
Fonte: elaborado pelo autor.

Com o objetivo de melhor compreender e identificar soluções adequadas para o rio Tocantins, a análise de cada tema foi realizada, abrangendo: tecnologias de turbinas hidrelétricas amigáveis para peixes (Francis, Kaplan, Alden, Parafuso de Arquimedes); tecnologias adicionais como PeixeSensor e Gelpeixe, juntamente com estudos sobre barotraumatismo; sistemas de transposição de peixes (escadas para peixes, sistemas de captura e transporte, rampas); barras, grades, sistemas de orientação e estruturas de proteção para peixes; estudos de caso; pequenas centrais hidrelétricas; e vertedores.

A Figura 20 apresenta a distribuição percentual dos documentos encontrados para cada tema analisado. Os tópicos mais recorrentes incluem turbinas, representando 20% das publicações, seguido por estudos sobre passagens para peixes, sistemas de armadilhas e

transporte, rampas de peixes, barras e cercas, também com 20%. Além disso, os sistemas de orientação e estruturas de proteção para peixes correspondem a 22% dos documentos. Os demais estudos se enquadram em múltiplas categorias simultaneamente, como, por exemplo, pesquisas que abordam tanto turbinas Francis quanto Peixe Sensor, ou que discutem sistemas de transposição de peixes em conjunto com vertedores e turbinas Kaplan.

Figura 20 - Concentração dos temas estudados sobre tecnologias e dispositivos para proteção de peixes



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1 Tecnologia amigáveis

As turbinas hidrelétricas consideradas amigáveis para peixes abrangem diversos tipos, como o parafuso de Arquimedes, a turbina Kaplan, a turbina Francis e as rodas d'água, com estudos focados especialmente nos aspectos ecológicos destas tecnologias. Uma pesquisa conduzida por Zhu et al. (2022) destaca que a maioria das turbinas convencionais não permite a passagem segura dos peixes, com exceção de alguns modelos projetados para operar em baixas quedas d'água, inferiores a 8 metros, como a turbina de baixíssima queda (TBQ) e a turbina Parafuso de Arquimedes.

O estudo também ressalta que, nestas turbinas específicas, os peixes não sofrem impactos significativos, podendo atravessá-las com segurança. No caso das turbinas a parafuso, a baixa velocidade de rotação e o amplo espaço de passagem da água garantem a transposição segura para todas as categorias de peixes, incluindo os de maior porte (YoosefDoost; Lubitz, 2020). Além disso, pesquisas recentes demonstram que a implementação de turbinas a parafuso, em pequenas centrais hidrelétricas, pode oferecer benefícios superiores em comparação às turbinas tradicionais, como Kaplan e Francis (Zhu et al. 2022).

As turbinas Francis e Kaplan são os dois tipos mais comuns de turbinas hidrelétricas (Fu et al. 2016), sendo que as turbinas Francis tendem a apresentar taxas de mortalidade de peixes mais elevadas em comparação às turbinas Kaplan (Marmulla, 2021). Estudos analisam os efeitos do número e do ângulo de inclinação das pás do rotor na probabilidade de danos causados por variações de pressão e tensões de cisalhamento, destacando a importância do design adequado para reduzir impactos negativos sobre os peixes (Zhu et al. 2022).

Adicionalmente, pesquisas recentes exploram o desenvolvimento de pás Kaplan convencionais e modificadas, com o objetivo de torná-las mais compatíveis com a preservação da fauna aquática (Kumar et al. 2021). Um estudo conduzido por (Martinez et al. 2020) em Hurley, uma cidade na Flórida, EUA, utilizou um sensor de peixes para avaliar o desempenho de uma turbina Francis modernizada com uma pá diretora modular. Durante os testes, foi detectada a pressão nadir (menor pressão atingida), medida em diferentes pontos de operação, apresentando valores médios de 74,7, 66,6 e 56,6 kPa, para as potências de 90, 190 e 380 kW, respectivamente. Todas inferiores à pressão atmosférica. A pressão nadir é um indicador essencial para avaliar o risco de lesões nos peixes, especialmente o barotrauma, que ocorre devido às variações bruscas de pressão. Embora a definição de um limite seguro para a passagem de peixes por turbinas hidráulicas ainda seja um desafio, pressões mais elevadas são geralmente consideradas menos prejudiciais para os organismos aquáticos, aumentando suas chances de sobrevivência durante a transposição (Martinez et al. 2020).

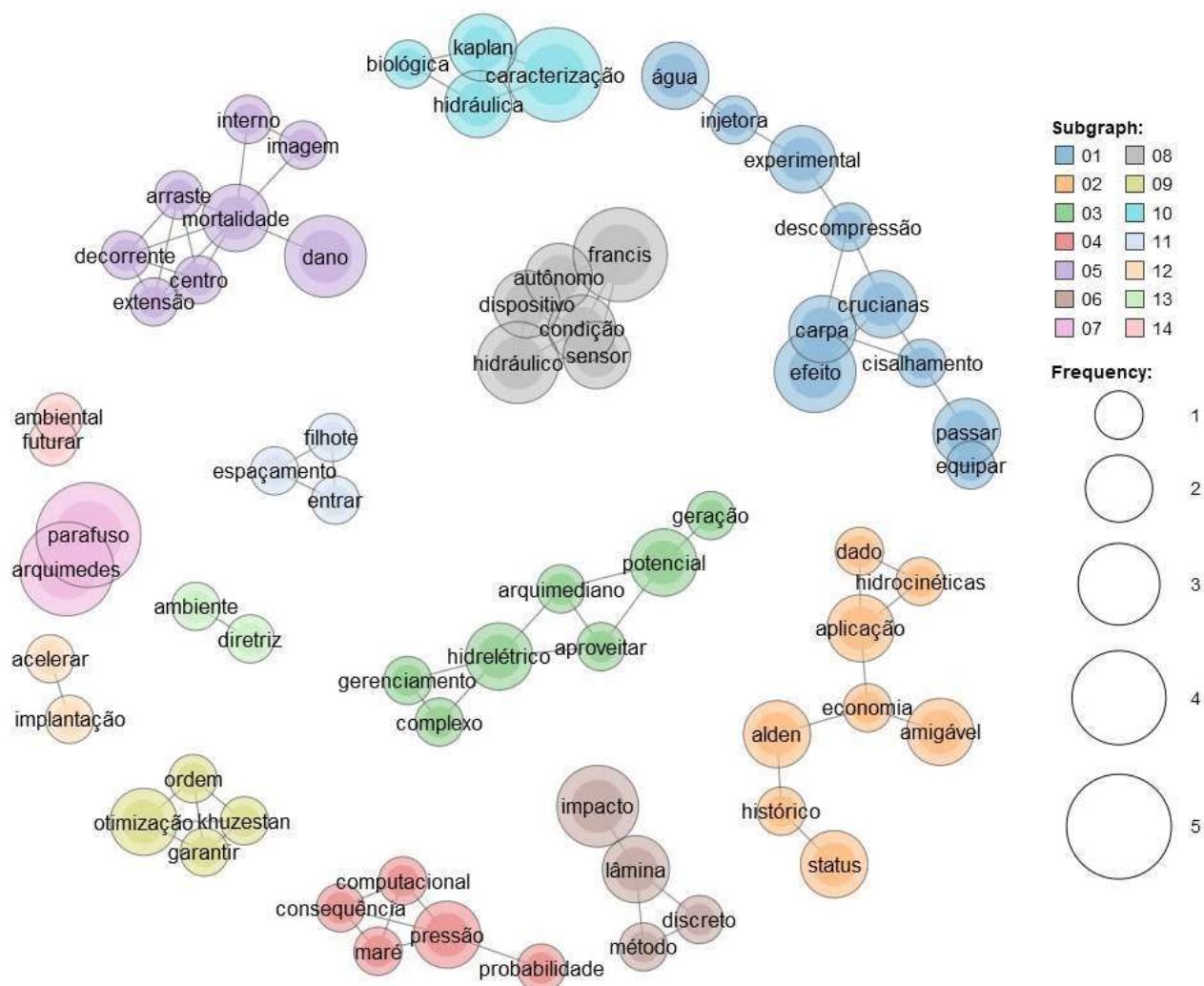
Na mesma direção, as turbinas Alden foram desenvolvidas com o objetivo de minimizar lesões e a mortalidade dos peixes. Testes demonstraram que estas turbinas podem alcançar uma taxa de sobrevivência de 98% para peixes de até 200 mm e de 100% para aqueles com 100 mm ou menos (D. Dixon 2011; Hogan 2011). Classificadas como turbinas ambientalmente aprimoradas, elas buscam reduzir os impactos negativos das plantas hidrelétricas sobre as populações de peixes e qualidade da água (Quaranta et al. 2021). Além

disso, sua capacidade de adaptação a condições específicas, de cada local, torna-as uma solução flexível para diferentes ambientes hidrelétricos (Dixon 2011). Alguns títulos encontrados sobre turbinas amigáveis estão discriminados a seguir:

- A análise e redução da probabilidade de danos causados pela pressão e corte aos peixes em uma turbina Francis (Zhu et al. 2022);
- Parafusos de Arquimedes como turbinas amigáveis aos peixes para explorar o potencial hidrelétrico (Purece; Corlan 2021b);
- Projeto e análise de custos de uma turbina Kaplan amiga do ambiente: um estudo de caso (Kumar et al. 2021);
- Otimização de turbinas hidrelétricas para facilitar a passagem de peixes na província de Khuzestan (Mohammadi et al. 2015);
- Passagem segura de enguias americanas por meio de uma nova turbina hidrelétrica (Watson et al. 2022);
- Turbinas ecológicas para usinas hidrelétricas: atualidade (Quaranta et al. 2021);
- Hidreletricidade com turbinas amigáveis aos peixes da Alden: história e estado de desenvolvimento (Dixon; Hogan, 2015).
- Caracterização in situ do desempenho biológico de uma turbina Francis reequipada com uma palheta diretriz modular. (Martinez et al. 2020)
- Caracterização de uma turbina de sifão para acelerar a implantação de energia hidrelétrica de baixa queda (Martinez et al. 2019).

A partir dos títulos de cada documento, uma rede de palavras foi gerada utilizando o software KHcoder, e a visualização resultante é representada na Figura 21.

Figura 21 – Rede de palavras relacionadas às turbinas amigáveis para peixes



Fonte: Elaborado pelo autor.

A visualização dos subgrafos revela os principais temas de pesquisa relacionados, simultaneamente, à tecnologia hidrelétrica e à proteção de peixe. O grupo azul claro, localizado no canto superior direito, aborda os efeitos das turbinas na fauna aquática, destacando termos como "água", "injeção", "experimental", "descompressão", "carpa" e "efeito", sugerindo que o cisalhamento pode causar danos mecânicos aos peixes ao atravessarem as turbinas. No centro, o grupo verde enfatiza a geração de energia e o potencial hidrelétrico, com palavras como "geração", "potencial", "aproveitar" e "hidrelétrico", ressaltando aspectos técnicos da produção elétrica. O grupo laranja, à direita, foca nas aplicações hidrocinéticas e impactos econômicos, destacando "dados", "hidrocinéticas", "aplicação" e "economia", sugerindo um interesse crescente na viabilidade econômica dessas tecnologias. O grupo marrom/cinza, situado ao centro e na parte inferior, trata dos impactos e métodos de modelagem, incluindo conceitos como "impacto", "método", "probabilidade" e "computacional", indicando o uso de simulações para prever os efeitos das turbinas nos ecossistemas. No canto superior esquerdo, o grupo rosa/violeta discute os danos e a mortalidade piscícola, abordando termos como "mortalidade",

"dano", "interno" e "imagem", enfatizando os impactos negativos por meio de análises visuais. Já o grupo vermelho, na parte inferior, destaca restrições hidrodinâmicas e probabilidades, mencionando "pressão", "consequência", "maré" e "probabilidade", sugerindo modelos preditivos para os riscos associados às turbinas.

Essa representação evidencia um campo de estudo multidisciplinar, unindo engenharia hidráulica, impactos ambientais e avanços em aplicações hidrocínéticas. As duas principais questões abordadas são os efeitos ambientais das turbinas na fauna aquática (como mortalidade piscícola e danos mecânicos) e os desenvolvimentos tecnológicos e econômicos (incluindo modelagem e eficiência energética). O uso do termo "amigável" indica uma preocupação crescente com soluções sustentáveis que minimizem impactos negativos nos ecossistemas. Dessa forma, a análise se mostrou valiosa para identificar tendências e lacunas na pesquisa sobre turbinas hidráulicas e seus efeitos.

As tecnologias relacionadas ao Peixe Sensor e ao Gelpeixe são ferramentas essenciais para compreender o ambiente nas turbinas, fornecendo informações cruciais sobre as condições hidráulicas e a passagem dos peixes, auxiliando no desenvolvimento de máquinas mais amigáveis e na otimização de seu funcionamento (Fu et al. 2016). A análise das condições presentes no interior das turbinas é fundamental para entender a experiência dos peixes, e, portanto, o SensorFish se destaca como uma tecnologia de grande potencial, sendo discutido em cerca de 12% dos documentos analisados, conforme mostrado na Figura 19. Segundo Deng et al. (2010), inicialmente havia dois sistemas de Peixe Sensor, sendo o primeiro, denominado Gen I, menos eficiente e com desempenho limitado, o que levou ao desenvolvimento de uma versão aprimorada, o Gen II, que incorporou avanços tecnológicos para atender aos padrões exigidos.

Esta segunda geração de Peixe Sensor foi proposta para uso internacional em barragens de alta queda, equipadas com turbinas Francis e instalações de armazenamento por bombeamento (Deng et al., 2014), visto que estas estruturas possuem profundidades e pressões superiores à faixa de medição da versão Gen I (Ma; Lian; Wang, 2013).

O Peixe Sensor Gen I foi amplamente utilizado pela Divisão do Pacífico Norte do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, em parceria com o Departamento de Energia do país, para avaliações estruturais e operacionais da passagem de peixes após a construção da barragem no rio Columbia (Deng et al., 2010). No entanto, seu tamanho, funcionalidade, requisitos de implantação e recuperação, além da disponibilidade e custo, limitaram sua aplicação para além desse curso d'água (Deng et al., 2014). Mais recentemente, foi desenvolvido um novo modelo biomimético, chamado Gelfish, utilizando técnicas de

fabricação aditiva, gel balística como substituto de tecido e sensores para detectar mudanças de aceleração durante impactos com pás de turbinas (Saylor et al., 2021).

Os sensores de peixes, SensorFish, permitem medições in situ de acelerações tridimensionais (3D), velocidades de rotação 3D, orientação 3D, pressão e temperatura, com uma alta taxa de amostragem de 2.048 Hz, garantindo maior precisão na análise do impacto das turbinas sobre os organismos aquáticos (Deng et al., 2014). As revisões teóricas sobre esta tecnologia estava, principalmente, focada no ambiente das turbinas, ou seja, no que os peixes enfrentam ao passar das áreas de montante para jusante, através das turbinas. Os golpes das pás são particularmente prejudiciais e muitas vezes resultam em mortalidade quando os peixes são atingidos por pás mais finas movendo-se a velocidades mais altas (Saylor et al. 2021), além das mudanças extremas e abruptas de pressão, tensões de cisalhamento e turbulência. Alguns títulos encontrados sobre Peixe Sensor e Gelpeixe, são:

- Avaliação das condições hidráulicas através das turbinas Francis usando um sensor autônomo (Fu et al., 2016);
- Projeto e implementação de um novo sensor de peixe autônomo para acompanhar o desenvolvimento hidrelétrico avançado (Deng et al., 2014);
- Um conjunto de ferramentas de avaliação biológica hidrelétrica (HBET) para caracterizar as condições hidráulicas e os impactos das estruturas hidrelétricas nos peixes (Hou et al. 2018);
- Avaliação da expansão da aplicação para o sensor de peixe (DeRolph; Bevelhimer, 2014);
- Suscetibilidade de peixes fluviais a riscos antropogênicos: Traumatismo causado por impactos nas pás de turbinas hidrelétricas (R. K. Saylor, 2021);
- Criação de um protótipo de peixe biomimético para melhor compreender o trauma causado por impactos de pás de turbinas hidrelétricas (R. Saylor et al. 2021).

3.2.2 Soluções construtivas amigáveis

Os métodos de captura e transporte de peixes, assim como diferentes tipos de escadas para peixes, são sistemas frequentemente utilizados para mitigar os bloqueios à migração causados por barragens hidrelétricas. No entanto, sua eficácia é limitada, especialmente no caso das passagens para peixes, cuja eficiência varia conforme a espécie, não havendo, até o momento, uma estrutura universalmente eficaz. A questão da efetividade desses sistemas é um desafio constante, particularmente no que diz respeito ao Sistema de Transporte de Peixes. Assim, não basta apenas implementar um sistema de transporte sem um monitoramento

contínuo de sua eficiência; é essencial reavaliá-lo periodicamente em relação ao seu objetivo principal, pois um sistema ineficaz equivale à ausência de qualquer solução. De acordo com Santo (2005), para garantir a eficácia relativa de um dispositivo de passagem de peixes, diversos aspectos devem ser considerados:

- As espécies às quais se destina: identificar as espécies potencialmente presentes no curso d'água e que utilizarão o dispositivo, quantificá-las e determinar os períodos de migração ascendente e descendente. Também é importante definir para quais espécies os dispositivos serão projetados, com base em seu valor ecológico ou econômico ou ainda no impacto causado em cada população específica;

- A eficácia almejada: a posição relativa da barragem na bacia hidrográfica pode influenciar a importância de sua eficiência, ou seja, um obstáculo localizado perto da foz de um curso d'água constitui uma barreira por uma extensão maior do habitat e, portanto, deve apresentar uma solução técnica para um maior número de indivíduos em comparação com um obstáculo localizado mais próximo da nascente;

- O sentido do movimento migratório: embora os dispositivos sejam projetados para garantir o movimento de migração de jusante para montante, o movimento no sentido contrário pode ser de grande importância e deve ser levado em consideração no projeto, evitando assim que espécies sejam capturadas em turbinas ou outros mecanismos com base em seu tamanho;

- Migradores potamódromos e diádromos: para espécies que desenvolvem todo o seu ciclo de vida em água doce, migrando nesse ambiente, as áreas de alimentação e reprodução podem estar distantes, desde alguns metros a centenas de quilômetros (potamódromos). Os migradores diádromos desenvolvem seu ciclo de vida em água doce e salgada, com distâncias entre as áreas de alimentação e reprodução, podendo chegar a milhares de quilômetros;

- Regimes de natação e fatores associados: a capacidade de natação será um dos fatores determinantes no projeto das passagens, expressa em termos de velocidade de natação e resistência. Segundo Larinier e Travade (2002), a ondulação do corpo e da nadadeira caudal será a fonte de propulsão durante a migração na maioria das espécies;

- Tipo de músculo: o músculo vermelho está associado à atividade muscular aeróbica e à velocidade de cruzeiro. O regime de natação pode ser mantido por horas sem causar mudanças fisiológicas no corpo. O músculo branco é usado quando é necessária uma curta explosão de natação rápida (a redução das reservas de glicogênio no músculo resulta em seu esgotamento rápido). Um regime de atividade final utiliza tanto mecanismos aeróbicos,

quanto anaeróbicos em proporções variáveis, e quanto maior o esforço, maior será o uso do componente anaeróbico;

- Temperatura e comprimento: considerando que a velocidade máxima é determinada pelo funcionamento do músculo branco e que o intervalo entre duas contrações musculares diminui com a temperatura, pode-se dizer que a velocidade máxima depende principalmente do comprimento do peixe e da temperatura (Larinier; Travade, 2002);

- Comprimento e tipo de migrador: existem espécies que desovam apenas uma vez no final de seu ciclo de vida, com dimensões geralmente maiores e, portanto, alcançando velocidades mais altas e, conseqüentemente, maior capacidade de subir rios ou atravessar dispositivos; outras sobem rios, geralmente, na fase juvenil, quando seu tamanho diminui, limitando sua velocidade de natação e, portanto, tornando sua subida difícil. Para estas espécies, são necessárias superfícies com baixa inclinação e alta rugosidade;

- Velocidade de referência: na presença de espécies e tamanhos diferentes, o dispositivo deve ser dimensionado para permitir a passagem de espécies menos favorecidas, ou seja, com menor capacidade em termos de detecção de entrada, velocidade máxima de natação ou resistência, e desde que a calibração para essa espécie permita a passagem das demais.

A eficácia dos sistemas de direcionamento e derivação de peixes depende diretamente das condições hidrodinâmicas na região anterior às estruturas de passagem, influenciando o sucesso migratório e a taxa de sobrevivência das espécies aquáticas (Maddahi et al. 2022). Fatores como velocidade e turbulência do fluxo, geometria estrutural e comportamento das espécies-alvo desempenham um papel crucial na eficiência dessas soluções. Estruturas bem projetadas, como grades com barras horizontais e mecanismos de derivação estrategicamente posicionados, apresentam alto potencial de direcionamento, minimizando riscos de mortalidade por impacto ou estresse fisiológico, mesmo para organismos de pequeno porte e baixa capacidade natatória (Tomanova et al. 2018).

Além disso, a incorporação de tecnologias avançadas, incluindo sensores de monitoramento e modelagem computacional de fluxo, possibilitam ajustes dinâmicos, conforme variações ambientais e hidrológicas, aprimorando a funcionalidade desses sistemas. A interação entre engenharia e biologia é essencial no desenvolvimento de dispositivos de passagem de peixes, pois, além da definição de parâmetros estruturais e operacionais, é necessário considerar aspectos biológicos das espécies-alvo, como suas habilidades de natação, comportamento migratório e exigências ecológicas ao longo do ciclo de vida (Santo, 2005). Dessa forma, a implementação de abordagens integradas e baseadas em

evidências científicas contribui para a mitigação dos impactos das barreiras artificiais sobre os ecossistemas aquáticos, promovendo soluções sustentáveis para a conservação da ictiofauna em ambientes fragmentados.

A seguir, destacamos alguns trabalhos que abordam este sub-tema:

- A pesquisa sobre passagens de peixes na China (Mao, 2018);
- Revisão de pesquisas existentes sobre a passagem de peixes através de grandes barragens e sua aplicabilidade nas principais barragens do Mekong (Stefan; Carina, 2015);
- A melhoria do design da entrada da passagem de peixes envolvendo um fluxo de atração excedente (Marq Redeker, 2018);
- Como dominar a arte de construir passagens de peixes funcionais (Adam 2015);
- Aplicação do método de cálculo hidrodinâmico suavizado de partículas para a simulação de mecanismos de transposição de peixes em energia hidrelétrica (Gomes, 2017);
- Estudo numérico da hidráulica em uma fenda vertical de passagem de peixes com configurações aprimoradas (Ahmadi et al., 2021);
- Protegendo com eficiência os filhotes de salmão migratórios marinhos contra a entrada nas turbinas de usinas hidrelétricas com racks de espaçamento de barras baixas inclinados ou orientados (Tomanova et al. 2018)
- Investigação de campo da eficiência hidráulica e de orientação de peixes de um sistema de desvio de barra horizontal (Maddahi et al. 2022).

A relevância deste sub-tema é evidenciada pelo fato de que 20% dos documentos analisados tratam desse assunto (Figura 19), demonstrando o crescente interesse da comunidade científica na viabilização de passagens eficientes para peixes. A construção dessas estruturas, com o objetivo de permitir que os peixes evitem as turbinas, já ocorre há anos, mas o conhecimento sobre sua real eficácia ainda é limitado.

Segundo Agostinho et al. (2005), foi recentemente divulgado no meio acadêmico que, embora as passagens para peixes possibilitem a transposição de diversas espécies, elas não atendem adequadamente aos migradores de água doce, que deveriam ser o principal foco dessas soluções atualmente, apenas migradores de água salgada demonstram resultados satisfatórios. Diante disso, as passagens para peixes são projetadas especialmente para espécies migratórias, porém ainda há lacunas significativas nesse campo de estudo. O desafio dos pesquisadores é desenvolver soluções eficazes que permitam a criação de sistemas padronizados e eficientes de transposição de peixes. Para isso, aprofundar as pesquisas nesse domínio é essencial, pois a implementação dessas infraestruturas exige não apenas um alto

nível de conhecimento técnico e científico, mas também um significativo investimento econômico.

Dessa forma, múltiplos estudos preliminares são indispensáveis, abrangendo tanto aspectos biológicos com foco nas espécies-alvo quanto ambientais, hidrológicos e hidráulicos, relacionados ao regime de fluxo do rio em questão. Além disso, a construção dessas estruturas exige um planejamento rigoroso dentro da Engenharia Civil, envolvendo levantamentos topográficos, análises de qualidade da água e modelagens hidrodinâmicas que garantam o funcionamento adequado e compatível com a ecologia local (Porcher; Larinier, 2002).

Os sistemas de grades horizontais e verticais, bem como os sistemas de orientação para peixes, são projetados para evitar que os peixes entrem em áreas de alto risco dentro das instalações hidrelétricas, reduzindo assim as chances de lesões ou mortalidade durante a passagem (Maddahi et al. 2022). As grades podem ter diferentes orientações e formatos, incluindo estruturas retangulares, curvadas ou em formato de folha, cada qual projetada para otimizar o fluxo hidráulico e minimizar perdas de carga.

As grades curvadas, por exemplo, são particularmente eficientes para melhorar as condições de escoamento, favorecendo tanto o direcionamento dos peixes quanto o desempenho das turbinas (Meister et al. 2020). A eficácia desses sistemas é influenciada por múltiplos fatores, como o espaçamento entre as barras, o ângulo de aproximação do fluxo e a morfologia das espécies piscícolas. Estudos indicam que as grades horizontais apresentam variações na eficiência dependendo da espécie e das condições hidráulicas do locais (De Bie et al. 2021). Além disso, o comportamento natatório dos peixes e a configuração do fluxo desempenham papéis determinantes na efetividade do direcionamento, exigindo adaptações específicas para maximizar o sucesso do sistema (De Bie et al. 2018).

No contexto da hidreletricidade, esses sistemas desempenham um papel essencial na proteção e orientação dos peixes migratórios. Assim, esses dispositivos auxiliam na preservação da fauna piscícola e complementam outros sistemas de transposição, facilitando a navegação dos peixes em direção às passagens projetadas para sua migração, em vez de se dirigirem às turbinas, onde estariam sujeitos a danos severos. Na sequência estão alguns títulos da amostra da presente pesquisa, selecionados sobre este sub-tema:

- Contornando barras horizontais: Sistemas para a migração de peixes para a jusante – estado do conhecimento, limitações e lacunas (Meister et al., 2018);
- Hidráulica de barras horizontais para migração de peixes a jusante (Meister et al., 2019);

- Melhoria da performance hidráulica de estruturas de orientação de peixes com design inovador de barras (Beck; Albayrak; Boes, 2018);
- Protegendo efetivamente os alevinos migratórios do mar contra a entrada nas turbinas de centrais hidrelétricas por meio de suportes de barras inclinadas ou orientadas com espaçamento estreito (Tomanova et al., 2018);
- Eficiência de grades orientadas horizontal e verticalmente para orientar juvenis (*Squalius cephalus*) em movimento para a jusante (De Bie et al. 2018);
- Protegendo a descida de alevinos de salmão de centrais hidrelétricas com grades inclinadas e otimização da descarga de águas de derivação (Tomanova et al., 2021);
- Campos de fluxo ao redor de estruturas de orientação de peixes (Albayrak et al., 2015);
- Desempenho hidráulico e biológico de peixes em estruturas de orientação de peixes com barras curvas (Beck, 2019).

