

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA/PPG-EEL -  
ITAJUBÁ**

**DIEIMYS SANTOS RIBEIRO**

**IMPACTOS DA OPERAÇÃO INTERMITENTE DE UHES NA MORTANDADE DE  
PEIXES DEVIDO À SUPERSATURAÇÃO GASOSA**

Tese submetida ao Programa Doutorado  
em Engenharia Elétrica/PPG-EEL – Itajubá  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do Título de Doutor em  
Engenharia Elétrica

Área de concentração: SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Orientador: Prof. Guilherme Sousa Bastos

Co-orientador: Prof. Carlos Barreira Martinez

Julho de 2026

Itajubá – MG

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta tese, com todo o amor e gratidão, à minha esposa, Edilaine Fátima Espolarhic Mariano Ribeiro, cuja força, paciência e carinho inabaláveis sustentaram cada etapa desta jornada. Sua presença ilumina minha vida e seu apoio constante me inspira a melhorar como indivíduo.

À nossa filha, Lara Mariano Ribeiro, minha fonte de alegria e esperança, dedico cada palavra escrita aqui, na esperança de que este trabalho simbolize um futuro em que todos os sonhos são possíveis. Vocês duas são meu motivo, minha força e a mais doce realização. Com todo meu amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado a oportunidade de estudar e de realizar conquistas importantes em minha vida.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo esforço e dedicação aos filhos e, sobretudo, pela doação de vida que me permitiu chegar a esta etapa. Pelos valores, pelo exemplo de trabalho e pelos sacrifícios silenciosos que sustentaram cada escolha ao longo do caminho — minha gratidão é permanente.

Agradeço também à minha esposa, Edilaine Fátima Espolarhic Mariano Ribeiro, e à minha filha, Lara Mariano Ribeiro, que me incentivaram de todas as maneiras e sempre me apoiaram em todos os momentos.

Quero agradecer imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Sousa Bastos, que me instruiu, corrigiu e incentivou durante esta jornada.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez, que sempre me incentivou, instruiu, apoiou, direcionou e escutou incansavelmente minhas dúvidas, frustrações e conquistas.

Agradeço ao Sc. Dr. Guilherme Ferraz, que me ajudou, incentivou e direcionou com sua experiência em momentos decisivos para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço a todos os professores do Programa de Doutorado em Engenharia Elétrica, pelo conhecimento transmitido e, principalmente, pelo suporte prestado.

Agradeço à SINOP Energia por acreditar no potencial do nosso trabalho, pela contribuição financeira e pelo apoio técnico, bem como ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL.

A todos vocês, meu muito obrigado.

## RESUMO

A operação intermitente de Usina hidrelétrica (UHE) caracterizada por variações constantes nos níveis de água e vazão, altera as condições hidrodinâmicas nos reservatórios e rios a jusante. Esse cenário contribui para a aeração da água, especialmente durante a passagem por vertedouros, aumentando a dissolução de gases, como oxigênio e nitrogênio, este fato é agravado caso a UHE opere a fio d'água e com vertedouro de soleira afogada.

Esta operação pode gerar impactos significativos na fauna aquática, com destaque para a mortalidade de peixes causada pela supersaturação gasosa. Esse fenômeno ocorre quando a concentração de gases dissolvidos na água excede sua capacidade de saturação natural em determinadas condições de temperatura e pressão, resultando na supersaturação e conseqüentemente na formação de bolhas de gás nos tecidos dos peixes, o que pode desencadear problemas fisiológicos graves, como a embolia gasosa, comumente denominada como doença da bolha de gás (DBG).

A embolia gasosa obstrui a circulação sanguínea, provocando danos severos a circulação sanguínea e provocando danos severos em órgãos vitais, como brânquias, bexiga natatória e sistema nervoso. O estresse gerado por essas condições também compromete o sistema imunológico dos peixes, aumentando sua vulnerabilidade a doenças.

A mitigação desses impactos requer a adoção de medidas estratégicas. O monitoramento contínuo da saturação de gases na água permite identificar condições de risco e agir preventivamente. Além disso ajustes na operação das UHEs podem minimizar variações abruptas de vazão e pressão, enquanto dispositivos de aeração controlada e sistemas de despressurização podem reduzir o excesso de gases dissolvidos. Adicionalmente, a criação de áreas de refúgio para os peixes fornece locais de proteção durante períodos críticos.

Portanto, essa tese objetivou estudar a formação da supersaturação gasosa, reproduzir este evento em nível laboratorial controlado e apontar formas de mitigação da mortalidade. O estudo é um desafio multifacetado que demanda a colaboração entre engenheiros, biólogos, gestores ambientais e comunidades locais. A compreensão dos mecanismos envolvidos e a implementação de soluções técnicas e ambientais são essenciais para equilibrar a geração de energia hidrelétrica e a preservação da biodiversidade aquática.

### **Palavras-chave:**

Saturação gasosa; Estabilização do Sistema Elétrico; Ictiofauna; Vertedouro; Operação de UHE.

## **ABSTRACT**

The intermittent operation of hydroelectric power plants (HPPs), characterized by constant fluctuations in water levels and discharge, alters the hydrodynamic conditions within reservoirs and downstream river reaches. This operational regime enhances water aeration, particularly during spillway passage, increasing the dissolution of gases such as oxygen and nitrogen. This effect is exacerbated when the HPP operates as a run-of-river facility and employs a submerged-crest spillway.

Such operational patterns may generate significant impacts on aquatic fauna, particularly fish mortality induced by gas supersaturation. This phenomenon occurs when the concentration of dissolved gases exceeds the natural saturation capacity of water under specific temperature and pressure conditions. The resulting supersaturation leads to the formation of gas bubbles within fish tissues, triggering severe physiological disorders, including gas embolism—commonly referred to as gas bubble disease (GBD).

Gas embolism obstructs blood circulation and causes extensive damage to vital organs such as gills, swim bladder, and the nervous system. The physiological stress associated with these conditions also compromises the immune system of fish, increasing their susceptibility to secondary diseases.

Mitigating these impacts requires the adoption of strategic measures. Continuous monitoring of gas saturation in the water enables the identification of hazardous conditions and supports preventive action. In addition, operational adjustments in HPPs can minimize abrupt variations in flow and pressure, while controlled aeration devices and depressurization systems can reduce excess dissolved gases. Furthermore, the creation of fish refuge areas provides protective habitats during critical periods.

Therefore, this thesis aimed to investigate the formation of gas supersaturation, reproduce this event under controlled laboratory conditions, and propose mitigation strategies for fish mortality. This study represents a multifaceted challenge that demands collaboration among engineers, biologists, environmental managers, and local communities. A comprehensive understanding of the underlying mechanisms and the

implementation of technical and environmental solutions are essential to balance hydroelectric power generation with the preservation of aquatic biodiversity.

**Keywords:** Gas Saturation; Electrical System Stabilization; Ichthyofauna; Spillway; HPP Operation

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vertedor do tipo perfil Creager da barragem de Gongzui e vertedor de salto de esqui da barragem de Pubugou. ....	50
Figura 2 - Desenho esquemático do modelo CN201479739U. ....	52
Figura 3 - Desenho esquemático do modelo CN101303336B.....	53
Figura 4 - Desenho esquemático do modelo CN101806793B.....	55
Figura 5 - Desenho esquemático do modelo CN101793888B.....	57
Figura 6 - Desenho esquemático do modelo CN101793889B.....	59
Figura 7 - Desenho esquemático do modelo CN206863597U. ....	61
Figura 8 - Vertedouro tipo rampa de esqui. ....	75
Figura 9 - Vertedouro tipo soleira com bacia de dissipação.....	75
Figura 10 - Vertedouro tipo soleira afogada. ....	76
Figura 11 - Fluxograma de processos do aparato para geração de TDG para ensaio em ambiente controlado.....	78
Figura 12 - Aparato gerador de TDG - V1.....	80
Figura 13 - Aparato gerador de TDG - V2 – Vista isométrica.....	82
Figura 14 - Aparato gerador de TDG - V3 Vista lateral. ....	83
Figura 15 - Aparato gerador de TDG - V4.....	86
Figura 16 - Fluxograma de operação do sistema.....	87
Figura 17 - Desenho esquemático do circuito de alimentação dos tanques de teste (ramificados).....	88
Figura 18 - Seção de canal de teste.....	98
Figura 19 - Dimensões dos peixes.....	99
Figura 20 - Diagrama das dimensões corporais relevantes no Pintado ( <i>Pseudoplatystoma corruscans</i> ).....	101
Figura 21 - Diagrama das dimensões corporais relevantes no Curimatá ( <i>Prochilodus lineatus</i> ).....	101
Figura 22 - Dimensões dos tanques.....	105
Figura 23 - Dimensões dos tanques. Classe I (a) – Classe II (b).....	105
Figura 24 - Diagrama esquemático de uma rede ramificada.....	107
Figura 25 - Sonda de TDG.....	108
Figura 26 - Estrutura hierárquica da aplicação em IEC 61131-3 para o Laboratório de Ensaio em Peixes. ....	113
Figura 27- Parâmetros do controlador de nível. ....	113
Figura 28 - Parâmetros do controlador de fluxo 1. ....	114
Figura 29 - Parâmetros do controlador de fluxo 2. ....	114
Figura 30 - Compilado de imagens da espécie Tilápias ( <i>Oreochromis niloticus</i> ), 115%.....	120
Figura 31 - Compilado de imagens da espécie Tilápias ( <i>Oreochromis niloticus</i> ), 125%.....	121
Figura 32 - Compilado de imagens da espécie Tilápias ( <i>Oreochromis niloticus</i> ), 135%.....	122
Figura 33 - Compilado de imagens da espécie Lambari Amarelo ( <i>Astyanax lacustris</i> ),115%.....	125
Figura 34 - Compilado de imagens da espécie Lambari Amarelo ( <i>Astyanax lacustris</i> ),125%.....	126
Figura 35 - Compilado de imagens da espécie Lambari Amarelo ( <i>Astyanax lacustris</i> ),135%.....	127

Figura 36 - Sintomas Jundiá ( <i>Rhamdia quelen</i> ) 115%.....	129
Figura 37 - Sintomas Jundiá ( <i>Rhamdia quelen</i> ) 125%.....	130
Figura 38 - Sintomas Jundiá ( <i>Rhamdia quelen</i> ) 135%.....	131
Figura 39 - Compilado de imagens da espécie Piau-Três-Pintas ( <i>Leporinus friderici</i> ) 115%.....	134
Figura 40 - Compilado de imagens da espécie Piau-Três-Pintas ( <i>Leporinus friderici</i> ) 125%.....	135
Figura 41 - Compilado de imagens da espécie Piau-Três-Pintas ( <i>Leporinus friderici</i> ) 135%.....	137
Figura 42 - Compilado de imagens da espécie Curimatã ( <i>Prochilodus lineatus</i> ). .....	141
Figura 43 - Compilado de imagens da espécie Pacu ( <i>Piaractus mesopotamicus</i> ). .....	144
Figura 44 - Compilado de imagens da espécie Pintado ( <i>Pseudoplatystoma corruscans</i> ). .....	148
Figura 45 - Compilado de imagens da espécie Tambaqui ( <i>Colossoma macropomum</i> ). .....	152
Figura 46 - Bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia e distribuição das UHEs despacháveis por tipo de reservatório (fio d'água e acumulação). .....	152
Figura 47 - Geração despachada pela UHE Sinop ao longo de duas semanas, evidenciando variações abruptas de potência. Segundo relatório técnico interno da SINOP. ....	154
Figura 48- - Geração despachada pela UHE Sinop ao longo de duas semanas, evidenciando variações abruptas de potência. Segundo relatório técnico interno da SINOP. ....	154

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Legislações para outorga de água nos estados.....	69
Tabela 2 - Eficiência do aparato de TDG V1.....	80
Tabela 3 - Eficiência do aparato de TDG V2.....	82
Tabela 4 - Eficiência do aparato de TDG V3 (utilizando uma torre).....	84
Tabela 5 - Eficiência do aparato de TDG V3 (utilizando duas torres).....	84
Tabela 6 - Eficiência do aparato de TDG V4.....	88
Tabela 7 - Diâmetro (tempo de troca 5 minutos).....	89
Tabela 8 - Vazão de trânsito no saturador.....	91
Tabela 9 - Comprimentos equivalentes em metros lineares (mL).....	93
Tabela 10 - Re no interior do duto principal do saturador para vazões distintas...94	
Tabela 11 - Dimensões dos dutos possíveis a serem usados no saturador.....	94
Tabela 12 - Peças do saturador.....	95
Tabela 13 - Comprimentos equivalentes.....	95
Tabela 14 - Re da coluna de saturação para cada vazão.....	96
Tabela 15 - Valores do fator de perda de carga da torre de saturação para as vazões de ensaio.....	96
Tabela 16 - Perdas de carga da torre de saturação para cada vazão ensaiada.....	97
Tabela 17 - Dimensões características dos peixes.....	102
Tabela 18 - Dimensões dos tanques de testes.....	102
Tabela 19 - Velocidade e vazão nos tanques de testes.....	103
Tabela 20 - Re dos peixes.....	103
Tabela 21 - Volumes, vazão e tempo de reserva no tanque de TDG.....	104
Tabela 22 - Dimensões dos tanques de teste por classe.....	104
Tabela 23 - Limites máximos e mínimos de vazão para dutos.....	105
Tabela 24 - Condições hidráulicas dos ensaios.....	108
Tabela 25 - Parâmetros para a realização dos ensaios de caracterização.....	109
Tabela 26 - Ensaios de caracterização realizados em triplicata.....	110
Tabela 27 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Tilápias.....	120
Tabela 28 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Lambaris.....	125
Tabela 29 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Jundiás.....	129
Tabela 30 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Piau-Três-Pintas.....	134
Tabela 31 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Curimatás.....	141
Tabela 32 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Pacus.....	144
Tabela 33 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Pintados.....	148
Tabela 33 - Resumo dos testes em 115%, 125% e 135% de TDG em Tambaqui.....	149
Tabela 35 - UHes/vertedouros na bacia Amazônica e Tocantins-	

Araguaia.....	152
Tabela 36 - Aumento estimado de TDG nos vertedouros de UHEs da bacia Amazônica e Tocantins-Araguaia.....	155

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AFT</i>	Tempo até a morte acelerada
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<i>CA</i>	Carvão ativado
<i>CEMIG</i>	Companhia Energética de Minas Gerais
<i>DBG</i>	Doença da bolha de gás
<i>DESSEM</i>	Modelo de Despacho Hidrotérmico de Curtíssimo Prazo
<i>DNA</i>	Ácido Desoxirribonucleico
<i>DNAEE</i>	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
<i>DO</i>	Oxigênio dissolvido
<i>GSM</i>	Sistema global para comunicações móveis
<i>IoT</i>	Internet das Coisas
<i>L</i>	Litros
<i>L/s</i>	Litros por segundo
<i>LT<sub>50</sub></i>	Tempo médio de vida
<i>m</i>	Metros
<i>m<sup>3</sup>/s</i>	Metro cúbico por segundo
<i>ml</i>	Mililitro
<i>MW</i>	Megawatt
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<i>pH</i>	Potencial hidrogeniônico
<i>PVC</i>	Policloreto de vinila
<i>QMLT</i>	Vazões médias de longo termo
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>SEMA</i>	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Nacional
<i>SS</i>	Sedimentos suspensos
<i>TDG</i>	Total de gases dissolvidos
<i>TDG%</i>	Taxa de supersaturação de gás total dissolvido
<i>TGP</i>	Pressão total de gás
<i>UHEs</i>	Usinas hidrelétricas
<i>UHE</i>	Usina hidrelétrica

WAC	Washington Administrative Code
<i>mL</i>	Metro linear
<i>MVP</i>	Massa viva de peixe
$\Delta$ TDG%	Delta do total de gases dissolvidos

# SUMÁRIO

<i>Capítulo 1</i> .....	16
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 HIPÓTESE .....	18
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 Objetivos Específicos .....	18
1.4 APLICABILIDADE.....	18
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	19
<i>Capítulo 2</i> .....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
2.1 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE O TEMA .....	23
2.2 PATENTES DE EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE SUPERSATURAÇÃO GASOSA.....	51
<i>Capítulo 3</i> .....	62
3 ORIGEM DO PROBLEMA – CURTAILMENT, VERTEDOUROS E A SATURAÇÃO GASOSA .....	62
3.1 A PRÁTICA DO <i>CURTAILMENT</i> .....	63
3.2 VAZÕES ECOLÓGICAS .....	67
3.3 TIPO DE VERTEDOIRO E OS IMPACTOS NA ICTIOFAUNA LOCAL.....	73
<i>Capítulo 4</i> .....	77
4 DESENVOLVIMENTO DA BASE EXPERIMENTAL.....	77
4.1 APARATO DE SATURAÇÃO GASOSA.....	77
4.1.1 Arranjo do TDG V1.....	79
4.1.2 Arranjo do TDG V2.....	81

4.1.3	Arranjo do TDG V3 .....	83
4.1.4	Arranjo do TDG V4 .....	84
4.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO .....	88
4.2.1	Dimensionamento de Aparato de Saturação Gasosa.....	89
4.2.2	Dimensionamento dos Tanques de Teste de Influência de Gases Dissolvidos em Água em Peixes Neotropicais .....	97
4.2.3	Dimensionamento do Sistema Hidráulico para Alimentação de Tanques de Teste de Supersaturação Gasosa.....	106
4.2.4	Sonda de TDG .....	108
4.3	PROTOCOLO DE ENSAIOS .....	109
4.3.1	Ensaio de Estanqueidade.....	109
4.3.2	Ensaio de Caracterização dos Aparatos.....	109
4.3.3	Ensaio de exposição de peixes a água supersaturada .....	111
4.4	VARIÁVEIS DE CONTROLE .....	112
Capítulo 5.....		117
5	RESULTADOS DE EXPOSIÇÃO DE ESPÉCIES A SUPERSATURAÇÃO .....	117
5.1	Tilápias ( <i>Oreochromis niloticus</i> ).....	118
5.2	Lambari amarelo ( <i>Astyanax lacustris</i> ) .....	123
5.3	Jundiá ( <i>Rhamdia quelen</i> ) .....	128
5.4	Piau-Três-Pintas ( <i>Leporinus friderici</i> ).....	132
5.5	Curimatã ( <i>Prochilodus lineatus</i> ) .....	139
5.6	Pacu ( <i>Piaractus mesopotamicus</i> ).....	142
5.7	Pintado ( <i>Pseudoplatystoma corruscans</i> ).....	145
Capítulo 6.....		151
6	ÁREA DE ESTUDO.....	151
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA E DAS UHEs .....	151

6.2	DISCUSSÃO.....	155
6.3	ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO.....	157
<i>Capítulo 7.....</i>		158
7	MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DA SUPERSATURAÇÃO GASOSA EM USINAS.....	158
7.1	RESTRIÇÃO DA FLEXIBILIDADE OPERATIVA.....	158
7.2	ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS E IMPACTO NAS VAZÕES EXTREMAS.....	159
7.3	OPERAÇÕES SÍNCRONAS E COORDENAÇÃO EM CASCATA.....	159
7.4	EVIDÊNCIAS BIOLÓGICAS E DIRETRIZES DE MONITORAMENTO.....	160
7.5	DIRETRIZES AMBIENTAIS E RECOMENDAÇÕES.....	160
<i>Capítulo 8.....</i>		162
8	CONCLUSÕES.....	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		168

# Capítulo 1

## 1 INTRODUÇÃO

Esta tese parte da premissa de que ao induzir a operação intermitente de usinas hidrelétricas de modo forçado, definido pelo termo *curtailment*, intensifica o impacto ecológico nos trechos a jusante, sobretudo pela formação da supersaturação de gás total dissolvido (TDG) e seus efeitos sobre a ictiofauna. O foco recai sobre empreendimentos nas bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia, com vertedouros em salto de esqui e perfis *Creager* dotados de bacias dissipadoras. O estudo integra revisão técnico-científica, inventário de tipologias e capacidades de descarga, além de um arcabouço para estimar  $\Delta\text{TDG}\%$  recalibrado às condições específicas de cada usina.

A análise comparativa entre manutenção de vazão sanitária concentrada (um único vão) e descargas distribuídas (múltiplos vãos) indica que a primeira tende a produzir TDG na faixa de aproximadamente 117–131%, enquanto a segunda aproxima os valores do limite protetivo de 110%. Registros de campo da UHE Sinop registraram picos de cerca de 180% de TDG durante manobras de vertimento, sugerindo que ajustes generalistas subestimam a realidade operacional e reforçando a necessidade de curvas  $\Delta\text{TDG}\%$  específicas por usina, sensíveis à geometria do vertedouro, ao regime do jato e às condições hidráulicas locais. O objetivo é consolidar, de forma robusta, o encadeamento causal *curtailment* → intermitência operacional → TDG → risco biológico, suprimindo lacunas de dados e de modelagem e propondo protocolos de mitigação operacional e estrutural ancorados em coordenação em cascata, priorização de descargas distribuídas e monitoramento contínuo. Ao fazê-lo, a tese busca reduzir a frequência e a magnitude de eventos de mortandade, orientar decisões sob restrições de *curtailment* e equilibrar confiabilidade elétrica e proteção da biodiversidade, oferecendo subsídios práticos ao licenciamento, à operação e ao planejamento do setor, [1] e [2].

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A matriz elétrica brasileira caracteriza-se por elevada participação de fontes renováveis, notadamente hidráulica, biomassa, eólica e solar com predominância hidrelétrica. A recente expansão de fontes não despacháveis (eólica e solar) levou o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) a priorizá-las, dado o custo marginal próximo de zero, intensificando o *curtailment* em UHEs e tornando a operação mais intermitente [1]. Em tempo real, a gestão dessas usinas exige integrar variáveis hidrológicas e climáticas, características dos conjuntos turbina-gerador e restrições de despacho, mas a intermitência adiciona complexidade operacional e pressiona o atendimento a vazões ambientais. Nas hidrelétricas a fio d'água construídas nas últimas décadas, em especial na bacia do Amazônia e na bacia Tocantins–Araguaia, com vertedouros de crista submersa e bacias de dissipação, muitas vezes, sem descarregadores de fundo, a manutenção de vazão a jusante recai frequentemente sobre o vertedouro, as aberturas intermitentes favorecem o arraste de ar e a consequente supersaturação de gás total dissolvido (TDG), [2] e [3]. A literatura demonstra que TDG acima do equilíbrio de solubilidade impõe estresses subletais e pode evoluir para doença da bolha de gás (DBG), conforme nível de saturação, tempo de exposição e sensibilidade específica [4], [5], [6], [7] e [8]. Este estudo, portanto, analisa de forma integrada como a operação intermitente e a hidráulica dos vertedouros nas UHEs das bacias do Amazônia e Tocantins–Araguaia se relacionam às respostas biológicas, adotando como referência os limites protetivos de TDG (110% e ~125%) estabelecidos pelo WAC 173-201<sup>a</sup>, [9].

Com base nesse enquadramento, discute-se a adoção de estratégias combinadas de mitigação, coordenação operacional em cascata, intervenções estruturais (defletores, aeradores e otimização de dissipadores) e monitoramento em tempo real, com o objetivo de preservar a biodiversidade sem comprometer a flexibilidade requerida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), [3] e [9]. O trabalho propõe, ainda, classificar o risco ambiental por empreendimento e, quando necessário, recomendar menor prioridade de despacho a usinas de alto risco, sempre observando os requisitos de segurança e confiabilidade do sistema.

## 1.2 HIPÓTESE

A operação de vertedouros em UHEs pode gerar supersaturação gasosa e, conseqüentemente, elevada mortalidade de peixes a jusante. Todavia, há métodos para compreender a formação do fenômeno e mitigá-lo por meio de flexibilidade operativa.

## 1.3 OBJETIVOS

Definir a metodologia de operação das principais UHEs das bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia, com vertedouros controlados (comportas) e livres (soleira afogada e salto de esqui), sob operação intermitente, visando mitigar a mortalidade da ictiofauna sob situação de *curtailment*.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

- a) Estimar o impacto da operação das principais UHEs das bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia na mortalidade de peixes associada a vertimentos sob *curtailment*, quantificando a potência outorgada em função do tipo de vertedouro.
- b) Estimar a geração de supersaturação gasosa em função do tipo de vertedouro e da vazão ecológica.
- c) Construir um aparato de teste para simular a supersaturação gasosa em ambiente controlado e quantificar os limiares suportados pelos peixes.
- d) Determinar as taxas de supersaturação que geram letalidade para espécies-alvo.
- e) Propor protocolo de mitigação combinada, com coordenação em cascata, regras que evitem aberturas abruptas e intervenções estruturais (defletores, aeradores e otimização de dissipadores).

## 1.4 APLICABILIDADE

Este estudo investiga os impactos da operação intermitente de UHEs com soleira afogada e/ou salto de esqui (perfil *Creager* com bacias dissipadoras), no contexto de estabilização do SIN, em atendimento às diretrizes do ONS, com foco na supersaturação

de gases totais dissolvidos (TDG). A pesquisa é motivada por problemas ambientais e operacionais decorrentes da TDG a jusante das barragens, que afetam a ictiofauna, comprometem a biodiversidade e influenciam a eficiência energética. A investigação abrangerá:

- a) Manutenção de vazão ecológica: análise das estratégias empregadas pelas UHEs para garantir os fluxos exigidos por norma e se tais medidas contribuem para a ocorrência de supersaturação;
- b) Quantificação de TDG e efeitos biológicos: medição e análise dos níveis de TDG gerados durante as operações e seus efeitos letais e subletais sobre espécies neotropicais, estabelecendo limiares de segurança;
- c) Propostas de mitigação: formulação de estratégias de manejo e otimização da operação para reduzir a frequência e a magnitude dos impactos, equilibrando estabilidade elétrica e preservação ambiental.

A metodologia envolverá revisão bibliográfica, experimentos laboratoriais e análises operacionais do sistema hidrelétrico, considerando a interação entre processos hidráulicos e respostas biológicas. Espera-se ampliar o entendimento dos impactos e fornecer subsídios para estratégias operacionais mais sustentáveis e eficientes, mitigar efeitos adversos e promover integração entre necessidades energéticas e preservação ambiental.

## **1.5 ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese foi organizada em oito capítulos interdependentes, dispostos de forma lógica e progressiva para conduzir o leitor desde a contextualização teórica até a proposição de soluções práticas voltadas à mitigação da supersaturação gasosa em usinas hidrelétricas (UHEs) sob operação intermitente. A estrutura adotada reflete a integração entre fundamentos teóricos, métodos experimentais, resultados e recomendações aplicadas, buscando garantir continuidade e coerência entre os diferentes eixos da pesquisa, hidráulico, biológico e operacional.

O **Capítulo 1 – Introdução**, apresenta a problemática central e a motivação científica do estudo. Discute o contexto energético brasileiro, destacando a crescente penetração de

fontes renováveis não despacháveis (eólica e solar) e os reflexos dessa transformação na operação das UHEs, que passam a enfrentar períodos mais frequentes de *curtailment*. São definidos o escopo da pesquisa, a justificativa, a hipótese, os objetivos gerais e específicos e a aplicabilidade. Esse capítulo também estabelece o encadeamento causal que norteia toda a tese — *curtailment* → intermitência → supersaturação (TDG) → risco biológico — e propõe a construção de um arcabouço conceitual que permita avaliar e mitigar os impactos ecológicos sem comprometer a confiabilidade elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica** consolida o estado da arte sobre supersaturação gasosa, apresentando a experiência internacional e nacional acerca de seus mecanismos de formação e efeitos sobre a ictiofauna. São examinados os estudos clássicos realizados nos Estados Unidos e Canadá que estabeleceram os limites de segurança de TDG de aproximadamente (110 % – 125 %), e discutidas as adaptações necessárias às condições hidrodinâmicas tropicais. O capítulo aborda ainda o levantamento de patentes e soluções tecnológicas destinadas à mitigação da supersaturação, incluindo dispositivos aeradores, defletores, bacias dissipadoras e sistemas de despressurização. Essa revisão fundamenta as escolhas metodológicas adotadas nos capítulos seguintes, fornecendo base científica sólida para o delineamento experimental e a proposição de protocolos operacionais.