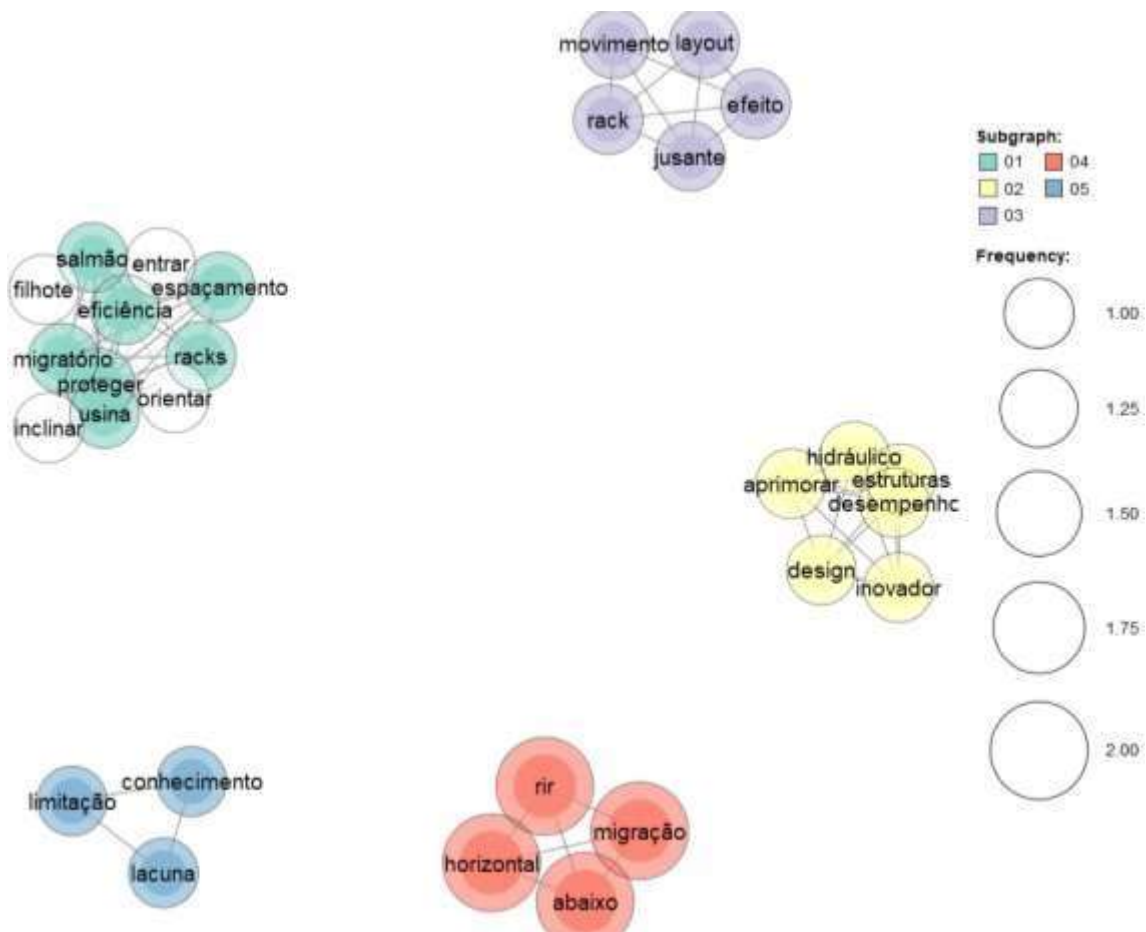
No total de documentos analisados, este sub-tema corresponde a 22% (Figura 19). O que evidencia um grande interesse, pois a simples instalação de grades não é suficiente, sendo necessária a implementação de um sistema completo e integrado. Os suportes para grades horizontais, combinados com um sistema de desvio, representam uma medida eficaz para proteger e orientar os peixes migradores no sentido de jusante, tendo sido instalados com sucesso em diversas pequenas e médias usinas hidrelétricas ($Q < 100 \text{ m}^3/\text{s}$) na Europa (Meister et al., 2019).

Entretanto, não foram encontrados estudos sobre esse sub-tema em usinas hidrelétricas brasileiras, o que levanta um questionamento relevante sobre a existência e aplicação desses sistemas no Brasil. Além disso, os sistemas de orientação comportamental, que utilizam eletricidade, luz ou som para repelir os peixes, demonstraram um desempenho variável, dependendo da espécie e das condições locais (Redeker, 2013); Tais sistemas também desempenham um papel na retenção de detritos, exigindo limpeza frequente para manter a eficiência operacional.

Estudos recentes, conduzidos por Meister et al. (2021), investigaram um sistema de proteção e orientação de peixes baseado em grades horizontais associadas a um campo elétrico de baixa voltagem, que permitiu um maior espaçamento entre as barras sem comprometer a eficácia do direcionamento dos peixes. Esta abordagem reduz problemas operacionais comuns, como obstruções e elevadas perdas de carga, que ocorrem quando as grades possuem espaçamentos muito estreitos.

Na Figura 22 são apresentados os principais temas abordados nos estudos sobre grades hidráulicas, onde as relações entre conceitos são ilustradas por conexões entre nós (círculos) e arestas (linhas). Cada subgrafo é representado por uma cor distinta para indicar clusters temáticos, e a legenda à direita fornece detalhes sobre a frequência dos termos e a força das conexões estabelecidas.

Figura 22 – Rede de palavras relaciona as barras hidráulicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos subgrafos revela diferentes aspectos das barras hidráulicas no contexto da hidreletricidade, destacando suas implicações ecológicas, técnicas e hidrodinâmicas. O subgrafo verde claro aborda a passagem e a proteção dos peixes, incluindo termos como "salmão", "filhote", "migratório", "eficiência", "proteção" e "usina", enfatizando os desafios da migração dos peixes através das estruturas hidráulicas e a necessidade de otimizar o espaçamento das grades ("racks") para minimizar impactos na fauna aquática. Já o subgrafo amarelo foca na concepção e desempenho hidráulico, com palavras como "hidráulico", "estruturas", "desempenho", "design", "aprimorar" e "inovador", evidenciando avanços tecnológicos voltados para a maximização da eficiência energética e a redução de impactos ambientais.

O subgrafo violeta explora os efeitos do fluxo e a disposição das estruturas, incluindo "movimento", "layout", "efeito" e "jusante", sugerindo que a configuração das barras pode influenciar significativamente a dinâmica do escoamento e seus efeitos a jusante. O subgrafo azul destaca lacunas no conhecimento e limitações na pesquisa, com termos como "lacuna", "conhecimento" e "limitação", indicando a necessidade de mais estudos sobre a eficiência e os impactos ambientais das barras hidráulicas.

Por fim, o subgrafo vermelho expõe a migração e as restrições espaciais, apresentando palavras como "migração", "horizontal" e "abaixo", sugerindo que a orientação das barras pode afetar o deslocamento dos organismos aquáticos. Esta representação gráfica evidencia duas questões principais: a otimização técnica e hidrodinâmica das barras hidráulicas para aumentar sua eficiência e reduzir impactos; e a preservação ecológica e proteção das espécies migratórias, com foco no design das grades e no gerenciamento dos fluxos d'água para minimizar efeitos adversos sobre os ecossistemas aquáticos.

No mais, os estudos de caso são conduzidos em contextos específicos, tanto em laboratório quanto em campo, com o objetivo de analisar o comportamento de diferentes espécies durante a migração, sua passagem por turbinas e a interação com dispositivos de transposição de peixes, entre outros fatores relevantes para a ecologia aquática e a sustentabilidade dos empreendimentos. Esses estudos permitem avaliar a eficiência das estruturas de transposição, os impactos das turbinas na mortalidade dos peixes e a adequação dos sistemas de mitigação implementados. Alguns dos títulos, envolvendo este tipo de estudo, foram nomeados da seguinte forma:

- Avaliação experimental do efeito da descompressão nas lesões de caracídeos durante a passagem pela turbina (L Meng et al., 2019);
- Medições de campo da atratividade de contornos para dispositivos de contenção respeitosos aos peixes (Lemkecher et al., 2018);
- Avaliação dos danos externos aos peixes causados por usinas hidrelétricas com base em um novo protocolo de campo (M. Mueller et al., 2017);
- Modelagem de medidas de mitigação para a migração de alevinos em trechos de rios represados (Melanie Mueller et al., 2020);
- Extensão de lesões e mortalidade resultantes da passagem de peixes por uma turbina hidrelétrica de queda muito baixa no centro de Ontário, Canadá (Tuononen et al., 2022);
- Testes de impacto nas pás da turbina para avaliação e otimização de uma turbina respeitosa aos peixes (Meng et al., 2022);

- Avaliação dos efeitos da passagem da turbina nas lesões internas dos peixes e mortalidade tardia usando imagens de raios-X (Melanie Mueller et al., 2020);
- Avaliação dos efeitos do cisalhamento na carpa capim ao passar pelas turbinas (Long Meng et al., 2021);
- Migração de alevinos de salmão-do-atlântico em três usinas hidrelétricas alemãs (Havn et al., 2017);
- Critérios de passagem de peixes para infraestruturas hidrelétricas e de irrigação na bacia do Murray-Darling (Boys et al., 2014).

Os estudos de caso representam 13% dos documentos analisados (Figura 19), configurando a terceira categoria mais frequente. A maioria dessas pesquisas é conduzida na Europa, Ásia e América do Norte, com destaque para os Estados Unidos, enquanto não há registros de estudos semelhantes na América do Sul, especialmente no Brasil. Esses estudos incluem ensaios laboratoriais e investigações de campo com categorias específicas de peixes, sendo que os realizados em ambiente natural têm como principais objetivos compreender as rotas migratórias das espécies, suas trajetórias, o tempo necessário para atravessar estruturas hidrelétricas, como turbinas e passagens para peixes (Lemkecher et al., 2018), além de avaliar o estado de saúde dos indivíduos após a passagem pelas turbinas (Meng et al., 2021), e o impacto da predação sobre os peixes que não conseguem transpor essas estruturas.

Ademais, geralmente, os experimentos envolvem a captura de peixes, que são marcados com chips eletrônicos para monitoramento de seus deslocamentos antes de serem soltos novamente, sendo o salmão prateado uma das espécies mais utilizadas nesses ensaios. Já os estudos em laboratório têm foco na compreensão detalhada das consequências do impacto das pás das turbinas, realizando análises por raio-X para identificar possíveis lesões resultantes do impacto (Mueller et al., 2020).

Em outra direção, apenas 2% dos documentos analisados abordam o sub-tema de pequenas centrais hidrelétricas (Figura 19), evidenciando que, embora menos estudadas, este tipo de planta apresenta particularidades ambientais relevantes. Os estudos indicam que, em comparação com grandes usinas, essas instalações ocupam menos território, o que representa uma vantagem em termos de uso do solo (Bakken et al. 2014). No entanto, apesar de sua menor escala, essas centrais podem provocar alterações hidrológicas significativas, impactando os ecossistemas aquáticos de maneira mais intensa, especialmente quando múltiplas instalações são construídas na mesma bacia hidrográfica. Embora frequentemente consideradas alternativas mais sustentáveis, sua eficiência ambiental pode ser inferior à das

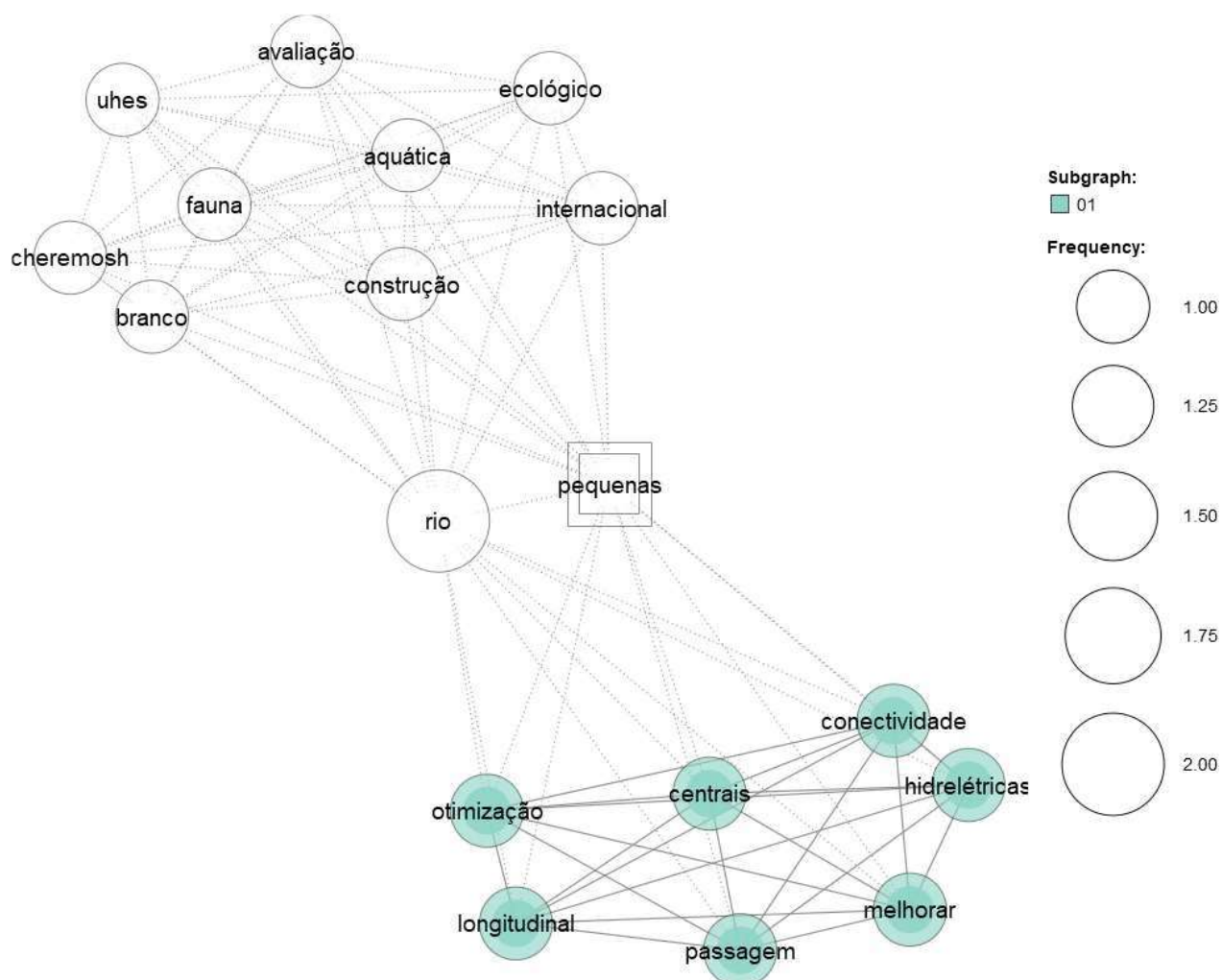
grandes hidrelétricas quando os impactos são avaliados em relação à potência, MW, de geração de energia (Kibler e Tullos 2013).

Desta forma, apesar da percepção de que as pequenas centrais são mais ecológicas devido ao seu tamanho reduzido e menor interferência espacial, os impactos ambientais por unidade de energia produzida podem ser expressivos, afetando a biodiversidade e os regimes hidrológicos. Portanto, é essencial adotar uma abordagem holística na avaliação desses projetos, evitando suposições automáticas de que são necessariamente mais sustentáveis do que grandes usinas hidrelétricas. Além disso, substituir uma grande usina por várias pequenas centrais pode não ser a melhor solução, sendo mais relevante considerar quais sistemas de proteção e orientação para peixes seriam mais adequados para minimizar os impactos sobre a fauna aquática neste tipo de instalação. Alguns títulos que fazem parte de nosso estudo incluem:

- Avaliação da construção de pequenas centrais hidrelétricas na fauna aquática e estado ecológico do rio White Cheremosh: abordagem internacional (Afanasyev et al., 2017);
- Baixa taxa de mortalidade de enguias prateadas (*Anguilla anguilla* L.) passando por uma pequena central hidrelétrica (Bernas et al., 2017);
- Sobrevivência de peixes que passam a jusante em uma pequena instalação hidrelétrica (Amaral et al., 2018);
- Operação adaptada aos peixes em pequenas centrais hidrelétricas: uma análise econômica (Merino; Brandimarte, 2022).

A Figura 23 apresenta uma rede de palavras-chave e conceitos extraídos de um corpus de textos científicos relacionados às pequenas centrais hidrelétricas, permitindo uma análise estruturada das principais temáticas abordadas na literatura.

Figura 23 – Rede de palavras relaciona as Pequenas centrais hidrelétricas



Fonte: elaborado pelo autor.

O grafo apresentado está estruturado em duas grandes áreas interconectadas, refletindo as principais preocupações científicas e técnicas relacionadas às pequenas centrais hidrelétricas (PCH). A parte superior destaca aspectos ecológicos e construtivos, evidenciados por termos como "fauna", "aquática", "ecológico", "avaliação" (avaliação ambiental), "internacional" e "construção" (construção de barragens), sugerindo uma abordagem voltada para os impactos ambientais e a regulamentação internacional das PCH.

A menção de "uhes" (usinas hidrelétricas) e de nomes de rios como "Cheremosh" e "Branco" indica estudos de caso em diferentes bacias hidrográficas. Já a parte inferior do grafo foca na otimização técnica e na gestão das infraestruturas hidrelétricas, com termos como "hidrelétricas", "conectividade" (conectividade ecológica), "otimização" (otimização de desempenho), "passagem" (passagem de peixes), "longitudinal" (continuidade fluvial), "centrais" e "melhorar" (aperfeiçoamento estrutural), ressaltando a importância da eficiência

operacional e da mitigação dos impactos sobre a fauna aquática. A correlação entre os termos "rio" e "pequenas" (pequenas centrais) ilustra a relevância dos pequenos barramentos na gestão dos recursos hídricos. Convém lembrar que a espessura das conexões entre os termos

indica a força das associações conceituais, com coeficientes de correlação variando entre 0,5 e 1,0, o que demonstra a interdependência entre aspectos ambientais e técnicos. Assim, a visualização evidencia dois eixos principais de pesquisa: os impactos ecológicos das PCH e as estratégias de otimização para integração sustentável no ambiente fluvial. Esta análise de frequência de palavras-chave fornece um suporte essencial para a identificação de tendências de pesquisa e para a orientação de estudos futuros, voltados ao desenvolvimento sustentável das pequenas centrais hidrelétricas.

Os vertedouros projetados para minimizar os impactos sobre os peixes na hidreletricidade desempenham um papel crucial na redução da mortalidade durante a migração a jusante, contribuindo para a conectividade dos habitats aquáticos. Estudos indicam que vertedouros de superfície, especialmente aqueles equipados com dispositivos ajustáveis, melhoram significativamente as condições de passagem ao reduzir eventos de aceleração extrema e colisões com estruturas (Duncan et al. 2018). Além disso, modificações estruturais, como a inclusão de blocos defletores e ajustes na inclinação dos vertedouros, demonstraram eficácia na mitigação dos impactos negativos sobre os peixes, diminuindo tanto a profundidade da queda quanto a severidade do impacto com a superfície da água (Deng et al. 2017). Portanto, a implementação de adaptações em vertedouros tem potencial para aumentar a taxa de sobrevivência das espécies migratórias. A seguir, destacamos dois estudos sobre este sub-tema:

- Aspectos da garganta do rio Caraş das comunidades de salmões - soluções técnicas (Voicu et al., 2018);
- Taxa de mortalidade e lesões de pequenos peixes passando por três modelos de vertedores de barragens de desvio (Bestgen et al. 2018).

Por fim, apenas 1% dos documentos analisados abordam a mortalidade de peixes relacionada aos vertedouros, evidenciando a necessidade de aprofundar pesquisas sobre esse impacto ecológico. Uma solução projetada especificamente para trutas marrons, jovens e adultas, propõe um fluxo gravitacional com velocidades de corrente adequadas, permitindo que nadadores menos resistentes consigam atravessar os vertedouros sem dificuldades durante sua migração a jusante (Voicu et al., 2018). Este sistema visa evitar que os peixes tentem ultrapassar o vertedouro, reduzindo riscos de lesões ou mortalidade.

Para avaliar a eficácia de tais soluções, experimentos foram conduzidos em laboratórios,

com três modelos de vertedouros: um vertedouro de queda livre, com 5,7 metros de altura e três profundidades distintas de poço de amortecimento; um vertedouro em forma de ogiva, com face lisa e 5,4 metros de altura; e um modelo semelhante ao anterior, masequipado com degraus de dissipação de energia (Bestgen et al. 2018). Os resultados indicaram que a taxa média de sobrevivência, corrigida para a mortalidade associada ao manuseio, foi elevada em todas as condições de teste, exceto no vertedouro de queda livre com um poço de amortecimento de apenas 2,5 cm de profundidade, onde a sobrevivência dos peixes foi significativamente reduzida (Bestgen et al. 2018). Os achados ressaltam a importância de adaptar a engenharia dos vertedouros para mitigar impactos negativos sobre a fauna aquática e garantir a preservação das espécies migratórias.

Além dos temas diretamente ligados à mitigação da mortalidade de peixes na exploração hidrelétrica, outros documentos (Figura 19) abordam tópicos distintos, mas ainda correlacionados a problemática. Entre estes sub-temas, destacam-se estudos sobre o "Túnel de contorno de sedimentos e peixes", que visa otimizar a passagem segura de organismos aquáticos e minimizar o assoreamento, bem como o desenvolvimento de protótipos de injetores de turbilhão para turbinas hidrelétricas, projetados para reduzir impactos negativos sobre a fauna aquática e melhorar a eficiência energética do sistema. Esses avanços tecnológicos refletem a busca contínua por soluções inovadoras. Alguns estudos neste sentido, são:

- Uma análise numérica e experimental de um protótipo de injetor de turbilhão para turbinas hidrelétricas amigáveis aos peixes (Airody, 2017);
- Soluções inovadoras e novas ferramentas para peixes hidropotentes (Harby et al. 2020);
- Criando um dispositivo hidrelétrico aquático respeitoso aos peixes usando um hidroptero oscilante (Chernjavsky, 2021);
- Prever a influência hidráulica das operações hidrelétricas no habitat aquático a montante (Langford et al. 2016).

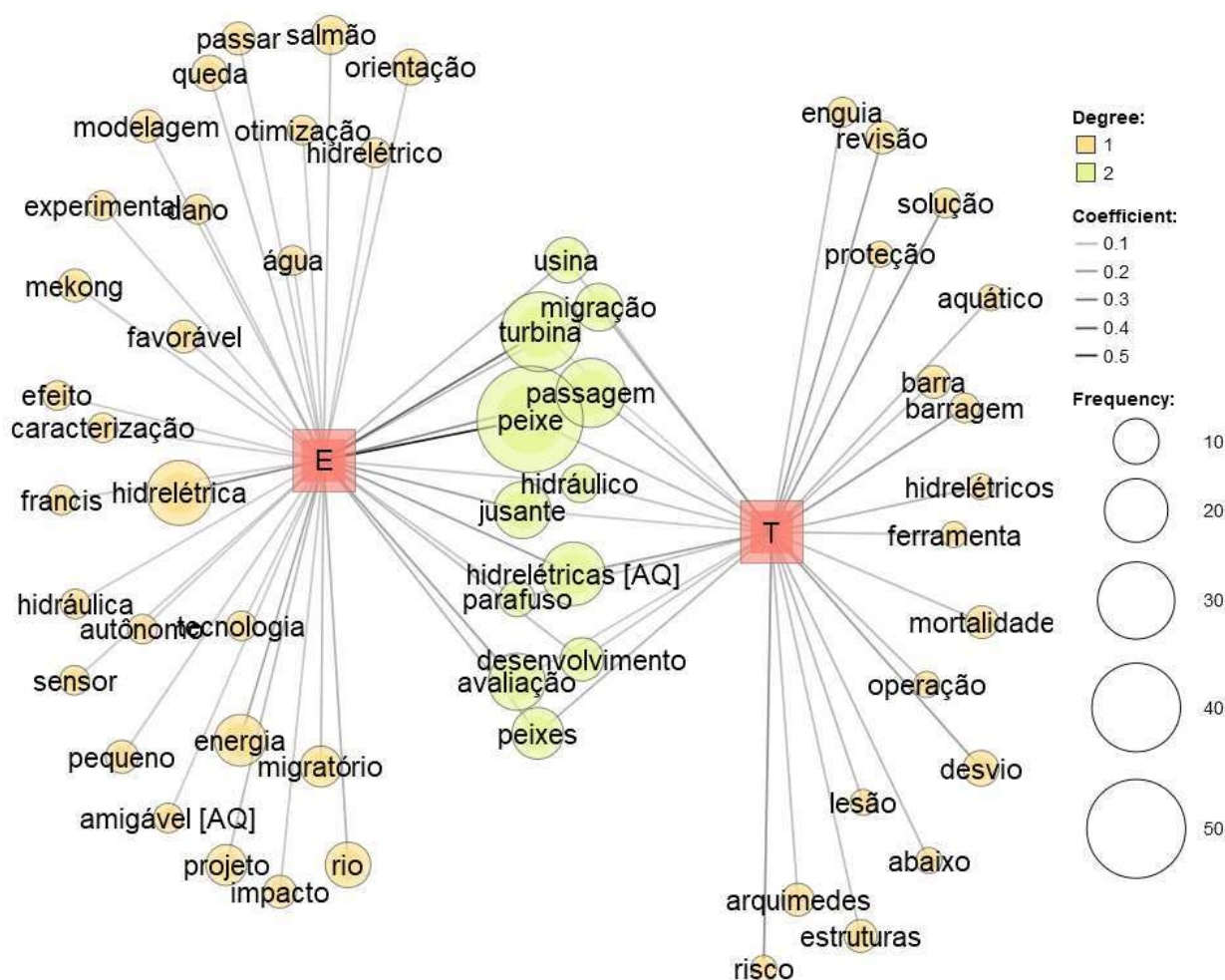
3.3 Análise de Conteúdo

É importante mencionar que, para garantir maior transparência na condução desta pesquisa, a lista dos documentos analisados está apresentada no final desta dissertação, no Apêndice A. Isto facilita a rastreabilidade e a verificação das fontes utilizadas. Para cada documento, são fornecidas as seguintes informações: o título da obra, o(s) autor(es), o ano de publicação, o país de origem e o link de acesso, quando disponível.

Os estudos foram subdivididos, pela natureza da pesquisa, em empíricos e teóricos. A

Figura 24 ilustra como essas abordagens são direcionadas, destacando os diferentes temas tratados nos títulos. A escolha do título de cada documento para a análise de conteúdo é fundamental, pois sintetiza o tema central e a abordagem adotada, fornecendo pistas sobre conceitos-chave e permitindo a identificação de padrões, categorias e relações entre os textos. Além disso, os títulos refletem a intenção dos autores e auxiliam na classificação dos documentos dentro de um contexto científico específico. A seleção baseada nos títulos facilita a organização do corpus da pesquisa e otimiza o processo de categorização dos dados, garantindo uma triagem inicial eficiente e assegurando que apenas documentos relevantes sejam incluídos no estudo.

Figura 24 – Rede de palavras entre estudos empíricos e teóricos



Fonte: elaborado pelo autor.

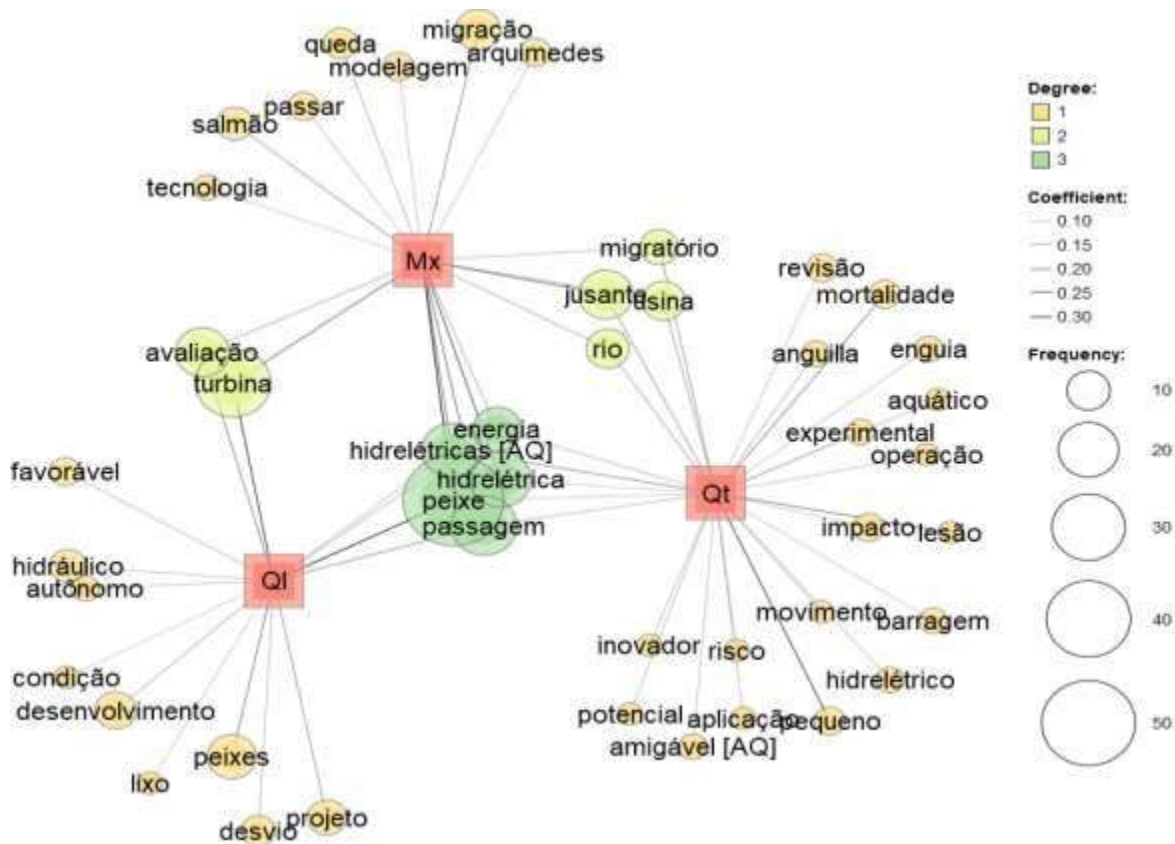
Os estudos empíricos englobam termos relacionados à experimentação e observação direta, como "hidrelétrica", "sensor", "tecnologia", "pequeno" e "projeto", indicando uma

abordagem voltada para o desenvolvimento e aplicação de soluções inovadoras. Além disso, palavras como "avaliação", "peixes", "migratório", "passagem" e "turbina" sugerem a análise de dispositivos que facilitam a migração dos peixes. A presença de conceitos como "modelagem", "otimização" e "experimental" indica o uso de métodos quantitativos para avaliar os impactos ambientais das infraestruturas.