O **Capítulo 3 – Origem do Problema: *Curtilment*, Vertedouros e a Saturação Gasosa** aprofunda a análise conceitual do fenômeno. Inicialmente, discute o *curtailment* como prática de despacho adotada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), explicando como a priorização de fontes intermitentes altera o regime hidrodinâmico das UHEs. Na sequência, caracteriza-se a tipologia dos vertedouros mais comuns nas bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia, perfis *Creager*, saltos de esqui e soleiras afogadas e avaliam-se suas implicações na geração de TDG. São apresentadas as vazões sanitárias típicas, as condições de dissipação de energia e as correlações observadas entre o tipo de descarga e a intensidade de supersaturação. O capítulo encerra com uma síntese das evidências que justificam o desenvolvimento de modelos empíricos  $\Delta$ TDG % específicos por usina.

O **Capítulo 4 – Desenvolvimento da Base Experimental** descreve a concepção, construção e validação dos aparatos utilizados para simular a supersaturação gasosa em ambiente controlado. São detalhados os quatro protótipos sucessivos do gerador de TDG (V1 a V4), projetados e otimizados para diferentes regimes de vazão e tempo de residência. O texto abrange o dimensionamento hidráulico das torres de saturação, tanques de teste e circuitos de recirculação, bem como a instrumentação empregada para medição de TDG, vazão e pressão. Incluem-se, ainda, os protocolos de ensaio, variáveis de controle, testes de estanqueidade e caracterização hidrodinâmica dos aparatos. Esse capítulo constitui o núcleo metodológico da tese, assegurando a reprodutibilidade dos experimentos e a confiabilidade das análises subsequentes.

O **Capítulo 5 – Resultados de Exposição de Espécies a Supersaturação** apresenta e interpreta os dados obtidos em laboratório. Foram avaliadas diferentes espécies de peixes neotropicais: *Oreochromis niloticus* (Tilápia), *Astyanax lacustris* (Lambari Amarelo), *Rhamdia quelen* (Jundiá), *Leporinus friderici* (Piau-Três-Pintas), *Prochilodus lineatus* (Curimatã), *Piaractus mesopotamicus* (Pacu) e *Pseudoplatystoma corruscans* (Pintado). Para cada espécie, são descritos os sintomas fisiológicos, tempos letais médios (LT<sub>50</sub>), níveis de TDG correspondentes e taxas de sobrevivência. O capítulo discute ainda os padrões de resposta interespecie e identifica faixas de saturação com efeitos subletais, permitindo o estabelecimento de limiares seguros de exposição. As análises confirmam a correlação direta entre intensidade de supersaturação, tempo de exposição e mortalidade observada.

O **Capítulo 6 – Área de Estudo** transita do ambiente laboratorial para o contexto real da bacia Amazônica. O estudo de caso concentra-se na UHE Sinop (MT), escolhida por apresentar registros operacionais de supersaturação superiores a 180 % TDG durante vertimentos. O capítulo descreve a caracterização física da bacia hidrográfica, a configuração do reservatório e do vertedouro, bem como o regime de operação adotado. São analisados dados de campo e relatórios técnicos da concessionária, comparando-os com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. A seção de discussão integra observações hidráulicas e biológicas, apontando as causas predominantes da mortandade ictiofaunística e sugerindo ajustes operacionais

imediatos. Por fim, são apresentadas estratégias preliminares de mitigação aplicáveis ao empreendimento e a outras UHEs com características semelhantes.

O **Capítulo 7 – Métodos de Mitigação da Supersaturação Gasosa em Usinas Hidrelétricas** consolida as propostas desenvolvidas ao longo da pesquisa. O capítulo está estruturado em cinco eixos: (i) restrição da flexibilidade operativa e priorização de descargas distribuídas; (ii) intervenções estruturais em vertedouros e dissipadores, visando reduzir a aeração excessiva; (iii) operações síncronas e coordenação em cascata entre usinas adjacentes, para suavizar variações abruptas de vazão; (iv) integração de evidências biológicas no planejamento operacional; e (v) diretrizes ambientais e recomendações para o licenciamento. São discutidos modelos de tomada de decisão que conciliam exigências energéticas e critérios ecológicos, além de sugestões de monitoramento contínuo via sensores de TDG e telemetria IoT. Este capítulo representa a contribuição prática da tese, transformando resultados científicos em instrumentos aplicáveis à gestão de usinas.

Por fim, o **Capítulo 8 – Conclusões** sintetiza as principais descobertas, ressaltando que a supersaturação de gás total dissolvido é um fenômeno fortemente dependente da geometria do vertedouro, das condições hidráulicas locais e da intermitência induzida pelo *curtailment*. As conclusões enfatizam a necessidade de incorporar parâmetros de TDG nos modelos de despacho hidrotérmico e nos processos de licenciamento ambiental. São apresentadas recomendações específicas para projetos futuros, como adoção de vertedouros com dissipação progressiva, aeradores controlados e planos de operação coordenada, além de diretrizes para continuidade de pesquisas experimentais e desenvolvimento de normas técnicas nacionais sobre TDG. O capítulo encerra reafirmando o propósito maior da tese: contribuir para a compatibilização entre geração de energia elétrica e conservação da biodiversidade aquática na Amazônia Legal e no Tocantins–Araguaia.

# Capítulo 2

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta dois subtópicos sendo o primeiro centrado na revisão de periódicos e o segundo na revisão acerca de patentes de equipamentos de geração de fluidos supersaturados ao redor do globo.

### 2.1 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE O TEMA

Usinas hidrelétricas (UHE), especialmente durante a operação de vertedouros, podem provocar supersaturação de gases nos corpos hídricos a jusante devido ao intenso arraste de ar e à conseqüente dissolução de gases atmosféricos, como o nitrogênio. Essa condição está intimamente associada ao surgimento da doença das bolhas de gás (DBG) em peixes, quadro patológico caracterizado pela formação de êmbolos gasosos em tecidos e no sistema circulatório, levando a estresse fisiológico, lesões e potencialmente à morte [4] e [11]. A incidência e a severidade da DBG dependem do nível de supersaturação, do tempo de exposição e da suscetibilidade específica de cada espécie [12]. Estudos conduzidos no Hemisfério Norte, em especial nos EUA, mostram que TDG > 110% podem representar ameaças significativas à vida aquática, reforçando a necessidade de monitoramento e mitigação eficazes durante eventos de vertimento, [9] e. Como discutido por [2], a supersaturação de gás total dissolvido (TDG) constitui preocupação recorrente em sistemas hidrelétricos devido à influência de estruturas hidráulicas que promovem forte arraste de ar e subsequente dissolução de gases na coluna d'água. Há consenso científico de que TDG > 125% é, em geral, letal para amplo espectro de espécies de peixes, conforme demonstrado por experimentos laboratoriais e observações de campo [5], [6], [7], [8], [9], [11], [12], [13] e [14]. Diversos estudos mostram que concentrações acima desse limiar levam à mortalidade aguda, enquanto valores em torno de 120% tendem a ser não letais sob exposição de curta duração [6] e [15]. Os autores, [14] relataram que peixes cronicamente expostos a 115% de TDG não apresentaram mortalidade, mas exibiram sintomas leves de DBG e menor tolerância em exposições subsequentes a níveis mais altos de TDG, sugerindo efeito fisiológico cumulativo. Para proteger a biota aquática, a EPA 440/5-86-001 (Quality Criteria for

Water), recomenda como critério protetivo o valor de 110% de TDG, amplamente adotado por jurisdições estaduais norte-americanas [9]. A letalidade aguda aumenta fortemente com a saturação: estudos de  $LT_{50}$  (tempo letal para 50% de mortalidade) indicam que 100% de mortalidade pode ocorrer em poucas horas com 135% a 145% de TDG, já entre 125% e 130% de TDG, o início dos sintomas e a morte são postergados, frequentemente superando 14 horas, a depender da espécie e da classe de tamanho, [5], [6] e [7]. Sinais observáveis sob TDG elevado incluem nado errático, perda de equilíbrio, exoftalmia e hemorragias, indicadores fisiológicos que sustentam a definição de limites. Assim, o patamar de 125% de TDG é amplamente reforçado na literatura como ponto crítico de letalidade, enquanto a exposição crônica a níveis moderados (115–120%) % de TDG, associa-se a estresse subletal e maior vulnerabilidade fisiológica [6], [8], [14] e [16].

O artigo dos autores, [2] aborda a produção de supersaturação de TDG em instalações hidrelétricas e o transporte desses gases, destacando o problema ambiental associado à supersaturação de TDG em sistemas hidrelétricos. O texto ressalta que a supersaturação de TDG pode impactar a qualidade da vida aquática, afetando peixes de água doce e invertebrados aquáticos, sendo a mitigação desse problema fundamental para melhorar a operação de barragens e melhorar o desempenho ambiental, [2] e [17]. A revisão destaca que a geração de TDG é influenciada por diversos fatores, como o modo de descarga, a taxa de fluxo, a hidrodinâmica na bacia de dissipação, a profundidade de imersão e o tamanho das bolhas, [8], [18] e [19]. A literatura também aborda as consequências da supersaturação do TDG, incluindo a mortalidade de peixes e invertebrados. Além disso, são apresentadas pelos autores [2] várias estratégias de mitigação para reduzir a supersaturação de TDG, como a otimização da operação de barragens, a instalação de dispositivos de aeração e a modificação da geometria da bacia de dissipação. Os resultados da revisão literária procuraram uma compreensão mais aprofundada dos fatores que influenciam a geração de TDG, bem como seus impactos adversos [20].

Já os autores [21] investigam a relação entre o TDG e o oxigênio dissolvido (DO) na água, destacando como a supersaturação de TDG pode causar a doença das bolhas de gás em peixes, aumentando sua mortalidade. O estudo menciona que pesquisas anteriores

sugerem que o TDG tem um impacto mais severo sobre os peixes em comparação com outros gases dissolvidos, como o nitrogênio. No entanto, esses autores citam, que é comum utilizar a concentração de oxigênio dissolvido como um indicador indireto para estimar a concentração de TDG, por razões práticas. O artigo apresenta duas abordagens para explorar a relação entre TDG e DO. A primeira consistiu no monitoramento de diferentes tipos de corpos d'água, como um tanque com água desmineralizada, um com água de torneira e um rio natural. Durante esse monitoramento, os níveis de TDG e a saturação de DO foram medidos utilizando uma sonda de oxigênio dissolvido Oxi3210® e um sonda de oxigênio ITRACKER®, respectivamente. A segunda abordagem envolveu experimentos de laboratório conduzidos pela Universidade de Sichuan, que investigaram a produção e liberação de TDG supersaturado em fluxos com sedimentos. As concentrações de TDG e DO também foram medidas com os mesmos dispositivos segundo [21] e [22]. Os resultados do estudo encontrados por [21] revelam que há uma correlação fraca entre a saturação de TDG e a saturação de OD, com ambas as concentrações variando de forma independente na maioria dos corpos d'água analisados. No entanto, em experimentos de laboratório, foi observada uma correlação linear parcial entre TDG e OD em certas seções de um mesmo corpo d'água, indicando que as duas variáveis podem apresentar tendências semelhantes sob determinadas condições. O artigo ainda discute a influência da qualidade da água e do ambiente sobre a composição bacteriana, sugerindo que essas variáveis também desempenham um papel na regulação das concentrações de TDG e DO.

O trabalho denominado "*Impact of TDG supersaturation on native fish species under different hydropower flood discharge programs*" dos autores [8] investiga o impacto da supersaturação de TDG na sobrevivência e no desempenho de natação de espécies de peixes nativas em rios afetados por hidrelétricas. A supersaturação é um problema frequente em operações hidrelétricas, representa uma ameaça significativa à vida dos peixes e à qualidade da água [2]. Os autores [8] utilizaram um método experimental para avaliar os efeitos da supersaturação de TDG em peixes nativos, empregando dois modos distintos de descarga de enchentes em hidrelétricas: regulares e intermitentes [23]. Peixes expostos à TDG foram avaliados quanto à capacidade de natação e

sobrevivência, e os resultados foram comparados com grupos de controle. A análise estatística dos dados buscou identificar diferenças significativas entre os grupos, com o objetivo de fornecer subsídios para a regulamentação das descargas de enchentes em hidrelétricas e, assim, contribuir para a proteção dos ecossistemas aquáticos. Os resultados indicaram que a supersaturação de TDG, provocada pela operação das hidrelétricas, comprometeu tanto a sobrevivência quanto o desempenho de natação das espécies de peixes nativas. Observou-se que os peixes expostos à TDG apresentaram uma redução significativa em sua capacidade de natação, além de uma mortalidade elevada em comparação aos grupos de controle, [8] e [23]. Além disso, os dois modos de descarga de enchentes (regulares e intermitentes) tiveram impactos diferenciados na supersaturação de TDG e no desempenho de natação dos peixes [20], [24], [25] e [8]. O estudo conclui que é essencial regular as descargas de enchentes de hidrelétricas para minimizar os danos aos ecossistemas aquáticos e garantir a proteção das populações de peixes nativas.

Outro trabalho investiga os efeitos do TDG e do sedimento na persistência ácido desoxirribonucleico (DNA) ambiental da carpa capim em meio aquático [17]. O DNA ambiental refere-se às moléculas liberadas continuamente por organismos no ambiente, sendo constituído principalmente por DNA extracelular, muco, fezes e células. Para avaliar o impacto da supersaturação de TDG e da presença de sedimento sobre a persistência do DNA da carpa capim, foi conduzido um experimento com quatro tanques equipados com condições de água corrente. Cada tanque possuía tubos curtos externos e mangueiras de borracha de Policloreto de vinila (PVC) conectadas a bombas de água, com sedimento distribuído uniformemente no fundo. A água foi adicionada para obter uma mistura homogênea contendo DNA da carpa capim e água supersaturada de TDG ou água pura. A concentração de DNA foi monitorada em intervalos de tempo específicos, por meio da coleta de 20 ml de água de cada tanque. Os resultados indicaram que a supersaturação de TDG acelerou a degradação do DNA da carpa capim em água parada, mas não teve efeito significativo em condições de água corrente, devido à rápida dissipação do TDG. A presença de sedimento, por outro lado, aumentou a taxa de degradação do DNA, independentemente das condições de fluxo. Os autores [17] ainda identificaram um padrão de decaimento exponencial do DNA na

água, com a constante de taxa de decaimento diminuindo ao longo do tempo. O estudo ainda destaca a relevância de integrar os resultados experimentais com o ambiente natural, oferecendo uma referência valiosa para o monitoramento de espécies aquáticas utilizando tecnologia de DNA em ecossistemas impactados por barragens de grande porte.

O artigo intitulado “*Effect of total dissolved gas supersaturation on the tolerance of grass carp (Ctenopharyngodon idellus)*” dos autores [6] investiga o impacto da supersaturação do TDG sobre a carpa-capim (*Ctenopharyngodon idellus*), uma espécie comum no rio Yangtze, China. A construção de barragens tem gerado efeitos adversos na saúde dos ecossistemas aquáticos, especialmente durante os períodos de cheia, quando a supersaturação do TDG pode comprometer a sobrevivência de diversas espécies de peixes [21], [8] e [6]. O estudo em questão analisa a influência do tamanho corporal dos indivíduos na sua tolerância ao TDG e avalia a resposta da carpa-capim juvenil a exposições agudas após períodos de exposição crônica à supersaturação de TDG [6]. A pesquisa utilizou um design experimental para mensurar a tolerância da carpa-capim à supersaturação de TDG. Os autores [6] selecionaram 400 indivíduos juvenis, distribuídos em dois grupos de tamanhos distintos, para a realização de experimentos que envolviam exposições letais agudas. Os peixes foram submetidos a diferentes níveis de supersaturação de TDG. A concentração de TDG foi monitorada utilizando um rastreador *Point Four*<sup>®</sup> que é uma linha de monitores de gases dissolvidos, para monitorar e controlar movimentos em tempo real, enquanto a temperatura da água foi controlada com um aquecedor. Uma sonda multiparamétrica de qualidade da água foi empregada para medir o potencial hidrogeniônico (pH), a temperatura da água e o nível de OD. Os resultados do estudo segundo os autores [6] demonstraram que a tolerância da carpa-capim à supersaturação de TDG é dependente do tamanho dos indivíduos, evidenciando que os peixes de maior dimensão, apresentam maior resistência à supersaturação de TDG em comparação com os menores. Além disso, a exposição crônica ao TDG foi associada a um aumento na tolerância dos peixes juvenis às condições de água supersaturada. Os resultados indicados por [6] sugerem que a exposição crônica ao TDG pode aumentar potencialmente a resistência dos peixes à supersaturação [21], [8] e [6]. Este estudo contribui com informações cruciais para a

conservação de peixes e pode servir de base para a formulação de estratégias de manejo em ambientes fluviais e UHEs.

[16] investigou os efeitos da supersaturação do TDG em peixes na China, com especial ênfase nas taxas de mortalidade. Durante as descargas de vertedouros de grandes barragens, a supersaturação de TDG pode ocorrer nas piscinas formadas pela fossa de erosão a jusante do vertedor, afetando as comunidades aquáticas a jusante [6] e [16]. A pesquisa avaliou a tolerância dos peixes chineses a diferentes níveis de TDG, constatando que uma saturação acima de 125% de TDG resultou na mortalidade de 100% os indivíduos expostos, enquanto a saturação de 120% de TDG não provocou mortalidade ao longo de um período de 96 horas. Além disso, o estudo explorou as capacidades de detecção e prevenção da supersaturação de TDG em peixes. O estudo também explorou as habilidades de detecção e evitação de supersaturação de TDG dos peixes em rios naturais. A análise de dados foi realizada usando métodos de unidade de probabilidade e notação de letras. O *software* SPSS foi usado para analisar as diferenças significativas entre os grupos de supersaturação de TDG e água não supersaturadas. Além disso, o estudo demonstra que a análise de diferenças significativas entre grupos de supersaturação de TDG e água fresca pode ser limitada pela variação na faixa de mobilidade dos peixes [16].

Já o autor [22] discute a função de sensores e equipamentos relacionados, mais utilizados em tecnologias de dissolução e outros ambientes laboratoriais destinados ao controle da qualidade da água livre de gases dispersos. O estudo apresenta uma revisão sucinta da história da análise química de gases distribuídos, enfatizando sua progressão ao longo dos anos e estabelecendo uma ligação com a Lei de Henry, que esclarece a conexão entre o conteúdo molar de um gás ou a concentração desse gás em uma solução. O propósito central do artigo de [22] é detalhar a operação de uma série de sensores e equipamentos correlatos que estão ganhando mais uso em laboratórios de tecnologia de dissolução e outros ambientes laboratoriais. O texto, de caráter informativo, não descreve um procedimento experimental específico. Seu foco está em elucidar a função desses sensores e equipamentos na regulação da qualidade da água livre de gás. Além disso, examina a progressão desses aparelhos e sua importância para a análise química de gases distribuídos ao longo dos anos [22].

O trabalho intitulado “*The Effects of Total Dissolved Gas on Chum Salmon Fry Survival, Growth, Gas Bubble Disease, and Seawater Tolerance*” [18] analisou os impactos do TDG na sobrevivência, desenvolvimento e resistência à água marinha dos alevinos de salmão chum (*Oncorhynchus keta*). A pesquisa foi conduzida em alevinos que crescem a jusante da barragem de Bonneville no Rio Columbia, submetidos a altos níveis de TDG. Os cientistas analisaram se os alevinos de salmão chum apresentavam três fases de crescimento distintas. Avaliaram-se a mortalidade, o crescimento, a doença das bolhas de gás e a tolerância dos alevinos à água do mar. Os indivíduos foram retirados, pesados, medidos e mantidos em formalina neutra tamponada. A avaliação da doença das bolhas de gás foi feita através da histopatologia. Foi feita uma análise estatística para verificar a importância dos efeitos principais e da interação entre o estágio de vida e o grau de tratamento do gás dissolvido, segundo [18].

Os achados da pesquisa indicaram que a exposição a altos níveis de TDG impactou de forma negativa a sobrevivência, o desenvolvimento e a resistência à água marinha dos alevinos de salmão chum. Em comparação com os alevinos que foram expostos a níveis mais baixos de TDG, houve um aumento na taxa de mortalidade e um decréscimo no crescimento. Ademais, os alevinos que foram expostos a concentrações mais elevadas de TDG apresentaram uma incidência mais elevada da doença das bolhas de gás. A análise de regressão revelou que a fase de vida dos alevinos teve um impacto significativo na taxa de crescimento, com alevinos mais novos se desenvolvendo mais rapidamente do que os mais velhos [18], [14] e [26].

O trabalho de [23] apresenta um método para calcular o tempo de percurso do TDG em reservatórios de UHEs, com o objetivo de avaliar e quantificar as condições de TDG supersaturado em reservatórios a jusante. O texto destaca ainda a importância de entender as consequências ambientais das condições de TDG supersaturado em reservatórios de UHEs, além da necessidade de uma coordenação mais eficiente entre as UHEs próximas para amenizar os efeitos de grandes vazamentos [23], [25] e [13]. O texto também apresenta algumas estratégias rápidas e fundamentais que podem ajudar na tomada de decisões a curto prazo em contextos dinâmicos. Este trabalho aplica um método baseado em dados empíricos que emprega uma metodologia de correlação cruzada variável no tempo para calcular o tempo de deslocamento do TDG em

reservatórios de UHE. A estratégia é mais direta e aplicável a múltiplos reservatórios em um sistema em cascata do que modelos hidrodinâmicos complexos [23]. O método pode ser empregado em estudos anuais sobre redução de gás para compreender de forma mais eficaz o tempo médio de deslocamento do gás dissolvido total em relação ao fluxo. Entender melhor o tempo médio pode levar a uma coordenação e comunicação mais eficientes entre os operadores de reservatórios que buscam diminuir o TDG em todo o sistema [23], [27] e [20].

O estudo intitulado *“A Simple Chamber Design for Calibrating Weiss Saturometers and Recommendations for Measuring and Reporting Total Dissolved Gases”* [28] oferece um guia técnico sobre a documentação de métodos para a medição de gases na água. Ele fornece informações úteis sobre como quantificar e registrar o TDG na água, bem como recomendações para a medição e calibração de equipamentos [22], [13], [29] e [30]. O objetivo do guia é ajudar os leitores a entenderem a importância de medir os gases na água e a comunicar essas informações de maneira precisa e consistente.

O texto não fornece resultados concretos de uma pesquisa, mas sim sugestões e técnicas para medir e comunicar TDG na água. O manual técnico detalha diversos procedimentos para realizar medições exatas de TDG e sugere que a supersaturação do TDG seja indicada como uma alteração nas unidades de pressão absoluta e % TDG, a fim de permitir a comparação entre as pesquisas. Ademais, o manual oferece sugestões para regular a calibração dos aparelhos de medição de TDG. Assim, as recomendações e métodos descritos no guia técnico são utilizados para medir e comunicar a supersaturação de TDG na água [13].

Foi publicado em 2008 um relatório técnico [13] que estabelece o contexto para uma revisão de literatura sobre a avaliação dos critérios de TDG e suas consequências biológicas. O texto esclarece que o TDG é um parâmetro vital para a qualidade da água, pois afeta a saúde dos organismos aquáticos e a capacidade da água de manter a vida [13]. A obra também discute a importância de analisar os critérios de TDG para garantir a saúde dos organismos aquáticos e a qualidade da água. A pesquisa conclui que é necessária uma revisão bibliográfica para confirmar a eficácia dos critérios de TDG e identificar brechas no conhecimento já acumulado [13].

O texto [31] "*Spillway jet regime and total dissolved gas prediction with a multiphase flow model*" enfatiza a importância de antecipar o volume TDG em vertedouros, o que pode afetar a qualidade da água e a presença de vida marinha.

Em seguida, [31] utiliza-se do modelo de escoamento multifásico para calcular a concentração TDG a montante dos vertedouros. O artigo também discute a dinâmica do fluxo de ar do vertedouro e sua influência na estimativa do TDG. O método utilizado no artigo em questão se fundamenta no modelo de fluxo multifásico, utilizado para prever a concentração de TDG a jusante de vertedouros. O modelo se baseia em equações de conservação da massa, momento e energia, resolvidas numericamente por meio do método de volumes finitos [23], [20] e [24]. O modelo também inclui a dinâmica do fluxo do vertedouro, caracterizada pela equação de Navier-Stokes. Os resultados foram comparados a informações experimentais obtidas em um canal de teste para confirmar a validade do modelo. O estudo também incluiu uma análise de sensibilidade para medir o efeito de diferentes parâmetros no modelo [31]. Os resultados do estudo mostraram que o modelo multifásico de escoamento é capaz de prever com precisão a quantidade de TDG a montante de vertedouros. O modelo também foi capaz de representar a dinâmica do fluxo de água do vertedouro e a distribuição do volume de TDG em uma representação segmentada do vertedouro [23] e [20], da Barragem McNary. A análise de sensibilidade indicou que a relação entre o volume de gás e o tamanho da bolha na zona de arrasto são os elementos mais significativos para a previsão do volume de TDG [31].

O trabalho "*Experimental study on the dissipation performance of supersaturated total dissolved gas in microbubble treatment*" [27], discute a minimização dos impactos negativos do TDG supersaturado em peixes, que pode ser causado pela aeração em ambientes aquáticos [27], [19], [33] e [34]. O estudo desenvolveu um modelo universal para antecipar a taxa de dissipação do TDG supersaturado no sistema de aeração, baseado na avaliação dimensional dos elementos completos e em informações experimentais. O modelo proposto pode avaliar a eficácia da aeração como tática de mitigação para o TDG supersaturado em várias condições ambientais e de aeração [27] e [33].

O trabalho de [27] também propõe a obtenção de mais informações experimentais e a criação de um modelo matemático capaz de prever com exatidão a transferência de massa do TDG supersaturado em fluxos aerados. Isso sugere que a aeração pode ser um método eficaz para mitigar as consequências adversas do TDG supersaturado em peixes [27] e [19]. O estudo desenvolveu um modelo universal capaz de antecipar a taxa de dissipação do TDG supersaturado em um sistema de aeração, que pode ser utilizado para avaliar a eficácia da aeração em diversas condições ambientais e de aeração [27].

Os resultados revelaram que a força da aeração, a profundidade da água e o tamanho do aerador têm um papel fundamental na dissipação do TDG supersaturado. O estudo sugere a coleta de mais dados experimentais e o desenvolvimento de um modelo matemático que possa prever com precisão a transferência de massa do TDG supersaturado em fluxos aerados [27].

[29] realizou em 2013, uma comparação entre a dissipação de TDG e a reaeração do OD em cursos de água naturais. O texto enfatiza a importância de entender esses procedimentos para reduzir problemas de doenças em peixes e outros organismos aquáticos. O artigo de [29] menciona também a realização de experimentos em laboratório para determinar os coeficientes de taxa de dissipação para OD e TDG supersaturados, que vai de encontro a outras publicações como os trabalhos de [22], [20], [34], [24] e [35]. O objetivo do estudo é fornecer informações pertinentes para a gestão dos recursos hídricos e a proteção da vida aquática. O método utilizado no estudo consistiu na realização de experimentos em laboratório para analisar a dissipação de TDG e a reaeração do OD em água. Os experimentos foram conduzidos em um frasco de vidro repleto de água e ar saturados com TDG ou OD, dependendo da situação. A progressão da concentração de gás foi avaliada com um medidor de pressão total de gás (TGP) fabricado pela *Point Four Systems, Inc*<sup>®</sup>. Os dados obtidos foram analisados para determinar os coeficientes de taxa de dissipação para OD e TDG em supersaturação. O estudo ainda comparou os resultados da dissipação e reaeração de gás em rios naturais, usando dados da literatura como base. Os resultados do estudo indicaram que o processo de dissipação do TDG é quantitativamente diferente do processo de reaeração do OD e que o comportamento do TDG é quantitativamente diferente do OD. De acordo com os autores [29], os coeficientes de taxa de dissipação de primeira ordem para OD e

TDG supersaturados foram calculados e comparados com base em informações da literatura. O estudo também mostrou que a intensidade da turbulência afeta a transferência de massa na interface entre ar e água, afetando, assim, a velocidade de reaeração do oxigênio presente na água [29].

A pesquisa realizada por [25] descreve o contexto e a relevância do estudo acerca dos impactos agudos da supersaturação de gás na fase que antecede a migração para o oceano de salmão do Atlântico em dois rios da Noruega. Outros autores como [23], [19], [20] e [24] investigaram esta linha de estudos, porém, o documento ressalta que a sobressaturação de TDG é uma questão ambiental relevante em rios com UHEs, podendo impactar de forma negativa a saúde e a sobrevivência dos peixes. A pesquisa foi conduzida para oferecer dados relevantes acerca dos níveis de tolerância à supersaturação de TDG no salmão do atlântico e para compreender como as UHE influenciam a supersaturação de TDG nos rios. O texto ressalta ainda a relevância de definir limites toleráveis de TDG e de implementar ações de atenuação para salvaguardar as populações de peixes.

O procedimento empregado envolveu a exposição de juvenis de salmão do atlântico a água supersaturada em gaiolas posicionadas em dois rios da Noruega a distâncias variadas das UHEs. Em cada um dos cinco pontos de estudo no Rio Otra, foram empregadas duas gaiolas, com profundidades de água que oscilavam entre 0,10 e 0,55 metros, [25]. O monitoramento da sobrevivência dos peixes foi realizado através de sensores de saturômetros instalados a 0,40 m de profundidade nos pontos de experimentação. A avaliação da sobrevivência dos peixes foi feita através de um teste de *log-rank* de Kaplan-Meier que é utilizado para estimar a probabilidade de sobrevida em vários intervalos de tempo e utilizado ainda para ilustrar graficamente a sobrevida ao longo do tempo. O teste de *log-rank* é um teste não paramétrico utilizado na comparação de curvas de sobrevida entre dois ou mais grupos.

Os resultados da pesquisa mostraram que a exposição de juvenis de salmão do atlântico a água com TDG supersaturado levou a uma redução considerável na sobrevivência desses peixes. A concentração de TDG na água impactou negativamente a sobrevivência dos peixes, sendo mais elevada a taxa de mortalidade em áreas mais próximas a UHEs. Os resultados ainda indicam que a tolerância à supersaturação de TDG difere entre as

populações de salmão do atlântico, sendo algumas mais suscetíveis que outras. Ademais, a pesquisa enfatizou a relevância de ações de mitigação para diminuir a supersaturação de TDG nos rios e salvaguardar as populações de peixes [25].

O artigo denominado “*A System Model for Total Dissolved Gas Risk Assessment Due to Multidam Spill Operations*” [19] discute o efeito adverso que as atividades de derramamento de reservatórios hidrelétricos podem causar aos peixes que habitam habitats a jusante, devido à produção de TDG supersaturados. A gestão e a avaliação do TDG podem representar um desafio em sistemas hídricos com várias barragens, devido à complexidade dos processos físicos que envolvem a transferência e a produção de gás dissolvido em vertedouros, além do seu transporte, mistura e dissipação no meio fluvial [23][24], [25] e [31]. Os autores propõem um método unificado para avaliar e administrar o TDG em sistemas fluviais com várias barragens, fundamentado em informações de monitoramento do TDG do sistema hidrelétrico do baixo rio Columbia.

O trabalho empregou um método que calculou as pontuações de risco para diversos eventos de derramamento, levando em conta a severidade do nível de supersaturação, a compensação da profundidade do rio e o tempo de exposição [19]. As pontuações foram categorizadas em quatro categorias de risco (nenhum, baixo, moderado e alto) e empregadas na identificação de possíveis áreas de risco e na avaliação do impacto nas zonas de risco dos peixes devido às operações conjuntas das instalações num sistema fluvial complexo. O modelo integrado também empregou um método mecânico para antecipar a produção de TDG em vertedouros, simulando a movimentação de gases dissolvidos. A gestão baseada em risco variável foi implementada conforme os objetivos políticos e a estrutura do modelo pode ser criada como uma ferramenta de fácil acesso e utilização [19].

Os resultados da pesquisa indicaram que o modelo integrado pode ser um instrumento eficiente para avaliar e administrar o TDG em sistemas fluviais com várias barragens. A metodologia mecanicista empregada para antecipar a produção de TDG em vertedouros foi confirmada com informações de monitoramento do TDG do sistema hidrelétrico do baixo rio Columbia. O modelo também identificou as possíveis áreas de perigo e a magnitude e extensão do habitat dos peixes afetado pelas operações conjuntas das instalações em um sistema fluvial complexo. O agrupamento das pontuações de risco

em quatro categorias (nenhum, baixo, moderado e alto) possibilitou uma análise estratégica da necessidade de ações de mitigação [19].

O trabalho dos autores [36] aborda a sobrevivência da carpa de rocha em água supersaturada com TDG e o impacto da exposição contínua a essa condição nas reações bioquímicas da espécie que destaca a relevância da conservação da vida aquática e as consequências adversas da supersaturação de TDG para a sobrevivência dos peixes. Esse artigo estuda uma linha que vai de encontro as dos autores [14], [6], [15] e [34]. Adicionalmente, outros trabalhos [36] debatem-se as consequências eco ambientais da edificação de barragens elevadas na China, que podem resultar em supersaturação de TDG em rios e lagos. A pesquisa analisou o efeito do contato contínuo com água supersaturada com TDG na sobrevivência e nas respostas bioquímicas da carpa de rocha. Nesse contexto, juvenis de carpas foram expostos de forma contínua a água supersaturada com TDG em níveis baixos (104, 108, 112 e 116%, respectivamente), enquanto um grupo de controle recebeu água desgaseificada a vácuo (com um nível de TDG de 100%). Por meio de análise estatística, a atividade enzimática foi avaliada. A comparação dos valores médios foi realizada através do teste de *Tukey*, que compara todas as médias possíveis de um conjunto de grupos, avaliando quais delas são significativamente diferentes entre si [36].

Os resultados da pesquisa indicaram que a exposição contínua à água supersaturada com TDG influenciou as reações bioquímicas da carpa de rocha. A atividade da catalase que é uma enzima encontrada em quase todas as células expostas ao oxigênio, incluindo plantas, animais e muitos tipos de bactérias e da superóxido dismutase que se trata de uma enzima antioxidante que desempenha um papel fundamental na defesa das células contra os danos oxidativos, aumentou consideravelmente nos tecidos musculares e branquiais da carpa de rocha exposta à água supersaturada com TDG [36].

Após 21 dias de exposição, a capacidade de produzir atividade catalase e superóxido dismutase nos níveis de 112% e 116% superaram em 1,5 a 1,9 vezes a do grupo controle. Contudo, não se observou nenhum acréscimo relevante nos níveis baixos de TDG (104%) durante os períodos de exposição. A exposição contínua a água supersaturada com TDG não resultou em morte nas carpas jovens, contudo, foram detectados alguns sinais de doença da bolha de gás (DBG). Os achados indicam que a exposição contínua à água

supersaturada com TDG pode influenciar as reações bioquímicas da carpa de rocha, porém não resulta em morte instantânea [36].

O trabalho apresentado por [30] fornece um estudo de caso sobre a desgaseificação em um protótipo de vertedouro modelo rampa de esquis. De acordo com o estudo, o propósito é examinar a transferência de TDG e estabelecer as contribuições relativas da pressão total do gás, pressão barométrica e pressão da água. O estudo de caso discutido no artigo empregou um modelo de vertedouro de rampa de esqui para examinar a transferência completa de gás dissolvido. A técnica empregada consistiu em medir a concentração de TDG em diversos locais do protótipo, além de analisar a pressão total do gás, a pressão barométrica e a pressão da água. Adicionalmente, efetuaram cálculos para avaliar a eficácia na transferência de gás proveniente da água derramada, trabalho esse que vai de encontro com as publicações dos autores [31], [24], [23] e [20]. Os resultados alcançados foram confrontados com as informações do protótipo para confirmar a eficácia do método empregado [30]. A pesquisa revelou que a transferência de TDG foi influenciada pela pressão total do gás, pressão barométrica e pressão da água. Na presença de bolhas, a eficiência na transferência de gás da água derramada foi superior, enquanto a transferência de superfície auxiliou na dissipação do TDG. Os resultados podem auxiliar na administração da água em sistemas de UHEs em cascata durante períodos de elevados níveis de TDG [30].

A pesquisa intitulada *“Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway II: Computational model”* revelou que a transferência de gás dissolvido foi influenciada pela pressão total do gás, pressão barométrica e pressão da água segundo [37]. Na presença de bolhas, a eficiência na transferência de gás da água derramada foi superior, enquanto a transferência de superfície auxiliou na dissipação do TDG. O texto apresenta um modelo computacional para determinar a concentração de TDG a partir de informações hidrodinâmicas e equações de transporte para fluxos de ar e água linha essa que comunga com os autores [14] e [19]. A meta de [37] foi analisar as alterações sugeridas para as estruturas hidráulicas e diminuir a quantidade de TDG em barragens. A pesquisa apresentada no artigo empregou uma mescla de modelos físicos e numéricos para analisar as alterações sugeridas para os evacuadores de emergência da barragem de Wanapum no rio Columbia. O modelo físico forneceu dados hidrodinâmicos para as

diversas alterações no evacuador, ao passo que o modelo numérico foi empregado para determinar a concentração de TDG a partir das informações hidrodinâmicas do modelo físico e das equações de transporte para fluxos de ar e água [37].

Já os autores [14] abordaram o impacto da supersaturação de TDG na sobrevivência de peixes pelágicos, concentrando-se na carpa cabeçuda (*Hypophthalmichthys nobilis*) no rio Yangtze. A questão do TDG em sistemas hidráulicos e a sua ligação com a mortalidade de peixes, ressaltando ainda a relevância da carpa cabeçuda na pesca e na ecologia do rio Yangtze.

A pesquisa empregou um modelo de tempo até a morte acelerada (AFT) para analisar a resistência da carpa cabeçuda à TDG supersaturado e estabelecer o impacto da exposição contínua à TDG na sua sobrevivência. Os testes foram conduzidos em ambiente laboratorial, com peixes juvenis expostos a variados níveis de TDG supersaturado por períodos curtos e prolongados. A análise estatística dos dados permitiu estabelecer a ligação entre a exposição à TDG e a taxa de mortalidade dos peixes conforme estudado também por [6], [36], [15] e [16]. Os resultados da pesquisa mostraram que o TDG supersaturado é uma séria ameaça para a sobrevivência da carpa cabeçuda, particularmente para os juvenis de menor tamanho. Notou-se que a exposição contínua à TDG diminuiu consideravelmente a sobrevivência dos peixes, e que a exposição aguda subsequente à exposição crônica elevou ainda mais a taxa de óbito. Os pesquisadores propõem um limite de tolerância de 120% para a carpa cabeçuda. A pesquisa também ressaltou a efetividade do modelo AFT na análise do efeito da TDG na sobrevivência dos peixes [14].

O texto intitulado “*Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (Procypris rabaudi Tchang)*”, [15], apresenta uma pesquisa sobre as consequências da supersaturação de TDG na água com carpas em fase jovem. O artigo inicia destacando a relevância da qualidade da água para a sobrevivência de peixes e outros seres aquáticos, além dos impactos negativos da supersaturação de TDG na água. A finalidade da pesquisa é identificar as reações letais e de fuga de carpas jovens quando expostas a variados níveis de TDG [15], que vai de encontro com os trabalhos de [14], [36], [16] e [6]. O estudo empregou um procedimento experimental em laboratório para avaliar as reações letais e de fuga de carpas juvenis quando expostas a variados níveis

TDG. Os peixes ficaram em contato com água com diversos graus de supersaturação (105%, 115%, 120%, 125%, 130%, 135%, 140% e 145%) de TDG durante 60 horas, a uma profundidade de 0,20 m e temperatura de 25°C. As medições de OD, temperatura e pH da água foram feitas. A análise estatística dos dados permitiu estabelecer o tempo letal médio e a concentração de TDG em que os peixes começaram a apresentar respostas de evitação. Os achados indicam que o tempo médio de vida ( $LT_{50}$ ) para carpas juvenis expostas a variados níveis de supersaturação de gás variou de 12,5 horas a 60 horas, [15]. Os resultados também indicaram que as carpas juvenis apresentaram reações de fuga à água com TDG supersaturado, atingindo uma taxa de fuga superior a 90% quando a supersaturação de TDG ultrapassava os 135% de TDG. Ademais, foi observada uma predileção dos peixes por águas supersaturadas quando a concentração de gás estava abaixo de 115 % de TDG. A avaliação estatística revelou uma variação considerável nas taxas de evitação em diversos graus de TDG supersaturado [15].

O problema da supersaturação de TDG e suas consequências adversas para a vida aquática foi objeto de um artigo de [20] que investigou a sobrecarga de TDG e sua repercussão em enfermidades e morte de peixes e os respectivos prejuízos ao meio ambiente [23], [31], [25] e [24]. O texto ressalta que é comum observar a supersaturação de TDG durante o escoamento de barragens e rios. O propósito da pesquisa é analisar os elementos que influenciam a produção de TDG durante o escoamento de barragens e sugerir uma nova correlação empírica que considere a eficácia na dissipação de energia [20].

O estudo empregou o método de coletar informações de 25 casos de escoamento de barragens em sete diferentes locais. Foi feita uma correlação entre a eficiência na dissipação de energia e a produção de TDG. A correlação sugerida foi posteriormente confrontada com as equações para verificar a sua exatidão na previsão dos níveis de TDG. A eficácia na dissipação de energia foi avaliada através de um modelo numérico de simulação [20]. O produto do estudo revelou que a eficiência na dissipação de energia é um elemento crucial na produção de TDG durante o escoamento de barragens. A correlação sugerida na pesquisa, que considera a eficiência na dissipação de energia, se mostrou mais acurada na previsão dos níveis de TDG em comparação com outras equações utilizadas para este fim [20].

O estudo desenvolvido por [33] discute a questão da supersaturação do TDG em corpos de água, que acontece durante o processo de despejo de água em barragens. A existência de TDG supersaturado pode resultar na criação de bolhas de gás que podem provocar doenças e até mesmo a morte de peixes [23], [25], [31] e [20]. A pesquisa examina o impacto do tamanho e da configuração das estruturas reguladoras de canal na dissipação e no transporte de TDG supersaturado, além de avaliar o efeito da supersaturação de TDG em peixes em variados cenários de simulação. A pesquisa de [33] empregou um modelo matemático para simular a hidrodinâmica em uma parte do rio Jialing, na China, situada a 3 km de distância da barragem de Caojie e com um comprimento de 4 km. O modelo foi confirmado através de testes laboratoriais e os resultados foram confrontados com dados experimentais. A pesquisa examinou o impacto do tamanho e da configuração das estruturas de controle de canal na dissipação e no transporte de TDG supersaturado, além de avaliar o efeito da supersaturação em peixes em variados cenários de simulação [33]. A finalidade da pesquisa foi oferecer uma fundamentação científica para minimizar o impacto negativo do TDG supersaturado em peixes e para a criação de rotas de navegação ecológicas. Os resultados indicam que a edificação de estruturas de controle de canal, como diques e quebra-mares, pode exercer um impacto considerável na dissipação e movimentação de TDG supersaturado em massas de água. A pesquisa também revelou que a edificação de quebra-mares e o desmoronamento de recifes não impactaram significativamente a distribuição de TDG. Por outro lado, a construção de diques restringiu o fluxo de água e ampliou o tempo de retenção de água com TDG supersaturado, garantindo que a área de baixa saturação de TDG permanecesse em uma área específica. Isso pode proporcionar um refúgio para os peixes, protegendo-os dos efeitos danosos do TDG supersaturado [33].

O trabalho intitulado *“Lethal Effect of Total Dissolved Gas-Supersaturated Water with Suspended Sediment on River Sturgeon (Acipenser dabryanus)”* [26], abordam o impacto fatal da água supersaturada em TDG, juntamente com sedimentos em suspensão em peixes. O texto ressalta que elevadas concentrações de TDG e elevadas concentrações de sedimentos suspensos (SS) constituem graves riscos para a sobrevivência dos peixes durante o período de inundações. Contudo, pouco se conhece acerca dos impactos da supersaturação de TDG com níveis variáveis de SS em peixes [15], [14], [36], [30] e [26]

. A pesquisa fornece dados relevantes sobre este assunto e pode auxiliar na implementação de ações efetivas para a salvaguarda dos peixes e a gestão de reservatórios durante o período de inundações [26].

A pesquisa empregou peixes jovens de esturjão do rio de cinco meses, obtidos do Instituto de Pesquisa de Pesca de Sichuan. Foram escolhidos para o experimento os jovens saudáveis com um tamanho corporal uniforme. Os sedimentos utilizados no experimento foram obtidos do rio Jinsha, sendo selecionados aqueles com diâmetro médio de 7 micrometro, que corresponde ao tamanho das partículas no rio Yangtze. O equipamento experimental incluiu um tubo de água, um reservatório de pressão, uma bomba, um compressor de ar e tanques de experimentação. A água turva proveniente do canal de água foi conduzida ao recipiente de pressão e combinada com o ar do compressor para gerar água supersaturada de TDG com SS. A pesquisa analisou a taxa de mortalidade do esturjão do rio quando exposto a diversas concentrações de TDG e SS. A análise estatística dos dados permitiu estabelecer as conexões entre a mortalidade e as concentrações de TDG e SS [26].

Os resultados da pesquisa indicaram que a exposição do esturjão do rio à água supersaturada de TDG com níveis variáveis de SS levou a uma mortalidade considerável e a manifestações anormais da doença das bolhas de gás [26]. O aumento das concentrações de TDG e SS elevou a taxa de mortalidade, enquanto o tempo médio de morte teve uma redução considerável. Ademais, a pesquisa revelou que a taxa de mortalidade e o tempo médio de morte foram influenciados pela interação entre TDG e SS. Os achados indicam que elevadas concentrações de TDG e SS representam graves riscos à sobrevivência dos peixes durante a época de inundações, sendo necessário adotar ações efetivas para salvaguardar as populações de peixes e regular os reservatórios durante esse período [26].

O estudo de [24] "*Model for Total Dissolved Gas Supersaturation from Plunging Jets in High Dams*" teve o propósito de investigar os processos de projetos hidrelétricos que utilizam um jato de mergulho (*plunging*) que trabalha com um fluxo de líquido ou gás que é projetado com uma força significativa em direção a uma superfície, entrando em contato com um meio fluido ou sólido de forma abrupta, geralmente perpendicularmente ou em um ângulo acentuado que dentro do cenário gera elevados

níveis de TDG e oferecer uma técnica para calcular esses níveis. O texto fornece uma perspectiva geral sobre o problema da supersaturação de TDG em barragens e sua conexão com a saúde dos peixes e outros seres aquáticos que vão de encontro aos trabalhos de [31], [20], [23] e [24]. O modelo é segmentado em duas fases: a primeira descreve a formação de bolhas de ar no processo de jato de mergulho (*plunging*) e a segunda descreve a dissolução dessas bolhas na água, levando a elevados níveis de TDG. O modelo considera diversos fatores, tais como o fluxo de água, o desnível da queda, a forma do jato *plunging* e as propriedades da bacia de amortecimento. O modelo é confirmado através de comparações com dados experimentais e é empregado para prever os níveis de TDG em variados cenários de funcionamento da barragem [24].

Os resultados indicam que o modelo sugerido é apto a calcular com exatidão os níveis de TDG em empreendimentos hidrelétricos que utilizam um jato *plunging*. Adicionalmente, o modelo pode antecipar os impactos de diversos parâmetros operacionais da barragem, como a quantidade de água e a altura da queda d'água, nos níveis de TDG. Ademais, os resultados indicam que a produção de TDG em empreendimentos hidrelétricos utilizando um jato *plunging* é um processo intrincado que depende da interação de diversos elementos, como a geometria do jato e as propriedades da bacia de amortecimento [24].

O trabalho divulgado no "*International Journal of Environmental Research and Public Health*" por [7] investiga as propriedades de resistência dos peixes que habitam o rio Yangtze superior a diferentes níveis de TDG. O autor enfatiza a relevância da pesquisa, ressaltando que a usina hidrelétrica de Xiluodu, localizada na China, transporta um volume considerável de ar para o reservatório de dissipação de energia a montante durante a época de inundações, o que pode comprometer a sobrevivência dos peixes. A finalidade da pesquisa é analisar a resistência dos peixes a variados níveis de TDG, fornecendo dados para a elaboração de estratégias de proteção de peixes em outras bacias hidrográficas globais, esse cenário vai de encontro aos trabalhos de [34], [7], [15] e [14].

A pesquisa analisou a resistência dos peixes que habitam o rio Yangtze Superior a variados graus de supersaturação de gás através de experimentos em laboratório e de campo. Os peixes raros da espécie *Schizothorax* foram empregados. Em ambos os

experimentos, a taxa de mortalidade dos peixes foi determinada e o (AFT) foi empregado para medir a tolerância dos peixes em experiências laboratoriais. A análise de sobrevivência foi empregada para determinar a viabilidade dos peixes em experimentos laboratoriais, além de ser avaliada a presença de indícios de doença da bola de gás (DBG). A pesquisa empregou a análise de Mantel-Cox para comparar a taxa de sobrevivência entre cada par de casos [7].

Os resultados da pesquisa indicaram que a resistência dos peixes *Schizothorax* à supersaturação de TDG variou de acordo com o pico e a extensão da TDG. Em experimentos de laboratório com TDG variável, a tolerância dos peixes foi inferior em relação à TDG constante. A sobrevivência dos peixes diferiu consideravelmente em ciclos de flutuação de 6 horas a 6 horas, em contraste com ciclos de flutuação de 8 horas a 8 horas, porém não sofreu impacto em ciclos de flutuação de 110-130% de TDG, [7]. Em experimentos de campo, a taxa de mortalidade dos peixes foi superior em setembro em relação a julho, devido ao pico de TDG e à dificuldade dos peixes em escapar para profundidades mais abruptas. A diminuição contínua da TDG não elevou de forma significativa a tolerância dos peixes. A pesquisa forneceu dados relevantes para a elaboração de estratégias de salvaguarda de peixes em outras bacias hidrográficas globais [7].

O texto dos autores [34] analisa a capacidade de tolerância e desenvolvimento de *Schizothorax prenanti* adultos quando expostos a gás supersaturado a montante de uma barragem. A doença das bolhas de gás, uma das principais causas de morte de peixes nativos em rios que possuem barragens, é abordada também pelos autores [14], [15], [7] e [6]. A finalidade da pesquisa é oferecer dados relevantes para a preservação de peixes nativos em rios represados que é uma das principais causas de mortalidade de peixes endêmicos em rios com barragens [28]. O estudo foi realizado para avaliar os efeitos do TDG em *Schizothorax prenanti*, uma espécie de peixe endêmica da China. O objetivo do estudo é fornecer informações valiosas para a conservação de peixes endêmicos em rios com barragens.

O trabalho segundo os autores [34] empregou um procedimento experimental para analisar a tolerância e o desenvolvimento de *Schizothorax prenanti* adultos expostos a TDG supersaturado a montante de uma barragem. Os peixes foram capturados no rio

Minjiang, localizado na China, e armazenados em um aquário por uma semana antes do experimento. Durante 96 horas, os peixes foram expostos a diversos níveis de TDG [34]. Depois de expostos, os peixes permaneceram em água limpa durante um período de recuperação de 96 horas. Avaliaram-se parâmetros como mortalidade, comportamento, crescimento e biomarcadores de estresse oxidante.

Conforme [34] a pesquisa revelou que a exposição à TDG teve um impacto significativo na sobrevivência e no desenvolvimento do *Schizothorax prenanti*. A taxa de mortalidade dos peixes submetidos à TDG superou a dos peixes criados em água limpa. Ademais, os peixes submetidos à TDG tiveram um crescimento consideravelmente inferior em comparação aos peixes mantidos em água limpa. Os biomarcadores de estresse oxidativo também apresentaram um aumento significativo nos peixes que receberam TDG. Contudo, os peixes que resistiram à exposição à TDG e permaneceram em água limpa durante um período de recuperação apresentaram uma diminuição na taxa de mortalidade quando reexpostos à TDG. Os achados indicam que o contato com TDG pode afetar negativamente a sobrevivência e o desenvolvimento de *Schizothorax prenanti*, contudo, a recuperação pode acontecer após um período específico em água limpa [34].

O artigo, "*Installation of deflector in Colider Dam to minimize the percentual of total dissolved gases,*" [39], foca na implementação de defletores no vertedouro da barragem, uma solução projetada para evitar o fluxo de mergulho, que transporta bolhas para regiões de alta pressão no canal de dissipação, aumentando assim a dissolução de gases. A pesquisa utilizou um modelo físico em escala reduzida (1:60) para desenvolver uma curva de desempenho do defletor. Paralelamente, um modelo numérico com *Open FOAM* que foi desenvolvido para simular a dinâmica dos fluxos e prever a produção de TDG. Após a instalação dos defletores em novembro de 2021, os primeiros testes mostraram que os defletores reduziram em cerca de 30% os níveis de TDG para pequenos vertimentos. Para fluxos superiores a 1000 m<sup>3</sup>/s, a redução foi de aproximadamente 10% de TDG, especialmente em situações sem operação das turbinas. Esses resultados confirmam a eficácia dos defletores em diminuir a concentração de TDG, validando os estudos prévios e contribuindo para a segurança ambiental da área ao mitigar o risco para os peixes e o ecossistema aquático.

A análise do estudo ressalta a importância de uma abordagem combinada entre modelos físicos e computacionais para aprimorar o projeto de estruturas hidráulicas e implementar soluções eficazes para problemas ambientais.

O artigo "*Modeling Total Dissolved Gas for Optimal Operation of Multireservoir Systems*" [40], os autores desenvolveram um modelo físico de TDG com o objetivo de otimizar as operações de vertimento em sistemas hidrelétricos multirreservatórios. O modelo considera variáveis independentes como a concentração de TDG no reservatório, a elevação do nível d'água a jusante, as descargas das turbinas e vertedouros, o desnível da barragem, além de parâmetros ambientais, como temperatura e pressão atmosférica. O modelo foi calibrado e validado com dados reais encontrados na Barragem de *Rock Island* em Washington. A análise de sensibilidade realizada pelos autores foi fundamental para entender como diferentes fatores influenciam a produção de TDG, como a entrada de ar, a dissolução de gases e a interação do fluxo lateral da casa de força. Os resultados do estudo demonstram que uma gestão otimizada das descargas pode reduzir a supersaturação de gases, contribuindo para a proteção da ictiofauna.

O artigo "*Fish die-off in river and reservoir*" [5], discute os mecanismos envolvidos, destacando os limites letais de OD e TDG para diferentes espécies de peixes. A revisão inclui uma análise das principais ocorrências de mortalidade de peixes no Brasil na última década e as melhores práticas para monitorar, prevenir e mitigar esses eventos. O impacto ambiental das usinas hidrelétricas é destacado, e os autores recomendam que esses riscos sejam considerados em processos de licenciamento ambiental. Os pesquisadores apontam que, embora eventos de supersaturação de gases possam ser rapidamente detectados em algumas situações, sua natureza transitória e a dificuldade de coleta de dados contínuos complicam a identificação precisa das causas. Eles defendem um monitoramento contínuo da saturação de gases, o que ajudaria a compreender melhor as especificidades subjacentes e a definir faixas operacionais seguras para a operacionalização de sistemas hidro intensivos.

O artigo "*Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Tres Marias Dam, Brazil.*" [41] destaca dois métodos principais usados para proteção do povoamento de peixes, principalmente o mandi (*Pimelodus*

*maculatus*). Os pesquisadores avaliaram a eficácia dessas técnicas analisando se o vertimento poderia atrair os peixes e se as notas reduziriam as mortes ou danos. Embora a eficácia do vertimento tenha sido inconclusiva devido às limitações estatísticas, os graus de proteção provados foram eficazes, reduzindo significativamente a biomassa de peixes mortos ou feridos. Além disso, uma análise mostrou que a quantidade de peixes presos durante a condução estava em direções correlacionadas com a vazão da turbina, indicando que aumentar a vazão antes da condução pode reduzir o aprisionamento. Essas descobertas são relevantes não apenas para Três Marias, mas também para outras barragens no Brasil, onde a mortalidade de peixes durante manobras de turbinas é uma preocupação ambiental significativa. O artigo propõe que as práticas de manejo sejam ajustadas com base nessas observações para mitigar o impacto sobre a fauna aquática.