Por outro lado, os estudos teóricos focam nos fundamentos conceituais e análises estruturais das barragens, como demonstrado pelos termos "proteção", "solução", "barragem", "ferramenta" e "hidrelétricos", que indicam uma abordagem mais voltada à gestão das infraestruturas. Elementos como "Arquimedes", "estruturas", "risco" e "abaixo" sugerem investigações baseadas em princípios físicos e hidrodinâmicos para compreender melhor os efeitos das barragens no meio ambiente. Os nós verdes representam conceitos fortemente ligados às plantas, como "hidrelétricas", "passagem", "peixe", "hidráulico", "jusante" e "desenvolvimento", destacando a forte interação entre as infraestruturas e a fauna aquática. Enquanto que os nós amarelos indicam conceitos periféricos, associados às metodologias e implicações ecológicas mais amplas. A espessura das conexões evidencia relações significativas entre os termos, como a forte associação entre "hidrelétrica", "passagem" e "peixe", ressaltando a importância dos estudos sobre o impacto das barragens nas rotas migratórias dos peixes. Assim, a análise do gráfico revela dois principais eixos de pesquisa: uma abordagem empírica, baseada em experimentação e observação, para otimizar as infraestruturas, e uma abordagem teórica, focada na formulação de modelos hidrodinâmicos para prever e mitigar os impactos ambientais das usinas hidrelétricas.

Outra classificação, nesta análise de conteúdo, relaciona-se com os tipos de abordagem adotados (Quadro 3), ou seja, diferentes focos analíticos: qualitativa (Ql), quantitativa (Qt) e mista (Mx). Sendo que, a categorização dessas abordagens permite uma melhor compreensão da metodologia utilizada nos estudos analisados, auxiliando na identificação de padrões e na interpretação dos dados. A Figura 25 ilustra os temas abordados em cada abordagem, utilizando os títulos dos estudos selecionados. Para garantir maior precisão na análise, foi utilizado o software KHCoder, que possibilita a extração e organização das informações de forma sistemática e estruturada.

Figura 25 – Rede de palavras sobre o tipo de abordagem utilizada



Fonte: elaborado pelo autor.

As abordagens qualitativas (QI) englobam termos associados à análise descritiva e exploratória dos impactos ambientais e técnicos, como avaliação, turbina, desenvolvimento e condição, evidenciando um exame contextual detalhado. Além disso, palavras como hidráulico, autônomo e peixes confirmam uma preocupação com a interação entre as infraestruturas hidrelétricas e a fauna aquática. Já as abordagens quantitativas (Qt) baseiam-se na mensuração e análise estatística de dados, sendo representadas por termos como revisão, mortalidade, experimental e operação, que destacam a investigação de indicadores de desempenho e impacto ambiental. Conceitos como risco, impacto, movimento e tensão sugerem que essas pesquisas enfatizam a avaliação dos riscos e das dinâmicas fluviais associadas às barragens. Por outro lado, as abordagens mistas (Mx) combinam características das duas metodologias anteriores, integrando análise descritiva e modelagem matemática para compreender as dinâmicas complexas. Isso é refletido por termos como migração, queda e modelagem, que indicam a aplicação de modelos teóricos e simulações para estudar a relação entre eficiência energética e impactos ecológicos. Os nós verdes no grafo representam conceitos fortemente correlacionados às hidrelétricas, como energia, hidrelétrica e passagem (de peixes), demonstrando a preocupação com a sustentabilidade dos empreendimentos. Já os nós amarelos, que incluem palavras como

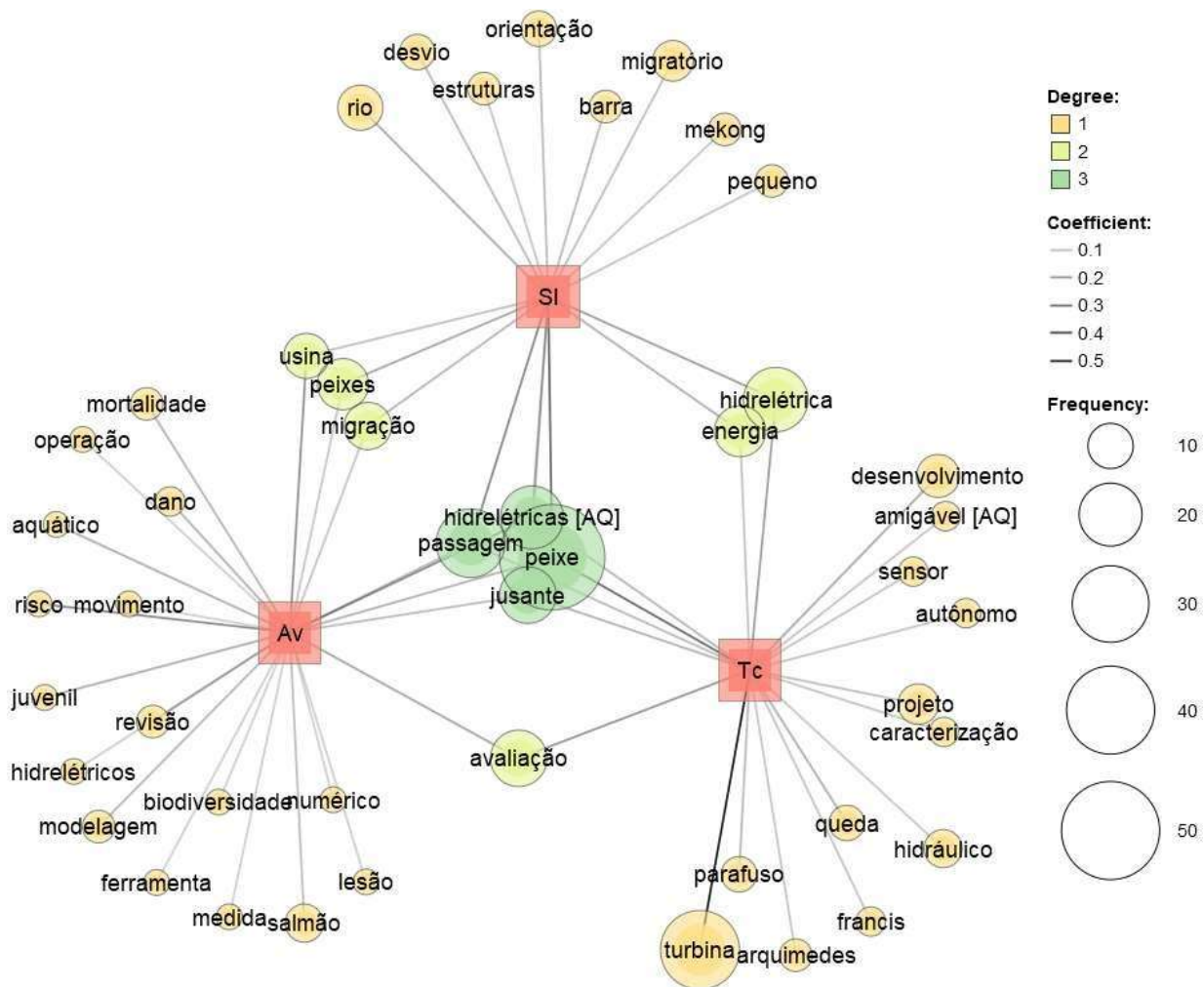
tecnologia, pequeno e amigável, sugerem tendências de pesquisa voltadas para soluções mais sustentáveis e de menor impacto. A espessura das conexões entre os termos reforça a importância da compatibilização entre geração de energia e conservação ambiental. Em resumo, o grafo revela que os estudos sobre hidrelétricas se dividem entre a avaliação qualitativa dos impactos ambientais, a quantificação de variáveis operacionais e a integração dessas abordagens para otimizar a eficiência energética e a sustentabilidade dos sistemas fluviais.

As tecnologias e soluções construtivas identificadas foram categorizadas, permitindo uma visão abrangente das abordagens existentes. Além das soluções construtivas (Sl) e tecnologias (Tc) projetadas para minimizar impactos sobre os peixes, também foram encontrados documentos que avaliam as lesões destes, após passarem pelas turbinas, bem como estudos sobre a migração e análises de rotas migratórias.

Além disso, foram identificadas pesquisas dedicadas à avaliação do campo de escoamento dos rios, fornecendo dados essenciais para compreender a hidrodinâmica que influencia a fauna aquática. Dessa forma, a categorização dessas informações contribui para uma síntese estruturada da literatura existente, permitindo identificar padrões, lacunas e avanços na área.

A Figura 26 apresenta mais detalhes sobre a classificação. Localizada à direita do grafo, a categoria Tc inclui termos como desenvolvimento, amigável, sensor, autônomo, projeto e caracterização, além de conceitos técnicos como turbina, parafuso e Arquimedes, indicando inovações tecnológicas voltadas para a redução do impacto das barragens sobre a fauna aquática. A presença de termos como queda (queda d'água), hidráulico e Francis sugere estudos focados na otimização das turbinas hidrelétricas para facilitar a passagem dos peixes. No topo do grafo, a categoria Sl agrupa conceitos relacionados ao design físico e às infraestruturas das barragens, incluindo estruturas, orientação, barramento e pequeno, o que indica pesquisas sobre barragens de menor porte. Os termos migratórios e Mekong (referência ao rio Mekong) revelam influências sobre as rotas migratórias dos peixes.

Figura 26 – Rede de palavras sobre conteúdo das abordagens



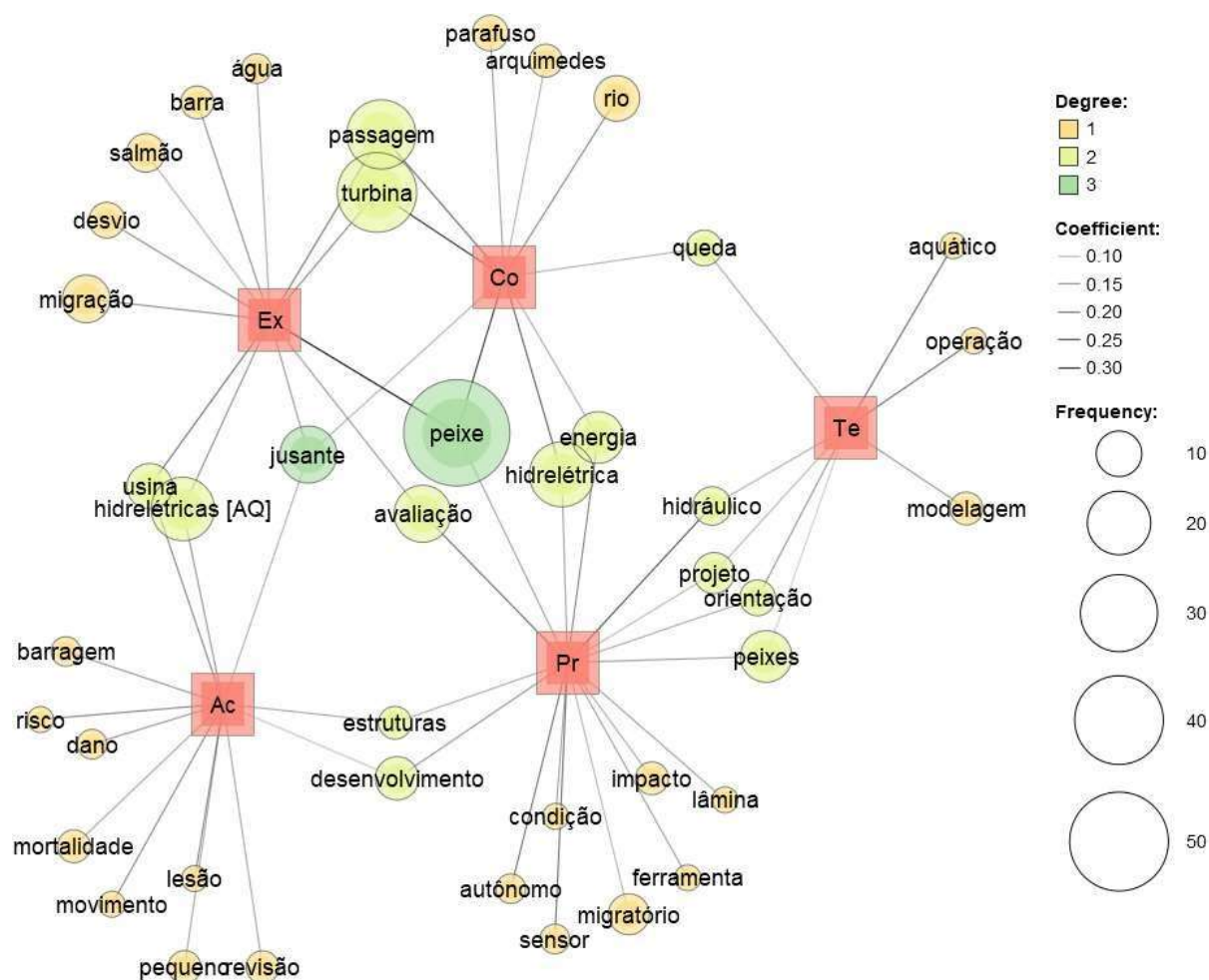
Fonte: elaborado pelo autor com dados da pesquisa.

À esquerda do grafo, a categoria Av (Avaliação das lesões e das rotas migratórias dos peixes) abrange estudos sobre os impactos das barragens nos organismos aquáticos, com termos como mortalidade, dano, operação, aquático, risco, movimento, juvenil e revisão, destacando um foco na quantificação dos efeitos sobre as populações de peixes. A presença de palavras como biodiversidade, lesão, medida e salmão indica uma preocupação específica com espécies migratórias, enquanto modelagem e numérico destacam o uso de abordagens quantitativas para avaliar esses impactos. Os nós verdes representam conceitos centrais como hidrelétricas, energia, peixe, passagem e jusante, enfatizando a importância da continuidade ecológica e das rotas migratórias. Já os nós amarelos abordam temas periféricos, como sensor, amigável e desenvolvimento, sugerindo a busca por soluções sustentáveis e inovadoras. As conexões mais espessas indicam forte correlação entre termos, especialmente entre hidrelétrica, passagem e peixe. O grafo aciona três principais eixos de pesquisa na hidreletricidade e na conservação da fauna aquática: (1) tecnologias inovadoras para reduzir os impactos ambientais (Tc); (2)

soluções estruturais para melhorar a conectividade ecológica (Sl); e (3) avaliações dos danos e dos efeitos sobre a biodiversidade (Av).

Como mencionado, as soluções construtivas e as tecnologias respeitosas aos peixes, identificadas nos estudos analisados, estão distribuídas em diferentes níveis de desenvolvimento, abrangendo desde a pesquisa acadêmica até a comercialização. Incluindo os níveis: Acadêmico (Ac), que envolve estudos e investigações científicas fundamentais; o Teórico (Te), focado na modelagem e conceitualização de novas abordagens; o Protótipo (Pr), que compreende a criação e testes iniciais de dispositivos inovadores; o Experimental (Ex), caracterizado pela validação prática dessas tecnologias em ambientes controlados; e, por fim, a Comercialização (Co), que representa a implementação efetiva e a aplicação no setor. A Figura 27 ilustra as conexões dos diferentes estágios e os principais elementos que os compõem.

Figura 27 - Rede de palavras sobre o nível das Tecnologias e Soluções Construtivas



Fonte: elaborado pelo autor.

Na figura, o nível Ac, abrange conceitos fundamentais como barragem, risco, mortalidade, lesão e movimento, refletindo estudos aprofundados sobre os impactos

ecológicos das barragens. O nível Te concentra-se na modelagem e na conceitualização das infraestruturas, incorporando termos como operação, aquático e hidráulico, ou seja, investigações baseadas nos princípios físicos do escoamento da água e na otimização de estruturas. O nível Pr representa a fase de desenvolvimento de soluções técnicas, incluindo termos como projeto, sensor, ferramenta, impacto e orientação, demonstrando a experimentação inicial para avaliação da viabilidade e da eficiência das tecnologias emergentes. O nível Ex está voltado para a validação empírica dessas inovações em ambientes controlados, como indicado por termos como passagem, turbina, desvio e salmão, sugerindo a realização de testes para aprimorar dispositivos que auxiliam a migração de peixes em estruturas hidrelétricas.

No estágio final, o nível Co reflete a implementação prática dessas tecnologias no setor hidrelétrico, representado por termos como parafuso, arquimedes e rio, ou seja, refletindo a adaptação e integração das inovações à operação real. O gráfico também evidencia a complexidade da interação entre a engenharia de barragens e a conservação ambiental, ressaltando a necessidade de equilibrar inovação tecnológica e sustentabilidade ecológica. Os nós na cor verde representam conceitos diretamente associados à hidreletricidade, enquanto os de cor amarela indicam elementos periféricos, mas ainda relevantes para o avanço da inovação no setor.

4 MORTANDADE DE PEIXES EM HIDRELÉTRICAS INSTALADAS NO RIO TOCANTINS: ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS

Conforme abordado anteriormente neste texto, a mortalidade de peixes em sistemas fluviais devido à operação de usinas hidrelétricas representa uma preocupação ambiental significativa, especialmente em ecossistemas altamente biodiversos, como o da bacia do Rio Tocantins, uma das principais do Brasil. A construção e operação de grandes barragens nesse rio têm causado impactos ecológicos consideráveis, tais como a fragmentação de habitats e a interrupção das rotas migratórias essenciais para muitas espécies, o que pode levar à redução populacional e ao declínio da biodiversidade aquática. Além das barreiras físicas impostas pelas barragens, as turbinas hidráulicas são uma das principais causas de mortalidade, uma vez que muitos peixes sofrem ferimentos letais ao atravessá-las.

Estudos científicos, como os de Agostinho et al. (2008), demonstram que os danos físicos causados pelas turbinas podem resultar tanto em morte imediata quanto em ferimentos graves que comprometem a sobrevivência dos peixes. Para mitigar esses impactos, tecnologias inovadoras têm sido desenvolvidas, que reduzem a incidência de lesões por meio de ajustes no

design das pás e na velocidade de rotação (Deng et al., 2010) . No entanto, a implementação dessas soluções no Brasil ainda é limitada, e a adaptação dessas tecnologias à realidade do rio Tocantins poderia contribuir significativamente para a redução da mortalidade dos peixes (Agostinho et al., 2016). Paralelamente, a instalação de passagens para peixes e outras estruturas que facilitam a migração é uma estratégia crucial, mas sua eficiência depende das características específicas do rio e das espécies locais, visto que devem ser projetadas considerando o comportamento migratório das espécies-alvo (Larinier; Travade, 2002).

Portanto, a mitigação dos impactos das hidrelétricas no rio Tocantins requer uma abordagem integrada, que combine inovação tecnológica, soluções construtivas e um conhecimento aprofundado da ecologia local. Pesquisas contínuas e o monitoramento ambiental são essenciais para a adaptação e otimização dessas estratégias, assegurando a sustentabilidade das operações hidrelétricas e a conservação da biodiversidade aquática dessa importante bacia hidrográfica.

4. 1 As Hidrelétricas no Rio do Tocantins

Esses empreendimentos funcionam por meio de um sistema no qual a energia mecânica da água é convertida em eletricidade pelos geradores, enquanto os vertedouros desempenham a função de controle do nível dos reservatórios, especialmente durante períodos de cheia, a fim de evitar inundações e garantir a integridade estrutural das barragens. No entanto, os vertedouros também possuem um papel estratégico na gestão ambiental, uma vez que o controle hidrológico contribui para a mitigação de impactos ecológicos adversos, sobretudo em áreas de elevada sensibilidade ecológica, como a bacia amazônica e o rio Tocantins, onde há grande diversidade de espécies aquáticas.

Neste capítulo, serão descritas de forma individualizada as principais usinas hidrelétricas localizadas ao longo do rio Tocantins, considerando suas especificidades técnicas, contextos de implantação, regimes operacionais e potenciais implicações ambientais. Essa abordagem visa subsidiar análises posteriores sobre a eficácia de tecnologias mitigadoras aplicadas à ictiofauna regional, além de contribuir para a compreensão da complexa relação entre desenvolvimento energético e conservação da biodiversidade em bacias hidrográficas tropicais.

A Figura 28 apresenta uma representação esquemática da cascata de usinas hidrelétricas em operação no rio Tocantins, facilitando a compreensão da organização sequencial dos aproveitamentos hidrelétricos, bem como das interações potenciais entre eles no que diz respeito ao regime hidrológico, à conectividade fluvial e à migração de peixes.

Figura 28- Configuração das usinas hidrelétricas em operação no Rio Tocantins



Fonte: adaptado de Oliveira e Oliveira (2021).

As características básicas das usinas hidrelétricas atualmente instaladas ao longo do rio Tocantins estão sintetizadas no Quadro 4. O qual apresenta informações técnicas relevantes como capacidade instalada, ano de operação de cada empreendimento e a cidade de implantação da barragem. Estes dados são fundamentais para compreender a dimensão e o papel estratégico destas no sistema energético nacional.

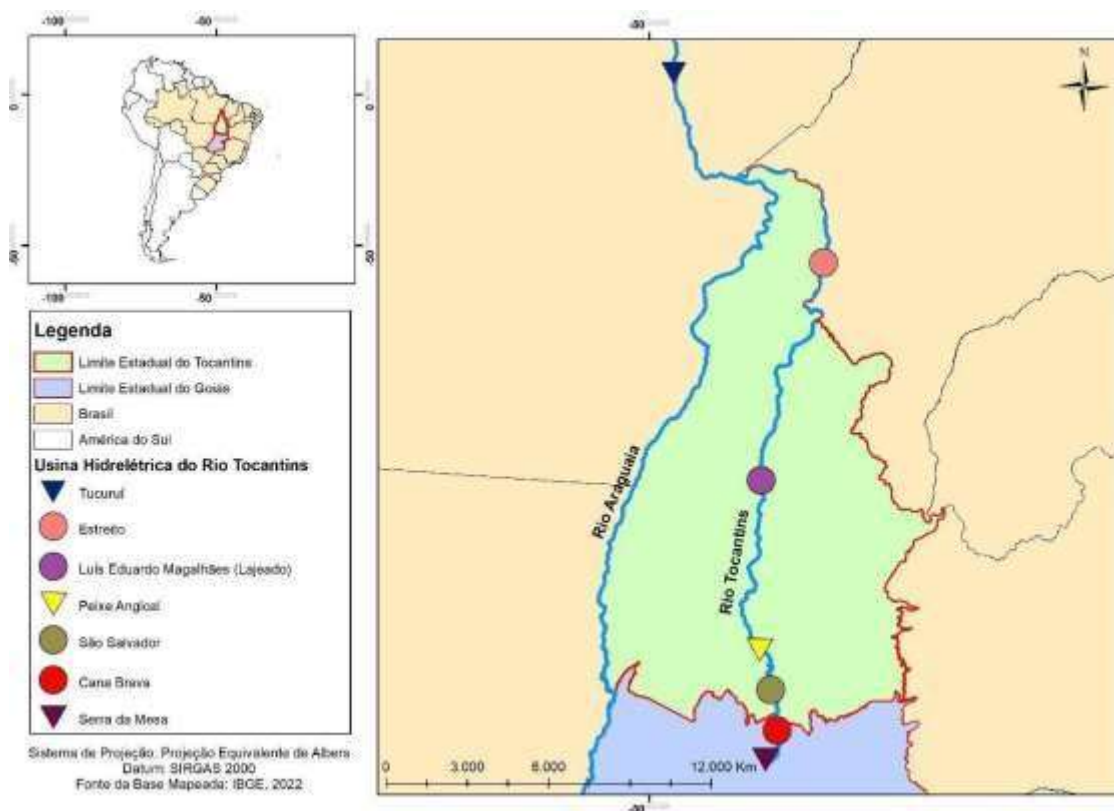
Quadro 4 - Propriedades básicas das UHEs instaladas no rio Tocantins

Usina Hidreletrica	Localização	Capacidade	Data de entrada em operação
Serra Mesa	Cavalcante-GO, Minaçu-GO	1.275 MW	30/04/1998
Luís Eduardo Magalhães	Miracema do Tocantins	902,5 MW	1/12/2001
Cana Brava	Cavalcante-GO, Minaçu-GO	450 MW	22/05/2002
Peixe Angical	São Salvador do Tocantins	498,75 MW	27/06/2006
São Salvador	São Salvador do Tocantins	243,2 MW	06/08/2009
Estreito	Estreito (MA)	1.087 MW	2011

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 29 ilustra a localização geográfica das referidas UHEs, ao longo do curso do rio, permitindo uma melhor visualização da distribuição espacial dos empreendimentos e da segmentação fluvial imposta. No mais, estas informações oferecem uma base para a avaliação integrada dos aproveitamentos hidrelétricos do rio Tocantins.

Figura 29 - Mapa de localização do estado do Tocantins, rio Tocantins e UHEs instaladas



Fonte: Elaborado por Mussama e Oliveira (2025).

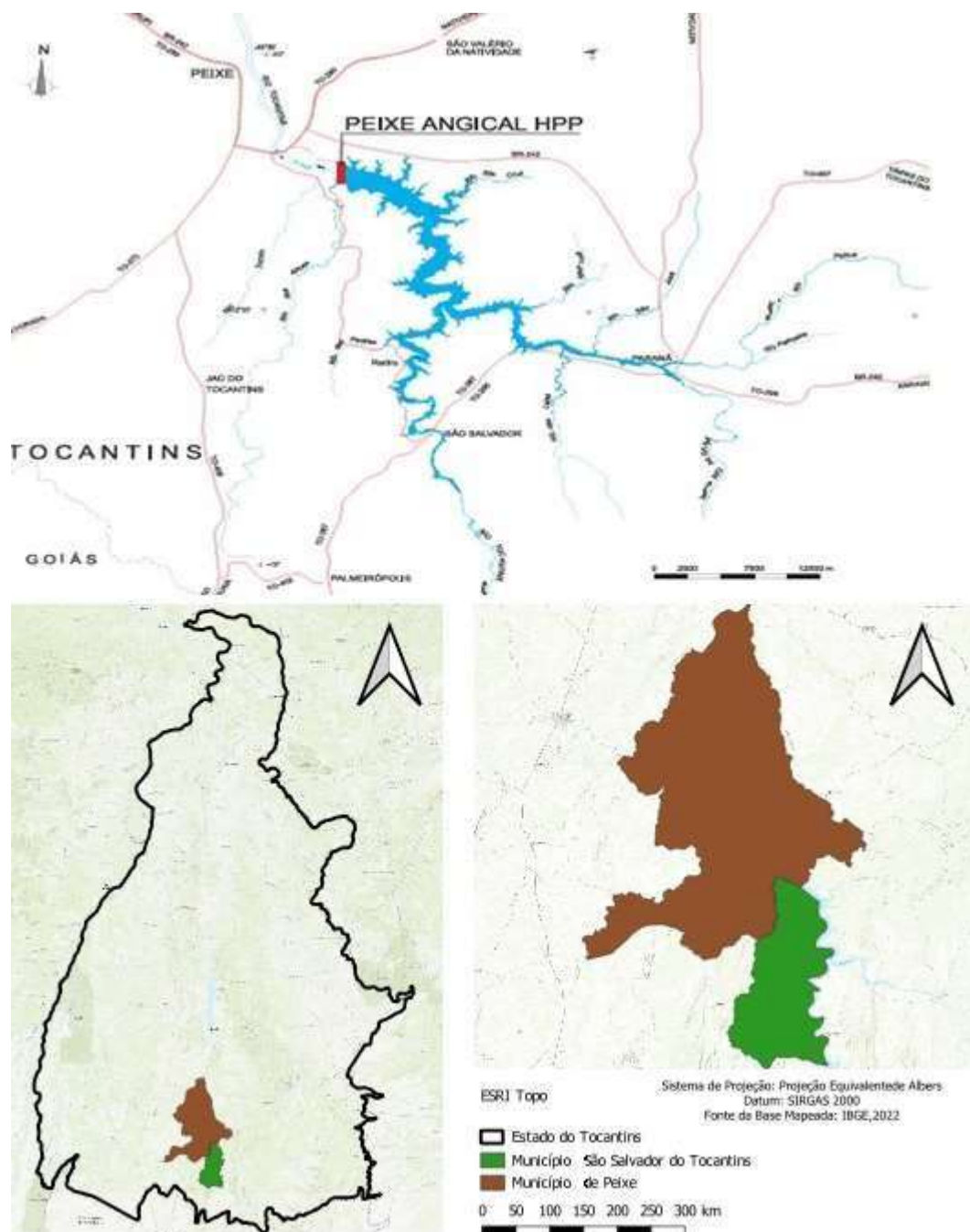
Uma descrição de cada usina hidrelétrica implantada no rio Tocantins é apresentada nos parágrafos a seguir. Esta análise visa aprofundar as principais características técnicas dos empreendimentos, contemplando aspectos como o tipo e a capacidade dos reservatórios, os modelos de turbinas utilizadas, o regime de operação (fio d'água ou com reservatório), a capacidade instalada, bem como a função estratégica que cada usina desempenha dentro do sistema interligado nacional. Tal abordagem permite não apenas compreender a relevância energética de cada estrutura, mas também fornecer subsídios técnicos para futuras análises sobre seus impactos socioambientais e sua integração com políticas de desenvolvimento sustentável na bacia hidrográfica do Tocantins.