O artigo "*Hydropower Development and Fish Management: A Food-Water-Energy Nexus Requiring International and Multidisciplinary Approach*" [42], enfatiza que o desenvolvimento de hidrelétricas, embora essencial para atender à crescente demanda energética, muitas vezes entra em conflito com a saúde dos ecossistemas aquáticos, especialmente em regiões que dependem da pesca para segurança alimentar e econômica. Este conflito se inseriu no chamado "nexo alimento-água-energia", que requer uma abordagem internacional e interdisciplinar para equilibrar a produção energética com a gestão sustentável de recursos hídricos e da biodiversidade.

Os autores destacam que as práticas de manejo de peixes, como a criação de passagens e soluções técnicas para reduzir o impacto das turbinas, ainda são desafiadoras e extraordinárias de inovações científicas e técnicas. Eles defendem uma colaboração internacional, uma troca de conhecimentos e a necessidade de desenvolver modelos de gestão que possam ser aplicados em diferentes contextos geográficos. Além disso, há um apelo a políticas públicas que levem em consideração os aspectos ecológicos na expansão de projetos hidrelétricos, garantindo uma coexistência sustentável das atividades humanas e da ictiofauna ali presente.

O artigo "*Methodology for risk assessment of fish death at hydropower plants,*" [43] aborda a avaliação de risco de morte de peixes em usinas hidrelétricas, com foco nas metodologias e práticas para prevenir tais ocorrências. O estudo faz parte do livro "Peixes e Usinas Hidrelétricas", publicado pela Companhia Energética de Minas Gerais

(CEMIG) - Peixe Vivo, e se concentra nas práticas de gestão ambiental e nas implicações ecológicas de hidrelétricas. O principal objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia para avaliar os riscos de mortalidade de peixes em usinas hidrelétricas, proporcionando uma forma de identificar, mitigar e monitorar os impactos dessas instalações sobre os ecossistemas aquáticos. O estudo descreve a utilização de uma metodologia integrada, que inclui uma análise de variáveis ambientais, características operacionais das usinas e os diferentes tipos de peixes presentes nas áreas afetadas. A metodologia emprega uma abordagem quantitativa e qualitativa para identificar os riscos potenciais e desenvolver estratégias de minimização. O estudo considera fatores como a qualidade da água, a temperatura, os níveis de oxigênio, o fluxo das turbinas, e o comportamento migratório dos peixes. Esses modelos ajudam a antecipar as condições em que os peixes podem ser mais vulneráveis, como durante períodos de pico de geração de energia ou quando a hidrodinâmica da usina sofre variações em seus parâmetros. O estudo ainda conseguiu identificar os principais fatores operacionais e ambientais que afetam a morte de peixes em usinas hidrelétricas. Isso inclui variáveis como a velocidade da água, a pressão nas turbinas, a temperatura e a qualidade da água. Foi desenvolvida uma metodologia quantitativa para avaliar o risco de mortalidade de peixes, com a criação de modelos de simulação que avaliam variáveis operacionais e ambientais. Esses modelos ajudaram a prever os cenários de risco em diferentes condições de operação da usina e durante períodos de variação de níveis de água.

Os autores do artigo "*A meta-analysis of gas bubble trauma in fish.*,"[44], destacam que o trauma por bolhas de gás é um problema significativo para a saúde dos peixes e pode levar a danos aos tecidos, redução da capacidade de natação, distúrbios comportamentais e, em casos mais graves, à morte. Além disso, esses efeitos podem variar em termos de diversidade ambiental dos peixes e, por consequência, dos ecossistemas aquáticos. A supersaturação de gases também pode ter implicações econômicas, principalmente nas indústrias pesqueiras e na conservação de recursos hídricos. A metodologia do estudo consiste em uma meta-análise de estudos existentes sobre os efeitos do trauma por bolhas de gás em peixes. Os autores realizaram uma busca na literatura, selecionando estudos que apresentavam dados quantitativos sobre a mortalidade e lesões causadas pela supersaturação de gases. Foram extraídos dados

sobre intensidade de supersaturação, tipo de dano, tempo de exposição e mortalidade. Utilizando análise estatística, os dados foram combinados para calcular o efeito médio do trauma, considerando variáveis como espécie, tipo de gás e condições experimentais. Os resultados da meta-análise sobre o trauma por bolhas de gás em peixes indicaram que a supersaturação de gases tem efeitos significativos sobre a saúde dos peixes, resultando em alta mortalidade, lesões internas e alterações comportamentais. A mortalidade foi especialmente pronunciada quando os peixes foram expostos a altas concentrações de oxigênio ou nitrogênio dissolvido, com o aumento da mortalidade correlacionado à intensidade da supersaturação e à duração da exposição. Além disso, os peixes apresentam lesões em órgãos internos, como fígado, enxágue e sistema nervoso, devido à formação de bolhas nos tecidos. O comportamento dos peixes demonstrou desorientação, dificuldade de natação e perda de equilíbrio, efeitos que foram mais pronunciados em exposições prolongadas. Uma análise também revelou que diferentes espécies de peixes apresentam diferentes níveis de resistência, sendo alguns deles mais vulneráveis aos danos causados pela supersaturação de gases. Embora os efeitos do trauma por bolhas de gás fossem evidentes tanto em ambientes laboratoriais quanto no campo, a mortalidade e os danos foram mais intensos em condições naturais, afetando que fatores ambientais adicionais podem amplificar os efeitos. Os resultados também demonstraram que a duração da exposição e a concentração de gases são os principais fatores que determinam a gravidade dos danos, [44].

O estudo "*Laboratory Studies of the Effects of Pressure and Dissolved Gas Supersaturation on Turbine-Passed Fish*", [45] tem como objetivo de investigar os efeitos da pressão e da supersaturação de gases distribuídos sobre peixes que passam por turbinas de usinas hidrelétricas. O estudo foi realizado no contexto das preocupações ambientais sobre os impactos da operação das usinas hidrelétricas na fauna aquática, especificamente em relação à mortalidade e aos danos causados aos peixes durante o processo de passagem pelas turbinas. O estudo foi conduzido em um ambiente laboratorial controlado, onde os pesquisadores simularam as condições causadas em uma usina hidrelétrica, focando na passagem de peixes por turbinas. Foram utilizados tanques de laboratório, fornecidos para controlar as condições de

pressão e a quantidade de gases distribuídos na água. Os peixes foram expostos a variações de pressão e níveis de supersaturação de gases, com monitoramento rigoroso das condições experimentais para replicar o mais próximo possível as condições reais que os peixes enfrentam nas turbinas. Os principais resultados segundo os autores foram, a pressão variada teve um efeito significativo sobre os peixes, com mudanças abruptas de pressão resultando em danos físicos, a supersaturação de oxigênio e nitrogênio dissolvido na água também teve um impacto crítico sobre a saúde dos peixes, a combinação de pressão elevada e supersaturação de gás aumentou significativamente a taxa de mortalidade e existem espécies mais vulneráveis aos efeitos da supersaturação.

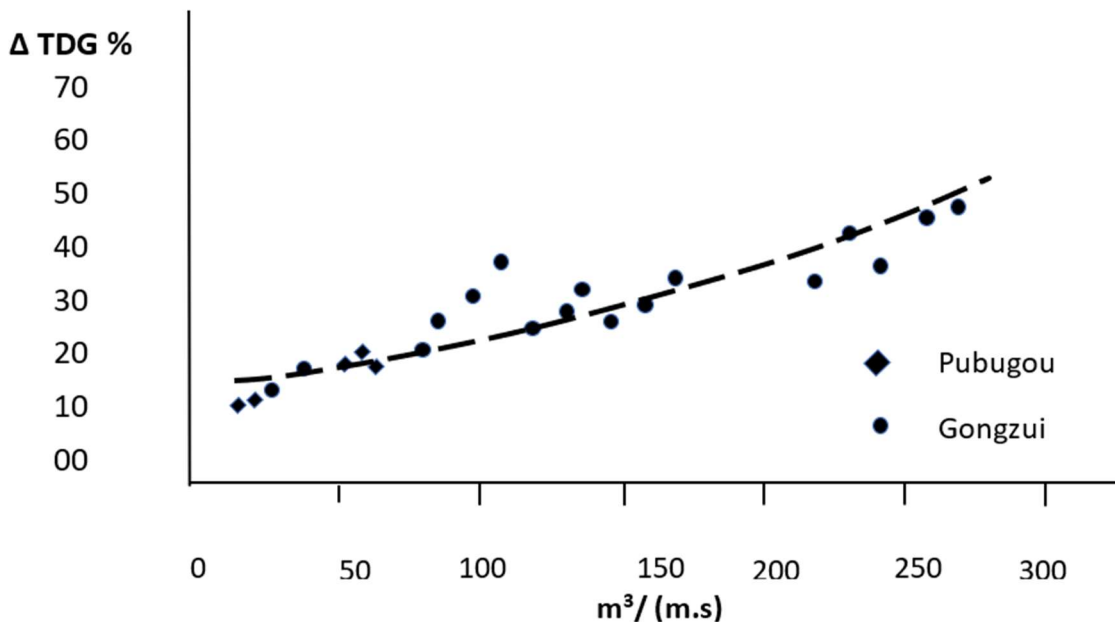
A revisão de [2], compila dados de campo e laboratório de TDG em diferentes tipos de vertedouros que podem ser utilizados para análises iniciais de aumento de TDG em estruturas. No relatório Appendix C – *Technical Analysis of TDG Processes*, dos autores [68], são apresentadas formulações teóricas e equações que descrevem de forma clara a relação entre TDG e vazão específica. O relatório mostra que a variação da pressão do gás dissolvido acima do barômetro aumenta quase exponencialmente com a vazão específica, sendo também modulada pela profundidade de jusante. O documento recomenda, ainda, que em vertimentos não uniformes seja utilizada a vazão específica ponderada, a fim de melhorar a precisão das estimativas. Apesar disso, não são fornecidos resultados experimentais que detalhem a variação de TDG em função da vazão específica, [68]. O trabalho de [24], publicado no *Journal of Hydraulic Engineering*, apresenta um modelo mecanicista para jatos mergulhantes, contudo, o artigo não traz gráficos ou correlações empíricas diretas entre TDG e vazão específica, mas sim modelos baseados em tempo de residência e pressão média no ressalto. O estudo dos autores [69], reconhece que há relações empíricas entre TDG e vazão em determinados contextos. No entanto, o modelo proposto para usinas de grande queda prioriza a profundidade hidrostática e a pressão no ressalto, sem apresentar correlações experimentais diretas entre TDG e vazão específica, [69]. No trabalho dos autores [40], publicado no *Journal of Hydraulic Engineering*, a modelagem de sistemas multireservatórios incorpora parâmetros hidrodinâmicos, incluindo a profundidade efetiva e a mistura de fluxos provenientes do vertedouro e da casa de força. Embora

mencione estudos que relacionam profundidade efetiva e vazão específica, o trabalho não apresenta correlações diretas entre TDG e essa variável, concentrando-se na aplicação do modelo como ferramenta de suporte à operação, [40]. Já no trabalho de [70], publicado no *Journal of Cleaner Production*, o foco é a mitigação da supersaturação por meio de defletores em vertedouros. Os autores apresentam dados de TDG em função da descarga total, mas não correlacionam os resultados com a vazão específica, restringindo-se ao impacto do desenho dos defletores, [70]. De modo semelhante os autores [71], aplicam técnicas de aprendizado de máquina para prever TDG. Embora identifiquem o volume de água liberado através do vertedouro como variável importante, não analisam explicitamente a dependência de TDG com vazão específica, [71]. Por fim, [72], apresentam um estudo in situ sobre os efeitos adversos da supersaturação de gases em peixes no rio Xijiang. O trabalho concentra-se nas respostas biológicas (sobrevivência e lesões de natação) a concentrações de TDG entre 112 e 125%, sem explorar qualquer correlação com variáveis hidráulicas como a vazão específica [72]. Em síntese, a evidência direta da relação entre TDG e vazão específica foi identificada apenas no Appendix C, [68], que apresenta equações demonstrando que a supersaturação aumenta com a vazão específica, modulada pela profundidade de jusante. No entanto, o documento não disponibiliza resultados experimentais ou gráficos detalhando essa variação. Os demais trabalhos analisados abordam outros aspectos, como modelagem mecanicista, estratégias de mitigação, previsão por inteligência artificial ou impactos ecológicos, reconhecendo a relevância da descarga, mas sem fornecer correlação empírica explícita com a vazão específica. O trabalho dos autores [73], apresenta um estudo sobre a elevação de TDG em vertimentos, demonstrando a correlação entre vazão específica e o aumento de TDG em diferentes tipos de vertedouros. Esse estudo constitui o arcabouço técnico-metodológico que fundamentará a avaliação da elevação de TDG nas UHEs analisadas nesta investigação. A partir desse referencial, será possível propor a priorização do despacho das usinas, criando cenários operativos frente a possíveis patamares de TDG resultantes das descargas a jusante. A Figura 1 mostra resultados do vertedor do tipo perfil *Creager* da barragem de Gongzui e do vertedor de salto de esqui da barragem de Pubugou, com dados relatados por [73], onde a saturação de entrada é tomada como a linha de base (100%). Neste estudo, para a faixa analisada, verificou-se que descargas unitárias abaixo

de  $70 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$  em descarregadores com salto de esqui elevaram o TDG em até aproximadamente 20%, enquanto descargas maiores, em vertedouros de perfil Creager com bacia de dissipação, chegaram a até aproximadamente 46%; esses valores refletem o conjunto de casos estudados e podem variar em outras geometrias e condições operativas.

É importante registrar que nessa análise vai-se admitir que a saturação de base (antes dos vertedouros) será considerada como sendo de 100% o que pode não ser representativo, principalmente nos casos em que as UHEs estão em cascata e são a fio d'água.

Figura 1 - Vertedor do tipo perfil *Creager* da barragem de Gongzui e vertedor de salto de esqui da barragem de Pubugou.



Fonte: Adaptado de [73].

O ajuste dos dados experimentais de [73] resultou na Equação (1) ( $R^2 = 0,819$ ), que estima a variação de TDG, em função da vazão específica  $Q_{esp}$  ( $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ ), válida para  $10 \leq Q \leq 250 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ .

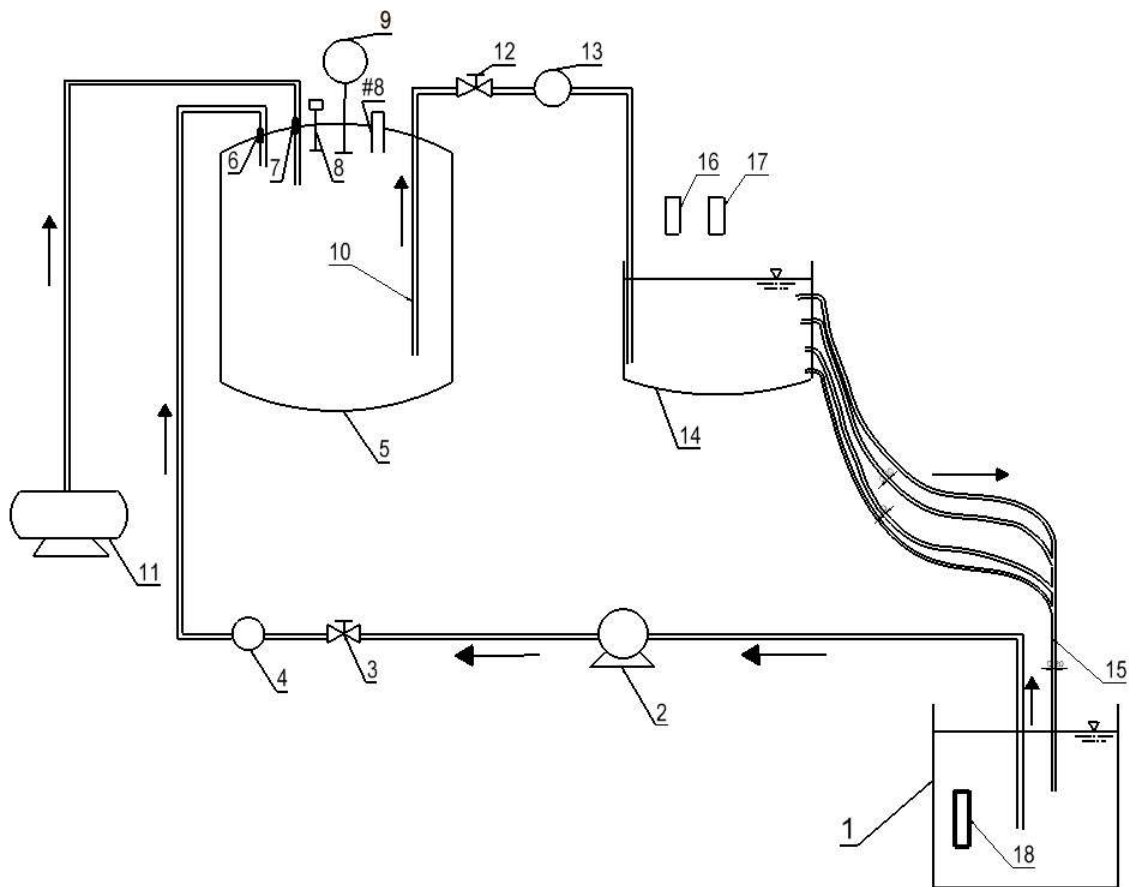
$$\Delta \text{TDG}_{\%} = 14.094. e^{0,005.Q_{esp}} \quad (1)$$

## 2.2 PATENTES DE EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE SUPERSATURAÇÃO GASOSA

Além da pesquisa baseada em artigos de revistas e periódicos, expandiu-se a análise para as patentes com similaridade ao assunto pesquisado sendo selecionadas aquelas cuja características e o funcionamento dos equipamentos propostos são relevantes para esta pesquisa.

Segundo [46] a análise do Modelo de Utilidade CN201479739U originalmente publicado em chinês e intitulado – tradução livre “Dispositivo para o estudo da geração supersaturada de gás dissolvido total na água e seu impacto nos peixes” se refere a um equipamento experimental destinado a estudar a supersaturação de gás dissolvido total em água com temperatura controlável e sua influência sobre os peixes. O dispositivo inclui autoclave e um compressor de ar, uma válvula reguladora de ar, uma válvula de segurança de ar, um barômetro, uma entrada de água e uma saída de água; também tem um tanque inferior com água que contém controlador de temperatura e uma bomba de água. O dispositivo coleta água de um tanque aberto à atmosfera por meio de uma bomba e a conduz, por meio de tubulação forçada, até um tanque hiperbárico que possui entradas de ar e onde o nível de água é mantido estável de forma que a água sofra um processo de supersaturação sendo posteriormente conduzida a um tanque aberto para a atmosfera onde fica armazenada sendo que esse tanque possui saídas em diversos níveis o que permite a retirada de água saturada em vários valores de saturação. A análise dos desenhos e esquemas contidos no MU CN201479739U mostra que o sistema opera em circuito fechado restaurando a água à medida que ela passa pelo saturador. Pode-se perceber pela descrição do dispositivo que ele é constituído por apenas um cilindro saturador, funciona em circuito fechado e que não possui câmara de estabilização hiperbárica sendo diferente da proposta em epígrafe não guardando semelhanças com o pedido em apreço que se trata de um sistema hidromecânico multi - modulo compacto de supersaturação gasosa de água e demais líquidos. A invenção contribui para uma melhor compreensão dos impactos ambientais de projetos hidrelétricos e outras infraestruturas hídricas, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Desenho esquemático do modelo CN201479739U.



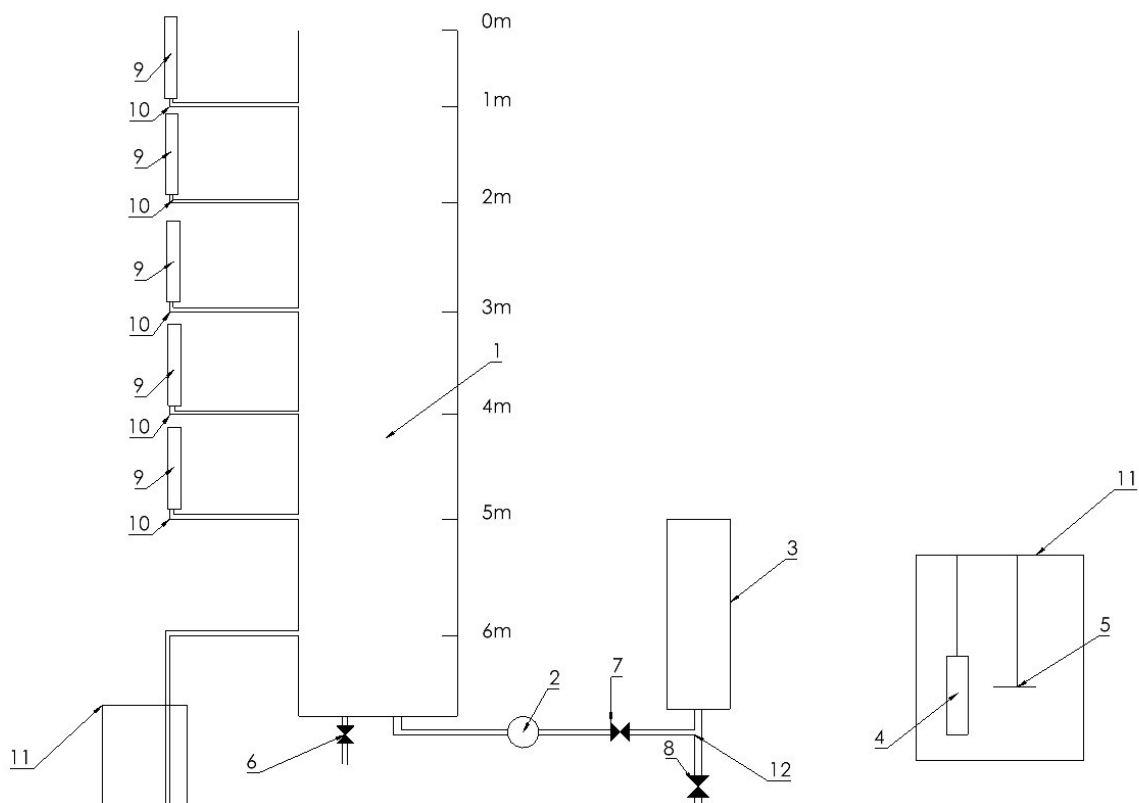
Fonte: Adaptado de [46].

Onde:

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 1 - Tanque de ensaios;           | 10 - Ponto de entrega;                   |
| 2 - Bomba de água;               | 11 - Compressor de ar;                   |
| 3 - Válvula de esfera;           | 12 - Válvula de esfera;                  |
| 4 - Medidor de vazão;            | 13 - Medidor de vazão;                   |
| 5 - Parede externa do tanque;    | 14 - Tanque;                             |
| 6 - Entrada de água;             | 15 - Tubos de emulsão;                   |
| 7 - Entrada de ar;               | 16 - Analisador geral de gás dissolvido; |
| 8 - Válvula de ar;               | 17 - Monitor de qualidade de água;       |
| 8# - Válvula de ar de segurança; | 18 - Controlador de temperatura;         |
| 9 - Manômetro;                   |  |

O aparato experimental CN101303336B, conforme descrito na Figura 3 e detalhado pelos inventores [47], originalmente publicado em chinês e intitulado – tradução livre – “Aparelho experimental de supersaturação de gás dissolvido total em água de barragem a jusante” de 30 de maio de 2012 é um sistema projetado para simular e medir as condições de supersaturação de gases totais dissolvidos em água, com foco em aplicações relacionadas a reservatórios e represas sendo composto por um vaso aberto em forma de coluna de água, válvulas de controle, medidores de vazão, compressores de ar, analisadores de gases, agitadores e manômetros. Nesse aparato o ar é injetado na parte inferior do vaso aberto e à medida que ele ascende na coluna de água passa por um processo de saturação sendo coletado em diversas alturas sob condições diferentes de saturação gasosa. Pode-se perceber que o aparato tem uma única coluna, aberta a atmosfera e que, a exemplo do dispositivo apresentado anteriormente, tem retirada de água saturada em diferentes alturas e níveis de saturação gasosa.

Figura 3 - Desenho esquemático do modelo CN101303336B.



Fonte: Adaptado de [47].

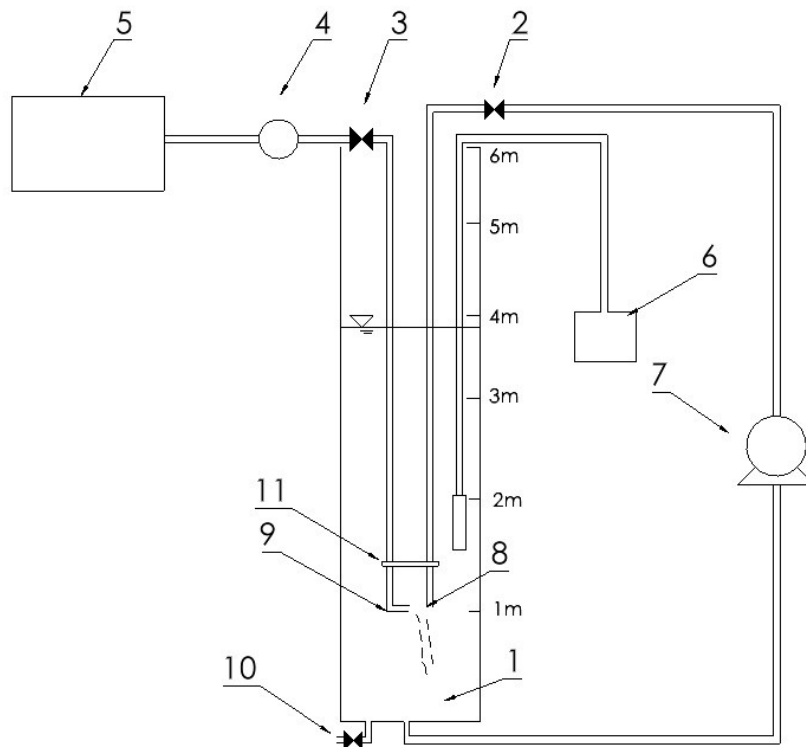
Onde:

- 1 - Coluna de água;
- 2 - Medidores de vazão;
- 3 - Máquinas compressoras de ar;
- 4 - Analisadores gerais de gases dissolvidos;
- 5 - Agitadores;
- 6 - Primeira válvula;
- 7 - Segunda válvula;
- 8 - Terceira válvula;
- 9 - Manômetros de mercúrio;
- 10 - Tubos de emulsão;
- 11 - Béqueres;
- 12 - Tubo de três vias;

Os autores [48] descrevem o aparato CN101806793B originalmente publicado em chinês e intitulado – tradução livre - “Dispositivo experimental para geração de gás dissolvido geral supersaturado por dopagem de ar de jato de alta velocidade” é um dispositivo experimental para geração de gás dissolvido supersaturado por dopagem de ar de jato de alta velocidade. O equipamento é composto por uma coluna de água, medidor de vazão, compressor de ar, medidor de gás dissolvido, bocal hidráulico injetor de água, e outro bocal injetor de ar (gás). O compressor de ar está conectado ao medidor de vazão, que por sua vez está conectado com o bocal de injeção de gás acoplado na coluna de água. A sucção da bomba é conectada ao fundo da coluna de água, enquanto a seção de recalque é conectada a um bocal injetor de fluxo de água que está inserido na coluna de água. A supersaturação se dá por meio de dopagem de ar com jato de alta velocidade em um corpo de água, conforme a Figura 4. A finalidade do dispositivo é permitir o controle na medição das principais condições físicas que afetam a geração do gás dissolvido geral supersaturado, como a velocidade do fluxo de jato de um corpo de água, quantidade de ar dopado, pressão, profundidade da água e semelhantes. Com isso, é possível pesquisar quantitativamente o fluxo de jato dopado com ar do gás dissolvido geral supersaturado. Além disso, o dispositivo tem a importante função de

promoção na proteção do ecossistema aquático dos rios e no estabelecimento de engenharia hidráulica.