4.1.1 UHE Peixe angical

A usina Peixe Angical está situada no rio Tocantins, na divisa entre os municípios de Peixe e São Salvador do Tocantins, a aproximadamente 320 km de Palmas, capital do estado. A planta tem potência instalada de 452 MW, energia assegurada anual de 2.374 GWh (Dams, 2009), barragem com 6.148,1 metros de comprimento na crista e uma altura máxima de 39

metros, alcançando uma elevação de 266 metros. Seu vertedouro é composto por nove comportas, e o reservatório, com área de 294,1 km², teve seu enchimento iniciado em 14 de janeiro de 2006 e concluído em 22 de abril do mesmo ano. Operada pela empresa Enerpeixe S.A., a usina está estrategicamente localizada no rio Tocantins, nas coordenadas 12° 14' 16,6" S e 48° 23' 8,4" W. A relação da barragem com o seu entorno, com destaque para área alagada, pode ser visualizada na Figura 30.

Figura 30 - Localização da UHE Peixe Angical



Fonte: Dams (2009) e o autor (2025).

A UHE Peixe Angical é composta por uma casa de força equipada com três turbinas do tipo Kaplan, posicionada na margem direita do rio Tocantins. O vertedouro, localizado próximo à barragem na região do leito original do rio, possui nove comportas do tipo segmento para controle do fluxo d'água. As barragens de terra e enrocamento foram construídas em ambas as extremidades, garantindo a estabilidade estrutural. A usina também conta com um sistema de transposição de peixes, uma escada com extensão de 623,9 metros (representado pela linha vermelha na Figura 30).

Em um estudo conduzido por Pelicice e Agostinho (2012), foi avaliada, criticamente, a eficácia das escadas para peixes, com foco específico em sua capacidade de atender às necessidades migratórias da ictiofauna. A pesquisa foi realizada em uma região com 119 espécies de peixes registradas, das quais apenas 31 utilizaram efetivamente a estrutura da escada, indicando um acesso altamente restrito para a maioria das espécies presentes no ecossistema. Um dos achados mais relevantes refere-se à limitação dos deslocamentos no sentido de jusante: somente 18 espécies foram registradas movendo-se para baixo e, entre todos os peixes capturados na escada, apenas 4% estavam se deslocando neste sentido. Este padrão resulta em uma razão extremamente desequilibrada entre peixes ascendentes e descendentes com média de 644:1 para todas as espécies e 1.069:1 para as espécies migratórias, evidenciando que as escadas priorizam os movimentos ascendentes e praticamente inviabilizam a migração descendente. Com base nesses resultados, os autores concluíram que tais estruturas não atendem de forma satisfatória às exigências migratórias; nem dos peixes migradores nem dos não migradores, comprometendo, assim, seu papel na conservação da biodiversidade aquática e dificultando a eficácia de outros esforços de mitigação ambiental associados aos empreendimentos hidrelétricos.

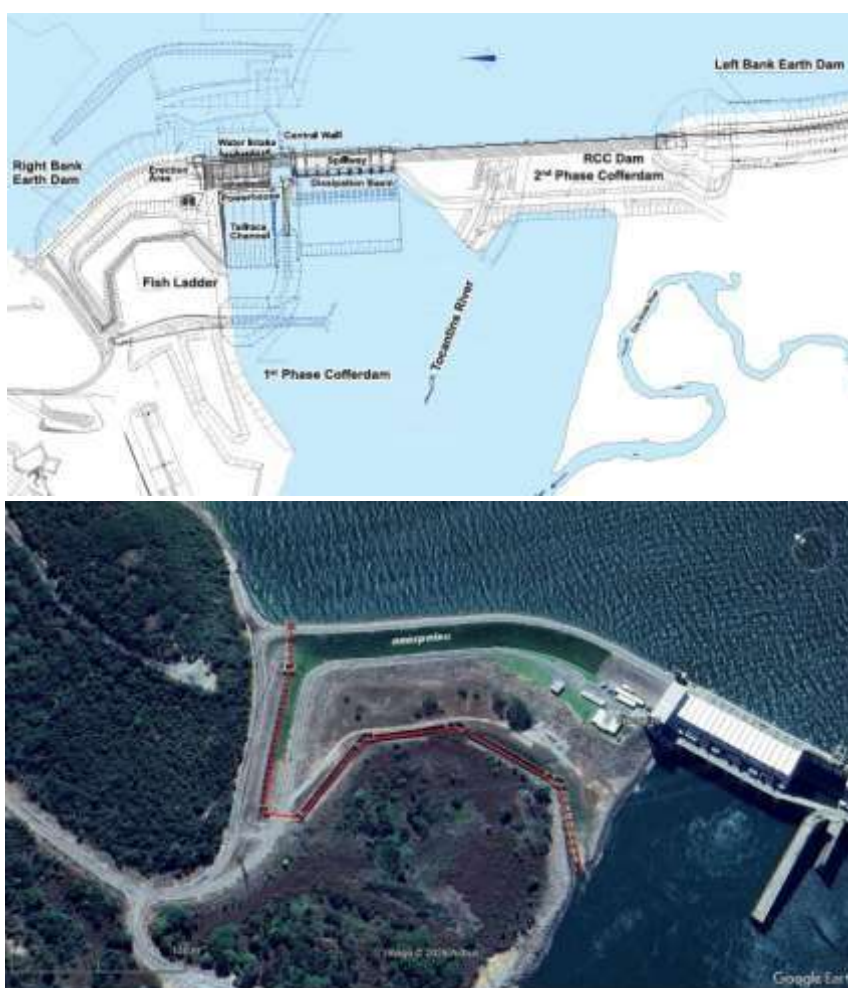
Um dos fatores críticos para a eficácia das passagens para peixes é a capacidade de atrair os peixes para a entrada da estrutura, aspecto conhecido como *débit d'attraction*. A atratividade da passagem é fundamental, pois os peixes precisam localizar sua entrada em meio ao fluxo principal do rio. No entanto, isso pode se tornar um grande desafio quando o fluxo de atração da escada é insuficiente em relação ao volume total de água liberado pela usina (Angele et al., 2021).

Diante desse problema, estudos experimentais têm buscado soluções inovadoras. Por exemplo, um estudo de caso testou o uso de paredes guia que formam um canal de contração, projetado para acelerar e concentrar o fluxo de atração. A configuração promoveu a formação de um jato turbulento que se estende mais longe no canal principal do rio, facilitando a detecção da entrada da passagem pelos peixes. Importante destacar que essa intervenção foi capaz de

melhorar significativamente a orientação dos peixes rumo à escada sem provocar alterações nos níveis d'água nem comprometer a geração de energia hidrelétrica. (Angele et al., 2021).

Para além disso, não foram encontradas evidências que confirmem a presença ou ausência de tecnologias específicas voltadas para a mitigação do impacto da usina Peixe Angical sobre a ictiofauna. A Figura 31 apresenta uma visão detalhada da estrutura da barragem e seus principais componentes.

Figura 31 - Arranjo físico da UHE Peixe Angical



Fonte: Adaptada pelo autor a partir de Dams (2009) e Google earth (2024).

4.1.2 UHE São Salvador

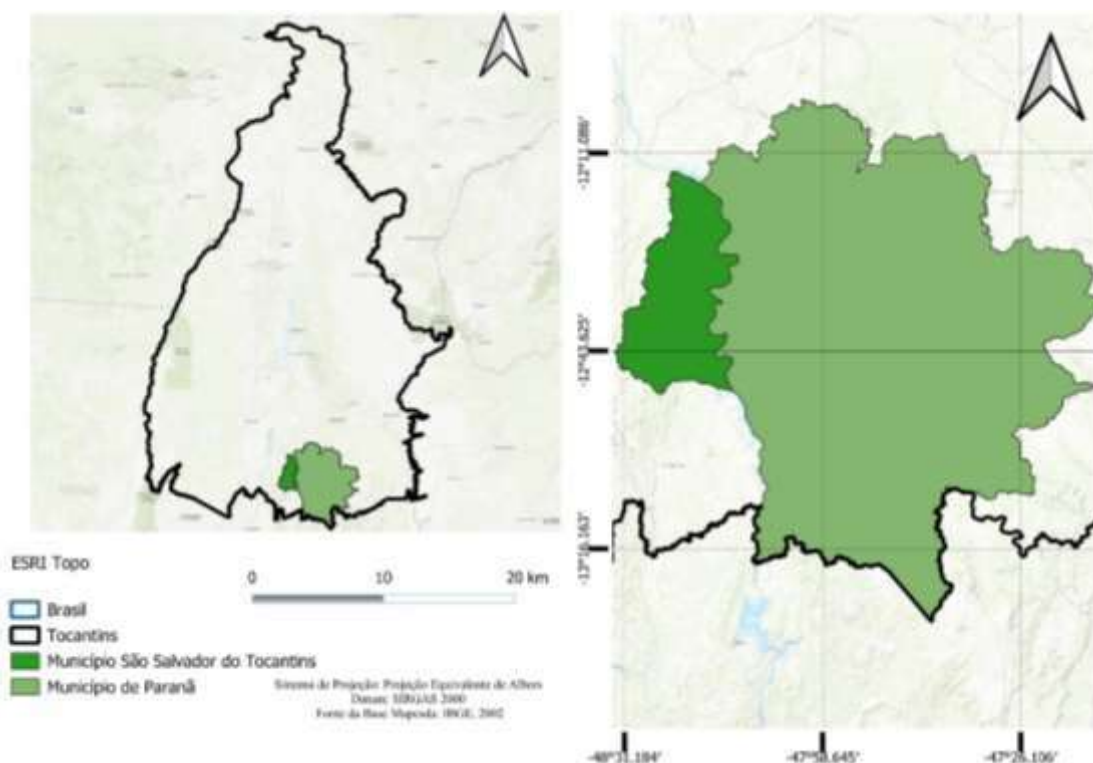
A localização de São Salvador é entre os municípios de São Salvador e Paranã, estado do Tocantins, a 420 km de Palmas. Teve sua construção iniciada em abril de 2002 e opera no regime a fio d'água, com um reservatório de 104 km². A concessão para o aproveitamento hidrelétrico foi atribuída à Engie Brasil Energia, sendo a usina equipada com duas turbinas verticais do tipo Kaplan, cada uma com capacidade de 121,6 MW, totalizando uma potência instalada de 243,2

MW. A barragem, situada no leito e na margem esquerda do rio, possui aproximadamente 360 metros de comprimento e uma altura máxima de cerca de 33 metros.

Ademais, de acordo com um relatório anual de atividades ambientais, disponibilizado pela empresa responsável pela operação da usina, foi implementada uma atividade de rotina para o resgate de peixes durante os desligamentos das unidades geradoras. Esta medida, conhecida como procedimento 86H, consiste na paralisação das unidades de produção, com

um bloqueio hidráulico, permitindo que a turbina gire a uma velocidade que impede a entrada de peixes no tubo de sucção, enquanto as comportas a jusante são fechadas rapidamente, reduzindo significativamente a possibilidade de aprisionamento da fauna aquática. Como resultado, houve uma diminuição expressiva no número de peixes capturados, permitindo a realização de atividades de resgate, incluindo recolhimento, manutenção, transporte e devolução dos peixes ao rio, utilizando um sistema de transposição e transporte na própria usina. No entanto, não foram encontradas informações que confirmem a existência de outro tipo de solução voltada à proteção da ictiofauna. A UHE São Salvador não tem escada para peixes, conforme o seu Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, originalmente de responsabilidade da empresa Engevix. A Figura 32 ilustra os principais componentes da barragem e a localização dos municípios de São Salvador e Paranã.

Figura 32 - Localização dos municípios São Salvador do Tocantins e Paranã e Panorama da UHE São Salvador



Fonte: Google earth (2024) e o autor (2025).

4.1.3 UHE Estreito

O aproveitamento hidrelétrico de Estreito encontra-se à, aproximadamente, 513 km de Palmas-TO. Possui um reservatório com 555 km² de área total, dos quais 400 km² correspondem a terras alagadas, com um comprimento de 290 km e capacidade de armazenamento de 5,4 bilhões de metros cúbicos de água. A barragem apresenta uma crista com 534,13 metros de extensão e altura máxima de 57 metros, enquanto seu vertedouro é composto por quatorze comportas segmentadas, com dissipação de energia realizada por meio de um tanque de amortecimento.

Operada pela Engie Brasil Energia, a usina conta com oito turbinas verticais do tipo Kaplan, cada uma com potência nominal de 135,875 MW, totalizando uma capacidade instalada de 1.087 MW (Engie, 2024). A usina hidrelétrica de Estreito, está implantada no rio Tocantins entre os estados do Tocantins e Maranhão. A Figura 33 apresenta a localização dos municípios São Salvador do Tocantins e Paranã e estrutura da barragem Estreito. Enquanto que dados sobre a existência ou não de tecnologias amigáveis para peixe, bem como a presença ou não de um sistema de transposição de peixes, não foram encontradas.

Figura 33 - Imagem do arranjo geral da UHE Estreito



Fonte: Google eath (2024).

4.1.4 UHE Luís Eduardo Magalhães (ou UHE Lajeado)

Localizada entre os municípios de Miracema do Tocantins e Lajeado, a usina possui um reservatório com área de 630 km², enquanto sua barragem se estende por 2.034,43 metros em linha reta, atingindo uma altura máxima de 215 metros. A imponência de sua infraestrutura

reflete a relevância do empreendimento no cenário da matriz elétrica nacional. Seu vertedouro é composto por quatorze comportas de superfície, com fluxo controlado por comportas, enquanto a geração de energia é realizada por cinco turbinas do tipo Kaplan.

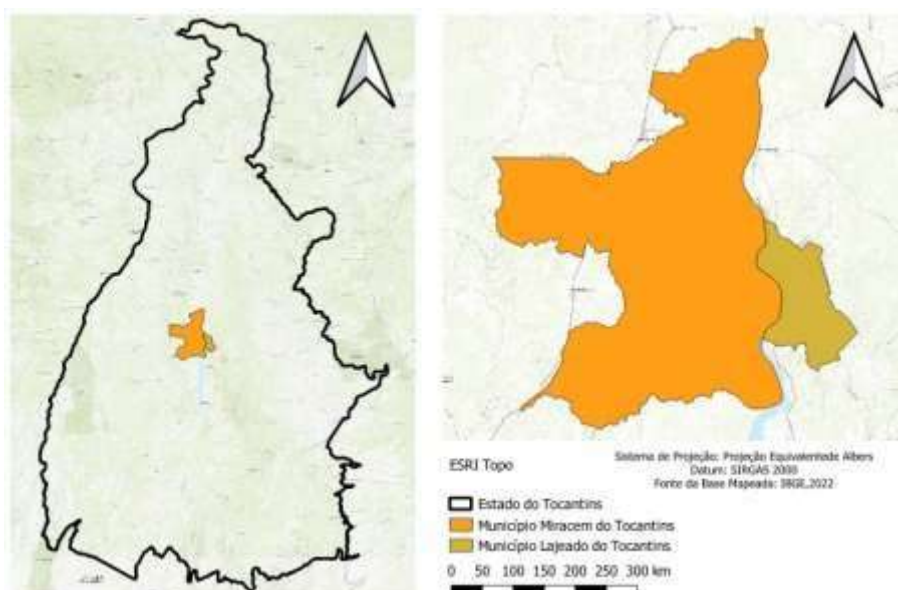
A sua barragem conta com uma estrutura de transposição de peixes, especificamente uma escada para peixes, com mais de 800 metros de comprimento, visando minimizar os impactos da fragmentação do habitat aquático. Em operação comercial desde 2001, a usina desempenha um papel estratégico no atendimento à crescente demanda energética do Sistema Interligado Nacional, especialmente nos mercados das regiões Norte-Sul, abrangendo o Distrito Federal, os estados do Tocantins e Goiás, além da região Sudeste. Com uma potência instalada de 902,5 MW e uma energia firme de 4.468.476 MWh/ano, a usina representa um importante ativo para a matriz elétrica brasileira. A Figura 34 ilustra a estrutura e as principais características da instalação, com destaque para a escada de peixes representada por uma linha vermelha (acima) e no segundo plano da figura (abaixo) e a Figura 35 mostra a localização dos municípios Miracema do Tocantins e Lajeado.

Figura 34 – Escada de peixes da UHE Luís Eduardo Magalhães



Fonte: Adaptada pelo autor a partir de Dams (2019), Flickr (2009).

Figura 35 – Localização dos municípios Miracema do Tocantins e Lajeado



Fonte: Elaborado pelo o autor (2025).

4.1.5 UHE Cana Brava

A usina hidrelétrica Cana Brava, situada no rio Tocantins, estado de Goiás, representa um importante projeto de desenvolvimento energético na região central do Brasil, com uma capacidade instalada de 450 MW. Localizada aproximadamente 300 km de Brasília, a usina desempenha um papel estratégico para o Sistema Interligado Nacional. Suas coordenadas geográficas são 13°24'6" Sul e 48°8'33" Oeste (Dams, 2009). A Figura 36 apresenta, esquematicamente, a localização da UHE Cana Brava na cascata do rio Tocantins, entres as usinas Serra da Mesa e São Salvador, respectivamente.

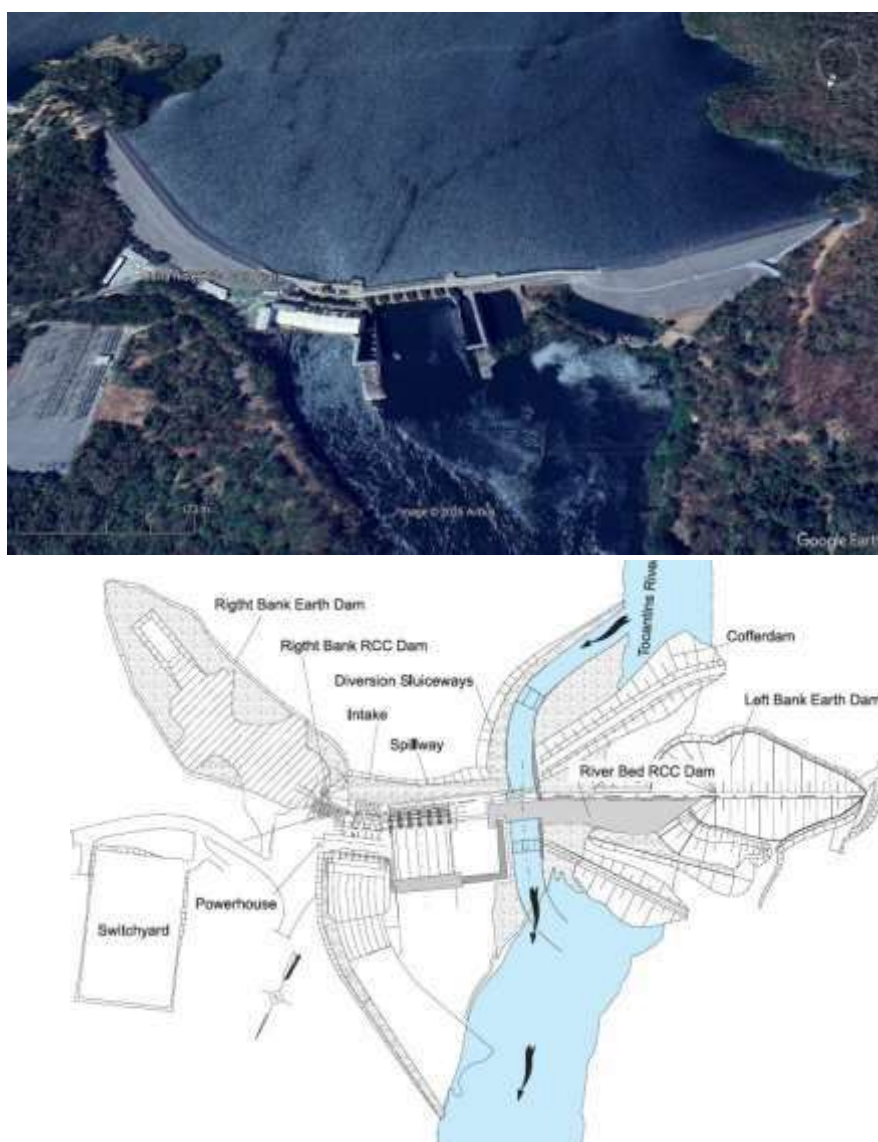
Figura 36– Localização UHE Cana Brava



Fonte: Dams (2019).

O arranjo da UHE Cana Brava é constituído por uma estrutura de concreto convencional que abriga três unidades geradoras, cada uma equipada com uma turbina Francis de eixo vertical, com potência nominal de 151,9 MW e uma queda de 43,6 metros. De acordo com um relatório publicado pela Engie, empresa responsável por sua operação, a usina adota um procedimento específico para o resgate de peixes que ficam presos na espiral e no tubo de sucção das turbinas, em função do fechamento das comportas a jusante durante paradas programadas das unidades geradoras. Portanto, o protocolo tem como objetivo mitigar os impactos ambientais na ictiofauna local, associados às interrupções operacionais. No entanto, este foi o único mecanismo mencionado no relatório para a redução dos impactos sobre a fauna aquática. A Figura 37 apresenta os diferentes componentes das instalações da usina.

Figura 37 – Arranjo da UHE Cana Brava



Fonte: Dams (2019), Google earth (2024).

4.1.6 UHE Serra Mesa

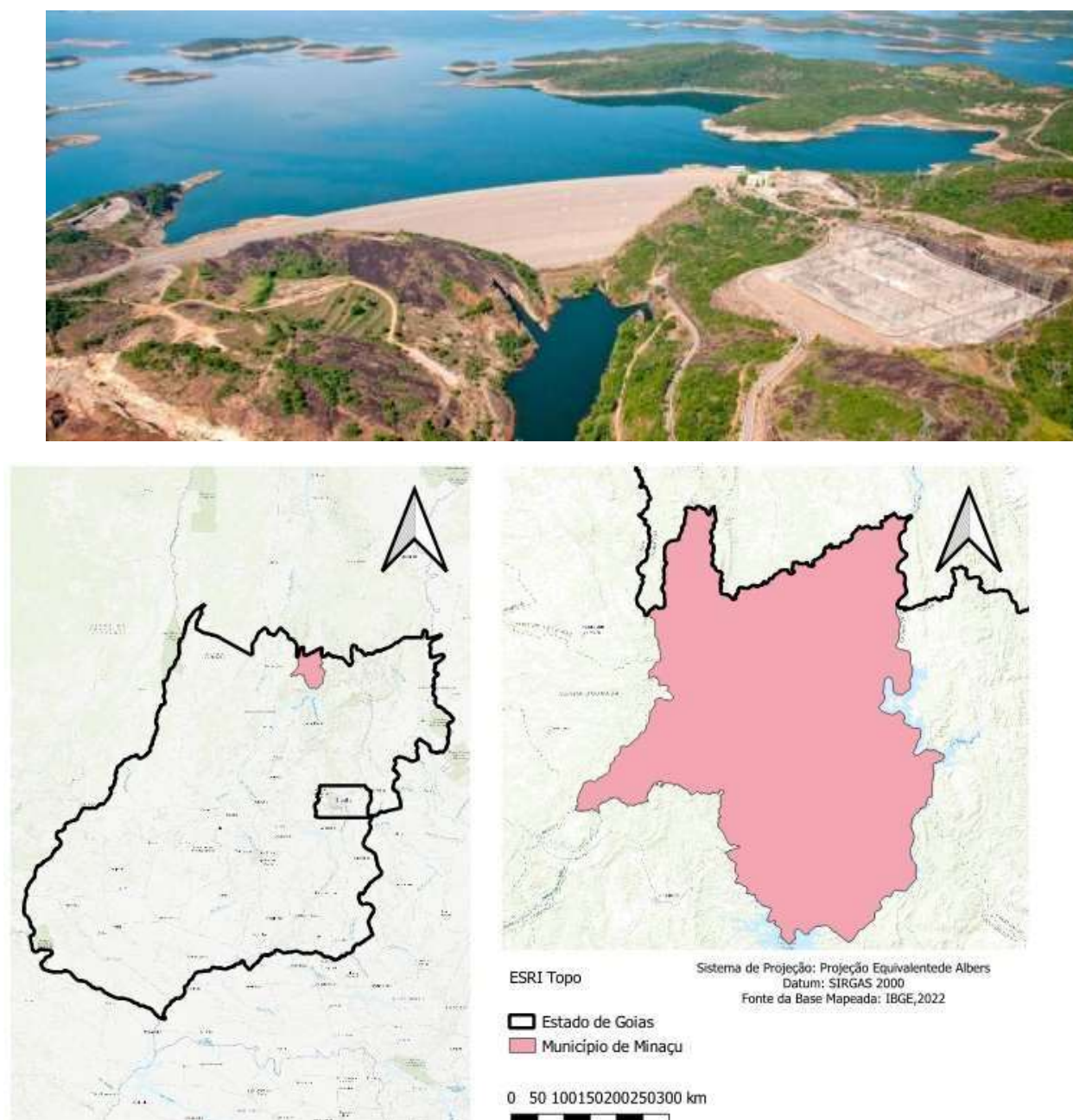
A usina Serra da Mesa (Figura 36), localizada nas proximidades do município de Minaçu, no estado de Goiás, constitui um dos maiores empreendimentos hidrelétricos do país em termos de volume de reservatório. Composta por três turbinas do tipo Francis de eixo vertical, com capacidade nominal individual de 425 MW, a usina totaliza uma potência instalada de 1.275 MW. Seu reservatório, com capacidade total de armazenamento de 54,4 bilhões de metros cúbicos, ocupa uma área de 1.784 km², sendo considerado um dos maiores do Brasil (Eletrobras, 2024).

A sua barragem, situada a aproximadamente 1.790 km da foz do rio Tocantins, apresenta 154 metros de altura e estrutura em enrocamento com núcleo de argila, possuindo cerca de 1.200 metros de comprimento. A UHE Serra da Mesa possui sua casa de força escavada diretamente em rocha, posicionada na margem direita do rio Tocantins. O vertedouro, dimensionado para suportar vazões de até 15.000 m³/s, localiza-se na também na margem direita, a uma altitude de 441,00 metros. A operação do reservatório obedece a faixas altimétricas definidas, com níveis normais de operação compreendidos entre 417,3 metros (nível mínimo operacional) e 460,0 metros (nível máximo operacional).

O sistema de adução das turbinas foi implantado subterraneamente, garantindo o direcionamento eficiente do fluxo hídrico (De Mello Franco et al. 2002). Em conformidade com a Resolução nº 529 da Agência Nacional de Águas (ANA), datada de 19 de outubro de 2004, foi estabelecido o limite mínimo de vazão defluente de 300 m³/s, a ser respeitado permanentemente. Adicionalmente, a Resolução ANA nº 376, de 6 de junho de 2011, determina que, durante a Temporada de Praias no rio Tocantins, a descarga a jusante da usina deve ser mantida constante, observando-se a mesma vazão mínima de 300 m³/s.