Figura 4 - Desenho esquemático do modelo CN101806793B.



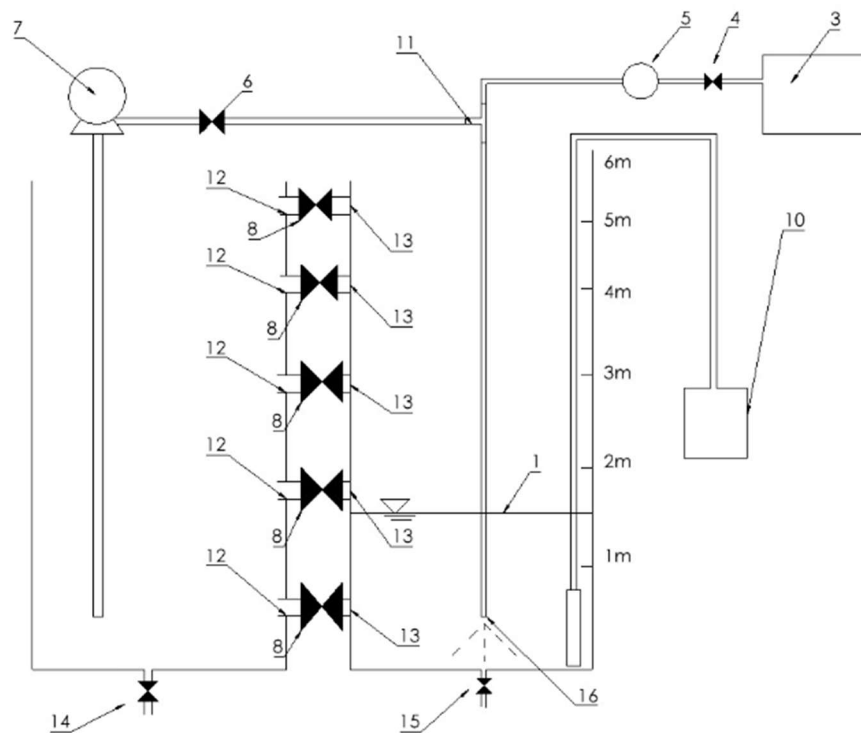
Fonte: Adaptado de [48].

Onde:

- 1 - Coluna de água;
- 2 - Primeira válvula;
- 3 - Segunda válvula;
- 4 - Medidor de vazão;
- 5 - Máquina compressora de ar;
- 6 - Analisador geral de gás dissolvido;
- 7 - Bomba d'água;
- 8 - Jato d'água;
- 9 - Bico de gás;
- 10 - Terceira válvula;

O aparato CN101793888B [49], originalmente publicado em chinês e intitulado – tradução livre - “Dispositivo experimental para fluxo de ar de alta velocidade transportando água para formar um jato para gerar gás dissolvido total supersaturado” é descrito pelos inventores como um dispositivo experimental para formação de fluxo de jato por meio da deriva de água com fluxo de ar de alta velocidade e geração de gás dissolvido total supersaturado. Ele é composto por uma coluna de água principal e uma coluna de água auxiliar, um medidor de vazão, um compressor de ar, válvulas, um determinador de gás total dissolvido, um medidor de água bomba, um tubo de jato, um bocal e um orifício de bocal. O compressor de ar é conectado a uma extremidade do medidor de vazão por uma mangueira de borracha, e o orifício do bocal na parede da coluna de água principal é conectado a uma mangueira de borracha. Uma terceira válvula é montada na mangueira de borracha e comunicada com a coluna de água auxiliar. Além disso, o aparato também inclui uma bomba d'água, um tubo de jato, um bocal, um duto sanitário e um orifício de escoamento, conforme a Figura 5. A finalidade do equipamento é gerar um fluxo de jato por meio da derivação de água com fluxo de ar de alta velocidade e geração de gás dissolvido total supersaturado. O objetivo é estudar a supersaturação geral do gás dissolvido e avaliar o desempenho do dispositivo experimental.

Figura 5 - Desenho esquemático do modelo CN101793888B.



Fonte: Adaptado de [49].

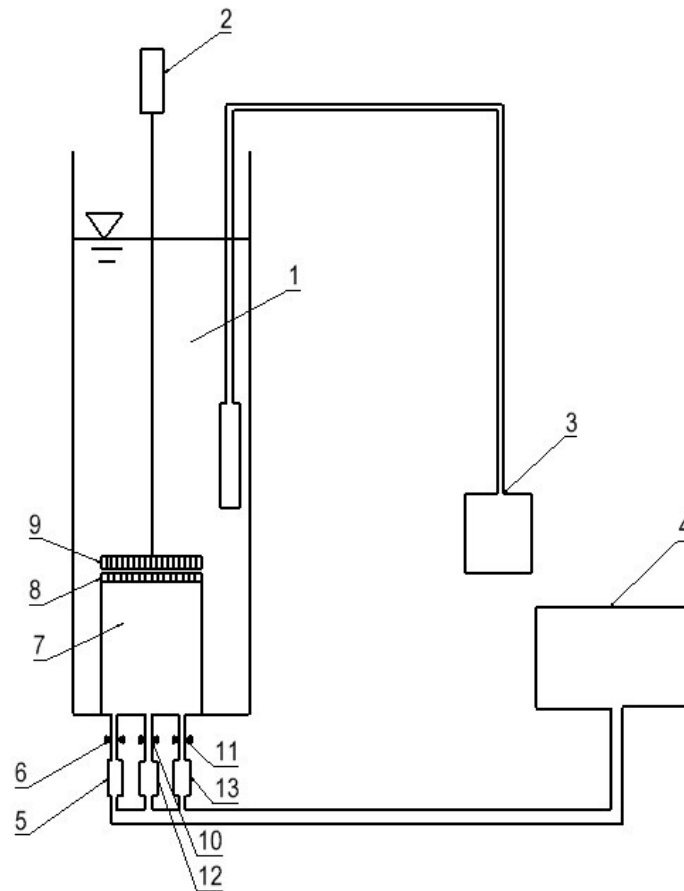
Onde:

- 1 - Coluna de água principal;
- 2 - Coluna de água secundária;
- 3 - Máquina de compressor de ar;
- 4 - Primeira válvula;
- 5 - Medidor de vazão;
- 6 - Segunda válvula;
- 7 - Bomba d'água;
- 8 - Terceira válvula;
- 9 - Tubo de jato;
- 10 - Gases dissolvidos;
- 11 - Tubo de três vias;
- 12 - Duto sífônico;
- 13 - Orifício de saída;
- 14 - Quarta válvula;
- 15 - Quinta válvula;
- 16 - Bocal;

O equipamento descrito pelos autores [50], CN101793889B originalmente publicado em chinês, intitulado – tradução livre – “Dispositivo para geração de água supersaturada” é um dispositivo experimental para medir a relação entre a geração de gás total dissolvido supersaturado em barragens e o tamanho da bolha. Ele é composto por uma coluna de água, um analisador geral de gases dissolvidos, uma máquina compressora de ar, válvulas e medidores de vazão, um mancal de rolamento e conjuntos de tela. O dispositivo utiliza cavidades de ar e conjuntos de tela para controlar o tamanho da bolha e a aprisionamento de ar, permitindo a medição da supersaturação geral de gás dissolvido no corpo d'água. O equipamento é projetado para ser conveniente de instalar e medir, com baixo custo de material e investimento em equipamentos. Ele também resolve problemas de medição em diferentes centrais elétricas e economiza recursos humanos e materiais. Em resumo, o dispositivo experimental é uma ferramenta útil para medir e entender os fatores que influenciam a geração de gás em barragens.

Para utilizar o dispositivo, é necessário conectar a coluna de água ao analisador geral de gases dissolvidos, à máquina compressora de ar, às válvulas e aos medidores de vazão. Em seguida, é necessário ajustar a cavidade de ar e os conjuntos de tela para controlar o tamanho da bolha e a aprisionamento de ar. Com isso, é possível medir a supersaturação geral de gás dissolvido no corpo d'água e entender os fatores que influenciam a geração de gás em barragens, conforme a Figura 6. Os resultados obtidos com o dispositivo podem ser usados para melhorar a segurança e a eficiência das barragens, permitindo que os engenheiros entendam melhor como a geração de gás afeta o comportamento da água e como isso pode ser controlado. Em resumo, a utilização do dispositivo experimental é uma ferramenta útil para medir e entender os fatores que influenciam a geração de gás em barragens e melhorar a segurança e a eficiência das barragens.

Figura 6 - Desenho esquemático do modelo CN101793889B.



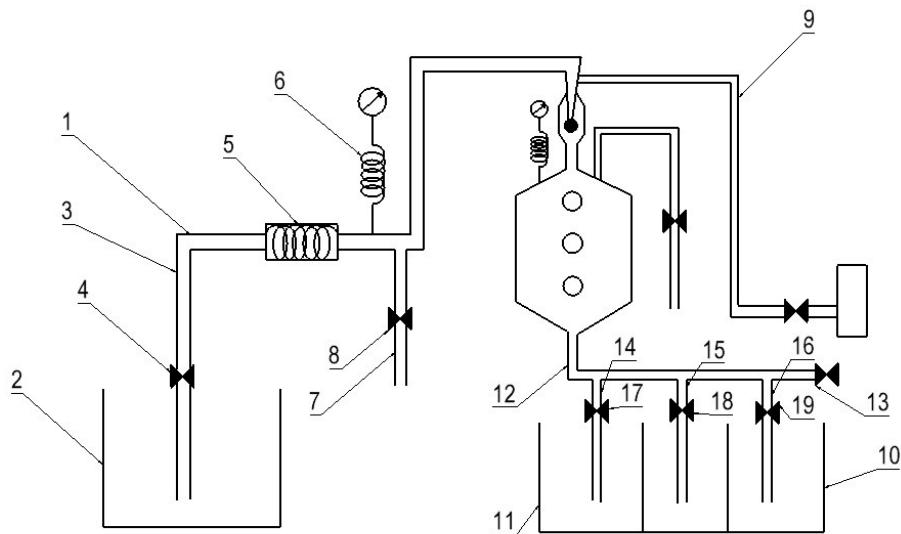
Fonte: Adaptado de [50].

Onde:

- 1 - Coluna de água;
- 2 - Rolamento;
- 3 - Analisador geral de gases dissolvidos;
- 4 - Compressor de ar;
- 5 - Primeiro medidor de vazão;
- 6 - Primeira válvula;
- 7 - Cavity de ar;
- 8 - Primeiro pano de tela;
- 9 - Segundo pano de tela;
- 10 - Segunda válvula;
- 11 - Terceira válvula;
- 12 - Segundo medidor de vazão;
- 13 - Terceiro medidor de vazão;

O aparato CN206863597U originalmente publicado em chinês e intitulado – tradução livre – “Dispositivo de geração de água supersaturada” é um modelo de utilidade que segundo os autores [51], permite quantificar e controlar a supersaturação de gases dissolvidos em corpos hídricos. Ele é composto por um tubo de entrada de água com diâmetro de 6 cm a 8 cm e comprimento de 7,5 a 8,5 m, um tubo Venturi com diâmetro nominal de 25 mm e pressão nominal de 0,25 Mpa a 4,0 Mpa, um tubo de entrada de ar com traqueias de poliuretano de alta pressão com diâmetro de 1,5 cm a 2 cm e comprimento de 4,5 a 5,5 m, um tubo de saída com diâmetro de PVC de 6 cm a 8 cm e comprimento de 4,5 a 5,5 m, e uma válvula de controle de segurança. A utilização do aparato consiste em preparar um corpo de água supersaturado com gases dissolvidos em um ambiente controlado de laboratório. O processo de preparação do corpo de água supersaturado envolve a entrada de água no tubo de entrada, que passa pelo tubo Venturi, onde é misturada com ar comprimido. Em seguida, a água é conduzida para o tubo de saída, onde é coletada e analisada para verificar a quantidade de gases dissolvidos. O controle da quantidade de gases dissolvidos na água é feito por meio da regulagem da pressão do ar, da água e do fluxo de gás. O aparato também conta com uma válvula de controle de segurança para garantir a segurança do processo, conforme a Figura 7. A utilização deste aparato pode ser aplicada em diversas áreas, como pesca, avaliação de impacto ambiental, biologia, meio ambiente e engenharia hidráulica, para realizar estudos correlativos supersaturados de gás em laboratório.

Figura 7 - Desenho esquemático do modelo CN206863597U.



Fonte: Adaptado de [51].

Onde:

- 1 - Sistemas de entrada de água;
- 2 - Fonte de água;
- 3 - Tubos de entrada de água;
- 4 - Válvula do tubo de entrada de água;
- 5 - Bombas de sucção;
- 6 - Medidor de entrada de água;
- 7 - Tubo de controle de segurança;
- 8 - Válvula de controle de segurança;
- 9 - Sistemas de geração de supersaturação;
- 10 - Sistemas experimentais de saída de água;
- 11 - Piscinas experimentais de corpo de água de supersaturação;
- 12 - Tubos de saída;
- 13 - Válvula de controle de segurança;
- 14 - Primeiro ramal de saída;
- 15 - Segundo ramal de saída;
- 16 - Terceiro ramal de saída;
- 17 - Primeira válvula de controle;
- 18 - Segunda válvula de controle;
- 19 - Terceira válvula de controle;

# Capítulo 3

## 3 ORIGEM DO PROBLEMA – CURTAILMENT, VERTEDOUROS E A SATURAÇÃO GASOSA

A matriz elétrica brasileira, historicamente sustentada por um sistema hidrelétrico robusto, enfrenta novos desafios à medida que sua expansão se concentra na Bacia Amazônica. A predominância de usinas a fio d'água, associada a restrições ambientais e regulatórias, trouxe maior complexidade à operação em cascata e aumentou a necessidade de conciliar segurança energética com preservação ambiental. Nesse contexto, o *curtailment*, prática que reduz temporariamente a geração de energia para atender restrições de despacho do ONS, tem se tornado recorrente. Na realidade amazônica, essa redução frequentemente exige a abertura de vertedouros para assegurar as chamadas vazões residuais ou sanitárias a jusante, evitando impactos diretos sobre a continuidade operacional das usinas em cascata, [5] e [39].

Os vertedouros desempenham papel fundamental na operação de UHEs, pois são responsáveis pelo controle e pelo descarregamento seguro do excesso de água dos reservatórios. Cada tipo de vertedouro é projetado de acordo com as condições específicas de vazão, topografia e regime hidrológico, de modo a garantir tanto a eficiência hidráulica quanto a segurança estrutural das barragens. Contudo, a operação dessas estruturas em diferentes cenários — seja em situações de cheia, seja em descargas associadas ao *curtailment*, pode gerar níveis elevados de TDG, [52].

A supersaturação gasosa resultante desse processo representa um problema ambiental relevante, uma vez que concentrações críticas de gases dissolvidos podem ultrapassar a tolerância fisiológica da ictiofauna, ocasionando estresse, embolias e até mortalidade em massa de espécies aquáticas, [4] e [11]. Tal fenômeno, já amplamente descrito em literatura internacional, [15] assume contornos específicos na Amazônia devido ao modelo predominante de usinas a fio d'água, à operação em cascata e à necessidade de frequentes vertimentos, [5] e [39].

Assim, compreender o papel dos vertedouros na geração de supersaturação gasosa, associado ao contexto de restrições operativas e de *curtailment*, é essencial para analisar a origem do problema. Esse panorama inicial estabelece as bases para as discussões subsequentes deste capítulo, que abordará tanto os mecanismos físicos de formação da supersaturação quanto seus impactos ecológicos e as estratégias de mitigação em estudo.

### **3.1 A PRÁTICA DO CURTAILMENT**

O termo "*curtailment*", conforme utilizado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), do Brasil, é definido formalmente como uma ação operativa de corte de geração. Trata-se de uma medida técnica e deliberada, ordenada pelo ONS, para reduzir temporariamente a potência ativa de uma ou mais usinas abaixo de sua capacidade disponível, mesmo quando há recursos energéticos suficientes, como vento, água ou sol, para gerar mais [53].

O objetivo primordial do *curtailment* nunca é econômico, mas sim garantir a segurança, a confiabilidade e a estabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), [54]. Esta ação é acionada quando a injeção total de energia no sistema pode causar sobrecarga em linhas de transmissão ou subestações, comprometer a estabilidade de frequência e tensão da rede ou violar restrições operativas específicas, como limites hidráulicos ou ambientais.

O contexto mais comum de aplicação no Brasil ocorre com as fontes intermitentes. Em situações de ventos muito fortes, a geração pode exceder a capacidade de transporte das linhas de transmissão que levam a energia para os centros de consumo em outras regiões. Para evitar danos à infraestrutura e um *blackout*, o ONS [53], é obrigado a ordenar o *curtailment*, "cortando" a geração de parques eólicos específicos. É crucial diferenciar o *curtailment* de um simples despacho econômico. No despacho, uma usina não gera porque sua energia não é necessária naquele momento, havendo outras fontes prioritárias. No *curtailment*, a energia é necessária e a usina tem condições técnicas de gerar, mas uma restrição física na rede ou de estabilidade impede que ela opere plenamente [55]. Portanto, a definição formal do ONS para *curtailment* é uma medida de último recurso, temporária e compulsória, destinada a preservar a integridade do

sistema diante de limitações técnicas incontornáveis da rede de transmissão, sendo estritamente regulada por procedimentos do ONS [76] e da ANEEL [54].

No Brasil, embora esse conceito já fosse empregado em outros contextos, ganhou nova centralidade com a expansão de usinas hidrelétricas a fio d'água na Amazônia. Nessas condições, a prática está frequentemente associada a decisões operativas que implicam no uso intensivo dos vertedouros, o que traz implicações não apenas energéticas, mas também ambientais [5] e [39]. Esse mesmo fenômeno tem sido documentado em diferentes contextos internacionais de integração de renováveis, como demonstrado por [56], que analisaram experiências de *curtailment* em países com elevada participação eólica e solar.

O sistema elétrico brasileiro caracteriza-se por elevada participação da geração hidrelétrica, distribuída em bacias de diferentes regimes hidrológicos, [57]. Tradicionalmente, a coordenação operativa buscava otimizar a regularização proporcionada pelos grandes reservatórios, que permitiam amortecer variações de vazão e reduzir a necessidade de descargas não destinadas à geração. A mudança do perfil da matriz, com a construção de usinas a fio d'água, reduziu a capacidade de armazenamento e ampliou a frequência de situações em que o *curtailment* se torna necessário [58]. Casos semelhantes foram relatados por [59], que analisaram o elevado *curtailment* hídrico na Província de Yunnan, China e destacaram como a operação de reservatórios hidrelétricos tem sido readequada para acomodar grandes volumes de geração fotovoltaica, resultando em cortes de geração mesmo em condições de alta disponibilidade hídrica. Nesse contexto, podem ser distinguidas duas modalidades principais: o *curtailment* operativo, determinado pelo ONS em função de excesso de oferta de energia ou restrições do sistema de transmissão, e o *curtailment* ambiental, associado a decisões que visam manter padrões mínimos de qualidade ambiental ou atender condicionantes regulatórias, como a manutenção de vazões ecológicas. Em ambos os casos, há a possibilidade de descargas suplementares pelos vertedouros, gerando consequências para a qualidade físico-química da água a jusante. A supersaturação gasosa decorrente da operação de vertedouros em cenários de *curtailment* está bem documentada na literatura internacional. Estudos clássicos mostram que concentrações acima de 110 % de gases totais dissolvidos já podem causar efeitos adversos em organismos aquáticos, [4] e [11]. Modelagens hidrodinâmicas

posteriores evidenciaram que fatores como a geometria dos vertedouros, a profundidade do ressalto hidráulico e o regime de operação influenciam diretamente o nível de TDG produzido [52] e [16].

Estudos internacionais ampliam essa discussão ao avaliar também os efeitos do *curtailment* em sistemas elétricos de alta penetração de renováveis, como os trabalhos de [60], que analisaram esquemas de *curtailment* e princípios de acesso em redes europeias, e de [61], que examinaram tendências globais de cortes em geração solar fotovoltaica.

Adicionalmente, estudos recentes sobre *curtailment* em sistemas híbridos (hidrelétrico com fontes variáveis) destacam como, em alguns casos, restrições de armazenamento ou saturação do reservatório podem forçar uma redução na geração mesmo quando a demanda permitir, resultando em *curtailment* mesmo sem transmissão saturada [62]. Esse fenômeno reforça a noção de que *curtailment* não é um problema exclusivamente de rede elétrica, mas também de flexibilidade operacional das próprias usinas. Os autores [63], corroboram essa perspectiva ao analisarem o *curtailment* no sistema nórdico, enfatizando a influência de restrições de transmissão, limites de inércia e flexibilidade de geração.

No Brasil, registros recentes em empreendimentos amazônicos como Colíder e Sinop apontam que o *curtailment* associado a abertura de vertedouro sob baixas vazões podem culminar em concentrações de até 180 % de TDG, confirmando que o problema não é apenas teórico, mas já se manifesta de forma concreta em sistemas a fio d'água da região [39]. Esses episódios têm implicações ambientais graves, especialmente para espécies migradoras que utilizam os trechos de jusante como rota de deslocamento. Os sintomas observados incluem embolias gasosas, hemorragias e alterações comportamentais, caracterizando quadros típicos da Doença da Bolha de Gás, [18].

Do ponto de vista regulatório, a discussão sobre *curtailment* vai além da segurança energética. Órgãos ambientais e reguladores do setor elétrico têm enfatizado a necessidade de monitoramento contínuo dos níveis de TDG e de avaliação de medidas mitigadoras, [54]. O desafio central consiste em compatibilizar a flexibilidade operativa exigida pelas usinas amazônicas com a preservação dos ecossistemas aquáticos.

Diversas estratégias têm sido avaliadas internacionalmente para mitigar os efeitos da supersaturação em cenários de *curtailment*. Entre elas, destacam-se a adoção de vertedouros do tipo salto de esqui (*ski-jump spillways*), capazes de reduzir a profundidade de mistura segundo [15]; a operação diferenciada das comportas com distribuição do fluxo em múltiplos vãos [52]; e a introdução de dispositivos dissipadores ou defletores para limitar a incorporação de ar, [16]. Em adição, a literatura mais recente sobre *curtailment* em sistemas elétricos ressalta a importância de modelos analíticos para quantificação do *curtailment* diário [62], e o estudo da interação entre *curtailment* e regimes mínimos de geração hídrica. Complementarmente, os autores [33] destacam a importância de incorporar o custo econômico do *curtailment* aos modelos de operação, reforçando que a prática tem implicações não apenas ambientais, mas também financeiras. No Brasil, experimentos em escala laboratorial e ensaios de campo vêm sendo conduzidos para simular condições reais de supersaturação, avaliar a tolerância das espécies nativas e desenvolver protocolos de mitigação adequados à realidade amazônica [39].

Assim, a prática do *curtailment* não pode ser entendida apenas como uma medida operativa de ajuste entre geração e demanda. Trata-se de um elemento estruturante da atual configuração da matriz elétrica brasileira, com impactos diretos sobre a sustentabilidade ambiental dos empreendimentos. Compreender a relação entre *curtailment*, operação de vertedouros e formação de TDG, e incorporar as lições de sistemas híbridos e modelos analíticos recentes, é fundamental para subsidiar políticas regulatórias mais consistentes e desenvolver soluções técnicas que assegurem a compatibilização entre a expansão hidrelétrica e a conservação dos ecossistemas aquáticos.

Em termos de mecanismos, a saturação aumenta porque (i) a pressão hidrostática em bacias profundas eleva a solubilidade dos gases, favorecendo a dissolução de bolhas arrastadas pelo jato, [64],[52] e [24]; (ii) grandes gradientes de turbulência fragmentam bolhas, ampliam a área interfacial e aceleram a transferência de massa gás-líquido, tendência reproduzida por modelos multifásicos quando calibrados, [65], [52] e [31]; (iii) a forma do vertedor, o alcance do jato e a vazão unitária controlam a profundidade de penetração e o tempo de residência das bolhas, diretamente ligados ao incremento de

TDG, [31] e [24]; (iv) o jato livre do salto de esqui pode reduzir TDG quando a água chega supersaturada, mas o impacto ainda pode gerar TDG na bacia, com resultados dependentes do desenho do bico defletor e do modo de operação, [30] e [19]; (v) elementos estruturais, como defletores e blocos de ressalto e ajustes geométricos podem limitar a penetração de bolhas e reduzir a produção de TDG, evidenciando o papel determinante da geometria do vertedor, [66]; (vi) em cascatas de barragens, o TDG gerado a montante é transportado a jusante, de modo que decisões operativas (por exemplo, escolha de vãos e descargas) influenciam o acúmulo subsequente, reforçando a ligação entre tipo/operação do vertedor e TDG, [67] e [19].

### **3.2 VAZÕES ECOLÓGICAS**

A relação entre a construção de usinas hidrelétricas e as questões ambientais é um tema controverso e representa um dos principais desafios à expansão do setor hidrelétrico [74]. O setor elétrico, seguindo diretrizes oficiais, orienta que a implementação de empreendimentos hidrelétricos deve priorizar a minimização dos impactos socioambientais. Assim, além de garantir energia suficiente para sustentar o crescimento econômico, esses projetos devem ser concebidos de modo a reduzir as pressões sobre o meio ambiente [67]. Na identificação e avaliação dos impactos, o meio ambiente pode ser analisado a partir de um elemento denominado “componente-síntese”, que engloba Ecossistemas Aquáticos, Ecossistemas Terrestres, Modos de Vida, Organização Territorial e Economia Local, entre outros fatores [67].

No Brasil, a determinação das vazões ecológicas seguiu metodologias diversas, aplicadas de forma descentralizada pelos estados [75]. O antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), substituído pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu normativas específicas para definir vazões mínimas em projetos de aproveitamento hídrico, com base em séries históricas de pelo menos dez anos. Para pequenos empreendimentos, estipulava-se que a vazão mínima não poderia ser inferior à média mensal mínima, calculada a partir de dados anuais locais [67] e [75].

A criação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, instituídos pela Lei nº 9.433/1997, estabeleceu

diretrizes para a outorga de direitos de uso da água, garantindo acesso regulamentado em nível nacional [76]. Segundo [67], a outorga é instrumento essencial para preservar a qualidade e quantidade de água, minimizar conflitos e apoiar o gerenciamento sustentável dos recursos.

A Agência Nacional de Águas (ANA) define critérios para a concessão de outorgas, considerando especificidades regionais. Conforme [77], a outorga busca controlar o uso quantitativo e qualitativo da água, assegurando direitos de acesso. São exemplos de usos que requerem outorga: derivação ou captação de água superficial ou subterrânea, lançamento de efluentes em corpos hídricos, intervenções de macrodrenagem e aproveitamento hidrelétrico.

A definição de vazões de referência é central na política de outorga e no debate sobre vazões ecológicas. Os parâmetros mais empregados são Q7,10, Q90 e Q95, cada qual associado a diferentes finalidades. A Q7,10 corresponde à menor vazão média de sete dias consecutivos que ocorre, em média, uma vez a cada dez anos. É amplamente utilizada como referência em outorgas consuntivas e definição de vazões remanescentes, tendo origem em normativas federais posteriormente incorporadas pelas legislações estaduais [74] e [67].

As vazões de permanência Q90 e Q95 correspondem, respectivamente, às vazões igualadas ou superadas em 90% e 95% do tempo de uma série histórica. São parâmetros estatísticos, vinculados ao atendimento de usos múltiplos e à preservação ecológica em estiagem. Sua aplicação é destacada em legislações como as da Bahia, Mato Grosso, Pará e Mato Grosso do Sul, que limitam o somatório das captações a frações da Q90 ou Q95, [75] e [77].