As resoluções regulatórias associadas ao empreendimento têm por finalidade assegurar um equilíbrio sustentável entre a operação hidrelétrica e os múltiplos usos da água, tais como o abastecimento, navegação e recreação. Neste contexto, a Figura 38 fornece uma representação gráfica da capacidade do reservatório da planta hidrelétrica, ressaltando a magnitude do seu armazenamento, bem como explicitando o seu papel estratégico na regulação do regime fluvial da bacia hidrográfica do rio Tocantins.

Figura 38 – UHE Serra Mesa



Fonte: Eletrobras (2024) e o autor (2025).

Por fim, é relevante citar que, com o objetivo de verificar a existência ou não, e a atual situação operacional de soluções ambientalmente amigáveis para peixes nas usinas hidrelétricas mencionadas, diversas tentativas de contato foram empreendidas junto às empresas concessionárias responsáveis pelos respectivos empreendimentos. No entanto, todos os esforços demonstraram-se infrutíferos. As ligações telefônicas realizadas para os números disponibilizados nos sites oficiais destas instituições não resultaram em êxito, sendo

frequentemente respondidas por mensagens automáticas, informando que os contatos estavam fora de serviço, desativados ou inexistentes.

De forma complementar, também foram enviados e-mails formais solicitando informações, os quais, até o encerramento deste estudo, permaneceram sem qualquer retorno. Esta ausência de resposta evidencia uma barreira considerável no acesso à informação e na transparência das operações, o que dificulta a coleta de dados primários essenciais para uma análise técnica mais aprofundada sobre a adoção de práticas sustentáveis e os impactos socioambientais associados ao funcionamento destes ativos.

4.2 Levantamento de dados sobre a mortandade de peixe no rio do Tocantins

A bacia do rio Tocantins-Araguaia é a maior bacia localizada inteiramente no território brasileiro. O alto grau de endemismo de sua ictiofauna foi revelado em diversos estudos, com o alto Tocantins tendo o maior número absoluto de táxons endêmicos na bacia amazônica (Chamon et al. 2022). Recentemente, a maior parte da composição da ictiofauna do Tocantins-Araguaia tem sido proposta como estando mais estreitamente relacionada aos rios do Escudo Brasileiro que drenam a Amazônia, formando uma região biogeográfica com o Xingu, o Tapajós e alguns afluentes do rio Madeira .

Considerada a terceira maior sub-bacia do rio Amazonas, o Tocantins/Araguaia tem uma vazão média anual de cerca de 11.000 m³/s. Suas águas são claras e contêm poucos nutrientes, pois drenam terrenos cristalinos. Na região mais alta da bacia (parte superior), encontram-se várias cachoeiras e corredeiras (Hales et al., 2013). A ictiofauna da bacia do Tocantins/Araguaia é estimada em mais de 400 espécies. Porém, este número pode chegar a mais de 600 espécies válidas (Abell et al., 2008). As mais dominantes são as *Characidae* (73 espécies), *Loricariidae* (39) e *Rivulidae* (32). Diversas espécies de peixes são endêmicas nesta região (aproximadamente 175), sendo as famílias com o mais alto grau de endemismo *Characidae* (36 espécies), *Rivulidae* (30) e *Loricariidae* (26) (Alho et al., 2013).

Uma pesquisa realizada pela empresa Themag (1996) indicou a presença do Voador (*Hemiodus unimaculatus*), Branquinha (*Curimata cyprinoides*), Mandí-sardinha, Facão, Sardinha-colim e Sardinha-papolargo, Mandí (*Pimelodus maculatus*), Bicuda (*Boulengerella maculata*), Cará (*Astronotus ocellatus*), Tucunaré (*Cichla spp.*), Piabanha (*Brycon gouldingi*), Cachorrinho (*Roeboidea spp.*) e Piranha (*Serrasalmus spp.*) nos arredores da usina hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães (Carvalho 2019a). Sendo que, as seguintes espécies migratórias foram identificadas: Surubim (*Pseudoplatyoma coruscans*), Chèvre (*Zungaro zungaro*), Barbu (*Pirirampus pirirampu*), Bacu (*Lithodoras dorsalis*), Curimbatá (*Prochilodus nigricans*),

Jaraqui (*Semaprochilodus brama*) e Ubarana (*Albula vulpes*).

Algumas espécies de peixes migram em todas as bacias fluviais associadas à sua reprodução. No entanto, é possível reconhecer outros motivos para os movimentos desses animais, como os térmicos ou sazonais, tróficos ou nutricionais e ontogenéticos ou de crescimento, geralmente relacionados ao regime hidrológico (Botelho et al., 1985; Goulding et al., 1996). A incapacidade de migrar para tais espécies é sinônimo de várias consequências negativas, como a diminuição da população e a morte.

A mortalidade de peixes no rio Tocantins acarreta diversas consequências socioeconômicas, incluindo a escassez de peixes para consumo, o que impacta negativamente as comunidades que dependem da pesca como fonte de alimento e renda. Estudos indicam que alterações no regime hidrológico do rio, combinadas com a ausência de políticas públicas adequadas, têm levado à redução da disponibilidade de pescado, afetando diretamente a subsistência e a economia das populações ribeirinhas (Nascimento et al. 2013).

Diante destes fatos, este capítulo apresenta uma revisão narrativa sobre os casos de mortalidade de peixes no rio Tocantins. Conforme descrito na metodologia deste estudo, a escolha por uma abordagem narrativa foi justificada pela escassez de estudos específicos sobre a mortalidade da ictiofauna no contexto hidrelétrico do rio Tocantins. Essa limitação compromete a representatividade dos dados disponíveis e dificulta a formulação de conclusões generalizáveis, o que inviabiliza a aplicação de uma metodologia de revisão sistemática.

Assim, a revisão narrativa se mostrou mais adequada para reunir e discutir criticamente as escassas informações existentes, oferecendo uma base preliminar para futuras investigações, mais aprofundadas, sobre os impactos das usinas hidrelétricas na biodiversidade aquática do rio Tocantins. A pesquisa exaustiva de trabalhos sobre “mortalidade/mortandade de peixes em hidrelétricas localizadas no rio Tocantins”, foi realizada nas plataformas de busca Periódicos CAPES e Google Acadêmico, considerando publicações indexadas entre os anos de 1998 e 2022. A escolha metodológica buscou sistematizar o conhecimento existente e identificar lacunas relevantes na literatura sobre os impactos hidrelétricos na ictiofauna local.

O ano de 1998 foi escolhido como ponto de partida para a investigação, pois marca a construção da primeira usina hidrelétrica no rio Tocantins, a UHE Serra da Mesa. A escolha deste período se justifica pela possibilidade de que eventos de mortalidade da ictiofauna tenham ocorrido desde a implantação desta usina, tornando essencial a inclusão de estudos que possam elucidar as possíveis causas desses episódios.

As poucas pesquisas identificadas ao longo desta revisão indicam que episódios significativos de mortalidade de peixes ocorreram na Usina Hidrelétrica Luís Eduardo

Magalhães. Os estudos realizados revelaram diversos tipos de lesões nos espécimes afetados, incluindo eversão ou ruptura da bexiga natatória, ferimentos externos, congestão e hemorragias na cavidade celômica (Agostinho et al., 2005). Além disso, como já discutido neste texto, a passagem dos peixes pelas turbinas representa um fator crítico, pois os indivíduos estão sujeitos a riscos como gradientes abruptos de pressão, impactos com componentes móveis e fixos, forças de cisalhamento, cavitação e até mesmo sobresaturação gasosa (Carvalho, 2019).

Uma estratégia para mitigar os efeitos da descompressão, por exemplo, seria a construção de usinas hidrelétricas com menores quedas, o que reduz a capacidade de geração de energia, por consequência. Neste sentido, estudos específicos sobre os limites fisiológicos de tolerância à descompressão das espécies mais representativas da região poderiam subsidiar o desenvolvimento de projetos hidrelétricos mais compatíveis com a conservação da ictiofauna, minimizando a mortalidade associada à passagem pelas estruturas de geração.

4.3 Casos de mortandade em hidrelétricas no rio Tocantins

Dado o impacto ambiental e social do problema, a escassez de pesquisas é alarmante e reforça a necessidade de maior atenção e investimento científico para compreender e mitigar os danos causados pela exploração hidrelétrica. A falta de pesquisas sobre este tema, contribui para manter uma percepção equivocada de que a produção de energia hidrelétrica é “verde” ou isenta de impactos significativos, enquanto os efeitos sobre a biodiversidade aquática podem ser substanciais.

Devido a essa "invisibilidade", torna-se difícil desenvolver políticas de conservação eficazes para proteger a biodiversidade no rio Tocantins. O monitoramento ambiental e os relatórios de órgãos brasileiros, como o IBAMA, que poderiam revelar a extensão desses efeitos, são insuficientes, e o marco legislativo permanece vago quanto ao tratamento da mortalidade de peixes relacionada às hidrelétricas (Pereira et al., 2015). Consequentemente, a escassez de estudos sobre o tema deixa uma incerteza científica em relação aos reais efeitos da produção hidrelétrica sobre a fauna aquática.

Um dos principais entraves enfrentados no desenvolvimento desta pesquisa refere-se à indisponibilidade de dados fundamentais que deveriam ser fornecidos pelo Instituto Natureza do Tocantins (Naturatins). Conforme detalhado no pedido de acesso à informação (protocolo nº 02323.2024.000098-45), foi requisitado o acesso a todos os laudos e relatórios referentes aos episódios de mortandade de peixes associados aos empreendimentos hidrelétricos no rio Tocantins, para compor a presente pesquisa. Apesar do trâmite ter percorrido três instâncias

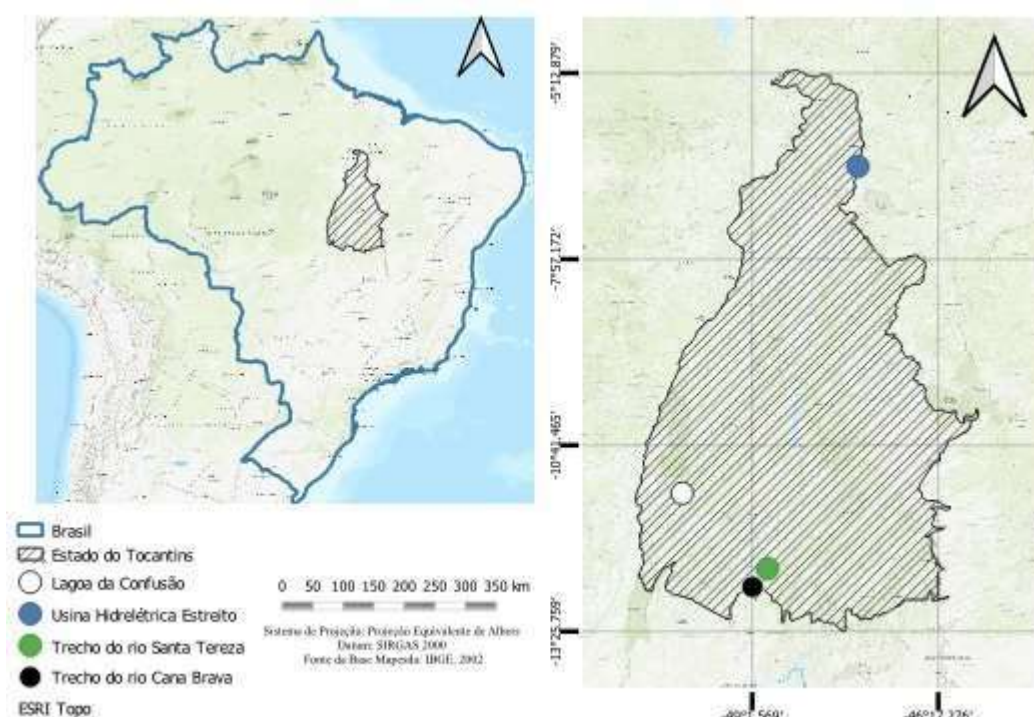
administrativas e o pedido ter recebido parecer favorável da Controladoria-Geral da União (conforme processo nº 2024/09041/000081), o Naturatins, em desacordo com tal parecer, tem recusou-se a disponibilizar os documentos solicitados. O que por si só desperta questionamentos sobre o porquê informações e dados que poderiam fundamentar estudos em prol da sustentabilidade e da sociedade brasileira, que deveriam ser de acesso público, estão sendo escondidos na regência da Lei de Acesso à Informação, por um órgão ambiental estadual.

Em vez de dar acesso a integralidade de documentos sobre o tema, em seu poder, o órgão ambiental estadual, Naturatins, forneceu acesso apenas a um relatório com quatro casos relacionados a eventos de mortalidade de peixes, no estado do Tocantins, o relatório foi elaborado no ano de 2024. Esse documento foi produzidos em resposta às denúncias feitas por cidadãos sobre ocorrências de mortandade de peixes nos municípios de Lagoa da Confusão, Talismã, Estreito e Aguiarnópolis. Contudo, é importante destacar que nem todos os eventos ocorreram no rio Tocantins, o que limita a análise direta dos impactos hidrelétricos sobre a ictiofauna no recorte espacial da presente pesquisa.

Esses casos de mortandades foram considerados nesta pesquisa com o objetivo de avaliar o conteúdo das únicas fontes oficiais que tivemos acesso. No entanto, os documentos analisados não evidenciam de forma clara a gravidade do problema, muito menos estabelecem uma relação direta de causalidade entre os empreendimentos hidrelétricos e os episódios de mortalidade observados.

Dentre do relatório, apenas os referentes aos municípios de Estreito e Aguiarnópolis indicam uma possível, ainda que modesta, associação com as atividades da usina hidrelétrica local e os eventos de mortandade de peixes. A Figura 39 demarca as regiões Tocantins onde foram registrados casos de mortandade de peixes, de acordo com o relatório (Anexo I).

Figura 39 - Localização geográfica dos casos de mortandade de peixe



Fonte: O autor (2024).

Considerando os referidos episódios de mortalidade de peixes registrados, no que se refere ao município de Lagoa da Confusão, a ocorrência foi relatada pelo cacique da aldeia local por meio de uma denúncia eletrônica, destacando a morte de peixes no Lago Aríguari. Durante a vistoria realizada pelo órgão ambiental estadual (Naturatins), foram observadas condições ambientais críticas: baixo volume de água, coloração acinzentada, odor intenso de decomposição e a presença de grande quantidade de peixes mortos, pertencentes a diversas espécies.

Com base na metodologia descrita por Rolla et al. (2009), as investigações apontaram que a mortalidade foi resultante de uma combinação de fatores ambientais, incluindo flutuações de temperatura, alta taxa de evaporação e desoxigenação extrema da água (níveis de oxigênio dissolvido igual a 0,0 mg/L), com pH variando entre 6,0 e 7,0. Esses parâmetros indicam a ocorrência de um episódio de hipóxia como principal causa do evento.

No município de Talismã, outro caso foi registrado em um trecho do Rio Cana Brava. Em 27 de agosto de 2023, o Naturatins, por meio de sua unidade em Palmas, foi notificado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Defesa Civil sobre a morte estimada de aproximadamente 1.000 kg de peixes a jusante de uma lagoa marginal. As análises de campo e laboratoriais indicaram que a causa provável foi a redução crítica do oxigênio dissolvido na água, associada a um pH oscilando entre 6,0 e 7,0.

Além disso, suspeita-se que a presença de resíduos provenientes da combustão de materiais e de pesticidas diluídos no corpo hídrico tenha contribuído para o agravamento das condições ambientais. Ainda em Talismã, porém desta vez no Rio Santa Tereza, um terceiro evento de mortalidade de peixes foi reportado em 7 de maio de 2024. As avaliações conduzidas revelaram a ocorrência de ecotoxicidade aguda, evidenciada por testes com organismos bioindicadores, como *Daphnia similis*. Os resultados laboratoriais também apontaram para uma elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), com valores de 14,2 mg/L, indicando um elevado nível de matéria orgânica em decomposição. As causas da mortalidade foram corroboradas por necropsias realizadas nos peixes afetados e por análises detalhadas da qualidade da água.

Por fim, um quarto relatório abordou um episódio ocorrido a jusante da Usina Hidrelétrica de Estreito (UHE-Estreito), entre os municípios de Estreito e Aguiarnópolis. Em 16 de maio de 2024, a Colônia de Pescadores Z-35 formalizou uma denúncia por meio do ofício nº 27/2024, relatando a ocorrência de mortes de peixes supostamente relacionadas à abertura simultânea de turbinas e vertedouros da usina, além da interrupção dos fluxos migratórios naturais das espécies. Embora o relatório aponte uma possível correlação entre a operação da usina e o evento, os dados disponíveis não foram suficientes para estabelecer uma relação causal definitiva.

Embora um dos relatórios identifique correlações entre uma infraestrutura hidrelétrica e evento de mortalidade, as evidências apresentadas são insuficientes para fornecer uma visão abrangente do impacto das usinas sobre a biodiversidade aquática. No âmbito geral, para além do rio Tocantins, as causas relatadas incluem flutuações de temperatura e oxigenação, falta de oxigênio dissolvido, uso de pesticidas e resíduos industriais, bem como impactos diretos relacionados às operações de turbinas e vertedouros. No entanto, a ausência de dados consistentes e uniformes, assim como lacunas nos métodos de investigação, limitam a capacidade de diagnosticar adequadamente as causas dos eventos.

Esta lacuna na vinculação sistemática entre eventos de mortalidade e barragens levanta a preocupação de que muitos casos possam ser sendo subestimados ou atribuídos exclusivamente a fatores externos. A adoção de práticas baseadas em evidências científicas, como a implementação de sistemas de gestão mais integrados, o uso de tecnologias menos agressivas e o fortalecimento das equipes de fiscalização, são essenciais para minimizar os impactos sobre a biodiversidade.

Portanto, é imprescindível que os futuros relatórios ambientais ampliem o escopo das investigações, considerando tanto os impactos diretos quanto os efeitos cumulativos das usinas ao longo da bacia do Tocantins. Assim, é fundamental que os órgãos responsáveis priorizem a criação de uma base de dados sólida e confiável, que permita identificar padrões, causas e soluções para a sustentabilidade da hidreletricidade, não apenas no estado do Tocantins, mas em todo o país, sem esquecer que os órgãos ambientais precisam dar acesso a estes relatórios, respeitando o princípio da publicidade dos atos administrativos.

4.4 Resultados e Discussão

Observou-se que, embora tecnologias inovadoras venham sendo propostas no mundo, a aplicação efetiva de soluções, com comprovação de eficácia ecológica, ainda representa um desafio considerável, principalmente devido à elevada variabilidade comportamental entre as espécies de peixes migratórios, o que dificulta a replicabilidade de estratégias em diferentes contextos hidrológicos e ecológicos.

A análise do conjunto de documentos consultados ao longo deste estudo permitiu identificar diversas tecnologias inovadoras e promissoras, contribuindo para o conhecimento sobre as técnicas disponíveis para a mitigação de impactos ambientais em empreendimentos hidrelétricos. Entre as tecnologias emergentes, destacam-se os sistemas de monitoramento ambiental em tempo real, como o Peixe Sensor e o GelPeixe, que utilizam ferramentas de telemetria e geolocalização para acompanhar os deslocamentos dos peixes e aferir os impactos diretos da operação dos vertedouros e turbinas (Martinez et al. 2019; Saylor et al. 2021). Tais dispositivos oferecem subsídios técnicos relevantes para o planejamento e a adaptação de medidas mitigadoras, além de possibilitar o monitoramento contínuo das respostas comportamentais da fauna aquática frente às alterações hidrológicas.

No que se refere às soluções construtivas aplicadas à geração hidrelétrica, turbinas de concepção específica vêm sendo analisadas por seu potencial de reduzir a mortalidade de peixes. As turbinas do tipo parafuso de Arquimedes são, em geral, projetadas para operar de forma eficiente em locais com baixa queda d'água, geralmente inferior a 10 metros, sendo otimizadas para funcionar nessas condições com eficiências que variam entre 60% e 94%, a depender das características específicas de cada local de instalação. Essa tecnologia se destaca pela sua simplicidade construtiva, baixo impacto ambiental e capacidade de aproveitamento de cursos d'água com pequena declividade, tornando-se uma alternativa viável para geração de energia em regiões onde grandes barragens não são viáveis ou indesejáveis (YoosefDoost; Lubitz, 2020).

A turbina Parafuso de Arquimedes, por exemplo, permite a passagem bidirecional de peixes sem causar danos significativos, sendo indicada para usinas de baixa queda. No entanto, sua aplicabilidade é limitada para empreendimentos de grande porte, como os localizados no rio Tocantins. Em contrapartida, a turbina Alden, projetada com três pás robustas e canal de fluxo otimizado, apresenta, segundo estudos internacionais, taxas reduzidas de mortalidade e lesão em peixes migratórios, sendo, portanto, uma alternativa tecnicamente viável para usinas de médio a grande porte (Dixon e Hogan 2015). A viabilidade de sua adoção no Brasil, contudo, requer avaliação específica quanto às condições operacionais, econômicas e ambientais da bacia do Tocantins. Cabe ressaltar que esta opção pode ter viabilidade para novos empreendimentos e não para os existentes.

Além das inovações em turbinas, estruturas auxiliares como escadas, elevadores, canais artificiais e passagens naturais para peixes vêm sendo implantadas com o objetivo de restaurar parcialmente a conectividade longitudinal dos cursos d'água. A eficácia de tais dispositivos, entretanto, apresenta ampla variação, a depender do dimensionamento técnico, da espécie-alvo, da posição na barragem e das condições hidrodinâmicas locais (Silva et al. 2018a). Complementarmente, sistemas de orientação comportamental, que utilizam estímulos acústicos ou luminosos para direcionar os peixes às rotas de menor risco, têm sido objeto de estudo como estratégias promissoras de mitigação (Maddahi et al. 2022), ainda que sua eficácia em ambientes tropicais requeira validação adicional.

Outras alternativas analisadas incluem o uso de grades de exclusão horizontais e verticais, barreiras elétricas e eletromagnéticas (Haug et al. 2022), bem como a realocação de habitats críticos, como áreas de desova e alimentação, para trechos com maior conectividade ecológica. Porém, a adequação dessas alternativas às espécies nativas e às características ambientais da bacia exige testes em escala reduzida, seguidos de avaliações sistemáticas de desempenho antes da adoção em larga escala.

Os resultados obtidos indicam que a mitigação dos impactos sobre a ictiofauna em sistemas hidrelétricos de grande porte demanda uma abordagem multidisciplinar e integrada, envolvendo o uso simultâneo de soluções tecnológicas, estruturais e ecológicas, apoiadas por programas contínuos de monitoramento, pesquisa aplicada e avaliação adaptativa. Considerando a posição do Brasil como um dos maiores produtores mundiais de energia hidrelétrica, torna-se essencial o investimento estratégico em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, que equilibrem a eficiência energética com a conservação dos ecossistemas aquáticos. Este equilíbrio pressupõe o fortalecimento da governança ambiental, a articulação entre stakeholders

e a consolidação de uma base científica robusta que subsidie as decisões de planejamento e gestão de recursos hídricos.

Ao longo do rio Tocantins, as usinas hidrelétricas em operação têm diretrizes específicas de vazão e nível d'água, determinadas com o objetivo de mitigar os impactos socioambientais, especialmente sobre a ictiofauna e os usos múltiplos da água, de acordo com o Operador Nacional do Sistema (ONS). A UHE Peixe Angical, por exemplo, possui duas restrições importantes: uma vazão defluente mínima de 182 m³/s para manter a vazão sanitária, e outra de 360 m³/s para evitar o aprisionamento e a consequente mortandade de peixes em lagoas marginais, sendo esta última equivalente a uma unidade gerando 94 MW.

A UHE Serra da Mesa, conforme a Resolução ANA nº 529/2004, deve manter uma vazão mínima de 300 m³/s a jusante, além de obedecer a uma taxa de variação máxima de defluência de 2.500 m³/s por dia. Durante a Temporada de Praias (fluviais), regulamentada pela Resolução ANA nº 376/2011, esta vazão deve ser mantida constante.

Por sua vez, a UHE Luiz Eduardo Magalhaes, deve operar com vazão ambiental mínima de 255 m³/s, e também seguir a Resolução nº 376/2011 quanto à necessidade de minimizar flutuações entre o seu aproveitamento e o de Peixe Angical, no período de 10 de junho a 20 de agosto, podendo haver alterações mediante solicitação da Agência de Desenvolvimento do Turismo do Estado do Tocantins (ADTUR), com anuência do ONS e comunicação à ANA. Para ser mais preciso, com base na normativa mencionada, qualquer modificação no período oficial da Temporada de Praias deve ser formalmente solicitada pela ADTUR, previamente acordada com o ONS e, em seguida, comunicada à ANA. Tal exigência normativa evidencia a interdependência entre os setores de turismo, de gestão dos recursos hídricos e de geração de energia hidrelétrica, ressaltando a necessidade de articulação institucional para a conciliação de múltiplos usos da água.

Na UHE Cana Brava, o reservatório deve manter-se acima da cota 332,30 m durante o mesmo período para garantir a balneabilidade da Praia do Sol, e recomenda-se uma vazão mínima de 90 m³/s, com abertura imediata do vertedouro em caso de impossibilidade de geração mínima. De forma semelhante, a UHE São Salvador também estabelece vazão mínima de 90 m³/s, correspondente a 80% da menor vazão média mensal, podendo ser ajustada conforme observações locais para proteção da ictiofauna. Já a UHE Estreito apresenta recomendações específicas para o período de praias, entre junho e o feriado de 7 de setembro, em que deve manter defluência estabilizada ou com variações diárias mínimas, priorizando incrementos suaves. Durante o período seco, a redução de carga deve ser feita em patamares de 50 MW a cada 30 minutos, visando evitar o aprisionamento de peixes nas margens a jusante do canal de

fuga. Estas exigências operacionais refletem um esforço normativo e técnico, mínimo, para equilibrar a geração de energia com a preservação dos ecossistemas aquáticos da bacia do Tocantins.

A análise dos escassos documentos encontrados para elaboração deste capítulo, indicou que os estudos voltados à mitigação da mortalidade de peixes em usinas hidrelétricas na bacia do rio Tocantins, encontram-se majoritariamente em estágio inicial de desenvolvimento. Enquanto que, ao considerar o recorte espacial das usinas hidrelétricas instaladas ao longo do rio Tocantins, uma das bacias hidrográficas mais impactadas por empreendimentos de grande porte no país (Pelicice et al. 2021), a necessidade de desenvolver soluções adaptadas à sua ictiofauna endêmica e às especificidades morfodinâmicas da bacia é particularmente evidente. Diante disso, a realização de experimentações em pequena escala, tanto em laboratório quanto em ambiente de campo, apresenta-se como etapa fundamental para calibrar intervenções técnicas destinadas à conservação da biodiversidade aquática regional.

O Quadro 5 apresenta uma síntese das principais tecnologias e soluções construtivas identificadas ao longo deste estudo, evidenciando aquelas consideradas ambientalmente adequadas para aplicação em cada usina hidrelétrica situada ao longo do rio Tocantins. A seleção dessas soluções levou em conta as características estruturais, operacionais e ambientais específicas de cada empreendimento, buscando conciliar a eficiência energética com a preservação dos ecossistemas aquáticos. Dentre as seis usinas hidrelétricas localizadas ao longo do rio Tocantins, três apresentam barragens de altura moderada e três possuem barragens de grande porte; por essa razão, no referido quadro, as usinas foram agrupadas conforme a altura de suas barragens, de modo a facilitar a análise comparativa das soluções construtivas e tecnológicas mais adequadas a cada contexto estrutural.