A literatura ressalta que a escolha entre Q7,10 e Q90/Q95 não é neutra ambientalmente. A Q7,10 está ligada a condições hidrológicas críticas e tende a ser mais restritiva em termos de disponibilidade hídrica. A Q90 e a Q95 refletem vazões típicas de estiagem, oferecendo flexibilidade para usos múltiplos, mas sendo menos protetivas em trechos sob forte pressão antrópica. Nesse sentido, a Lei nº 9.433/1997 [76] e a regulamentação da ANA [77], reforçam que a definição deve considerar particularidades regionais e equilibrar segurança hídrica, uso econômico e conservação ambiental. Portanto, Q7,10, Q90 e Q95 são instrumentos complementares: enquanto a Q7,10

assegura maior proteção em cenários críticos, Q90 e Q95 oferecem previsibilidade e praticidade regulatória. A harmonização desses critérios é um desafio para assegurar coerência nas políticas de outorga e mitigar conflitos entre geração, abastecimento e conservação.

A concessão da outorga fundamentada na disponibilidade hídrica é crucial, conforme [67]. A análise qualitativa e quantitativa das outorgas é crucial para assegurar a integridade das vazões outorgadas e atender os requisitos pré-estabelecidos, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Legislações para outorga de água nos estados.

<b>Estado da Federação</b>	<b>Exigência para outorga</b>
<b>Acre</b>	- Balanço hídrico; - Cálculo de vazão de referência utilizando séries históricas; - Vazão máxima outorgável no curso de interesse;
<b>Alagoas</b>	- Descarga regularizada anual com garantia de 90%; - Soma dos volumes de água outorgados de uma bacia não poderá exceder nove décimos da vazão regularizada anual;
<b>Amapá</b>	- Balanço hídrico local; - Cálculo de vazões de referência; - Vazão máxima necessária no curso de interesse;
<b>Amazonas</b>	- Vazão garantida de 95% por volume quando igual ou superior a vazão solicitada; - Quando há ausência de informações, adota-se menor vazão medida local em período de estiagem, sendo fora da estiagem adota-se coeficiente de redução; - Soma das vazões máximas não poderá exceder 75% da vazão de referência de 95% de garantia;
<b>Bahia</b>	- Soma das vazões máximas não poderá exceder 80% da vazão de referência de 90% de garantia; - Usos individuais não podem exceder 20% da vazão de referência de 90% de garantia;
<b>Distrito Federal</b>	- Dependendo da região adota-se Q7,10 ou Q90, e somadas vazões não podem exceder vazões com 80% de garantia;
<b>Espírito Santo</b>	- Vazão de referência menor ou igual a Q7,10 e não podem exceder vazão de período de seca do curso d'água;
<b>Goiás</b>	- Soma das vazões não poderá exceder 70% da vazão de referência de 90% de garantia, admite-se metodologias conservadoras de 50% da vazão de referência;
<b>Maranhão</b>	- Vazão a jusante das derivações não poderá exceder 80% da vazão de referência de 90% de garantia.
<b>Mato Grosso</b>	- Soma das vazões máximas não poderá exceder a vazão de referência de 95% de garantia;

<b>Continuação: Tabela 1 - Legislações para outorga de água nos estados.</b>	
<b>Mato Grosso do Sul</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão máxima outorgável será de 70% da vazão de referência com 95% de garantia;</li> <li>- Usos individuais não podem exceder 20% da vazão de referência de 95% de garantia;</li> </ul>
<b>Minas Gerais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão máxima de 30% da vazão de referência Q7,10 para curso d'água considerado;</li> <li>- Limite máximo de 70% da Q7,10 de referência quando se utiliza reservatórios;</li> </ul>
<b>Pará</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Somatório de vazões fica limitado a 70% da vazão de referência com 95% de garantia;</li> <li>- O somatório de vazões indisponíveis fica limitado a 30% da vazão de referência com 95% de garantia;</li> <li>- Limite máximo para captação com reservatórios é de 100% da vazão regularizada com 95% de garantia, desde que 70% sejam garantidos a jusante;</li> </ul>
<b>Pará (continuação)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limite máximo de captação individual é 20% da vazão de referência com 95% de garantia;</li> <li>- Limite máximo de vazão indisponível é de 10% da vazão com 95% de garantia;</li> </ul>
<b>Paraíba</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A soma dos volumes não poderá exceder 9/10 da vazão regularizada anual com 90% de garantia;</li> <li>- Em lagos ou lagoas, o limite reduz-se em 1/3.</li> </ul>
<b>Paraná</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazões correspondentes à energia assegurada;</li> <li>- Vazão de engolimento máximo;</li> <li>- Vazões de garantia a jusante;</li> <li>- Vazões de projeto.</li> </ul>
<b>Pernambuco</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão outorgável não poderá exceder 90% da vazão de referência com 90% de garantia;</li> </ul>
<b>Piauí</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão para rios com vazão média mensal com 95% de garantia, e reservatórios com 90% de garantia;</li> <li>- Para derivações e captações superficiais é previsto vazão ecológica de 20% da vazão de referência</li> <li>- Outorga máxima de 80% da vazão com 95% de garantia para rios, e 80% da vazão com 90% de garantia para reservatórios;</li> </ul>
<b>Rio de Janeiro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão ambiental mínima de 50% da Q7,10 do curso d'água selecionado.</li> </ul>
<b>Rio Grande do Sul</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão máxima outorgável de 70% da vazão de referência com 90% de garantia;</li> </ul>
<b>Rio Grande do Norte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão outorgável entre 80 e 95% da vazão de referência com 90% de garantia;</li> </ul>
<b>Rondônia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazão outorgável de 70% da Q7,10 do curso d'água escolhido</li> </ul>
<b>Roraima</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vazões medidas em meses do período seco do estado;</li> <li>- Estudo com aceite de usuários a jusante do ponto de captação ou que não existiu conflito de uso;</li> <li>- Pode-se usar vazão Q7,10, Q90 ou QL como vazão de referência.</li> </ul>

<b>Continuação: Tabela 1 - Legislações para outorga de água nos estados.</b>	
<b>Santa Catarina</b>	- Vazão outorgável de 50% da vazão de referência com 98% de garantia; - Considera reserva técnica de 10% da vazão de referência com 98% de garantia;
<b>São Paulo</b>	- Vazão máxima outorgável de 50% da Q7,10 do curso d'água escolhido, limitado a 20% da Q7,10 para usos individuais.
<b>Sergipe</b>	- Vazão máxima outorgável entre 85% e 95% de garantia; - Usos individuais limitados a 30% da vazão de referência adotada.
<b>Tocantins</b>	- Vazão máxima outorgável a fio d'água de 75% da vazão de referência com 90% de garantia; - Vazão máxima outorgável com reservatório de até 90% da vazão de referência com 90% de garantia; - Limitação individual em 25% da vazão de referência com 90% de garantia;

Fonte: Adaptado de [67].

A regulamentação das outorgas no Brasil, diversificada entre estados, reflete condições hidrológicas e distintas estratégias de gestão. No Acre e no Amapá, adota-se o balanço hídrico como base, estabelecendo vazão de referência e máxima necessária, sem percentuais explícitos, o que confere flexibilidade, mas reduz padronização. Em Alagoas e Paraíba utiliza-se a vazão regularizada anual com 90% de garantia, sendo que na Paraíba há redução de um terço para lagos e lagoas.

O Amazonas adota a Q95, com limite global de 75%, podendo usar a menor vazão medida em estiagem. O Maranhão também recorre à Q90, impondo remanescente mínimo de 20%. A Bahia fixa 80% da Q90 como teto global e 20% como limite individual, regra semelhante à do Mato Grosso do Sul, que, porém, aplica a Q95. Goiás estabelece 70% da Q90, podendo reduzir a 50% em casos específicos.

No Sudeste, predominam critérios mais restritivos: Minas Gerais adota 30% da Q7,10 em rios e até 70% em reservatórios; São Paulo fixa 50% da Q7,10 como regra global, limitando usos individuais a 20%; o Rio de Janeiro considera vazão ambiental 50% da Q7,10; Espírito Santo também aplica a Q7,10, não permitindo exceder a estiagem. O Distrito Federal combina Q7,10 e Q90, com usos até 80%, mesclando abordagens de estiagem e permanência.

No Sul, o Rio Grande do Sul adota 70% da Q90, enquanto Santa Catarina aplica 50% da vazão com 98% de garantia, acrescida de reserva técnica de 10%. O Paraná, por outro

lado, ancora-se em critérios ligados à energia assegurada, engolimento máximo e vazões de projeto, aproximando a outorga da lógica energética.

Na região Norte, além do Amazonas, o Pará se destaca pelo arcabouço detalhado: limite global de 70% da Q95, teto individual de 20%, condições específicas para reservatórios e garantia de 70% da Q95 a jusante. Rondônia adota 70% da Q7,10, mantendo critérios críticos, e Roraima combina medições nos meses secos com negociação entre usuários, podendo usar Q7,10, Q90 ou QL. Tocantins diferencia aproveitamentos a fio d'água, limitados a 75% da Q90, de empreendimentos com reservatórios, que podem atingir 90%, com limite individual de 25%.

No Nordeste, além dos exemplos já citados, Pernambuco fixa 90% da Q90, limite elevado que demanda monitoramento intenso. O Rio Grande do Norte admite faixas entre 80% e 95% da Q90, amplitude que exige critérios claros de aplicação. Sergipe autoriza captações de 85% a 95% da referência, com limite individual de 30%, mas carece de precisão sobre qual parâmetro se aplica. O Piauí diferencia rios e reservatórios, usando a QMLT com 95% de garantia para cursos naturais e 90% para reservatórios, além de definir a vazão ecológica em 20% da referência, limitando a 80% as outorgas totais.

Essa heterogeneidade evidencia dois blocos principais: estados que privilegiam a Q7,10 (Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Rondônia e parte do Norte) e estados que utilizam Q90 ou Q95 (Bahia, Pará, Goiás, Mato Grosso do Sul, Alagoas e Rio Grande do Sul). Há exceções como Santa Catarina, que aplica a Q98, e o Paraná, que ancora suas regras em critérios energéticos. Estados que usam Q7,10 e Q98 são mais restritivos, protegendo ecossistemas em estiagem, mas podem limitar usos múltiplos; os que utilizam Q90 e Q95 oferecem previsibilidade, mas menor proteção em rios sob pressão. Arranjos sofisticados surgem em estados como Bahia, Mato Grosso do Sul, Pará, São Paulo e Tocantins, que conjugam tetos globais e individuais ou diferenciam empreendimento com e sem reservatórios.

No contexto atual, a harmonização dos critérios entre estados permanece como desafio central da Política Nacional de Recursos Hídricos, sobretudo frente à necessidade de conciliar segurança energética, conservação ambiental e usos múltiplos em cenário de maior variabilidade climática.

O parâmetro “70% da Q7,10” deve ser entendido não como grandeza hidrológica em si, mas como critério normativo que utiliza referência crítica para limitar usos. A necessidade de flexibilidade operativa das hidrelétricas, por sua vez, tornou-se tema central diante da expansão de fontes renováveis intermitentes. Essa flexibilidade implica ajustar a geração hidrelétrica para compensar a variabilidade eólica e solar, sendo hoje gerida pelo modelo DESSEM do ONS. Em momentos de elevada oferta renovável, hidrelétricas reduzem geração, liberando água sem aproveitamento energético, prática alinhada à transição energética, mas com impactos técnicos e econômicos.

A operação intermitente aumenta o desgaste de turbinas e sistemas auxiliares, gera variações de vazão a jusante e pode induzir supersaturação gasosa [78]. Economicamente, há perdas por subutilização do potencial hídrico e custos sistêmicos decorrentes da necessidade de flexibilidade de outros agentes. Apesar desses desafios, a flexibilidade operativa é essencial à segurança do sistema. A mitigação dos impactos demanda investimentos em monitoramento, manutenção preditiva, estudos sobre ictiofauna e integração com armazenamento e diversificação da matriz. O equilíbrio entre operação eficiente e sustentabilidade econômica é estratégico para o futuro do setor elétrico no Brasil.

### **3.3 TIPO DE VERTEDOIRO E OS IMPACTOS NA ICTIOFAUNA LOCAL**

Os vertedouros em UHEs são selecionados conforme as condições do local, topografia, requisitos hidráulicos, flexibilidade operativa e condicionantes ambientais e, em linhas gerais, incluem soleira livre, canal de descarga, poço (“*morning glory*”) e laterais. Os vertedouros de soleira livre (perfil *Creager/ogiva*) acompanham a trajetória natural do fluxo, lidando com grandes descargas com segurança, mas podem induzir aeração e supersaturação a jusante quando mal dimensionados, [79]. Em terrenos inclinados, os vertedouros em canal de descarga conduzem a água por calhas declivosas com dissipadores de energia, solução simples e eficaz para transições de cota, [80]. Onde o controle fino é crucial, os vertedouros controlados por comportas oferecem flexibilidade, embora a operação inadequada possa gerar alterações abruptas a jusante, [81]. Em vales estreitos, os vertedouros de poço admitem a água por uma borda circular

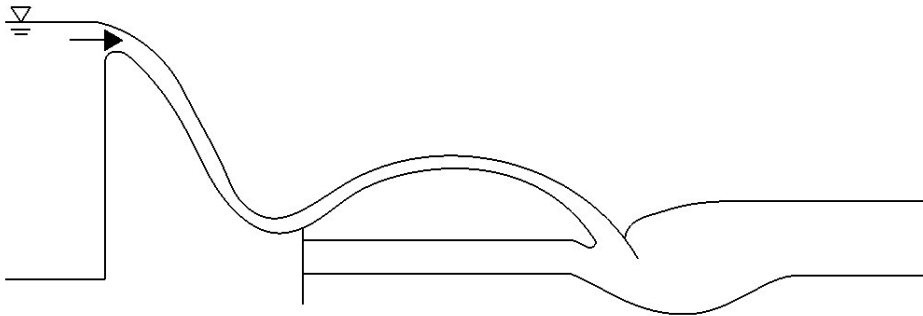
e a conduzem por poço vertical/inclinado, solução eficiente para descargas moderadas, porém menos comum pelo maior requisito construtivo [80]. Já os vertedouros laterais, implantados paralelamente ao eixo da barragem, favorecem o direcionamento do fluxo a um canal ao longo do reservatório, minimizando interferências e permitindo maior controle direcional, [80].

A escolha tipológica equilibra desempenho hidráulico, requisitos estruturais e impactos ambientais. Em escala global, projetos como Três Gargantas (22.500 MW), Itaipu (14.000 MW), Grand Coulee e Sayano-Shushenskaya ilustram o papel dos grandes vertimentos na segurança de cheias e no sistema elétrico; no Brasil, onde a hidreletricidade responde por ~60% da geração, Belo Monte (11.233 MW), Tucuruí (8.370 MW), Santo Antônio e Jirau (>7.000 MW combinados) evidenciam tanto o potencial quanto a responsabilidade de operar com sustentabilidade.

Durante cheias e manobras, o vertimento pode induzir supersaturação de gases totais dissolvidos (TDG), associada à doença da bolha de gás. Em escoamentos turbulentos submetidos a pressões elevadas, a água absorve  $O_2$  e  $N_2$ , ao exceder a solubilidade, formam-se bolhas em tecidos e brânquias, com risco de mortalidade, [11] e [4]. Registros no Yangtzé, incluindo Três Gargantas, documentam eventos de mortalidade, [7]. No Brasil, a UHE Sinop reportou mortalidade severa em descargas de alta vazão, [82]. Diante disso, destacam-se medidas de mitigação: ajustes geométricos para reduzir aeração, estratégias operativas que suavizem descargas, aprofundamento de trechos a jusante para oferecer refúgio em maior pressão [4], monitoramento contínuo de TDG e barreiras para afastar peixes.

Entre as soluções, o salto de esqui Figura 8, projeta o jato no ar antes do impacto, dissipando parte da energia e reduzindo riscos de erosão; o raio e ângulo do bico defletor controlam trajetória e espraiamento [83] e [84]. Embora eficaz, o impacto ainda pode aumentar a mistura ar-água e, conforme arranjo, elevar TDG, [79].

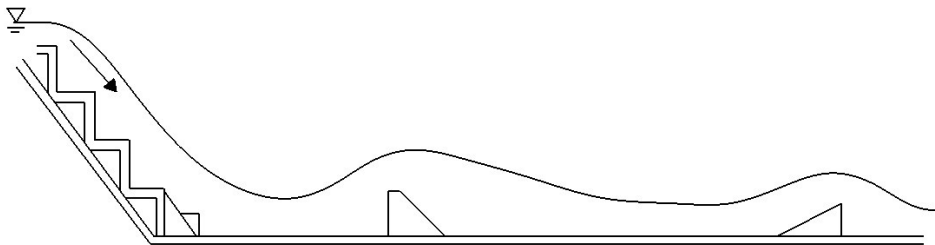
Figura 8 - Vertedouro tipo rampa de esqui.



Fonte: Adaptado de [85].

Outra tipologia importante é a soleira com bacia de dissipação Figura 9, que regula a descarga e amortece o jato em ressalto controlado com blocos de impacto e paredes laterais [79] e [21]. Preserva o leito, mas pode alterar padrões de fluxo/sedimentos se mal dimensionada, [86].

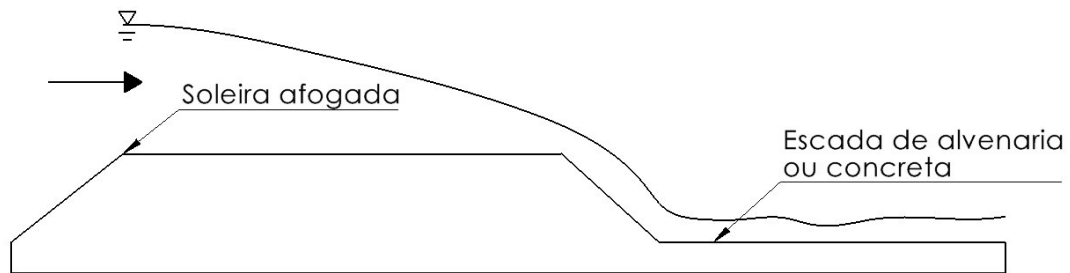
Figura 9 - Vertedouro tipo soleira com bacia de dissipação.



Fonte: Adaptado de [86].

Já a soleira afogada Figura 10, opera em regime submerso, reduzindo velocidades e impactos erosivos. É simples e estável em ampla faixa de vazões, mas com menor capacidade de descarga e maior demanda de manutenção [79] e [80]. Em configurações específicas pode também gerar supersaturação [87].

Figura 10 - Vertedouro tipo soleira afogada.



Fonte: Adaptado de [87].

# Capítulo 4

## 4 DESENVOLVIMENTO DA BASE EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da base experimental que dá suporte à hipótese central da tese. Embora a construção da bancada seja indispensável e traga soluções inovadoras, ela não constitui o núcleo científico do trabalho se limitando na construção de uma metodologia e sequência de ensaios propostos. Assim, os resultados aqui descritos correspondem à validação do aparato, teste de conceito, calibração de sensores, checagem de estabilidade do fluxo e curvas preliminares de pressão e vazão, com caráter exclusivamente instrumental e metodológico, demonstrando que a bancada está apta a operar.

### 4.1 APARATO DE SATURAÇÃO GASOSA

A reprodução experimental da supersaturação gasosa em ambiente controlado constitui uma etapa essencial para a compreensão do fenômeno e para a avaliação dos seus efeitos sobre a ictiofauna. O presente capítulo concentra-se na definição de um teste de conceito, estruturado de modo a validar os princípios físicos e metodológicos necessários à investigação científica. Esse teste busca comprovar a viabilidade técnica da abordagem e fornecer subsídios para análises quantitativas posteriores.

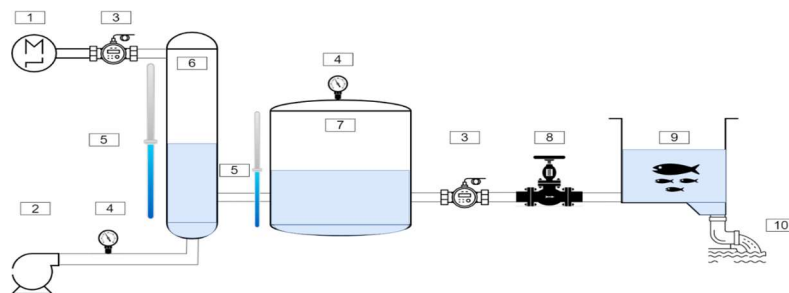
O teste de conceito tem como finalidade verificar se os dispositivos e arranjos hidráulicos podem gerar, de maneira controlada, níveis de supersaturação compatíveis com aqueles observados em campo. Com isso, é possível avaliar preliminarmente as respostas biológicas e identificar limitações que orientarão a fase subsequente de experimentação. A abordagem é central para reduzir incertezas e ampliar a robustez dos resultados obtidos.

A metodologia proposta combina práticas de desenvolvimento ágil com protocolos de pesquisa laboratorial. Essa integração permite acelerar a etapa de prototipagem, ao mesmo tempo em que assegura o rigor técnico exigido por estudos ambientais. O processo envolve a montagem de aparatos que reproduzem pressões, borbulhamento

e padrões de circulação observados em vertedouros de usinas hidrelétricas, de forma a garantir representatividade hidrodinâmica. A clareza conceitual do teste possibilita ainda que futuras etapas de experimentação sejam conduzidas com maior precisão, garantindo continuidade metodológica e fortalecendo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para alcançar esses objetivos, foram especificados componentes técnicos que constituem o núcleo do aparato experimental. Entre eles destacam-se a motobomba, o compressor de ar, as válvulas reguladoras, os tanques de ensaio e o sistema de instrumentação para monitoramento de pressão e concentração de gases dissolvidos. Esses elementos estão organizados em fluxograma Figura 11, que sintetiza o encadeamento lógico das etapas do processo e ilustra a interação entre os dispositivos.

Figura 11 - Fluxograma de processos do aparato para geração de TDG para ensaio em ambiente controlado.



Fonte: Autor, 2024.

Onde:

- 1) Moto bomba controlada por inversor de frequência;
- 2) Compressor com saída de pressão controlada por válvula reguladora;
- 3) Medidor de vazão;
- 4) Medidor de pressão
- 5) Medidor de nível;
- 6) Tanque de pressão com dispositivo para geração de borbulhamento;
- 7) Tanque de estabilização;
- 8) Válvula controlada de vazão;
- 9) Tanque para inserção dos peixes com medição de TDG;
- 10) Dreno para disposição de água supersaturada;

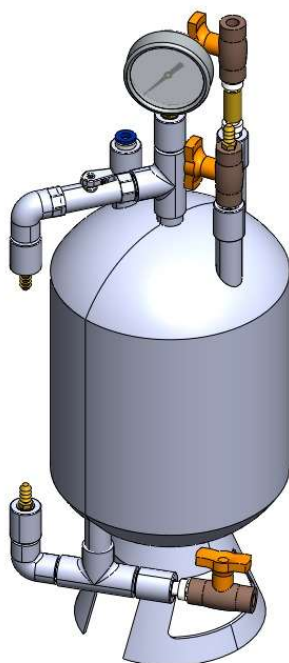
O emprego de práticas de reprodutibilidade garante que os resultados possam ser comparados e validados em diferentes contextos. Ao mesmo tempo, a adoção de protocolos de monitoramento contínuo assegura que as variações de TDG sejam registradas em tempo real, reforçando a confiabilidade dos ensaios. A metodologia adotada representa, assim, um passo estratégico para a consolidação de modelos preditivos e para a formulação de medidas de mitigação ambiental mais efetivas.

A reprodução de condições de supersaturação em laboratório exigiu a concepção e o aprimoramento progressivo de diferentes aparatos experimentais, denominados TDG V1, V2, V3 e V4. Cada versão foi desenvolvida a partir das limitações identificadas na anterior, buscando maior eficiência, praticidade e precisão no controle operacional.

#### **4.1.1 Arranjo do TDG V1**

O TDG V1 constituiu o primeiro protótipo funcional, concebido para verificar a viabilidade de gerar níveis de supersaturação de gases dissolvidos por meio de pressurização simples. Trata-se de um recipiente de 5 litros adaptado, com entradas superiores independentes para água e ar. Quando a água é submetida à pressão do ar, absorve parte das moléculas gasosas, reproduzindo o fenômeno de supersaturação. A água saturada é então liberada pela saída inferior e conduzida aos tanques de ensaio. O sistema conta ainda com válvula de controle de pressão, manômetros, válvulas unidirecionais e um mecanismo de medição indireta que auxilia na operação. O ajuste combinado de volume de água, pressão de ar, vazão de entrada e saída permite controlar os níveis de supersaturação obtidos, como ilustrado na Figura 12. Embora tenha confirmado o princípio do processo, o V1 apresentou restrições de estabilidade e de controle fino das condições experimentais, o que motivou a criação da versão seguinte.

Figura 12 - Aparato gerador de TDG - V1.



Fonte: Autor, 2024.

Os resultados dos testes demonstram que o aparato de TDG V1 é passivo de controle pelo operador. Porém devido às limitações de projeto os resultados ainda não atingiram os percentuais necessários, gerando assim a necessidade de evolução nos estudos e desenvolvimentos de novos modelos de aparatos de geração de TDG. Os resultados apresentados na Tabela 2, demonstram uma evolução nos padrões de geração de água supersaturada em decorrência da elevação de pressão e vazão, conseguindo resultados entre 120,4% e 128,6% em sua operação. Evidenciando assim geração de água supersaturada na casa dos 30%.

Tabela 2 - Eficiência do aparato de TDG V1.

	<b>10 mca</b>	<b>20 mca</b>	<b>30 mca</b>	<b>40 mca</b>	<b>50 mca</b>
<b>0,5 l/m</b>	120,4 %	122,3%	123,3%	126,1%	124,1%
<b>2,0 l/m</b>	121,5%	121,4%	120,9%	120,1%	120,1%
<b>3,5 l/m</b>	127,0%	130,9%	126,6%	128,6%	121,5%
<b>5,0 l/m</b>	123,7%	129,9%	130,7%	127,6%	128,6%

Fonte: Autor, 2024.

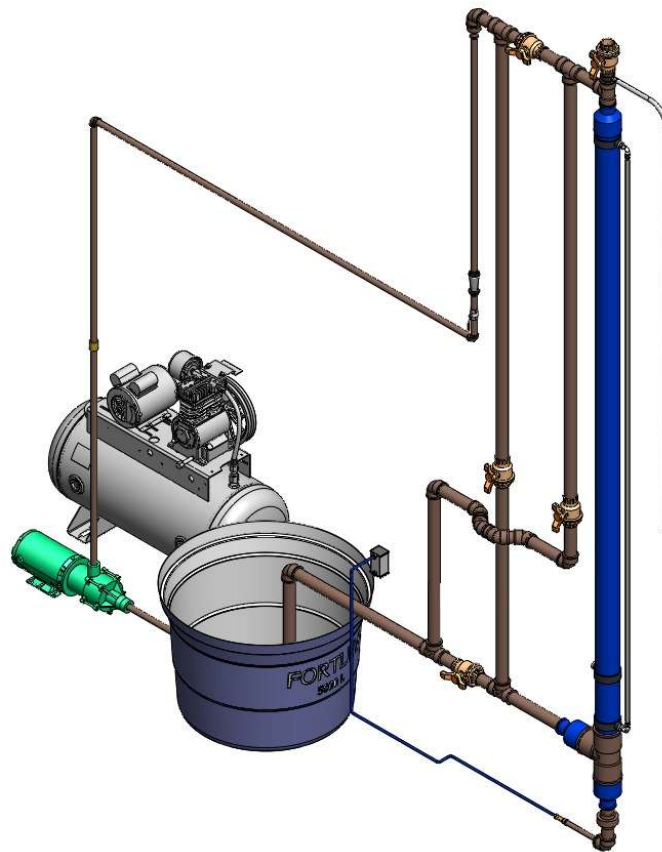
#### 4.1.2 Arranjo do TDG V2

O TDG V2 foi desenvolvido para superar as limitações de estabilidade observadas no primeiro modelo. Essa versão incorporou um conjunto de melhorias estruturais e operacionais, resultando em maior confiabilidade dos ensaios. O aparato conta com uma torre de saturação de 100 mm de diâmetro e 3 m de altura, alimentada por um sistema hidráulico composto por uma bomba de 2 Cv e 60 mca, conectada a uma caixa d'água de 500 litros com nível controlado por boia mecânica. A tubulação de alimentação possui 4,5 m de comprimento, e na saída da bomba foram instaladas uma válvula de retenção de 1" e uma válvula esférica de 1". A ingestão de água ocorre pela parte superior do equipamento, enquanto a de ar é feita pela parte inferior, diferenciando-se do arranjo do V1. Para evitar o retorno de água ao compressor (140 lbf/pol<sup>2</sup>, 100 litros, 2 Cv), foi acrescentada uma válvula unidirecional no sistema de entrada de ar.

Além dessas adaptações, foi identificado que a eficiência do processo exigia um dispositivo adicional, denominado cilindro reservatório de água supersaturada, com capacidade de 200 litros. Esse reservatório é abastecido pela parte inferior, por tubulações de 2", e fornece água para os ensaios a partir da parte superior, também em 2". Para otimizar a retirada da água supersaturada, mesmo com a saída na parte superior, foi projetado um acessório chamado "pescador", que capta o líquido na região mais eficiente do reservatório.

Essas modificações garantiram maior constância no fornecimento de gás, melhor manutenção da pressão interna e, conseqüentemente, maior estabilidade experimental. Contudo, a dimensão do aparato e sua complexidade operacional reduziram a praticidade e a mobilidade, motivando a concepção de uma versão subsequente mais portátil. A Figura 13 apresenta a perspectiva isométrica do TDG V2, destacando os detalhes construtivos introduzidos para reduzir o espaço físico ocupado e maximizar a eficiência do equipamento.

Figura 13 - Aparato gerador de TDG - V2 – Vista isométrica.



Fonte: Autor, 2024.

Os resultados do aparato de TDG V2 apresentados na Tabela 3, demonstram uma evolução nos padrões de geração de água supersaturada em decorrência da elevação de pressão e vazão, comparadas aos resultados do aparato de TDG V1, conseguindo resultados que variam entre 127,1% e 156,3% em sua operação.

Tabela 3 - Eficiência do aparato de TDG V2.

	<b>10 mca</b>	<b>20 mca</b>	<b>30 mca</b>	<b>40 mca</b>	<b>50 mca</b>
<b>0,5 l/m</b>	145,4 %	131,1%	127,1%	139,0%	136,4%
<b>2,0 l/m</b>	144,4%	143,7%	146,0%	142,8%	139,7%
<b>3,5 l/m</b>	138,5%	156,3%	151,5%	137,5%	143,1%
<b>5,0 l/m</b>	143,7%	152,5%	146,9%	147,7%	151,9%

Fonte: Autor, 2024.

### 4.1.3 Arranjo do TDG V3

O **TDG V3** foi concebido com o objetivo de superar as limitações de praticidade do V2, priorizando maior mobilidade e flexibilidade operacional. Diferentemente do modelo anterior, esse aparato incorporou uma segunda torre de saturação, o que possibilitou dois modos de funcionamento: operação com apenas uma torre, para situações em que se buscava agilidade, ou operação em série com as duas torres, quando se desejava intensificar os níveis de supersaturação. As torres, agora com 2 m de altura, foram interligadas por tubulações de 2 polegadas, controladas por válvula esférica, que permitia habilitar ou isolar a segunda unidade.

Esse arranjo ofereceu ganhos significativos de rendimento, já que a segunda torre, quando acionada, recebia água previamente supersaturada pela primeira, potencializando os resultados obtidos. Além disso, o sistema tornou-se mais compacto, facilitando o deslocamento e conferindo maior praticidade à operação. Os dispositivos de controle e medição foram mantidos, com o acréscimo de sensores adicionais para monitorar as duas torres quando necessário. Assim, o V3 representou um avanço importante, pois reduziu a variabilidade dos ensaios, aumentou a confiabilidade dos resultados e proporcionou maior versatilidade ao processo experimental, Figura 14.

Figura 14 - Aparato gerador de TDG - V3 Vista lateral.



Fonte: Autor, 2024.

O aparato de TDG V3 operando com uma única torre de saturação entregou valores entre 131,8% e 152,0%, dependendo da pressão e vazão já pré-estabelecida anteriormente na metodologia. Conforme é demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Eficiência do aparato de TDG V3, (utilizando uma torre).

	<b>10 mca</b>	<b>20 mca</b>	<b>30 mca</b>	<b>40 mca</b>	<b>50 mca</b>
<b>0,5 l/m</b>	131,8%	133,2%	134,2%	131,8%	134,8%
<b>2,0 l/m</b>	134,6%	132,1%	132,8%	134,3%	139,0%
<b>3,5 l/m</b>	133,2%	134,3%	134,5%	137,5%	139,0%
<b>5,0 l/m</b>	141,2%	141,7%	143,6%	146,3%	152,0%

Fonte: Autor, 2024.

Já o aparato de TDG V3 operando com duas torres de saturação em série apresentou um ganho quando comparado a situação anterior, os valores ficaram entre 130,3 % e 162,1%, vide Tabela 5.

Tabela 5 - Eficiência do aparato de TDG V3, (utilizando duas torres).

	<b>10 mca</b>	<b>20 mca</b>	<b>30 mca</b>	<b>40 mca</b>	<b>50 mca</b>
<b>0,5 l/m</b>	130,3 %	142,3%	136,0%	135,7%	139,6%
<b>2,0 l/m</b>	149,7%	145,6%	145,5%	143,8%	147,5%
<b>3,5 l/m</b>	155,1%	150,7%	148,5%	153,0%	148,6%
<b>5,0 l/m</b>	162,1%	160,8%	159,0%	160,0%	159,6%

Fonte: Autor, 2024.

#### **4.1.4 Arranjo do TDG V4**

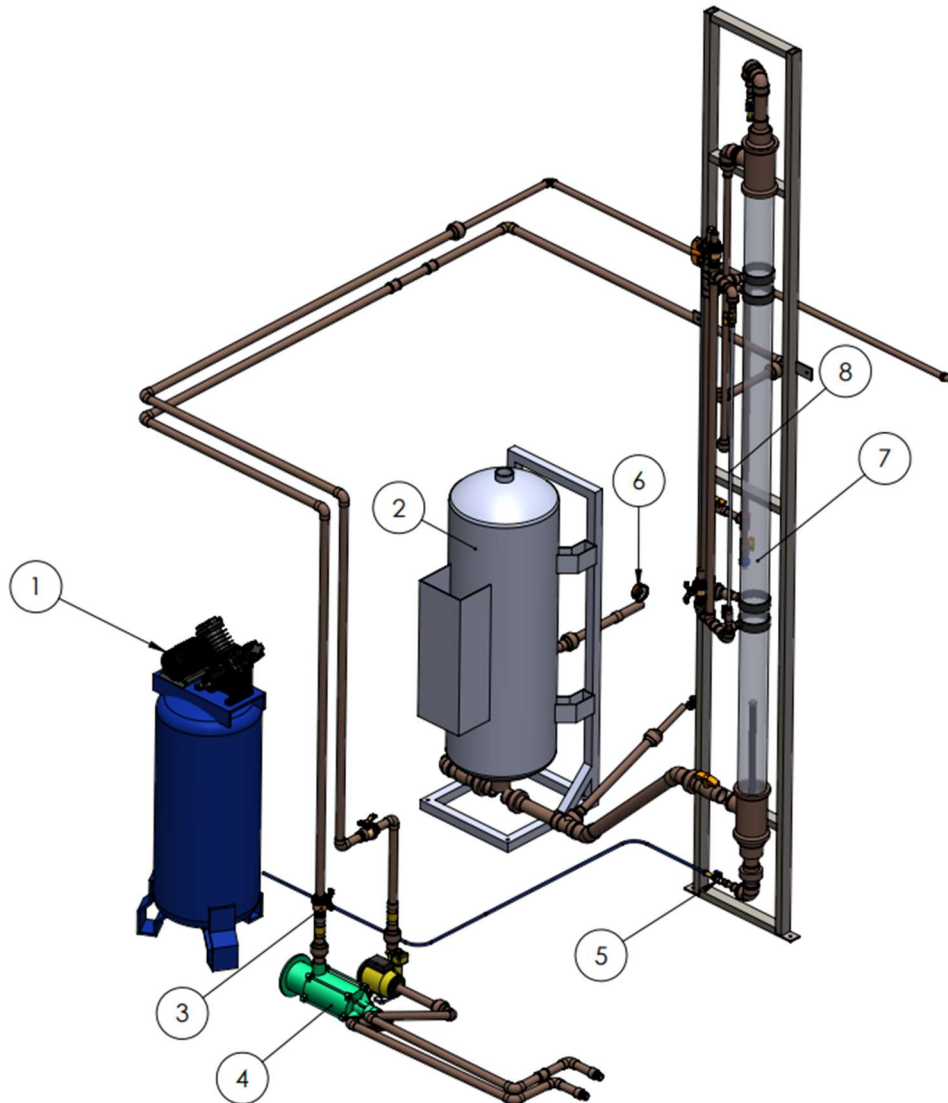
O TDG V4 foi desenvolvido como etapa de refinamento em relação ao V3, com ênfase na estabilidade dos ensaios e no controle automatizado das variáveis de operação. Apesar dos avanços proporcionados pela introdução das duas torres no modelo anterior, ainda persistiam limitações ligadas à precisão do monitoramento e à necessidade de maior confiabilidade nos registros experimentais. Para superar essas restrições, o V4 manteve o reservatório cilíndrico de 200 litros como elemento central, mas recebeu instrumentação mais sofisticada, capaz de medir em tempo real a pressão, a vazão e os níveis de gases dissolvidos.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados nos aparatos TDG V1, TDG V2 e TDG V3, foi desenvolvido o aparato TDG V4, que passou a contar com uma torre única, tanque de estabilização, controladores de pressão, nível e vazão. O sistema de alimentação hidráulica foi equipado com uma bomba de 4 Cv, com capacidade de 113 mca, alimentada por uma caixa d'água de 500 litros, por sua vez abastecida pelo sistema público e regulada por boia mecânica. A tubulação de alimentação tem 2,0 metros de comprimento e 1" de diâmetro, com válvula de retenção e válvula gaveta de 1" instaladas na saída da bomba.

Para o controle da operação de aquários em ensaio, o arranjo incluiu cinco válvulas elétricas solenóide de 2" normalmente fechadas, distribuídas de modo a habilitar o circuito, o aquário principal e os aquários secundários. O sistema também foi equipado com compressor de 283 l/min, 140 lbf/pol<sup>2</sup> e potência de 2 Cv. Para complementar, foi identificado como necessário o uso de um cilindro reservatório de água supersaturada, com capacidade de 200 litros, abastecido pela parte inferior por tubulação de 2" e com saída para ensaios posicionada a 30 cm de altura da entrada, também em 2".

A Figura 15 apresenta a perspectiva isométrica do TDG V4, evidenciando o arranjo construtivo que reduziu dimensões físicas e maximizou a eficiência do equipamento. Para sua operação, foi elaborado um fluxograma de partida e parada vide, Figura 16, que organiza a sequência de acionamento e controle de processos. O sistema inicia com o acionamento da motobomba, enchendo o TDG e o tanque de estabilização, enquanto as válvulas purgadoras e a válvula proporcional de saída permanecem fechadas. Ao atingir o nível de regulação, são ativados o compressor e a válvula proporcional de pressão até alcançar o valor desejado (por exemplo, 20 mca).

Figura 15 - Aparato gerador de TDG - V4.

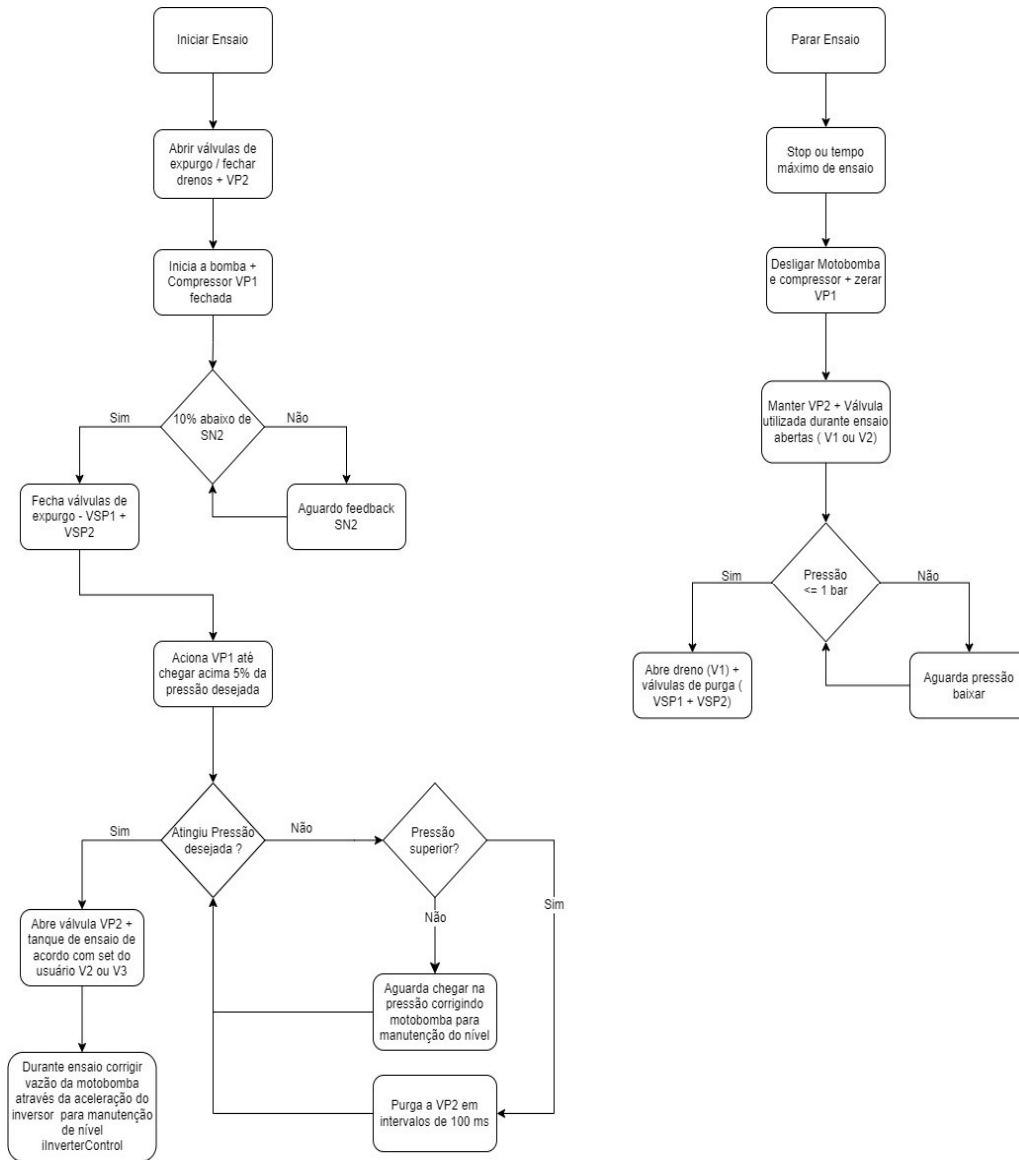


Fonte: Autor, 2024.

Onde:

- 1 - Compressor de ar;
- 2 - Tanque de equalização;
- 3 - Medidor de vazão;
- 4 - Bomba hidráulica;
- 5 – Entrada de ar da Coluna de Saturação;
- 6 - Manômetro;
- 7 - Coluna de Supersaturação;
- 8 - Medidor de nível;

Figura 16 - Fluxograma de operação do sistema.



Fonte: Autor, 2024.

O aparato de TDG V4 apresentou resultados entre 127,4% e 185,3%. Resultados esses que atendem as prerrogativas para a reprodução do fenômeno de supersaturação gasosa em ambiente laboratorial. Condição essa, que atende as premissas para estudos de exposição de peixes a diferentes graus de supersaturação, com controle de variáveis como, vazão, pressão, percentual de geração de água supersaturada e tempo de ensaios. A Tabela 6 apresenta os resultados do aparato de TDG V4.

Tabela 6 - Eficiência do aparato de TDG V4.

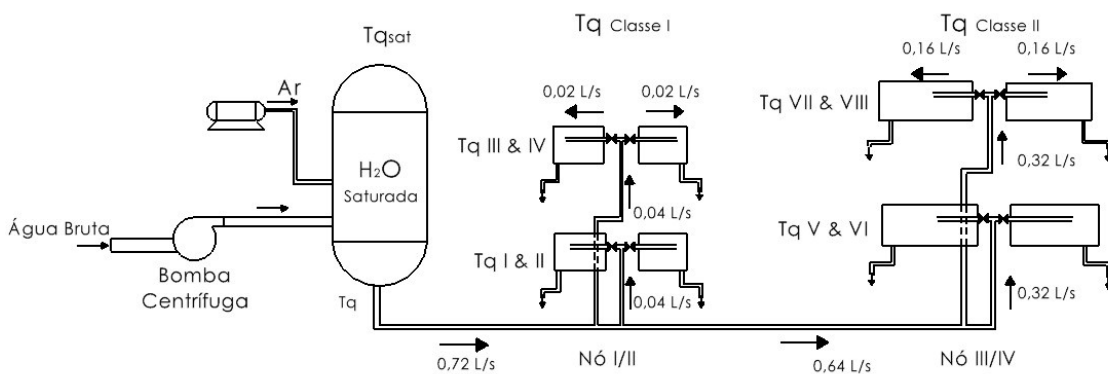
	10 mca	20 mca	30 mca	40 mca
10,0 l/m	185,3%	154,3%	143,5 %	140,0%
20,0 l/m	157,4%	157,6%	150,2%	141,1%
30,0 l/m	145,1%	125,9%	147,7%	135,3%
40,0 l/m	143,5%	143,6%	142,6%	127,4%

Fonte: Autor, 2024.

## 4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO

Conforme apresentado anteriormente calculou-se os dutos de alimentação a partir da premissa que o sistema será uma rede ramificada. As dimensões dos tanques de teste foram divididas em duas classes (ver item 4.2.2) em função da dimensão dos indivíduos a serem testados. O desenho esquemático está apresentado na Figura 17 e Tabela 7. A Tabela 7 apresenta o cálculo do Re para diversos diâmetros de tubulação em função da operação a plena carga, ou seja, com todos os tanques sob condição de teste de supersaturação com tempo de troca de água máximo de 5 minutos.

Figura 17 - Desenho esquemático do circuito de alimentação dos tanques de teste (ramificados).



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 7 - Diâmetro (tempo de troca 5 minutos).

TRECHO	Q (l/s)	6"	4"	3"	2"	1 ½"	1"	½"
		150 mm	100 mm	75 mm	50 mm	37,5 mm	25 mm	12,5 mm
<b>Re</b>								
Tq / nó I	0,72	6.115	9172	12229	18334	24459	36688	73376
nó I/nó II	0,68	5775	8662	11550	17325	23100	34650	69299
nó I/Tq II e IV	0,04	340	510	679	1019	1359	2038	4076
nó II/Tq I e II	0,04	340	510	679	1019	1359	2038	4076
nó II/nó III	0,64	5435	8153	10870	16306	21741	32611	65223
nó III/nó IV	0,32	2718	4076	5435	8153	10870	16306	32611
nó IV/Tq V e VI	0,32	2718	4076	5435	8153	10870	16306	32611
nó III/Tq VII e VIII	0,32	2718	4076	5435	8153	10870	16306	32611

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2.1 Dimensionamento de Aparato de Saturação Gasosa

Este tópico apresenta um roteiro de cálculo, fez-se o projeto de um sistema supersaturador de água. Para isso adotou-se das seguintes premissas:

- a) A água que será admitida no sistema será pressurizada por bomba centrífuga até a pressão máxima em torno de 50 mca;
- b) O escoamento será turbulento (Re maior que 4000);
- c) O escoamento será do tipo descendente;
- d) O ar será injetado por meio de elemento difusor formador de microbolhas;
- e) A entrada do sistema terá um medidor de vazão do tipo rotâmetro;
- f) Vazão de passagem deve ser de 0,72 l/s.

O Re pode ser obtido a partir da equação (equação 2). O cálculo da perda de carga no sistema pode ser feito pela equação de Darcy- Weisbach (equação 3). A velocidade de trânsito será calculada pela equação da continuidade (equação 4).

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad (2)$$

Onde:

- V: velocidade média na seção do duto (m/s);
- Dh: é o diâmetro hidráulico do duto (m);
- $\nu$ : viscosidade cinemática da água a 20° C é igual a 10-6 (m<sup>2</sup>/s);

$$hf = f \frac{L \cdot V^2}{D_h \cdot 2g} \quad (3)$$

Onde:

- f: fator de perda de carga obtido do ábaco de Moody em função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade superficial do tubo.
- L: comprimento do duto (m);
- V: velocidade média na seção do duto (m/s);
- Dh: diâmetro hidráulico do duto (m);
- g: aceleração da gravidade em (m<sup>2</sup>/s);

$$Q = V \cdot S \quad (4)$$

Onde:

- Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);
- V: velocidade média na seção do duto (m/s);
- S: seção de escoamento (m<sup>2</sup>);

O diâmetro hidráulico do duto interno foi calculado em função do que tem a função de injetar ar no escoamento (equação 5).

$$D_h = D_e - D_i \quad (5)$$

Onde:

- Dh: é o diâmetro hidráulico do duto (m);
- De: é o raio do difusor interno;

- Di: é o raio interno do duto externo do sistema supersaturador;

Por uma questão de facilidade de montagem e de manutenção optou-se por utilizar no duto central do saturador um trecho de tubulação com 4" (100mm) de diâmetro interno equipado com tubo difusor de 20mm. Com isso pode-se selecionar o diâmetro dos dutos auxiliares do aparato.

Essa opção se baseou no fato da solução proposta [88], ser mais recente (2022) e guardar semelhanças entre as aplicações desejadas. O sistema de saturação gasosa será dimensionado para alimentar 8 tanques de 50 litros (peixes de 500 mm e 3 kg) e 12 tanques de 5 litros (peixes de até 250 mm e 200 gramas). Para isso a vazão necessária será de 0,72 L/s com tempo de residência de 10 minutos. Para fins de cálculo iremos dimensionar uma seção capaz de aduzir uma vazão 50% maior do que a necessária ou seja de 1,2 L/s. Foi investigado o uso de dutos comerciais que vão variar de 4" a 1" com comprimento de 2,5 m em todos os casos.

A velocidade de trânsito foi calculada utilizando-se a equação da continuidade em função da vazão de passagem e da seção livre de escoamento que será calculada pela diferença da seção do duto externo subtraída da seção do difusor. O resultado desse cálculo está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Vazão de trânsito no saturador.

Diâmetro do duto externo (mm)	100	75	50	25
Diâmetro do duto difusor (mm)	20	15	15	15
DH (m)	0.08	0.06	0.035	0.01
vazão (L/s)	Velocidade (m/s)			
1.2	0.16	0.28	0.67	3.82
1.1	0.15	0.26	0.62	3.50
1	0.13	0.24	0.56	3.18
0.9	0.12	0.21	0.50	2.87
0.8	0.11	0.19	0.45	2.55
0.7	0.09	0.17	0.39	2.23
0.6	0.08	0.14	0.34	1.91
0.5	0.07	0.12	0.28	1.59
0.4	0.05	0.09	0.22	1.27

Fonte: Autor, 2024.

Com base nesses resultados pode-se chegar à equação de perda de carga ( $\Delta h$ ) em função da vazão ( $Q$ ) para o saturador com diâmetro do duto central de 4", difusor interno de 3/4" e alimentado por circuito hidráulico acoplado de diâmetro de 1" conforme a equação 6.

$$\Delta h = 7,045 \cdot Q^2 \quad (6)$$

Onde:

- $\Delta h$ : perda de carga (mca);
- $Q$ : vazão (l/s);

O ar será injetado sob pressão dentro do duto do saturador, por meio de um difusor gasoso, e deverá manter um nível d'água pré-determinado sendo monitorado por meio de um visor de nível externo. O escoamento deve ser mantido no regime turbulento de forma a facilitar a difusão gasosa. Para que o controle do sistema seja feito optou-se por instalar um medidor de vazão do tipo rotâmetro na entrada do duto do saturador. O sistema de circulação do saturador terá um diâmetro de 3/4" ou 1" a ser investigado/selecionado posteriormente sendo que a entrada de água controlado por um registro que conduz o fluido por um trecho de tubulação. A água passa pelo duto do saturador e é saturada por ar injetado pelo difusor, saindo na parte inferior do duto por meio de uma saída A saída reta do "te" está conectada a um registro. A saída lateral está conectada uma válvula unidirecional, conectado a registro de saída. A saída lateral do "te" é conectada a registro de controle de esfera de 1/2" com adaptador espigão com uma mangueira na ponta. Essa mangueira é conectada a adaptador espigão para mangueira conectada a entrada no duto. A perda de carga esperada no saturador gasoso é obtida pelo método de comprimento equivalente que pode ser calculado a partir do comprimento retificado de cada peça e que permite substituir os acessórios por um comprimento de tubulação reta de mesmo diâmetro e material, na qual ocorra uma perda de carga igual àquela que acontecerá no acessório. A Tabela 9 apresenta os comprimentos equivalentes das peças do saturador e que foram descritas acima.

A Tabela 9 apresenta os comprimentos equivalentes em metros lineares, enquanto a Tabela 10 apresenta os valores de Re para cada condição de vazão dentro do saturador. A rugosidade superficial do duto, conforme apresentado no item anterior será de 0,30 mm.

Tabela 9 - Comprimentos equivalentes em metros lineares (mL).

Elementos hidráulicos	unid.	quant.	comprimento equivalente	
			pç / trecho tubo	total
Soma compr. equivalente 3/4" (mL)				51,8
Registro 3/4"	pç	2	6,7	13,4
Tubo 3/4"	mL	5	5	25
Cotovelo 3/4"	pç	2	0,6	1,2
Niple 3/4"	pç	1	0,4	0,4
Rotâmetro 3/4"	pç	1	6	6
Entrada 3/4"	pç	1	1,4	1,4
Válvula unidirecional 3/4"	pç	1	4	4
Tê passagem	pç	1	0,4	0,4
Soma compr. Equivalente 2" (mL)				6
Saída tubo 2"	mL	1	0,5	0,5
Tê lateral 2"	pç	1	1,6	1,6
Bucha 2" para 3/4	pç	1	3,9	3,9

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 10- Re no interior do duto principal do saturador para vazões distintas.

Diâmetro duto externo (mm)	100	75	50	25
Diâmetro duto difusor (mm)	20	15	15	15
DH (m)	0.08	0.06	0.035	0.01
vazão (L/s)	Re			
1.2	12,739	16,985	23,518	38,217
1.1	11,677	15,570	21,558	35,032
1	10,616	14,154	19,598	31,847
0.9	9,554	12,739	17,638	28,662
0.8	8,493	11,323	15,679	25,478
0.7	7,431	9,908	13,719	22,293
0.6	6,369	8,493	11,759	19,108
0.5	5,308	7,077	9,799	15,924
0.4	4,246	5,662	7,839	12,739

Fonte: Autor, 2024.

Como pode ser observado na Tabela 5 as perdas internas do saturador podem ser consideradas desprezíveis para as vazões necessárias. O cálculo das perdas de carga do sistema saturador para diâmetro de  $\frac{3}{4}$ " e 1". A equação de perda de carga ( $\Delta h$ ) em (mca) em função da vazão (Q) em (L/s) para o saturador com diâmetro do duto central de 4", difusor interno de  $\frac{3}{4}$ " e alimentado por circuito hidráulico acoplado de diâmetro de 1" (equação 6).

A velocidade de trânsito foi calculada utilizando-se a equação da continuidade (equação 4) em função da vazão de passagem e da seção livre de escoamento que será calculada pela diferença da seção do duto externo subtraída da seção do difusor, conforme a Tabela 11. O resultado desse cálculo está apresentado na Tabela 11.

Diâmetro duto externo (mm)	100	75	50	25
Diâmetro difusor (mm)	20	15	15	15
DH (m)	0,08	0,06	0,035	0,01

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 11 - Dimensões dos dutos possíveis a serem usados no saturador.