Quadro 5- Resumo sobre as tecnologias e soluções construtivas ambientalmente aplicáveis a cada Usina Hidreletrica no rio Tocantins

UHE (rio Tocantins)	Tecnologias e/ou Soluções “amigáveis” sugeridas	Justificativa
UHE Serra Mesa (GO)		➤ GelFish, Peixe-sensor :ferramenta de pesquisa fundamental para a quantificação dos estressores hidrodinâmicos e a previsão de mortalidade (que pode ser adoptada em qualquer usina) ➤ Turbina Alden: Desenvolvida especificamente para minimizar barotrauma e colisão, com um design bem específico redizindo a quantidade de pá.
Lajeado / Luís E. Magalhães (TO)	Turbina Alden, Peixe-sensor, GelFish; Sistema de Transposição de Peixe (Sistema de captura e transporte Elevadores para peixes, escadas com redutores de velocidade)	➤ Os sistemas de transposição de peixes incluem diferentes tecnologias adaptadas às características das barragens e às necessidades das espécies migratórias. Em barragens de grande altura, os sistemas de captura e transporte, os elevadores para peixes, destacam-se por possibilitar a passagem ascendente de forma controlada e segura, superando desníveis acentuados com maior eficiência. Já as escadas de peixes com redutores de velocidade são mais indicadas, pois reduzem a velocidade do escoamento da água e facilitam o deslocamento dos peixes, diminuindo o esforço natatório e o risco de exaustão. Complementarmente, os sistemas de guiamento comportamental representam uma inovação tecnológica
Peixe-Angical (TO)		

		ao empregar barreiras não físicas, como estímulos acústicos, luminosos e hidráulicos, para direcionar os peixes de maneira seletiva a rotas migratórias seguras, integrando princípios de etologia e hidrodinâmica e promovendo uma maior compatibilização entre a eficiência energética e a conservação da biodiversidade aquática.
Estreito (MA/TO)	Turbina Alden, Peixe-sensor, GelFish, Sistema de Transposição de Peixe (Passagens rústicas, Passagem de peixes com	➤ GelFish, Peixe-sensor :ferramenta de pesquisa fundamental para a quantificação dos estressores hidrodinâmicos e a previsão de mortalidade (que pode ser adotada em qualquer usina) ➤ Turbina Alden: Desenvolvida especificamente para minimizar barotrauma e colisão, com um design bem específico redizendo a quantidade de pá. ➤ Sistema de Transposição de Peixes: Em barragens de altura moderada, é possível
UHE Cana Brava (GO)	tanques sucessivos, Eclusas para peixes)	adotar diferentes tipos de estruturas de transposição, como as passagens rústicas, as passagens de peixes com tanques sucessivos e as eclusas para peixes, que apresentam resultados positivos quanto à eficiência e ao funcionamento. Essas soluções permitem que os peixes realizem sua migração de forma gradual e segura, acompanhando o fluxo natural da água e superando o desnível da barragem com menor esforço. Além disso, os sistemas de guiamento comportamental surgem como
São Salvador (TO)		

uma alternativa tecnológica inovadora, pois utilizam barreiras não físicas, baseadas em estímulos acústicos, luminosos ou hidráulicos, para influenciar o comportamento dos peixes e direcioná-los seletivamente para rotas migratórias mais seguras, reduzindo o risco de mortalidade e contribuindo para a conservação da biodiversidade aquática.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A falta de dados sobre casos de mortandade de peixes em hidrelétricas no rio Tocantins, a recusa do órgão ambiental estadual, o Naturatins, em fornecer os relatórios e laudos de casos enquadrados, mesmo via Lei Federal de Acesso à Informação, consolida uma prejudicial condição de invisibilização generalizada do problema, ao passo que é de conhecimento geral que tais ocorrências são relativamente frequentes. Além disso, a falta de transparência das empresas de geração de energia, responsáveis pelos empreendimentos, sobre o tema, também é um problema grave, ao passo que este trabalho permitiu comprovar que a fiscalização do poder público é ineficaz.

Apesar de termos levantado exaustivamente as soluções construtivas e tecnologias amigáveis para peixes disponíveis na literatura científica, a segurança técnica e acadêmica na recomendação de sua aplicabilidade às hidrelétricas do rio Tocantins foi comprometida. Isso se deu diretamente em decorrência da invisibilização generalizada do problema da mortandade de peixes na região, que inviabilizou a coleta de dados secundários cruciais sobre ocorrências. Esta realidade, que a pesquisa permitiu comprovar como reflexo da ineficácia da fiscalização pública e falta de responsabilidade socioambiental por parte das empresas gestoras dos empreendimentos, impossibilitou uma análise comparativa e a adequação regional das tecnologias, limitando a validação e a recomendação específica para o contexto local.

A modificação das comunidades piscícolas e a perda de diversidade das espécies de peixes em rios regulados por grandes barragens representam impactos ecológicos significativos, observados de forma quase sistemática na maioria dos empreendimentos hidrelétricos analisados até o momento. Tal realidade se manifesta de maneira particularmente acentuada em bacias hidrográficas com alta densidade de barramentos, como a do rio Tocantins, onde a implantação sequencial de usinas, a exemplo de Peixe Angical, São Salvador e Luiz Eduardo Magalhaes, tem

provocado o desaparecimento progressivo dos trechos lóticos, segmentos de rios com fluxo livre, essenciais para a manutenção de espécies reófilas e migratórias.

Neste contexto, a fragmentação dos habitats, a perda de conectividade ecológica e a homogeneização dos ambientes aquáticos comprometem gravemente a sobrevivência de espécies que dependem de ciclos migratórios completos para reprodução, alimentação ou crescimento. Diante destas alterações, diversas tecnologias têm sido propostas e implementadas com o objetivo de mitigar os impactos sobre a ictiofauna. Entre elas,

destacam-se turbinas hidráulicas com modificações específicas, como as dos modelos Kaplan e Francis, otimizadas para reduzir lesões em peixes. Adicionalmente, a turbina Alden foi desenvolvida para permitir passagem mais segura para os peixes. Em menor escala, a utilização da turbina Parafuso de Arquimedes tem se mostrado eficaz por possibilitar o trânsito bidirecional dos peixes sem causar danos, sobretudo em centrais de pequeno porte e baixa queda.

Adicionalmente, sistemas de transposição piscícola, como escadas para peixes, elevadores e passagens naturais, são comumente instalados com a finalidade de restabelecer, ainda que parcialmente, a conectividade entre habitats a montante e jusante dos barramentos. No entanto, tais dispositivos apresentam limitações relevantes, sobretudo no que diz respeito à sua eficiência para determinadas espécies, à seletividade biológica e às restrições comportamentais relacionadas à migração. Complementando estas abordagens, tecnologias recentes como o Peixe Sensor e o GelPeixe têm sido empregadas para monitoramento ambiental preciso e em tempo real dos deslocamentos dos peixes, utilizando recursos de telemetria e geolocalização. Esses sistemas ampliam a capacidade dos gestores de ajustarem suas estratégias com base em dados empíricos, fortalecendo a base científica para a tomada de decisões.

É importante reconhecer que nenhuma dessas soluções, isoladamente, é capaz de restaurar plenamente as funções ecológicas comprometidas ou compensar a perda de biodiversidade resultante da construção de barragens. Por esta razão, as medidas técnicas devem integrar uma abordagem mais ampla e sistêmica, fundamentada na proteção ativa dos habitats fluviais remanescentes, incluindo afluentes, zonas marginais vegetadas e ambientes lênticos favoráveis ao recrutamento.

Também se torna crucial implementar programas de monitoramento científico contínuo, fomentar a cooperação entre os diferentes atores territoriais e consolidar o planejamento de novos empreendimentos dentro de uma lógica ecossistêmica em escala de bacia hidrográfica. Além disso, atenção especial deve ser direcionada às espécies mais vulneráveis, como os migradores de longa distância, as populações naturalmente reduzidas, as espécies de distribuição

restrita ou aquelas de alto valor pesqueiro, cuja conservação demanda ações específicas, coordenadas e respaldadas por dados ecológicos robustos.

O êxito na preservação da ictiofauna em contextos antropizados dependerá, portanto, não apenas da inovação tecnológica, mas também de um compromisso de longo prazo com a governança ambiental, o fortalecimento da pesquisa aplicada e a conscientização dos diversos stakeholders sobre a importância da continuidade ecológica nos ecossistemas aquáticos.

A presente pesquisa evidencia as dificuldades enfrentadas na obtenção de dados sobre os casos de mortalidade de peixes associados à operação de usinas hidrelétricas no rio Tocantins. Esta escassez de informações, marcada por limitações no acesso a relatórios oficiais e pela ausência de respostas por parte das concessionárias de energia, revela um cenário de baixa transparência e pouca abertura para a investigação científica sobre os impactos ambientais causados pelo setor hidrelétrico. Importante ressaltar que a produção de conhecimento científico voltado para a identificação de causas e a proposição de soluções para tais episódios de mortalidade não representa uma ameaça à geração de energia hidrelétrica. Pelo contrário, trata-se de uma oportunidade para o aprimoramento das práticas operacionais e para o desenvolvimento de tecnologias de mitigação ambiental mais eficientes e sustentáveis.

O acesso livre aos dados operacionais das usinas e aos registros de eventos de impacto ambiental é condição essencial para que a comunidade científica possa realizar diagnósticos precisos, levantar hipóteses fundamentadas e propor soluções técnicas que minimizem os danos à ictiofauna local. A falta de transparência, além de limitar o avanço científico, pode perpetuar problemas ambientais que, acumulados ao longo do tempo, podem gerar efeitos negativos em cadeia, de caráter grave e, em alguns casos, irreversível. Assim, reforça-se a necessidade de uma maior integração entre os setores envolvidos na geração de energia hidrelétrica e a comunidade acadêmica, visando garantir uma abordagem mais responsável, sustentável e comprometida com a conservação dos recursos naturais e a saúde ecológica dos sistemas aquáticos brasileiros.

REFERÊNCIAS

- ABELL, R. et al. Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. **BIOSCIENCE**, v. 58, n. 5, p. 403–414, 2008. DOI: 10.1641/B580507.
- ADAM, B. Plenary speaker: how to master the art of building functional fish way. 2015. Trabalho acadêmico.
- AFANASYEV, S. A. et al. Assessment of small HPPs construction on aquatic fauna and ecological state of the White Cheremosh River, international approach. **HYDROBIOLOGICAL JOURNAL**, v. 53, n. 5, p. 15–28, 2017. DOI: 10.1615/HydrobJ.v53.i5.20.
- AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F. M.; GOMES, L. C. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. **BRAZILIAN JOURNAL OF BIOLOGY**, v. 68, n. 4 suppl., p. 1119–1132, 2008. DOI: 10.1590/S1519-69842008000500019.
- AGOSTINHO, A. A.; THOMAZ, S. M.; GOMES, L. C. Conservation of the biodiversity of Brazil's inland waters. **CONSERVATION BIOLOGY**, v. 19, n. 3, p. 646–652, 2005. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2005.00701.x.
- AGOSTINHO, A. A. et al. Fish die-off in river and reservoir: a review on anoxia and gas supersaturation. **NEOTROPICAL ICHTHYOLOGY**, v. 19, n. 3, e210037, 2021. DOI: 10.1590/1982-0224-2021-0037.
- AGOSTINHO, A. A. et al. Fish ladder of Lajeado Dam: migrations on one-way routes? **NEOTROPICAL ICHTHYOLOGY**, v. 5, n. 2, p. 121–130, 2007. DOI: 10.1590/S1679-62252007000200005.
- AGOSTINHO, C. S.; et al. All that goes up must come down? Absence of downstream passage through a fish ladder in a large Amazonian river. **HYDROBIOLOGIA**, v. 675, n. 1, p. 1–12, 2011. DOI: 10.1007/s10750-011-0787-0.
- AHMADI, M. et al. Numerical investigation of hydraulics in a vertical slot fishway with upgraded configurations. **WATER**, v. 13, n. 19, p. 2711, 2021. DOI: 10.3390/w13192711.
- AIRODY, A. A numerical and experimental study on a prototype "fish-friendly" water turbine swirl injector. 2017. Trabalho acadêmico.
- ALBAYRAK, ISMAIL; KRIEWITZ, C. ROBERT; BECK, CLAUDIA; BOES, ROBERT M. Flow fields around fish guidance structures. 2015. Trabalho acadêmico.
- ALBERT, J. S.; TAGLIACOLLO, V. A.; DAGOSTA, F. Diversification of Neotropical freshwater fishes. **ANNUAL REVIEW OF ECOLOGY, EVOLUTION, AND SYSTEMATICS**, v. 51, n. 1, p. 27–53, 2020. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-011620-031032.

AMARAL, S. V. et al. Survival of fish passing downstream at a small hydropower facility. **MARINE AND FRESHWATER RESEARCH**, v. 69, n. 12, p. 1870, 2018. DOI: 10.1071/MF18123.

ANDRADE, F. DE; 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. DOI: 10.1590/S1679-62252012000400005.

ARRAIS, A. A. Implantação de sistema de transposição para peixes junto a hidrelétricas: aspectos técnicos a serem considerados para as pequenas centrais hidrelétricas. 2012. 24 p. Trabalho acadêmico.

YOOSEFDOOST, A.; LUBITZ, W. D. Archimedes Screw Turbines: A Sustainable Development Solution for Green and Renewable Energy Generation - A Review of Potential and Design Procedures. *Sustainability*, 12(18), 7352, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12187352>

BAINWAD, B. Comparative study of ogee and stepped spillway for enhancement of energy dissipation. **SCIENCE AND TECHNOLOGY – AN INTERNATIONAL JOURNAL**, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2024. DOI: 10.69738/staij.2024.01.01.0003.

BAKKEN, T. H. et al. Demonstrating a new framework for the comparison of environmental impacts from small- and large-scale hydropower and wind power projects. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT**, v. 140, p. 93–101, 2014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.01.050.

BARREIRA, J.; JOAQUIM, J. Avaliação do comportamento de espécies piscícolas ibéricas de água doce perante estímulos acústicos e luminosos e o seu contributo para o desenvolvimento de uma barreira comportamental para peixes. Vigo: Universidade de Vigo, 2021.

BASS, J. M.; BEECHAM, S.; NOLL, J. Experience of industry case studies: a comparison of multi-case and embedded case study methods. 2018. DOI: 10.1145/3193965.3193967.

BECK, C. Hydraulic and fish-biological performance of fish guidance structures with curved bars. In: **PROCEEDINGS OF THE 38TH IAHR WORLD CONGRESS**, p. 2205–2213, 2019. DOI: 10.3850/38WC092019-0434.

BECK, C.; ALBAYRAK, I.; BOES, R. Improved hydraulic performance of fish guidance structures with innovative bar design. Zurich: ETH Zurich, 2018. 4 p. DOI: 10.3929/ETHZ-B-000289463.

BERNÁS, R. et al. Low mortality rate in silver eels (*Anguilla anguilla* L.) passing through a small hydropower station. **MARINE AND FRESHWATER RESEARCH**, v. 68, n. 11, p. 2081, 2017. DOI: 10.1071/MF16396.

BESTGEN, K. R.; MEFFORD, B.; COMPTON, R. I. Mortality and injury rates for small fish passing over three diversion dam spillway models. **ECOLOGICAL ENGINEERING**, v. 123, p. 141–150, 2018. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.09.003.

BOYS, C. et al. Downstream fish passage criteria for hydropower and irrigation infrastructure in the Murray–Darling Basin. 2014. Relatório técnico.

BRIGNARDELLO-PETERSEN, R.; SANTESSO, N.; GUYATT, G. H. Systematic reviews of the literature: an introduction to current methods. **AMERICAN JOURNAL OF EPIDEMIOLOGY**, v. 194, n. 2, p. 536–542, 2024. DOI: 10.1093/aje/kwae232.

CAPELLINI, N. Expansion hydroélectrique et contrôle de l’eau par l’État au Brésil (1930–1990). **CARAVELLE**, n. 119, p. 71–88, 2022. DOI: 10.4000/caravelle.13094.

CARVALHO, Adriano dos Guimarães de. Injúrias e morte de peixes em hidrelétricas estudo das usinas de Peixe Angical, Luís Eduardo Magalhães e Estreito. 2019. 138f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente, Palmas, 2019.

CHAMON, C. C. et al. Building knowledge to save species: 20 years of ichthyological studies in the Tocantins-Araguaia River Basin. **BIOTA NEOTROPICA**, v. 22, n. 2, e20211296, 2022. DOI: 10.1590/1676-0611-bn-2021-1296.

CHERNJAVSKY, P. Worcester Polytechnic Institute. 2021. Trabalho acadêmico.

COUTANT, C. C.; WHITNEY, R. R. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review. **TRANSACTIONS OF THE AMERICAN FISHERIES SOCIETY**, v. 129, n. 2, p. 351–380, 2000.

CRESWELL, J. W. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. **SAGE PUBLICATIONS**, 2013.

DAMÁZIO, J.; SANTOS, M. A. dos. The multiple services of hydropower plants in the context of sustainable electric sector in Brazil. **Energy Exploration & Exploitation**, 2024.

DAGOSTA, F. C. P.; DE PINNA, M. The fishes of the Amazon: distribution and biogeographical patterns, with a comprehensive list of species. **Bulletin of the American Museum of Natural History**, n. 431, p. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1206/0003-0090.431.1.1>.

DAMS, The Brazilian Committee of. Main Brazilian Dam III. [S.l.]: The Brazilian Committee of Dams, 2009.

DE BIE, J.; PEIRSON, G.; KEMP, P. S. Effectiveness of horizontally and vertically oriented wedge-wire screens to guide downstream moving juvenile chub (*Squalius cephalus*). *Ecological Engineering*, v. 123, p. 127–134, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.038>.

DE BIE, J.; PEIRSON, G.; KEMP, P. S. Evaluation of horizontally and vertically aligned bar racks for guiding downstream moving juvenile chub (*Squalius cephalus*) and barbel (*Barbus barbus*). *Ecological Engineering*, v. 170, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106327>

DILCE, F. R.; MÁRCIO, M. V. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. **CATENA**, 2007.

ELETROBRAS. Eletrobras Furnas. 2024. Disponível em: <https://furnas.com.br/subsecao/129/usina-de-serra-da-mesa---1275-mw?culture=en>.

ENGIE. Usina hidrelétrica Estreito. [S.l.]: Engie, 2024. Disponível em: <https://www.engie.com.br/usinas/usina-hidreletrica-estreito/>.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. The dynamics of innovation: from national systems and “Mode 2” to a triple helix of university-industry-government relations. **Research Policy**, 2000.

FURNAS, ELETROBRAS. Usina de Serra da Mesa. [S.l.]: Eletrobras Furnas. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/serradamesa/?culture=pt>.

GARCIA, R.; CALANTONE, R. A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review, 2002.

GODINHO, H. P. et al. Fish ladder efficiency in a southeastern Brazilian river. **Ciência e Cultura**, 1991.

GOLDER, P. N.; TELLIS, G. J. Pioneer advantage: marketing logic or marketing legend? 1993.

GOMES, D. S. da M. Aplicação do método computacional Smoothed Particle Hydrodynamics para simulação de mecanismos de transposição de peixes em hidrelétricas. 2017.

GOV.BR. Estudo revela desaparecimento de espécies de peixes endêmicos após construção de usinas hidrelétricas no rio Uatumã. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inpa/pt-br/assuntos/noticias/2025/estudo-revela-desaparecimento-de-especies-de-peixes-endemicos-apos-construcao-de-usinas-de-rio-uatuma>.

HAVN, T. B. et al. Downstream migration of Atlantic salmon smolts past a low head hydropower station equipped with Archimedes screw and Francis turbines. **Ecological Engineering**, v. 105, p. 262–275, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.043>.

HIGGINS, T. The geopolitics of research funding in Europe and the USA: some policy aspects. **International Journal of Technology Management**, 2014.

HOGAN, T. EPRI-DOE Conference on environmentally-enhanced hydropower turbines: technical papers. 102–4609, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1057387>.

HOU, H. et al. A hydropower biological evaluation toolset (HBET) for characterizing hydraulic conditions and impacts of hydro-structures on fish. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 990, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11040990>.

HUNZIKER, S.; BLANKENAGEL, M. Multiple case research design. [S.l.]: Case Research Design, p. 171–186, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-34357-6_9.

HYDROPOWER, Getay. Getay hydropower. 2010. Disponível em: <https://pt.gthec.cn/products/francis-turbine.html>.

- JANDESSA, J.; FABIANO, P.; SAWAKUCHI, A. Quaternary climate variability as the main driver of the fluvial evolution of the Middle Tocantins River, eastern Amazonia. 2021.
- JESUS, J.; CORTES, R.; TEIXEIRA, A. Acoustic and light selective behavioral guidance systems for freshwater fish. **Water**, v. 13, n. 6, p. 745, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13060745>.
- KIBLER, K. M.; TULLOS, D. D. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River, China. **Water Resources Research**, v. 49, n. 6, p. 3104–3118, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20243>.
- KOSTENSE, L. Systematisch literatuuronderzoek. **Recht En Methode in Onderzoek En Onderwijs**, 2024. DOI: 10.5553/rem/.000080.
- KOUKOUVINIS, P.; ANAGNOSTOPOULOS, J. State of the art in designing fish-friendly turbines: concepts and performance indicators. **Energies**, v. 16, n. 6, p. 2661, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16062661>.
- KUMAR, R. et al. Design and cost analysis of fish friendly Kaplan turbine: a case study. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 5384–5388, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.805>.
- LARA, F. C. P.; SIQUEIRA, D. P.; ABREU, A. Revisão sistemática da literatura como técnica de revisão de literatura na área do direito. **Revista Direitos Sociais e Políticas Públicas (UNIFAFIBE)**, v. 10, n. 3, p. 82–110, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.25245/rdsp.v10i3.1319>.
- LARINIER, M. Guidelines for the design of fishways and other fish facilities. **FAO Fisheries Technical Paper**, n. 401, 2000.
- LARINIER, M. Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages pour les poissons migrateurs. **Bulletin Français de Pisciculture**, n. Hors série, p. 1–39, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/kmae:1983001>.
- LARINIER, M.; TRAVADE, F. Downstream migration: problems and facilities. **Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture**, n. 364 supplément, p. 181–207, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/kmae/2002102>.
- LEMKECHER, F.; DAVID, L.; COURRET, D.; CHATELLIER, L. Field measurements of the attractivity of bypasses for fishfriendly trashrack. In: PAQUIER, A.; RIVIÈRE, N. (Ed.). **E3S Web of Conferences**, v. 40, p. 03039, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003039>.
- LUCINDA, P. H. F. et al. Fish, Lajeado Reservoir, Rio Tocantins Drainage, State of Tocantins, Brazil. **Check List**, v. 3, n. 2, p. 70, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.15560/3.2.70>.
- MA, C.; LIAN, J.; WANG, J. Short-term optimal operation of Three-Gorge and Gezhouba cascade hydropower stations. **Energy Conversion and Management**, v. 65, p. 616–627, 2013.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.024>.

MADDAHI, M. et al. Field investigation of hydraulics and fish guidance efficiency of a horizontal bar rack-bypass system. **Water**, v. 14, n. 5, p. 776, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14050776>.

MAO, X. Review of fishway research in China. **Ecological Engineering**, v. 115, p. 91–95, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.010>.

MIRANDA, A. K. S.; ASSIS, I. P.. The operationalization of the concept of culture in communication journals: a systematic literature review. **Intercom: Revista Brasileira de Ciências da Comunicação**, São Paulo, v. 46, p. 1-20, 2023. DOI: 10.1590/1809-58442023142en.

MORAES, P. G.; OLIVEIRA, M. A.; ANDRADE C. L.; BIMBATO, A. M.; ALCÂNTARA PEREIRA, L. A. Effects of surface roughness and wall confinement on bluff body aerodynamics at large-gap regime. *J Braz Soc Mech Sci Eng*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03111-4>

MUSSAMA, I. T.; OLIVEIRA, M. A. Mapa de localização das Usinas Hidrelétricas implantadas no Rio Tocantins. Tocantins, 2025. Material elaborado para a dissertação de mestrado de Fedly Sufrá.

NASCIMENTO, S. F. et al. Queda da produtividade de pescado no Rio Tocantins: a percepção dos pescadores de Marabá – Pará. **Revista Agroecossistemas**, v. 3, n. 1, p. 101, 2013. DOI: <https://doi.org/10.18542/ragros.v3i1.1389>.

NWCOUNCIL. Conselho de Energia e Conservação do Noroeste – Conselho NWC. Programa de pesca e vida selvagem da Bacia do Rio Columbia, 2014. Disponível em: https://www.nwcouncil.org/fw/program/2014-12/program/partone_overview.

OLIVEIRA, M. A. Modelo para análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas. *Hidro & Hydro - News SHP*, v. 74, n. 3, p. 5-10, jul/set. 2017.

OLIVEIRA, M. A. Technical and economic evaluations for decision-making on the repowering of small hydropower plants and the optimum exploit of existing plants in Brazil. *American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems*, v. 6, n. 16, p. 16-24, jan. 2018.

OLIVEIRA, M. A. Repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas: Avaliação Técnica e Econômica. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

OLIVEIRA, M. A.; OLIVEIRA, M. S. Operational characterization of Luis Eduardo Magalhães hydroelectric power plant and the use of water resources of the Tocantins river for energy generation. *Brazilian Journal of Development*, 2021.

OLIVEIRA, M. A. MORAES, P. G.; ANDRADE C. L.; BIMBATO A. M.; ALCÂNTARA PEREIRA, L. A. Control and suppression of vortex shedding from a slightly rough circular cylinder by a discrete vortex method. *Energies* 13(17):4481, 2020 .

<https://doi.org/10.3390/en13174481>

OLIVEIRA, M. A.; ALCÂNTARA PEREIRA, L. A.. A Lagrangian roughness model integrated with the vortex method for drag coefficient estimation and flow control

investigations around circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.. 2022. DOI: 10.1007/s40430-022-03605-9.

OLIVEIRA, M. A.; ALCÂNTARA PEREIRA, L. A.. Effect of Surface Roughness on Aerodynamic Loads of Bluff Body in Vicinity of Smoothed Moving Wall. *Applied Sciences*. 14. 1-25. 2024. DOI: 10.3390/app14072919.

PERKINS, N. et al. Development status of the Alden fish-friendly turbine. **Factor This Power Engineering**, 12 June 2013. Disponível em: <https://www.power-eng.com/renewables/hydropower/development-status-of-the-alde-fish-friendly-turbine/>.

OLIVEIRA, M. A. de; OLIVEIRA, M. S. de. Caracterização operacional da Usina Hidrelétrica Luis Eduardo Magalhães e o uso dos recursos hídricos do Rio Tocantins para geração de energia. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 44952–44964, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-085>.

OLIVEIRA, M. A. de; OLIVEIRA, M. S. S. de; MIRANDA, A. K. S. A sustentabilidade como perspectiva para repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil: método para estimativas. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e00691, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc202000691vu2022l3ao>.

PELICICE, F. M.; AGOSTINHO, A. A. Fish-passage facilities as ecological traps in large Neotropical rivers. **Conservation Biology**, v. 22, n. 1, p. 180–188, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00849.x>.

PELICICE, F. M. et al. Large-scale degradation of the Tocantins-Araguaia River Basin. **Environmental Management**, v. 68, n. 4, p. 445–452, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01513-7>.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. Systematic reviews in the social sciences: a practical guide. 1. ed. Hoboken: Wiley, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470754887>.

PIPER, A. T. et al. Using 'trap and transport' to facilitate seaward migration of landlocked European eel (*Anguilla anguilla*) from lakes and reservoirs. **Fisheries Research**, v. 228, p. 105567, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105567>.

PORCHER, J. P.; LARINIER, M. Designing fishways, supervision of construction, costs, hydraulic model studies. **Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture**, n. 364, suplemento, p. 156–165, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1051/kmae/2002100>.

PURECE, C.; CORLAN, L. Archimedean screw as fish-friendly turbines for harnessing hydropower potential. In: NEGREANU, G. P.; VLĂDUȚ, N. V.; TAZEROUT, M.; ERTEKIN, C. (ed.). **E3S Web of Conferences**, v. 286, p. 02007, 2021a. DOI:

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128602007>.

PURECE, C.; CORLAN, L. Archimedean screw as fish-friendly turbines for harnessing hydropower potential. In: NEGREANU, G. P.; VLĂDUȚ, N. V.; TAZEROUT, M.; ERTEKIN, C. (ed.). **E3S Web of Conferences**, v. 286, p. 02007, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128602007>.

QUARANTA, E.; PÉREZ-DÍAZ, J. I.; ROMERO-GOMEZ, P.; PISTOCCHI, A. Environmentally enhanced turbines for hydropower plants: current technology and future perspective. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, p. 703106, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.703106>.

RAMMAL, H. G. Systematic literature reviews: steps and practical tips. [S.l.]: Emerald (MCB UP), 2023. DOI: 10.1108/s2754-586520230000002002.

REDEKER, M. Fish protection in Germany: first steps on a long and rocky road. In: TURNPENNY, A. W. H.; HORSFIELD, R. A. (ed.). **WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering**. Southampton: WIT Press, 2013a. v. 1, p. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.2495/978-1-84564-849-7/003>.

REDEKER, M. Protection des poissons en Allemagne: premiers pas sur un chemin long et semé d’embûches. 2013b.

REIS, R. E. et al. Fish biodiversity and conservation in South America. **Journal of Fish Biology**, v. 89, n. 1, p. 12–47, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfb.13016>.

RENEWABLE ENERGY RESOURCES. Renewable energy resources - Coclea Idraulica - Vite Idrodinamica Impianto Microidroelettrico, 2014. Disponível em: <https://youtu.be/hGYpBrh3Usc>.

RICHMOND, M. C.; ROMERO-GOMEZ, P. Fish passage through hydropower turbines: simulating blade strike using the discrete element method. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 22, n. 6, p. 062010, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/22/6/062010>.

ROCHA, G. B.; NOLETO, L. G. Universidade de Brasília – UnB, Faculdade UnB Gama – FGA, Curso de Engenharia de Energia, 2015.

SAMPAIO, R. C. Análise de conteúdo categorial: manual de aplicação. Brasília, DF: Escola Nacional de Administração Pública – Enap, 2021. (Coleção Metodologias de Pesquisa).

SANTO, M. Dispositivos de passagens para peixes em Portugal. Lisboa: Ministério da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, 1ª ed., 2005.

SAYLOR, R. K. Susceptibility of riverine fishes to anthropogenically-linked trauma: strikes from hydropower turbine blades, 2021.

SAYLOR, R. et al. Creation of a prototype biomimetic fish to better understand impact trauma caused by hydropower turbine blade strikes. **PeerJ Materials Science**, v. 3, p. e16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-matsci.16>.

SCHLETTERER, M.; REINDL, R.; THONHAUSER, S. Options pour restauration de la continuité des rivières, en mettant l'accent sur la solution particulière « ascenseurs à poisson»: exemples provenant d'Autriche, 2016.

SCHMUTZ, S.; MIELACH, C. Review of existing research on fish passage through large dams and its applicability to Mekong mainstream dams: technical paper no. 48. Vientiane: Mekong River Commission Secretariat, 2015. DOI: <https://doi.org/10.52107/mrc.aig82u>.

SHAH, H. et al. Can routinely collected administrative data effectively be used to evaluate and validate endpoints used in breast cancer clinical trials? Protocol for a scoping review of the literature. **Systematic Reviews**, v. 12, n. 1, p. 117, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-023-02283-5>.

SILVA, A. B. da et al. Technology management with focus on fish transposition system (FTS). **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, n. 9, p. 222–239, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.5.9.25>.

SOARES, L. M. C. Sistemas de Transposição para Peixes: Medida mitigatória para barragens. 2012. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2012.

SZABO-MESZAROS, M. et al. Experimental hydraulics on fish-friendly trash-racks: an ecological approach. **Ecological Engineering**, v. 113, p. 11–20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.032>.

THAKUR, K.; SHARMA, A. Exploring the scope of diversity management literature: a bibliometric review. **International Journal of Innovative Research and Analysis**, 2024. DOI: 10.62823/ijira/4.4(i).6932.

THOMKE, S. Experimentation matters: unlocking the potential of new technologies for innovation. [S.l.]: Harvard Business School Press, 2003.

TIDD, J.; BESSANT, J. Managing innovation: integrating technological, market and organizational change. Hoboken: Wiley, 2013.

TOBIAS, J. et al. Review of trap-and-haul for managing Pacific salmonids (*Oncorhynchus* spp.) in impounded river systems. **Fish Biology and Fisheries**, 2020.

TOMANOVA, S. et al. Protecting efficiently sea-migrating salmon smolts from entering hydropower plant turbines with inclined or oriented low bar spacing racks. **Ecological Engineering**, v. 122, p. 143–152, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.034>.

TOMANOVA, S. et al. Protecting the downstream migration of salmon smolts from hydroelectric power plants with inclined racks and optimized bypass water discharge. **Journal of Environmental Management**, v. 284, p. 112012, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112012>.

TUONONEN, E. I. et al. Extent of injury and mortality arising from entrainment of fish through a very low head hydropower turbine in Central Ontario, Canada. **Hydrobiologia**, v. 849, n. 2, p.

407–420, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04376-x>.

VARPIO, L.; PARKER, R.; MACLEOD, A. Understanding the differences that differentiate: a model for deciding which literature review to conduct. **Journal of Graduate Medical Education**, v. 16, n. 2, p. 146–150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4300/JGME-D-24-00151.1>.

VIANA, M. R. et al. Elaboração de um projeto de mecanismo para transposição de peixes utilizando canal de adução de uma PCH. Florianópolis: V Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 2006.

VOICU, R. et al. Caraş River Gorge aspects of salmonids' communities management – technical solutions. **Management of Sustainable Development**, v. 10, n. 2, p. 5–12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2478/msd-2019-0001>.

WATSON, S. et al. Safe passage of American eels through a novel hydropower turbine. **Transactions of the American Fisheries Society**, v. 151, n. 6, p. 711–724, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/tafs.10385>.

WERA, F.A. et al. Effects of opened and closed spillway operations of a large tropical hydroelectric dam on the water quality of the downstream river. **Journal of Chemistry**, v. 2019, p. 1–11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6567107>.

ZHU, G. et al. Analysis and reduction of the pressure and shear damage probability of fish in a Francis turbine. **Renewable Energy**, v. 199, p. 462–473, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.202>

APÊNDICE

Título	Autoria	Tipo de documento	País	DOI
Assessment of hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor	Fu et al. 2016	Artigo	Estados Unidos	http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.029
Design and Implementation of a Novel Autonomous Fish Sensor to Monitor Advanced Hydropower Development	Deng et al. 2014	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1063/1.4900543
A hydropower biological assessment toolkit (HBET) to characterize the hydraulic conditions and impacts of hydraulic structures on fish.	Hou et al. 2018	Artigo	Estados Unidos	10.3390/en11040990
Fish passage through hydroelectric turbines: blade impact simulation using the discrete element method.	MC Richmond; Romero-Gomez 2014	Artigo	Suécia	10.1088/1755-1315/22/6/062010
In situ characterization of turbine hydraulic environment to support the development of fish-friendly hydropower guidelines in the lower Mekong River region	Martinez et al. 2019	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.028

Analysis and Reduction of the Probability of Pressure and Shear Damage to Fish in a Francis Turbine.	Zhu et al. 2022	Artigo	China	https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.158
Archimedes' screws as fish-friendly turbines to harness hydropower potential	Purece e Corlan 2021	Artigo	Romênia	https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128602007
The impact of an Archimedes screw hydroelectric turbine on fish migration in a lowland river.	Piper et al. 2018	Artigo	Reino Unido	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.009
Archimedes Turbine: A Sustainable Solution: This review describes the characteristics of ASTs and then explores and analyzes how they can contribute to the sustainability of hydropower development.	oosefDoost & Lubitz, 2020	Artigo	Canadá	10.3390/su12187352
Design and Cost Analysis of an Environmentally Friendly Kaplan Turbine: A Case Study	Kumar et al. 2021	Artigo	Índia	https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.805
Status of ecologically enhanced hydropower turbines	Hogan;Cada; Amaral 2014	Artigo	Estados Unidos	doi/10.1080/03632415.2014.897195
Optimizing hydropower turbines to facilitate fish passage in Khuzestan province	Mohammadi; Mohammadi; Mohammadi, 2015	Artigo	Irã	10.22055/jacm.2014.10755
Safe passage for American eels through new hydroelectric turbine	Watson et al.,2022	Artigo	Estados Unidos	10.1002/tafs.10385
Hydraulic and biological characterization of a large Kaplan turbine	Martinez et al.2019	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.034

Sustainability assessment of hydroelectric power plant water wheels with downstream fish migration and modeling of blade impacts.	Quarenta;Wolter 2021	Artigo	Alemanha	https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100943
Ecological Impact Dashboard of Small Hydroelectric Power Plants in Operation: An Integrated Approach	Alp;Akyüz,; Kucukali, 2020	Artigo	Turquia	https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.127
Seasonal and diurnal variation of downstream fish movement at four small hydropower plants	Knott et al., 2020	Artigo	Alemanha	10.1111/eff.12489
Experimental evaluation of the effect of decompression on caracin injuries when passing through the turbine.	Meng et al., 2019	Artigo	China	10.1088/1755-1315/240/4/042008
Experimental comparison of fish mortality and injuries in innovative and conventional small hydroelectric plants	Mueller et al., 2022	Artigo	Alemanha	10.1111/1365-2664.14236
Perspective: Towards Ecologically Acceptable Criteria for Downstream Fish Passage in Small Hydropower and Irrigation Infrastructure in the Lower Mekong.	Baumgartner et al., 2014	Artigo	Austrália Bacia do Rio Mekong	https://doi.org/10.1063/1.4867101
Laboratory research on hydraulic losses in the inlet channel of Small Hydroelectric Power Plants with support for waste	Walczak;Walczak; Tyimiński, 2022	Artigo	Polônia	https://doi.org/10.3390/en15207602
Experimental hydraulics in fish-friendly waste racks: an ecological approach	Szabo-Meszaros et al. 2018	Artigo	Turquia	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.032

Field measurements of contour attractiveness for fish-friendly containment devices.	Lemkecher et al., 2018	Artigo	França	https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003039
Understanding barotrauma in fish passage through hydroelectric structures: a comprehensive strategy for sustainable water resources development.	Brown e outros 2014	Artigo	Estados Unidos	doi/10.1080/03632415.2014.883570
Quantification of the risk of barotrauma for young fish when passing through the hydroturbine.	Marshall C. Richmond et al., 2014	Artigo	Estados Unidos	http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.007
How and where to pass? Behavior of Atlantic salmon fry in a hydroelectric plant with multiple migration options.	Renardy et al., 2020	Artigo	Bélgica	https://doi.org/10.1007/s10750-019-04108-w
Optimization of fish-friendly flow model in vertical slot passage based on validation of fish swimming ability.	Zheng et al., outros 2022	Artigo	China	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106796
What are the relative risks of mortality and injury to fish passing hydropower dams in temperate regions? A systematic review	Dirk et al. , 2020	Artigo	Canadá	https://doi.org/10.1186/s13750-020-0184-0
Interactions of a North American temperate fish community with a very low-head hydroelectric power plant in Ontario, Canada	Tuononem et al., 2022	Artigo	Canadá	10.1002/rra.3930

Archimedes' screws as fish-friendly turbines to harness hydropower potential	Purece; Corlan 2021	Artigo	Romênia	https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128602007
Ecological turbines for hydroelectric plants: current affairs	Quaranta et al., 2021	Artigo	Espanha e Áustria	10.3389/fenrg.2021.703106
Alden fish-friendly turbine hydropower: history and development status	Dixon; Hogan 2015	Relatório da Conferência	Estados Unidos	
Design and evaluation of a fish-friendly water turbine	Farias 2016	Trabalho acadêmico	Brasil	
Development of research on measuring fish migration through dams.	Zhai; Wang 2018	Artigo	China	10.1088/1755-1315/191/1/012026
Design and Implementation of a Novel Autonomous Fish Sensor to Monitor Advanced Hydropower Development	Deng et al. 2014	Artigo	Etados Unidos	https://doi.org/10.1063/1.4900543
A hydropower biological assessment toolkit (HBET) to characterize the hydraulic conditions and impacts of hydraulic structures on fish.	Hou et al. 2018	Artigo	Etados Unidos	10.3390/en11040990
In situ characterization of turbine hydraulic environment to support the development of fish-friendly hydropower guidelines in the lower Mekong River region	Martinez et al. 2019	Artigo	Estados Unidos	
Support for expanding the application of fish sensor	Derolph; Bevelhimer, 2014	Artigo	Estados Unidos	

Fish passage through hydroelectric turbines: blade impact simulation using the discrete element method.	Richmond; Romero-Gomez, 2014	Artigo	Suécia	10.1088/1755-1315/22/6/062010
Downstream fish passage technologies for medium to large hydropower plants: part ii	Albayrak et al. 2019	Artigo	Suécia	https://doi.org/10.3929/ethz-b-000341761
Laboratory research on hydraulic losses in the inlet channel of Small Hydroelectric Power Plants with support for waste	Walczak; Walczak; Tymiński, 2022	Artigo	Polônia	https://doi.org/10.3390/en15207602
Optimizing hydropower turbines to facilitate fish passage in Khuzestan province	Mohammadi; Mohammadi; Mohammadi 2015	Artigo	Irã	10.22055/jacm.2014.10755
Perspective: Towards Ecologically Acceptable Criteria for Downstream Fish Passage in Small Hydropower and Irrigation Infrastructure in the Lower Mekong.	Baumgartner et al. 2014	Artigo	Bacia do Rio Mekong	https://doi.org/10.1063/1.4867101
Assessment of external fish damage caused by hydropower plants based on a new field-based protocol	Mueller; Pander; Geist 2017	Artigo	Alemanha	10.1111/fme.12229
Innovative solutions and new tools for hydroelectric fisheries	Harby; Berg; Rutschmann 2020	Artigo	Alemanha	
Creating a fish-friendly aquatic hydroelectric device Use an oscillating hydrofoil.	Chernjavsky, 2021	Relatório sobre o trabalho dos alunos de graduação da WPI	Estados Unidos	

European Fish Risk Index – An assessment tool to detect risks to fish from hydropower plants	Van Treeck et al., 2021	Artigo	Reino Unido e Alemanha	https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100903
Protecting migratory fish downstream of mini-hydroelectric plants and other river infrastructure	Boyce et al. , 2013	Relatório do estudo	Austrália	
Safe bidirectional migration of salmonids and eels beyond hydropower structures in Europe: review and recommendations for exemplary solutions	Fjeldstad; Pulg; Forseth, 2018	Artigo	Noruega.	https://doi.org/10.1071/mf18120
Design of rock ramps to ensure fish migration	Dumitran; Vu 2017	Artigo	Romênia	
Editorial: Vert ou rouge: les défis liés à l'hydroélectricité pour la conservation de la biodiversité des poissons et des eaux douces	Espírito, 2021	Artigo	Alemanha	10.1002/aqc.3597
Interactions between migratory salmonids and low-head hydropower projects	Brackley; Eng; Res, 2016	Tese	Escócia	
A study on the development of the Archimedes screw as a turbine.	Dewi Puspita Sari et al. 2021	Artigo	Indonésia	https://doi.org/10.37934/arfmts.87.1.151160
Fish passage downstream at the Hanover Lake Dam is facilitated by the use of an Archimedes screw generator.	Steeves; Malvezzi; Nebiolo, 2021)	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-774875/v1
Fish community interactions with very low head (VLH) turbine technology.	Tuononen, 2019	Dissertação	Canadá	
In situ characterization of the biological performance of a Francis turbine retrofitted with a modular guide blade.	Martinez et al., 2020	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.11549

Fish passage renewal: international best practices, current research and future developments	Redecker, 2019	Artigo		
Solving fish passage problems in hydropower and irrigation infrastructure projects in Indonesia.	Baumgartner; Wibowo 2018	Artigo	Indonésia	https://doi.org/10.1071/mf18088
Hydroelectricity development and loss of fisheries on the Mekong River.	Campbell; Barlow, 2020	Artigo	Bacia do Rio Mekong	10.3389/fenvs.2020.566509
Conference on Fish Passage in the Lower Mekong: Applying Innovation to Ensure Fisheries Productivity.	Baumgartner et al. 2017	Artigo	Bacia do Rio Mekong	10.1111/emr.12272
Optimization of Fishways to Improve Longitudinal River Connectivity for Small Hydropower Plants.	Piraianu, 2017	Artigo	Romênia	
Study of Key Technologies for Fishways in the West China Plains.	Mao et al., 2019	Artigo	China	https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00755
Fish-Adapted Operation of Small Hydropower Plants: An Economic Analysis	Merino; Brandimarte 2022	Dissertação	Suécia	
Survival of fish passing downstream at a small hydroelectric facility.	Amaral et al. 2018	Artigo	Estados Unidos, Canada	https://doi.org/10.1071/mf18123
Assessment of hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor	Fu et al. 2016	Artigo	Estados Unidos	http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.029
A hydropower biological assessment toolkit (HBET) to characterize the hydraulic conditions and impacts of hydraulic structures on fish.	Hou et al. 2018	Artigo	Estados Unidos	10.3390/en11040990
Physical and ecological evaluation of a fish-friendly surface spillway.	Duncan et al. 2018	Artigo	Estados Unidos	

Numerical modeling of fish passage and flow interaction in a hydroturbine.	Kassanos; Sanoudos-Dramalidis; Anagnostopoulos 2021	Artigo	Grécia	
Modeling mitigation measures for the migration of juvenile salmon in dammed river sections.	Mueller et al. 2020	Artigo	Noruega e Dinamarca	10.1002/eco.2131
Extent of injury and mortality caused by fish entrainment by a very low head hydroelectric turbine in central Ontario, Canada.	Tuononen et al. 2022	Artigo	Suíça	https://doi.org/10.1007/s10750-020-04376-x
Turbine blade crash tests for evaluation and optimization of a fish-friendly turbine.	Meng et al. 2022	Artigo	China	10.1088/1755-1315/1037/1/012058
Evaluation of the effects of turbine passage on internal fish injuries and late mortality using X-ray images.	Mueller et al. 2020	Artigo	Alemanha	10.7717/peerj.9977
Evaluation of the effects of shear stress on common carp passing through turbines.	Meng et al. 2021	Artigo	China	10.1088/1755-1315/774/1/012147
Migratory passage structures in hydroelectric plants as physiological and behavioral selective agents	Haraldstad et al. 2019	Artigo	Noruega	http://dx.doi.org/10.1098/rsos.190989
Horizontal bar grid diversion systems for downstream fish migration: state of knowledge, limitations and gaps	Meister et al 2018	Artigo	Suíça	https://doi.org/10.3929/ethz-b-000305990
Hydraulics of horizontal bar grates for fish migration downstream	Meister et al. 2019	Artigo	Suíça	10.3850/38wc092019-0369
Improved hydraulic performance of fish guidance structures with an innovative boom design.	Beck; Albayrak; Boes 2018	Artigo	Suíça	https://doi.org/10.3929/ethz-b-000289463

Effectively protect migrating salmon juveniles from entering hydropower turbines by using supports with inclined or closely spaced bars.	Tomanova et al. 2018	Artigo	França	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.034
Hydroelectric power and fishing: an action plan for best practice management.	Nielsen; Szabo-Meszaros 2022	Artigo	Suíça	
A numerical and experimental study on a 'fish-friendly' water turbine injector prototype	Airody 2017	Dissertação	Canadá	
Quantification of the risk of barotrauma for young fish when passing through the hydroturbine.	Richmond et al. 2014	Artigo	Estados Unidos	http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.007
What are the relative risks of mortality and injury to fish passing hydroelectric dams in temperate regions?	Dirk et al. 2020	Artigo	Canadá	https://doi.org/10.1186/s13750-020-0184-0
Integrating Fish Passage and Sediment Containment: A Conceptual Solution for Greater Sustainability of Dams and Reservoirs	Foldvik et al. 2022	Artigo	Noruega	https://doi.org/10.3390/w14121977
Computational prediction of pressure change near tidal stream turbines and its consequences for fish survival rate	Zangiabadi, 2017	Artigo	Reino Unido	http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.063

Downstream migration of Atlantic salmon fry in front of a low-head hydroelectric plant equipped with Archimedes screws and Francis turbines.	Havn et al. 2017	Artigo	Noruega	http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.04
Future of low head turbines in relation to the environment	Formaggio et al., sd	Artigo	Brasil	
Temporary management of turbine and reservoir levels to improve the descent of young salmon through a hydroelectric complex.	Tétard et al. 2021)	Artigo	França	https://doi.org/10.1051/kmae/2021004
Environmental effects of hydrokinetic turbines on fish: Studies in office and laboratory canals	Jacobson et al. 2012	Relatório de estudo	Estados Unidos	
Hydraulic and biological characterization of a large Kaplan turbine	Martinez et al. 2019	Artigo	Estados Unidos	https://www.sciencedirect.com/science/article/960148118308310
Improving survival: injury and mortality of fish struck by blades with steep and blunt leading edges	Amaral et al. 2020)	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1080/24705357.2020.176816
Predicting animal migration with SARIMAX: an effective way to reduce turbine-induced silver eel mortality.	Trancart et al. 2013	Artigo	França	10.3354/esr00517
Assessing the impact of hydropower on downstream migratory eels: catchment and fine-scale approaches to identify solutions.	Baker et al. 2020	Artigo	Nova Zelândia	

Descent of silver eels in fragmented rivers: using a Bayesian model to track onset and duration of movements.	Drouineau et al. 2017	Artigo	França	10.1051/alr/2017003
Susceptibility of juvenile musk eel to rapid decompression and fluid shear exposure associated with simulated passage through a hydroturbine.	Pflugrath et al. 2020	Artigo	Estados Unidos	10.3390/w12020586
Fish passage research report in China	Mao, 2018	Artigo	China	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.010
Assessment of existing research on fish passage through large dams and its applicability to major Mekong River dams	Stefan; Carina 2015	Relatório de estudo	Bacia do Rio Mekong	
Restoring connectivity for native migratory fish in a New Zealand river: effectiveness of a bridge upgrade.	Franklin; Bartels 2012	Artigo	Nova Zelândia	10.1002/aqc.2232
Assessment of fish abundance, biodiversity and movements in seasonal changes in a large river over 20 years.	Benitez et al. 2022	Artigo	Bélgica	https://doi.org/10.3390/ environments9020022
Improved fish passage inlet design involving an overflow attractor.	Redeker 2018	Artigo	Estados Unidos	10.15142/t3ws9r
Fish Passage in Large Rivers: A Literature Review.	Linnansaari et al., 2055	Relatório de estudo	Canadá	

Mitigating the Effects of Obstacles on Freshwater Fish Migration: The Australian Experience.	Harris et al. 2017	Artigo	Austrália	http://dx.doi.org/10.1071/mf15284
How to Master the Art of Building Functional Fishpasses	Adam, 2015	Artigo	Estados Unidos	
Efficiency of horizontally and vertically oriented grid screens for guiding juvenile squid (<i>Squalius cephalus</i>) moving downstream.	De Bie; Peirson e Kemp 2018	Artigo	Reino Unido	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.038
Protection of salmon fry descent in hydroelectric power plants with inclined racks and optimization of diversion water discharge.	Tomanova et l. 2021	Artigo	França	https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112012
Flow Fields Around Fish Guidance Structures.	Albayrak et al. 2015	Artigo	Suíça	
Design of Floating Fish Guidance Systems using CFD Modeling.	Kjærås et al. 2019	Artigo	Noruega	10.3850/38wc092019-0747
Effect of drift layout on the orientation of fish moving downstream in bar grid drift systems.	Boes et al. 2022	Artigo	Suíça	/10.3850/iahr-39wc2521716x2022537
Hydraulic efficiency and orientation of fish guidance structures.	Albayrak et al. 2018	Artigo	Suíça	

Use of surface diversion to protect downstream migration of migratory fish: lack of standardized evaluation criteria makes it difficult to assess effectiveness.	Klopries et al. 2018	Artigo	Alemanha	10.1071/mf18097
Improving diversion performance and passage success of Atlantic salmon fry at a fish-unfriendly former hydroelectric plant: a tough challenge.	Ovidio et al. 2021	Artigo	Bélgica	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106148
Protection and guidance of fish moving downstream through diversion systems with horizontal bars.	Meister et al., 2022	Artigo	Suíça	https://doi.org/10.3390/w13192786
Hydraulic and biological performance of fish on fish guidance structures with curved bars.	Beck, 2019	Artigo	Suíça	10.3850/38wc092019-0434
Monitoring at inputs and outputs: protective measures for the eel (<i>Anguilla anguilla</i>).	Sheridan et al. 2013	Artigo	Reino Unido	10.2495/978-1-84564-849-7/002
Conceptual approach to positioning fish guidance structures using CFD and expert knowledge.	Feigenwinter et al. 2019	Artigo	Suíça	10.3390/su11061646
Swimming behavior of fish moving downstream in innovative diversion systems with curved bar grates for fish protection at water inlets.	Beck et al. 2020	Artigo	Suíça	10.3390/w12113244

Protection and guidance of fish moving downstream with electrified horizontal bar rack diversion systems.	Meister et al. 2021	Artigo	Suíça	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106584
Field investigation on the hydraulic and fish guidance effectiveness of a rack diverter system with horizontal bars.	Maddahi et al. 2022	Artigo	Suíça	https://doi.org/10.3390/w14050776
Ethohydraulic experiments on the fish protection potential of the fishprotector hybrid system in hydroelectric plants.	Tutzer et al. 2021	Artigo	Áustria	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106370
A physical and behavioral barrier to promote fish migration below hydroelectric dams: The fishprotector flexible.	Tutzer et al. 2022	Artigo	Áustria	https://doi.org/10.3390/w14030378
Upgrading existing boom structures with electrodes for fish protection: an experimental study evaluating the effectiveness of a pilot site.	Haug et al. 2022	Artigo	Áustria	https://doi.org/10.3390/w14060850 editores acadêmicos: laurent d
Fish protection structures and fish passage in facilities.	Baba, sd	Artigo	Japão	
Assessment of the effects of small hydropower plants on aquatic life and the ecological state of the White Cheremosh River, with an international approach.	Afanasyev et al. 2017	Artigo	Ucrânia	
Low mortality rate of silver eels (<i>Anguilla anguilla</i> L.) pass by a small hydroelectric plant.	Bernaś et al. 2017	Artigo	Polônia	10.1071/mf16396

Prediction of the hydraulic impact of hydroelectric operations on the upstream aquatic habitat.	Langford; Zhu; Leake 2016	These	Canadá	
Downstream migration of juvenile Atlantic salmon at three hydropower plants in Germany.	Havn et al. 2017	Relatório de estudo	Alemanha	
Downstream fish passage criteria for hydropower and irrigation infrastructure in the Murray-Darling basin.	Boys et al. 2014	Relatório de estudo	Nova Gales do Sul	
Studies on downstream migrating silver phase European eels (<i>Anguilla anguilla</i>) in hydroelectrically regulated rivers.	Lenihan 2020)	Tése	Irlanda	
A comparison of parameters to assess the effects of hydroelectric installations on fish.	Redeker 2018	Artigo	Canadá	
A numerical approach to modeling active fish behavior in hydropower plant assessments.	Powalla et al. 2022	Artigo	Alemanha	10.1016/j.renene.2022.02.064
Development of a biomimetic fish prototype to improve understanding of damage caused by the impact of hydroelectric turbine blades.	Saylor et al. 2021	Artigo	Estados Unidos	10.7717/peerj-matsci.16
Development of a study on the spatial ecology and biological responses of wild fish to hydroelectricity in the Winnipeg River.	Struthers 2016	Dissertação	Canadá	

Multi-species assessment of injuries, mortality and physical conditions during passage through a large Archimedes hydrodynamic turbine.	Pauwels et al. 2020	Artigo	Bélgica	
Susceptibility of river fish to anthropogenic hazards Trauma: Impact injury: Impacts from hydroelectricity on power turbine blades.	Saylor 2021	Dissertação	Estados Unidos	
Himalayan aquatic biodiversity and hydroelectricity: Review and recommendations.	Adeva et al. 2021	Relatório de estudo	Nepal	
Renovation of the dam to extend the life of the reservoir and mitigate its impacts.	Kondolf; Yi 2022	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/ 10.3390/w14091464
Fish protection and migration – current state of knowledge and ongoing research projects in Austria.	Böttcher et al., 2015	Artigo	Áustria	10.1007/s00506-015-0248-5
Safe passage for American eels through new hydroelectric turbine	Watson et al., 2022	Artigo	Estados Unidos	10.1002/tafs.10385
Multispecies migratory passages in a Mediterranean river: contributions as migratory corridors and compensatory habitat for fishes	Sánchez-Pérez et al., 2022	Artigo	Espanha	http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.1546
Study of a vertical fish passage - Evaluation of flow dynamics through a standardized deviation and the effect of predefined roughness elements	Garcia; Rodríguez 2020	Dissertação	Suécia	
Options for restoring river continuity, with emphasis on the special "fish elevator" solution: examples from Austria.	Schletterer; Reindl; Thonhauser 2016	Artigo	Áustria	

Numerical simulation of fish behavior and movement through passages	Abdelaziz, 2013	Tese	Alemanha	
Use of the 'catch and carry' technique to facilitate the migration of the European eel (<i>Anguilla anguilla</i>), which lives in landlocked areas, to the sea from lakes and reservoirs	Piper et al., 2020	Artigo	Reino Unido	https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105567
Influence of lock operation on the migratory behavior of Atlantic salmon <i>Salmo salar</i> (L.) smolts	Gardner, Rees e Bryant, sd	Artigo	Reino Unido	
A new framework for evaluating roughness elements in promoting fish passage in low-head structures	Magaju et al., 2020	Artigo	Nova Zelândia	https://doi.org/10.1080/24705357.2020.173896
Hydraulics and design of fish passages II: vertical passages and rock spillways	Baki;Azimi 2021	Artigo	Estados Unidos	10.1080/24705357.2021.1981780
Fish passage - Bulgarian tradition	Marmulla et al., 2022	Artigo	Bulgária	
Laboratory studies on fish rheotaxis under different attraction flow conditions	Tang et al. outros 2022	Artigo	China	https://doi.org/10.3390/ijerph19095744
Passage efficiency and migratory behavior of adult Atlantic salmon in a Half-Ice Harbor fishway	Karlsson, 2013	Dissertação	Suécia	
Review of traps and transport for the management of Pacific salmonids (<i>Oncorhynchus</i> spp.) in retained river systems	(Kock; Keefer, 2020)	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1007/s11160-020-09627-7
Numerical study of hydraulics in a vertically slotted fish passage with improved configurations	(Ahmadi et al., 2021)	Artigo	Irã	https://doi.org/10.3390/w13192711

Application of the smoothed particle hydrodynamic calculation method for the simulation of poisson transposition mechanisms in hydroelectric power	(GOMES, 2017)	Dissertação	Brasil	
Brown trout upstream passage performance for a fishway with interpool waterfalls beyond fishway design recommendations	Bravo-Córdoba et al. 2022	Artigo	Espanha	https://doi.org/10.3390/w14172750
Contributions of behavioral monitoring by biotelemetry to evaluate the effectiveness of the fish ladder of the Maka dam in Bocq	Bourguignon, 2025	Dissertação	Bélgica	http://hdl.handle.net/2268.2/1598
Evaluation of Bar Support Designs to Allow Downstream Passage of Silvery American Eels at Hydroelectric Facilities	Melong 2014	Tese	Estados Unidos	https://digitalcommons.wpi.edu/etd-theses/139
Design and sizing of fish-friendly water inlets	CourretD, 2013	Conferência	França	
Examination of the fish protection and guidance effect of "flexible electrified fish fence" as a function of electric field	Haug 2018	Memória	Austrália	
Quantifying collective fish response to hydrodynamics to improve downstream fish passage facilities	Bie, 2017	Tese	Reino Unido	
Mortality and behavior of Atlantic salmon smolts related to hydropower in the Sieg, a German tributary of the Rhine	Havn et al., 2018	Artigo	Noruega	10.1007/s10750-017-3311-3

Suitable consumption for fish in small hydro “h-rista”	Navarro, 2014	Dissertação	Noruega	
Can the sound of feeding attract flowerfish (<i>Ptychobarbus kaznakovi</i>)?	Wang et al., 2021	Artigo	Alemanha	https://doi.org/10.1007/s00359-021-01501-6
Quantification of the movement and behavior of the migratory European eel (<i>Anguilla anguilla</i>) in relation to the physical and hydrodynamic conditions associated with river structures	Piper, 2013	Tese	Royaume-Uni	
Experiments on the hydraulic and swimming reactions of juvenile Chinook salmon upon encountering a floating guide structure	Tullos, 2018	Dissertação	Estados Unidos	
Effectiveness of a fish guidance device for migratory Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i> L.) smolts in the Piteälven River, northern Sweden	Vikström, 2016	Dissertação	Suécia	
Fish protection in Germany: first steps on a long and difficult path	Redeker 2013	Artigo	Alemanha	10.2495/978-1-84564-849-7/003
Study of water collection grids compatible with fish	Lemkecher 2021	Tese	França	
Aspects of the management of salmonid communities in the Caraş River Gorge – technical solutions	Voicu et al. 2018	Artigo	Romênia	
Mortality and injury rates of small fish passing through three diversion dam spillway projects	Bestgen; Mefford; Compton 2018	Artigo	Estados Unidos	10.1016/j.ecoleng.2018.09.003
What data should be collected and how should mortality of eels flowing into hydropower facilities be estimated?	Labadan; Sagnes 2021	Relatório de estudo	França	
Mitigating the impacts of dams on fishing	Phan, 2017	Relatório de estudo	Bacia do Rio Mekong	

Fish injuries and deaths in hydroelectric plants: study of the Angical, Luís Eduardo Magalhães and Narrow Fish plants	Carvalho, 2019	Tese	Brasil	
Effects on survival and behavior of exposure to a hydrokinetic turbine in juvenile Atlantic salmon and adult American shad	Castro-Santos; Haro 2015	Artigo	Estados Unidos	10.1007/s12237-013-9680-6
Injuries and mortality of two Mekong species exposed to turbulent shear forces	Colotelo et al. 2018	Artigo	Estados Unidos	https://doi.org/10.1071/mf18126
Quantifying the effect of Kaplan rotor blade clearances on fish-related flow conditions	Romero-Gomez; Colotelo; Weissenberger 2021	Artigo	Áustria	10.1088/1755-1315/774/1/012148
Hydraulic turbine model Archimedes screw	(Frizon; Scartazzinni 2015	Artigo	Brasil	
Fish-friendly turbine design methodology using optimization techniques based on experimental design	Río, 2018	Tese	Brasil	
Ecological fish monitoring using the hydrodynamic screw "HYDROCONNECT" with "Albrecht fishlift inside" in the Jeßnitz river in Lower Austria	Zeiringer 2015	Tese	Áustria	
The behavioural ecology of migratory salmonids in the River Tweed	Gauld, 2014	Tese	Royaume-Uni	http://etheses.dur.ac.uk/10722/
Development of hydraulic projects and corresponding analysis of ecological factors	Yao 2020	Artigo	China	10.33552/ctcse.2020.05.000615

Numerical simulation of fish passage over a spillway	Kaminski; Thorenz 2021	Artigo	Allemagne	https://doi.org/10.26077/d58d-6bcc
Quantifying stressors and predicting injuries and mortality in fish passing downstream past dams and turbines	Pflugrath, 2017	Tese	Australie	https://doi.org/10.26190/unsworks/20083
Improving hydroturbine pressure to improve salmon survival and recovery during passages	Trumbo et al. outros 2014	Artigo	Estados Unidos	10.1007/s11160-013-9340-8
Model investigations in a juvenile fish diversion system at Urridafoss Hep	Guðmundsson 2013	Dissertação	Islândia	
Mitigate and manage barriers to fishing passage and improve river connectivity	Cramp et al. 2021	Relatório de estudo	Australia	
Determining the effects of anthropogenic drainage structures on inanga (<i>Galaxias maculatus</i>) in lowland watercourses of Hawke's Bay, New Zealand.	Halstead, 2022	Dissertação	Nova Zelândia	
Silver eel migration in the Rhine, route choice and impacts on escape: a 6-year telemetry study in a highly anthropized system	Trancart et al. 2018	Artigo	França	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.002

ANEXO - PARECER TÉCNICO

302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte – Palmas/TOCEP:77006-336|TEL.:(63)3218-

**PARECER TÉCNICO DE MONITORAMENTO
AMBIENTAL 1084-
GEINSP/2024**

PALMAS, 30 de junho de
2024

1. IDENTIFICAÇÃO

ENDEREÇO: Trecho do médio rio Tocantins, Jusante da UHE-Estreito.

MUNICÍPIO: Estreito/Aguiarnópolis.

**2. DADOS DO
RELATÓRIO**

LATITUDE: -6°33'45.006"S

LONGITUDE: -47°27'29.364"O

3. INTRODUÇÃO

No dia 16 de maio de 2024, foi recebida uma denúncia através do ofício nº 27/2024 da colônia de pescadores Z-35, cujo teor tratava-se da mortandade de peixes à jusante do barramento da Usina Hidrelétrica de Estreito (UHE-Estreito), entre os municípios de Estreito e Aguiarnópolis,



A denúncia foi formalizada pelo Presidente da Colônia de Pescadores, Sr. Edivaldo Fernandes Lima Rocha, informando sobre o dano ambiental.

A apuração dos fatos foi realizada pela Inspeção Ambiental do NATURATINS *in loco*, com apoio da APA do Cantão (empréstimo de equipamentos e barqueiro) e Universidade Federal do Tocantins/UFT, *campus* Porto Nacional, representada pelo Biólogo pesquisador Everton Faustino de Oliveira que teve a participação na identificação dos exemplares. A missão teve como finalidade principal investigar e



TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



identificar a possível causa da mortandade de peixes e seus autores, no entanto foram detectados outros problemas ambientais que serão relatados neste relatório.

4. ANÁLISE TÉCNICA

O início das atividades de Inspeção Ambiental, no trecho do rio Tocantins, impactado pela mortandade, ocorreu no dia 11 de abril do corrente ano, com uma primeira visita técnica ao local, iniciando o percurso pela margem direita e a jusante do barramento da UHE-Estreito.

O volume de vazão de água no local é controlado, com variação aproximada de 1m entre os períodos dia/noite. Em relação aos parâmetros físicos: taxa de oxigênio dissolvido (%)



Documento assinado eletronicamente por EDER JOFRE ALVES WANZELER em 02/08/2024 às 16:27:18

Conforme decreto municipal nº 114/E de 02 de agosto de 2018 e decreto federal nº 8539, art. 7 de 08 de outubro de 2015

Verifique a autenticidade deste documento em <https://sigam.to.gov.br/cadastrousuarioexterno/verificacao.aspx> informando o código: 748F92F

302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TO CEP: 77006-336 | TEL.: (63) 3218-
localizado à jusante do barramento da UHE-Estreito, entre os municípios de Aguiarnópolis/TO
e Estreito/MA até a foz do rio Itaueiras (**FIGURA 02**).



FIGURA 02 – Localização dos cadáveres de peixes em decomposição no trecho à jusante do reservatório da UHE-Estreito.

Nos 12,6 km da drenagem do rio Tocantins monitorado, no período de abril a junho de 2024, ficou evidenciado a mortandade de cento e quinze (115) exemplares de peixes, pertencentes a doze (12) espécies e um (1) exemplar de mamífero “boto”, da espécie *Inia araguaiaensis*, os quais foram filmados/fotografados e estão descritos na **Tabela 02** a seguir:



302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TOCEP:77006-336|TEL:.(63)3218-

do reservatório da UHE-

Tabela 02. Distribuição dos exemplares encontrados mortos, à jusante

Estreito, identificados por espécies, ao longo dos meses de abril a junho de 2024.

Nº de exemplar	Nome popular	Dia	Espécie
1	Cuiú cuiú amarelo	11/04	<i>Megalodoras uranoscopus</i>
1	Corvina	14/05	<i>Plagioscion squamosissimus</i>
1	Jaú	15/05	<i>Zungaro zungaro</i>
1	Jaú	15/05	<i>Zungaro zungaro</i>
1	Cuiú cuiú amarelo	15/05	<i>Megalodoras uranoscopus</i>
1	Cuiú cuiú preto	15/05	<i>Oxydoras niger</i>
1	Corvina	16/05	<i>Plagioscion squamosissimus</i>
7	Peixe cachorro	17/05	<i>Hydrolycus tatauaia</i>
4	Sorubim	17/05	<i>Pseudoplatystoma tigrinus</i>
10	Cuiú cuiú preto	17/05	<i>Oxydoras niger</i>
8	Barbado	18/05	<i>Pinirampus pirinampu</i>
1	Boto	19/05	<i>Inia araguaiaensis</i>
1	Jaú	03/06	<i>Zungaro zungaro</i>
1	Pirarara	03/06	<i>Phractocephalus hemiliopterus</i>
1	Raia	09/06	<i>Potamotrygon henlei</i>
1	Caranha	10/06	<i>Colosoma macropomum</i> x <i>Piaractus brachypomus</i>
2	Barbado	10/06	<i>Pinirampus pirinampu</i>
64	Corvina	14/06	<i>Plagioscion squamosissimus</i>
3	Cuiú cuiú amarelo	09/06	<i>Megalodoras uranoscopus</i>
2	Jaú	10/06	<i>Zungaro zungaro</i>
1	Cuiú cuiú preto	19/06	<i>Oxydoras niger</i>
1	Jaú	21/06	<i>Zungaro zungaro</i>
1	Tucunaré	26/06	<i>Cichla kelberi</i>
1	Corvina	30/06	<i>Plagioscion squamosissimus</i>
116	-	-	12 TOTAL

Em algumas carcaças dos animais encontrados foram realizados os exames físicos *in loco* com a finalidade de identificação da causa da morte, tais como: medida corporal com auxílio de trena; presença ou ausência de ferimentos (lesão) no corpo e brânquias; bem como



TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



Documento assinado eletronicamente por EDER JOFRE ALVES WANZELER em 02/08/2024 às 16:27:18

Conforme decreto municipal nº 114/E de 02 de agosto de 2018 e decreto federal nº 8539, art. 7 de 08 de outubro de 2015

Verifique a autenticidade deste documento em <https://sigam.to.gov.br/cadastrousuarioexterno/verificacao.aspx> informando o código: 748F92F

302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TOCEP:77006-336|TEL.:(63)3218-
identificação de ossadas espalhadas ao longo da margens direita e esquerda à jusante do
reservatório da UHE-Estreito (FIGURA 03).



FIGURA 03 – Exame físico *in loco* com tomada das medidas corporais e identificação de ossadas.

O exame físico revelou que o dano ambiental vem ocorrendo na maioria dos casos com animais de grande porte, com algumas matrizes, como é o caso do jaú *Zungaro zungaro*, que é responsável pela manutenção e repovoamento dessa espécie na drenagem interrompida, conforme figura abaixo (FIGURA 04).



302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TO CEP: 77006-336 TEL: (63) 3218-



FIGURA 04 – Identificação da bexiga natatória (cheia de gás) no exemplar de Jaú.

Entre as carcaças recolhidas, três exemplares de *Hydrolycus tatauaia* foram mortos recentemente, os quais foram selecionados para o exame e necropsia *in loco*, na busca por evidências da causa da morte. As análises revelaram:

- a) **Exemplar 01:** presença de ferimentos na cabeça, no opérculo e região ventral do corpo abaixo da nadadeira peitoral.
- b) **Exemplar 02:** cabeça decepada.
- c) **Exemplar 03:** sem lesões aparentes na região externa e interna do corpo.

Também foi encontrado a cabeça de um exemplar de *Oxydoras niger* (**FIGURA 05**). Outros animais em elevado grau de decomposição apresentavam ferimentos no corpo, as brânquias estavam com aparência normal, porém as bexigas natatórias apresentavam completamente cheia de gás, as quais auxiliam os peixes ósseos a manterem-se a determinada profundidade, através do controle da sua densidade corporal em relação à da água (**FIGURA 04**).



FIGURA 05 – Ne

necropsia nos cadáveres dos animais





302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TOCEP:77006-336|TEL.:(63)3218-

A mortandade dos peixes à jusante do reservatório da UHE-Estreito caracteriza dano ambiental, o qual está relacionado a interrupção do fluxo migratório das espécies e abertura das turbinas e vertedouros.

Estudos têm indicado que as taxas de mortalidade variam de 0 a 20% para turbinas Kaplan (Therrien & Bourgeois, 2000), essas são idênticas as operadas na UHE-Estreito. Segundo Cada (2001), variações súbitas na pressão, choque e compressão contra as pás, desorientação devido à alta turbulência no tubo de sucção e consequente susceptibilidade a predadores são as principais causas de morte de peixes migradores que tentam atravessar a barragem através das turbinas.

Outro impacto direto a ictiofauna é oriundo do barramento, o qual gera interrupção de rotas migratórias das espécies migradoras e tende a formar acúmulo de peixes no sopé das barragens. Este acúmulo acaba desencadeando outros impactos, tais como a mortandade de peixes em turbinas hidráulicas e vertedouros (Agostinho *et al.*, 1993).

As manobras de parada de máquinas de geração de energia para manutenção periódica, podem ocasionar mortandades, neste caso associadas à entrada de cardumes de peixes no interior dos tubos de sucção durante a parada, pois neste momento, a mortandade está associada à entrada de cardumes de peixes no interior dos tubos de sucção.

Mortandade são também observados quando ocorre a passagem de peixes por turbinas no sentido montante-jusante (Silva *et al.*, 2006).

Ressalta-se que a mortalidade de peixes é considerada danos à fauna pela legislação federal (e.g., Lei de Crime Ambientais, Lei 9.605 de 13/02/98) e, portanto, sujeita as penalidades.

II - INTRODUÇÃO DE ESPÉCIES INVASORAS e MORTE DE PEIXES

Outro dano ao meio ambiente foi caracterizado pela introdução da espécie invasora *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), conhecida popularmente no Brasil como Mexilhão-dourado e internacionalmente como goldem mussel, pertencente a família Mytilidae, que está representada em maior parte por mexilhões que habitam oceanos e estuários. O mexilhão-dourado tem distribuição original restrita à China, mas se expandiu para outros países da Ásia e para América do Sul.

Vale destacar que a presença da espécie *Limnoperna fortunei*, segundo o Art. 3º, da Portaria do IBAMA nº102 de 15. jul.1998, é considerada fauna exótica, pois a introdução da mesma, bem como a sua dispersão é uma ameaça a diversidade biológica local.



302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TOCEP:77006-336|TEL.:(63)3218-

O mexilhão dourado está presente no interior e fora do reservatório da UHE-Estreito, sendo as características sésil (que se fixa a estruturas rígidas), gregária (que forma macroaglomerados de indivíduos) e grande capacidade de proliferação tornam esta espécie com potencial de causar grandes prejuízos ao meio ambiente e socioeconômico. O potencial invasor desta espécie ocasiona obstrução das tubulações e equipamentos em instalações hidrelétricas, que tem que forçar a realização de limpezas mecânicas e periódicas dos sistemas geradores para não ocasionar comprometimento na geração de energia.

As amostras coletadas à montante e à jusante do reservatório da UHE-Estreito estão ilustradas na **FIGURA 06**.



FIGURA 06 – Amostras de mexilhão dourado à jusante e montante do barramento UHE-Estreito.

Entre os impactos ao meio ambiente já citados, cabe ressaltar que também foi constatado a presença de um exemplar de peixe exótico, pertencente a Ordem Characiformes e Família Serrasalminidae, encontrado morto à jusante da usina UHE-Estreito (**FIGURA 07**). O mesmo foi identificado como híbrido de *Colosoma macropomum* x *Piaractus brachipomus* e de acordo Art. 3º da Portaria 1 02/1998, de 15. jul. 1998 do IBAMA, esse exemplar pode ser enquadrado como espécie exótica.



FIGURA 07 – *Colosoma macr*

hido morto à jusante do



TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



barramento da UHE-Estreito.



TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



Documento assinado eletronicamente por EDER JOFRE ALVES WANZELER em 02/08/2024 às 16:27:18

Conforme decreto municipal nº 114/E de 02 de agosto de 2018 e decreto federal nº 8539, art. 7 de 08 de outubro de 2015

Verifique a autenticidade deste documento em <https://sigam.to.gov.br/cadastrousuarioexterno/verificacao.aspx> informando o código: 748F92F

302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TOCEP:77006-336|TEL.:(63)3218-

O ilícito ambiental ficou caracterizado pela operação de atividade de piscicultura e introdução de espécie exótica ou não autóctones em águas jurisdicionais brasileiras “ lago da UHE-Estreito” sem autorização ou Licença de Operação do Órgão Ambiental Competente, localizada na cordenada -06°43'27.18" S -47°28'56.43" W.

O enquadramento desta atividade por desobediência aos artigos:

Art. 70, parágrafo § 1º da(o) LEI Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1988,

Art. 72, Inciso II, da(o) LEI Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1988,

Art. 38, da(o) Decreto Federal nº 6.514, de 22/07/2008.

O senhor Vinícius Gonçalves de Carvalho, CPF: 011.992.331-96, end. Rua 15 de Novembro, nº 495, município de Tocantinópolis - Tocantins, complemento, CEP: 77900000, foi multado em trinta mil reais (R\$30.000,00) em decorrência das infrações citadas anteriormente.

Além do mais a Inspeção Ambiental do NATURATINS constatou *in loco*, no dia 09 de junho de 2024, que os 24,302 ha de tanques redes da área aquícola, do município de Darcinópolis – TO, haviam sido deslocados da margem esquerda para margem direita, ou seja, do estado do Tocantins para o Estado do Maranhão, coordenada -06°43'58.428"S 47°29'23.538"W, sem a devida ciência do NATURATINS, provavelmente para eximir da multa aplicada em decorrência do ilícito ambiental. Para tanto, por tratar-se de rio Federal o NATURATINS encaminha este parecer ao conhecimento do IBAMA para tomar as medidas cabíveis (**FIGURA 08**).

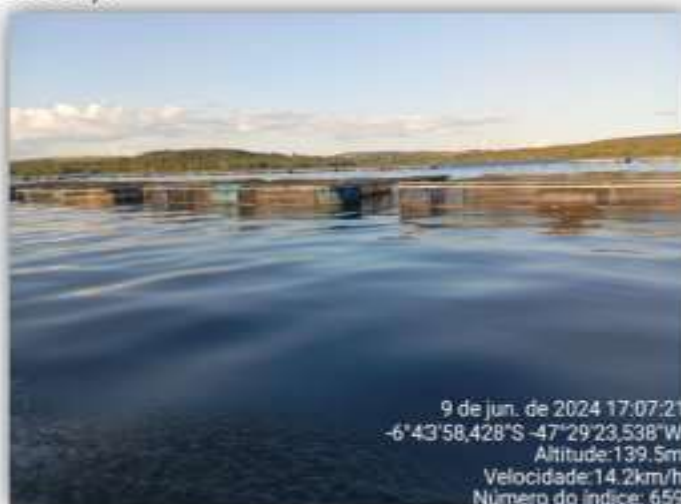


FIGURA 08 – *ocalização atual dos tanques redes da área aquícola no estado do Maranhão, no reservatório da UHE-Estreito.





TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



Conforme decreto municipal nº 114/E de 02 de agosto de 2018 e decreto federal nº 8539, art. 7 de 08 de outubro de 2015

Verifique a autenticidade deste documento em <https://sigam.to.gov.br/cadastrousuarioexterno/verificacao.aspx> informando o código: 748F92F

302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TO CEP: 77006-336 | TEL.: (63) 3218-

III - MORTE DE MAMÍFERO “BOTO” - IMPACTO INDIRETO

Outro impacto ambiental foi encontrado, no dia 03 de junho do corrente ano, na foz do rio Itaeiras à jusante da barragem da UHE Estreito, um exemplar de boto morto e preso a galhadas, pertencente a espécie *Inia araguaiaensis*, em grau avançado de decomposição (FIGURA 09).



FIGURA 09 – Exemplar de *Inia araguaiaensis* morto à jusante do barramento da UHE-Estreito.

IV – ARMADILHAS DE ESPERA DO TIPO ESPINHEL E IMPACTO A ICTIOFAUNA

No dia 30 de maio a equipe de Inspeção Ambiental do NAURATINS recolheu e conduziu a sede do NATURATINS, em Palmas, vários equipamentos usados em pesca predatória:

- 1- Bóias, galões e joões bobos espalhados à jusante do barramento da UHE-Estreito.
- 2- Espinhéis, aproximadamente 3,5 mil metros de cabo espalhados no leito do rio Tocantins a menos de 1000 metros do pé da barragem.

Os peixes encontrados presos aos anzóis dos espinhéis foram soltos imediatamente no local (FIGURA 10).





TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



Verifique a autenticidade deste documento em <https://sigam.to.gov.br/cadastrousuarioexterno/verificacao.aspx> informando o código: 748F92F

302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TO CEP: 77006-336 | TEL.: (63) 3218-



FIGURA 10 – Apreensão de 3,5 mil metros de armadilhas de espera do tipo “esp” e peixe fizado ao anzol, no leito do rio Tocantins à jusante do barramento da UHE-Estreito.

De acordo com a Instrução Normativa Interministerial MPA/MMA nº13/2011 é proibida a pesca com a utilização de apetrechos e métodos como espinhel ou outro qualquer aparelho cujo comprimento ultrapasse 1/3 da largura do ambiente aquático; armadilhas com a função de espinhéis que utilizem cabo metálico, fisga; caseia ou bubuia; boias, galões.

Também é proibida a pesca a menos de 1000m à jusante e à montante das barragens de empreendimentos.

4. EXIGÊNCIAS

- 1- Monitorar as paradas programadas para manutenção periódica das máquinas de geração de energia e formação de acúmulo de peixes no sopé das barragens, assim como evitar novos episódios de morte de peixes.

OBS.: As paradas deverão ser acompanhadas por biólogos credenciados e acreditados por ARTs e deverão ser agendadas com o NATURATINS para que o Inspetor de Recursos Naturais do órgão realize o acompanhamento das mesmas.

- 2- Apresentar um plano de monitoramento de distribuição e abundância da espécie invasora *Limnoperma fortunei*, ao longo da drenagem do rio Tocantins, compreendido entre os municípios de Palmeirante até Tocantinópolis, contemplando o papel das espécies nativas potencialmente predadoras: (Cuiú-cuiú amarelo) *Megalodoras uranoscopus* e (Mandi moela) - *Pimelodina flavipinnis* em busca de controle da espécie exótica.





TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



Verifique a autenticidade deste documento em <https://sigam.to.gov.br/cadastrousuarioexterno/verificacao.aspx> informando o código: 748F92F



TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TOCEP:77006-336|TEL.:(63)3218-

OBS.: A ação de monitoramento deverão ser realizadas por biólogos credenciados e acreditados por ARTs e deverão ser agendadas com o NATURATINS para que o Inspetor de Recursos Naturais do órgão realize o acompanhamento das mesmas.

- 3- Apresentar um plano de monitoramento da ictiofauna com ênfase nas espécies (1º) e (2º) abaixo, abordando os aspectos de distribuição e abundância na área de influência do reservatório:

1º) “Híbrido” - *Colosoma macropomum* x *Piaractus brachypomus*;

2º) “Tilápia” - *Oreochromis niloticus*.

OBS.: O período deste levantamento deverá acontecer entre os meses de setembro à dezembro, contendo laudo completo para as espécies da ictiofauna afetada.

- 4- Apresentar um plano de monitoramento dos “Botos”- *Inia araguaiaensis*, abordando os aspectos de distribuição e abundância em toda área de influência do reservatório, no período compreendido entre setembro de 2024 à setembro de 2026.
- 5- Realizar ação de educação ambiental, palestra e apresentação de cartilha de pesca do NATURATINS, na colônia de pescadores Z-35, para conscientização dos ribeirinhos sobre uso legal e correto de apetrechos de pesca.

5. CONCLUSÃO

De acordo com as observações realizadas em campo e ratificado pelo registro fotográfico, pôde-se constatar que houve morte de peixes e mamíferos; introdução de três espécies exóticas, sendo um molusco *Limnoperma fortunei*, e duas de peixes *Colosoma macropomum* x *Piaractus brachypomus* e *Oreochromis niloticus* e, em consequência disso, a ocorrência grave de dano ambiental em um rio Federal.

Assim sendo, encaminho este parecer para a Superintendência do IBAMA/Palmas e Diretoria de Fiscalização do NATURATINS, para que os responsáveis adotem as medidas cabíveis referentes ao caso em questão.



6. BIBLIOGRAFIA

Agostinho, A. A., Mendes, V. P., Suzuki, H. I., Canzi, C. Avaliação da atividade reprodutiva da comunidade de peixes dos primeiros quilômetros a jusante do reservatório de Itaipu, *UNIMAR*, 1993, no 15, Supl., p. 175-189.

Cada, G.F. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*. 2001, vol. 26, nº9, p. 14-23.

DARRIGRAM, G.; EZCURRA-DE-DRADO, I. Distribución de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) en La Cuenca Del Plata, Region Neotropical. *Medio Ambiente*, v. 13, n.2, p.75-79, 2000.

Therrien, J, & Bourgeois, G. *Fish Passage at Small Hydro Sites*. Report by Genivar Consulting Group for CANMET Energy Technology Centre, Ottawa, 2000.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente (SEPLAN). Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA). Resolução COEMA nº 07, de 09 de agosto de 2005. Dispõe sobre o Sistema Integrado de Controle Ambiental do Estado do Tocantins. Publicada no DOE nº 2.001, de 09 de setembro de 2005, páginas 14-30.

BRASIL. **Lei 9.605 de 13 de fevereiro 1998**. Dispõe sobre os Crimes Ambientais. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm

BRASIL. Portaria 102/1998, de 15. jul.1998. Dispõe fauna exótica. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=102784>

BRASIL. **Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>.

BRASIL. **Resolução CONAMA 274, de 29 de novembro de 2000**. Define os critérios de





TOCANTINS
GOVERNO DO ESTADO



302 Norte, Alameda 01, Lote 03 – Plano Diretor Norte –
Palmas/TO CEP: 77006-336 | TEL.: (63) 3218-
balneabilidade em águas brasileiras.
em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=272>>.

Disponível

Silva, L. G. M., Martinez, C. B.,b FORMAGIO, P. S. Uso de luz estroboscópica para repulsão de peixes de áreas de risco em usinas hidrelétricas. In: *V SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS FLORIANÓPOLIS – SC*, 2006.