<b>Diâmetro duto externo (mm)</b>	<b>100</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>25</b>
<b>Vazão (L/s)</b>	<b>Re</b>			
1,2	0,16	0,28	0,67	3,82
1,1	0,15	0,26	0,62	3,50
1,0	0,13	0,24	0,56	3,18
0,9	0,12	0,21	0,50	2,87
0,8	0,11	0,19	0,45	2,55
0,7	0,09	0,17	0,39	2,23
0,6	0,08	0,14	0,34	1,91
0,5	0,07	0,12	0,28	1,59
0,4	0,05	0,09	0,22	1,27

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 12, apresenta os comprimentos equivalentes das peças do saturador.

Tabela 12 – Peças do saturador.

<b>Elementos Hidráulicos</b>	<b>Un.</b>	<b>Quant.</b>	<b>Pç/trecho</b>	<b>Total</b>
Registro 3/4"	pç	2	6,7	13,4
Tubo 3/4"	m	5	5	25
Cotovelo 3/4"	pç	2	0,6	1,2
Niple 3/4"	pç	1	0,4	0,4
Rotâmetro 3/4"	pç	1	6	6
Entrada 3/4"	pç	1	1,4	1,4
Válvula unidirecional 3/4"	pç	1	4	4
Tê passagem	pç	1	0,4	0,4
Soma compr. Equivalente 2"	m	6	6	6
Saída tubo 2"	m	1	0,5	0,5
Tê lateral 2"	pç	1	1,6	1,6
Bucha 2" para 3/4	pç	1	3,9	3,9

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 17, apresenta os valores de Re para cada condição de vazão dentro do saturador.

Tabela 13 - Re da coluna de saturação para cada vazão.

Vazão (L/s)	Re			
	100	75	50	25
1,2	12,739	16,985	23,518	38,215
1,1	11,677	15,570	21,558	35,032
1,0	10,616	14,154	19,598	31,847
0,9	9,554	12,739	17,638	28,662
0,8	8,493	11,323	15,679	25,478
0,7	7,431	9,908	13,719	22,293
0,6	6,369	8,493	11,759	19,108
0,5	5,308	7,077	9,799	15,924
0,4	4,246	5,662	7,839	12,739

Fonte: Autor, 2024.

Os valores do fator de perda de carga da torre de saturação para as vazões de ensaio apresentados na Tabela 14.

Tabela 15 - Valores do fator de perda de carga da torre de saturação para as vazões de ensaio.

<b>Diâmetro do duto externo (mm)</b>	100	75	50	25
<b>Diâmetro do difusor (mm)</b>	20	15	15	15
<b>DH(M)</b>	0,08	0,06	0,035	0,01
<b>e/D</b>	0,00375	0,00500	0,00857	0,03000
<b>Vazão (L/s)</b>	<b>f</b>			
1,2	0,00043	0,0039	0,003700	0,0058
1,1	0,00443	0,0040	0,003758	0,00582
1,0	0,00456	0,0040	0,003816	0,00584
0,9	0,00469	0,0041	0,003874	0,00586
0,8	0,00482	0,0041	0,003932	0,00588
0,7	0,00495	0,0042	0,003990	0,00590
0,6	0,00508	0,0042	0,004048	0,00592
0,5	0,00521	0,0043	0,004106	0,00594
0,4	0,00534	0,0043	0,004164	0,00596

Fonte: Autor, 2024.

Como pode ser observado na Tabela 16 as perdas internas do saturador podem ser consideradas desprezíveis para as vazões necessárias.

Tabela 16 - Perdas de carga da torre de saturação para cada vazão ensaiada.

Diâmetro do duto externo (mm)		100	75	50	25
Diâmetro do difusor (mm)		20	15	15	15
DH(m)		0,08	0,06	0,035	0,01
Vazão (L/s)	Perdas de carga interna (mca)				
1,2	0,0021	0,008	0,073	13,0	
1,1	0,0018	0,007	0,062	13,0	
1,0	0,0015	0,006	0,052	11,0	
0,9	0,0013	0,005	0,043	9,1	
0,8	0,0010	0,004	0,034	7,1	
0,7	0,0008	0,003	0,027	5,9	
0,6	0,0006	0,002	0,020	4,5	
0,5	0,0004	0,002	0,014	3,3	
0,4	0,0003	0,001	0,009	2,3	

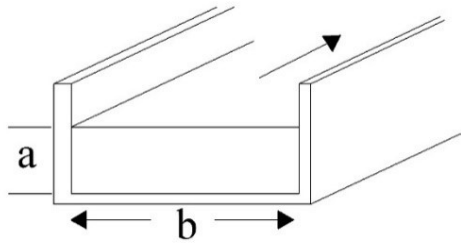
Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2.2 Dimensionamento dos Tanques de Teste de Influência de Gases Dissolvidos em Água em Peixes Neotropicais

Para testar os efeitos da supersaturação gasosa em peixes, é essencial dimensionar tanques onde os peixes serão expostos a diferentes níveis de saturação gasosa. A premissa é manter o fluxo laminar nos tanques para minimizar a turbulência e reduzir a dissipação de gases, mantendo o número de Reynolds (Re) abaixo de 2.000.

O Diâmetro Hidráulico vai depender da seção de escoamento que no caso do tanque de teste pode ser considerada como a seção de um canal e que pode ser calculado pela equação 7, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Seção de canal de teste.



Fonte: Adaptado de [89].

$$Dh = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (7)$$

Onde:

- A: área molhada da seção (m<sup>2</sup>);
- P: perímetro molhado (m);

Aplicando a equação do diâmetro hidráulico (Dhc) é possível calcular essa variável, conforme é demonstrado na equação 8.

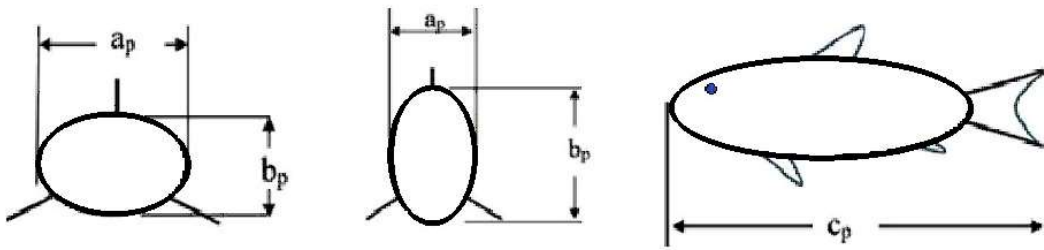
$$Dh_c = \frac{4a_c \cdot b_c}{2a_c + b_c} \quad (8)$$

Onde:

- ac: altura de lâmina d'água do canal;
- bc: largura do canal;

A seção transversal do peixe pode ser obtida de forma simplificada a partir da aproximação por uma elipse Figura 19. Tabela 17A partir da aplicação da equação da área e do perímetro da elipse pode-se chegar à equação 09 que representa aproximadamente o diâmetro hidráulico da seção do peixe (DHp).

Figura 19 - Dimensões dos peixes.



Fonte: Autor, 2024.

$$Dh_p = \frac{2a_p \cdot b_p}{\sqrt{\frac{a_p^2 + b_p^2}{2}}} \quad (09)$$

Onde:

- $Dh_p$ : diâmetro hidráulico da seção do peixe;
- $a_p$ : largura do peixe;
- $b_p$ : altura do peixe;

A vazão no tanque pode ser obtida a partir da equação da continuidade (equação 4) onde:

$$Q = V \cdot S \quad (4)$$

Onde:

- $Q$ : vazão ( $m^3/s$ );
- $v$ : velocidade ( $l/s$ );
- $S$  é a seção transversal do escoamento ( $m^2$ );

O cálculo inicial do volume de água nos tanques ( $V_{tq}$ ) será feito adotando-se a relação mínima de 1kg de massa viva do peixe ( $M_{vp}$ ) para 16,5 litros de água (equação 10).

$$V_{tq} = 16,5 \cdot M_{vp} \quad (10)$$

Onde:

- $V_{tq}$ : volume de água nos tanques;
- $M_{vp}$ : massa viva do peixe;

A relação adotada para projeto entre as dimensões do tanque e as dimensões características dos indivíduos serão dadas pelas equações 11,12 e 13.

$$C_{tq} = 1,3 \cdot c_p \quad (11)$$

$$L_{tq} = 2,3 \cdot c_p \quad (12)$$

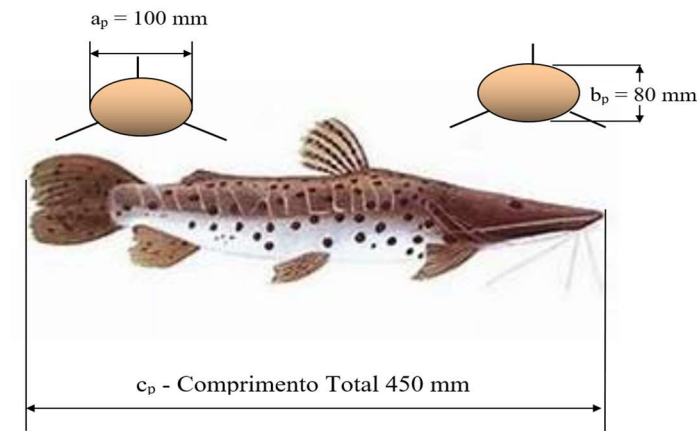
$$A_{tq} = 2,4 \cdot c_p \quad (13)$$

Onde:

- $C_{tq}$ : comprimento total;
- $L_{tq}$ : largura total;
- $A_{tq}$ : altura total;
- $C_p$ : comprimento do peixe;

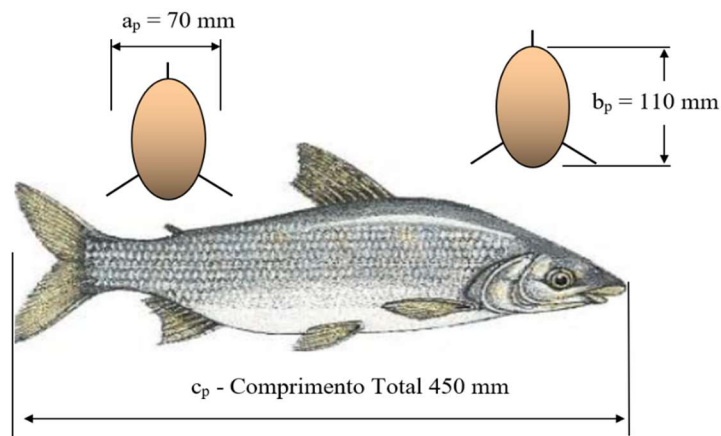
Conforme apresentado anteriormente iremos focar o dimensionamento da seção de teste para as duas espécies de peixes, conforme as Figura 20 e Figura 21 .

Figura 20 - Diagrama das dimensões corporais relevantes no Pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*).



Fonte: [90].

Figura 21 - Diagrama das dimensões corporais relevantes no Curimatá (*Prochilodus lineatus*).



Fonte:[91].

As dimensões dos indivíduos e, função do comprimento total foram obtidas por meio de medição direta em peixes disponíveis para comercialização no mercado, sendo obtidos de indivíduos já abatidos e de indivíduos vivos. A Tabela 17 apresenta as principais dimensões necessárias para dimensionamento da seção de teste (tanques). Por uma questão de simplificação adotamos o mesmo peso para o cálculo com as duas espécies optando por utilizar nos cálculos os maiores valores independentemente de qual espécie se tratava.

Tabela 17 - Dimensões Características do peixe.

Comprimento do peixe (mm)	Peso do peixe (kg)*	Pintado		Curimbatá	
		ap (largura)	bp (altura)	ap (largura)	bp (altura)
500	3.00	110	90	80	125
400	1,54	90	70	60	125
300	0,65	65	55	45	75
200	0,19	45	35	20	50
100	0,05	25	18	15	25
50	0,01	12	8	8	10

Fonte: Autor, 2024.

Os tanques de teste terão formato retangular com dimensões que permitam a colocação de indivíduos para testes de exposição aguda e exposição crônica. Para isso será usada a relação de 1kg de Mvp para 16,5 litros de água.

A Tabela 18 apresenta as principais dimensões necessárias para dimensionamento da seção de teste (tanques). Por uma questão de simplificação adotamos o mesmo peso para o cálculo com as duas espécies optando por utilizar nos cálculos os maiores valores independentemente de qual espécie se tratava.

Tabela 18 - Dimensões características dos peixes.

Dimensões Características dos peixes					
Comprimento do peixe (mm)	Peso do peixe (kg)*	Pintado		Curimbatá	
		a <sub>p</sub> (largura mm)	b <sub>p</sub> (altura mm)	a <sub>p</sub> (largura mm)	b <sub>p</sub> (altura mm)
500	3.00	110	90	80	125
400	1.54	90	70	60	100
300	0.65	65	55	45	75
200	0.19	45	35	20	50
100	0.05	25	18	15	25
50	0.01	12	8	8	10

Fonte: Autor, 2024.

Os tanques de teste terão formato retangular com dimensões que permitam a colocação de indivíduos para testes de exposição aguda e exposição crônica. Para isso será usada

a relação de 1kg de Mvp para 16,5 litros de água. As dimensões dos tanques estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Dimensões dos tanques de testes.

Peso peixe adotado (kg)	$c_p$ - comprimento peixe (mm)	$a_p$ - pintado (mm)*	$b_p$ - curimba (mm)*	Volume do tanque (L)	$C_{tq}$ (mm)	$L_{tq}$ (mm)	$A_{tq}$ (mm)	$V_{tq}$ (L)
3.00	500	110	125	48.8	650	250	300	48.8
1.54	400	90	100	25,0	520	200	240	25.0
0.65	300	65	75	10.5	390	150	180	10.5
0.19	200	45	50	3.1	260	100	120	3.1
0.05	100	25	25	0.8	250	50	60	0.8
0.01	50	12	10	0.2	250	25	30	0.2

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 19 apresenta o cálculo da velocidade e vazão nos tanques tomando-se como premissa a manutenção de escoamento laminar dentro dos mesmos ( $Re=2000$ ).

Tabela 19 - Velocidade e vazão nos tanques de testes.

<b>Velocidade e vazão nos tanques de teste para escoamento laminar (<math>Re = 2.000</math>)</b>					
$c_p$ - comprimento do peixe (mm)	$C_{tq}$ (mm)	$L_{tq}$ (mm)	$A_{tq}$ (mm)	Velocidade tanque (m/s)	Vazão no sistema (l/s)
500	650	250	300	0.005	0.40
400	520	200	240	0.007	0.32
300	390	150	180	0.009	0.24
200	260	100	120	0.013	0.16
100	250	50	60	0.027	0.08
50	250	25	30	0.053	0.04

Fonte: Autor, 2024.

Para garantir que o escoamento ao longo dos indivíduos seja laminar fez-se a verificação do número de Reynolds ( $Re$ ) dos peixes por meio da Tabela 20. É importante deixar registrado que nesse caso não foi feito o cálculo de aumento da velocidade de escoamento no tanque devido a inserção dos peixes na secção de teste com o conseqüente aumento de velocidade ao longo da linha dorsal do indivíduo.

Tabela 20 - Re dos peixes.

cp - comprimento do peixe (mm)	Pintado		Curimba	
	RH	Re	RH	Re
500	0.0985	527	0.0976	522
400	0.0781	523	0.0750	502
300	0.0594	529	0.0563	502
200	0.0391	523	0.0286	382
100	0.0207	553	0.0188	502
50	0.0094	504	0.0089	475

Fonte: Autor, 2024.

Os volumes e vazão para cada grupo de 8 tanques de teste estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Volumes, vazão e tempo de reserva no Tanque de TDG.

cp - comprimento do peixe (mm)	Volumes dos tanques (litros - L)				Tempo de reserva no gerador de TDG - 400L	
	Tanque individual (L)	8 tanques (L)	vazão individual tq (L/s)	vazão 8 tanques (L/s)	Segundos (s)	Minutos (m)
500	48.8	390	0.40	3.2	140	2
400	25,0	200	0.32	2.6	175	3
300	10.5	84	0.24	1.9	234	4
200	3.1	25	0.16	1.3	351	6
100	0.8	6	0.08	0.6	701	12
50	0.2	2	0.04	0.3	1,402	23

Fonte: Autor, 2024.

Por uma questão de simplificação optou-se por adotar duas classes de tanques de teste. Assim a primeira classe (Classe I) será destinada para indivíduos de até 200 mm de comprimento total e peso estimado de 190 gramas. A segunda classe (Classe II) de tanques pode receber indivíduos de até 3kg de peso e com até 500 mm de comprimento. Também foi utilizado um vertedor localizado na saída dos tanques destinado a: i) manter o nível do tanque constante permitindo a manutenção do volume da seção de teste; ii) permitir a medição de vazão que passa pelo sistema. Para isso o vertedor triangular deve ser previamente calibrado. Devido a facilidade de manutenção e operação dos tanques

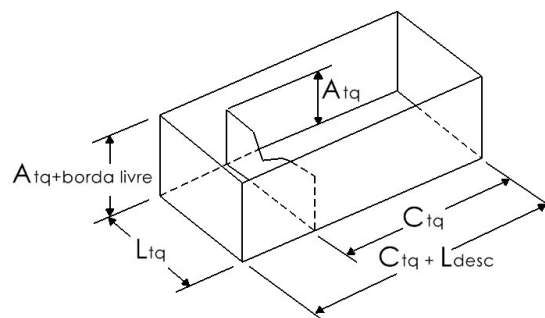
optou-se por não usar algumas dimensões menores do que 150 mm. Assim a largura do tanque Classe I foi fixada em 150 mm. O resultado obtido pode ser observado na Tabela 22 e visualizado nas Figura 22 e Figura 23.

Tabela 22 - Dimensões dos tanques de teste por classe.

Dimensões dos Tanques de teste por Classe								
Classe Tq	C <sub>p</sub> - comprimento peixe (mm)	peso do peixe (kg)	Dimensões dos tanques					
			C <sub>tq</sub> (mm)	L <sub>tq</sub> (mm)	A <sub>tq</sub> (mm)	L <sub>borda livre</sub> (mm)	L <sub>desc</sub>	V <sub>tq</sub> (L)
I	200	0.19	260	150	120	150	150	4.68
II	500	3.00	650	250	300		200	48.8

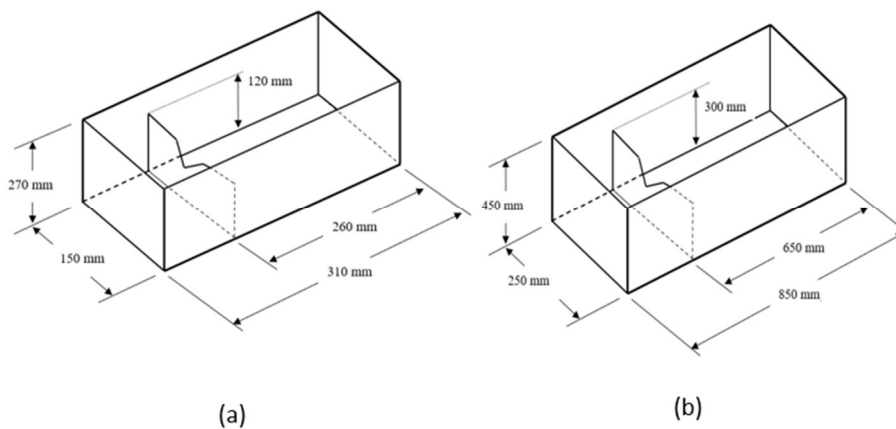
Fonte: Autor, 2024.

Figura 22 - Dimensões dos tanques.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 23 - Dimensões dos tanques. Classe I (a) – Classe II (b).



Fonte: Autor, 2024.

### 4.2.3 Dimensionamento do Sistema Hidráulico para Alimentação de Tanques de Teste de Supersaturação Gasosa

O sistema de alimentação dos tanques de teste de efeito de supersaturação gasosa sobre peixes deve ser dimensionado de forma a se ter baixa turbulência e, portanto, baixa dispersão de gases durante o trajeto do tanque de saturação (Tqsat) até os tanques de teste. Para isso a proposta é dimensionar um circuito de baixo número de Reynolds (Re) de forma a manter o escoamento no regime laminar / transitório, ou seja, entre 2.000 e 4.000, sendo que idealmente deve ser menor do que 2.000. O Re pode ser obtido a partir da equação 2.

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad (2)$$

Onde:

- V: velocidade média na seção do tanque (m/s);
- Dh: diâmetro hidráulico do tanque (m);
- $\nu$ : viscosidade cinemática da água a 20° C é igual a 10<sup>-6</sup> (m<sup>2</sup>/s);

O Diâmetro Hidráulico (Dh) vai depender da seção de escoamento, pode ser obtido pela equação 14.

$$Dh = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (14)$$

Onde:

- Dh : diâmetro hidráulico;
- A: é a área molhada da seção (m<sup>2</sup>);
- P: é o perímetro molhado (m);

Aplicando a seção de escoamento e o perímetro molhado do duto se obtém a equação do diâmetro hidráulico de um duto (Dhd), conforme equação 15.

$$Dh_d = \frac{4 \cdot (\pi \cdot \frac{D^2}{4})}{\pi \cdot D} \quad (15)$$

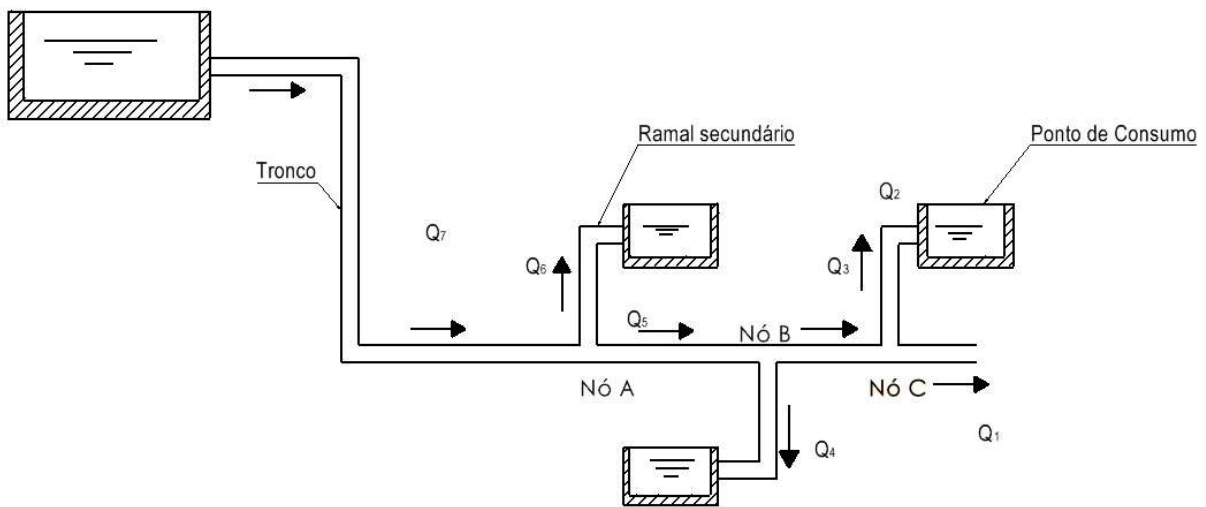
Onde:

- Dh<sub>d</sub> : diâmetro hidráulico de um duto;

- D : diâmetro do duto;

No caso de um duto de seção circular o Dh é igual ao diâmetro do tubo. O sistema será projetado como uma rede ramificada onde uma tubulação tronco abastece ramais secundários e estes os pontos de consumo. Assim as vazões vão se somando a partir dos pontos extremos e os diâmetros tendem a aumentar no sentido jusante montante. Um esquema de uma rede ramificada pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama esquemático de uma rede ramificada.



Fonte: Autor, 2024.

Tomando-se como princípio de que o número de Reynolds (Re) deve ser entre 2000 e 4000 se obtém a equação 16 para cálculo de diâmetro do duto (D) para escoamento laminar.

$$D = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot Re \cdot v} \quad (16)$$

Onde:

- D: diâmetro do duto;
- Re: número de Reynolds;
- Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);
- v: velocidade (m/s);

Para o sistema de alimentação de água bruta oriunda do rio pode-se trabalhar com o critério de velocidades máximas (3m/s) e mínima (0,6m/s). A Tabela 23, mostra os limites a serem respeitados nesse estudo.

Tabela 23 - Limites máximos e mínimos de vazão para dutos.

Diâmetro do tubo		Vazão L/s	
polegadas	mm	mínima	máxima
1/2"	12,7	0,08	0,44
1"	25,4	0,30	1,77
2"	50,8	1,22	7,09
3"	76,2	2,73	15,95
4"	101,6	4,86	28,36
6"	152,4	10,94	63,81

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2.4 Sonda de TDG

As sondas utilizadas são do modelo Polaris TGP, Figura 25, esse modelo compensa automaticamente a temperatura e a pressão barométrica. Ela tem variação na leitura de +/- 1% e pode armazenar mais de 3.000 conjuntos completos de dados, incluindo dados de hora e data, [92]. Os dados registrados podem ser armazenados de forma manual ou automática e em intervalos, com a possibilidade de relacionar os dados a áreas ou pontos. Ela conta com conexão *Bluetooth*. Optou-se por ser um medidor de pressão de gás portátil. Ele pode operar em três modos, um onde ele atua como um medidor de OD, um onde ele é um medidor TDG que mostra pressões como valores de saturação percentual e um onde ele é um medidor de pressão de gás total que mostra pressões como porcentagens de volume, [92].

Figura 25 - Sonda de TDG.



Fonte: [92].

## 4.3 PROTOCOLO DE ENSAIOS

### 4.3.1 Ensaio de Estanqueidade

O primeiro passo após as montagens dos modelos descritos foi o ensaio de estanqueidade, que consiste em verificar se durante o teste dos equipamentos há escape de água ou queda de pressão dentro de um tempo pré-estabelecido, Tabela 24, deve ser preenchida e caso seja identificado alguma alteração no ensaio, deve ser analisado, reparado e refeito, até que o resultado seja satisfatório.

Tabela 24 - Condições hidráulicas dos ensaios.

ETAPAS	HOUVE ESCAPE DE ÁGUA VISIVEL? (S/N)	PRESSÃO DE ENSAIO (kPa)	TEMPO (segundos)
1	NÃO	100	60
2	NÃO	200	120
3	NÃO	300	180
4	NÃO	400	240

Fonte: Autor, 2024.

### 4.3.2 Ensaio de Caracterização dos Aparatos

Para realização dos levantamentos das curvas de caracterização dos aparatos desenvolvidos ao longo deste trabalho foram realizados os seguintes passos:

- Levantamento do volume interno de cada modelo, para que seja possível calcular o tempo de estabilização do sistema quando ocorrer as mudanças de parâmetros de operação.
- Definição das vazões de ensaios. Esses dados são importantes para que seja possível identificar características de operação do equipamento.
- Utilização em duplicata do sistema de medição de TDG, ressalvo que foram utilizadas duas sondas idênticas ao modelo já especificado anteriormente.
- A profundidade das sondas também seguiu o padrão idêntico em todas os ensaios (25 cm).
- O tempo de cada ensaio foi padronizado em 4 minutos, devido às limitações de funcionamento do equipamento.

- Realização de todos os ensaios em triplicata aguardando o tempo de 120 segundos entre as medições, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Ensaios de caracterização realizados em triplicata.

ENSAIO	VAZÃO DE ENSAIO (l/m)	PRESSÃO DE ENSAIO (m.c.a)	SONDA DE TDG 1 (%)	SONDA DE TDG 2 (%)
1				
2				
3				
MÉDIA				

Fonte: Autor, 2024.

Para a determinação do grau de saturação gasosa obtido com o equipamento são medidos os percentuais registrados nas duas sondas de TDG. Assim, para cada vazão e pressão estabelecidas, é possível determinar o grau de saturação do modelo de aparato ensaiado ( $E$ ), que é obtida pela equação 17 apresentada a seguir:

$$E = \frac{STDG1+STDG}{2} .100 \quad (17)$$

Onde:

- $E$  = Grau de saturação do aparato de TDG (%);
- STDG1 = valor medido na sonda de TDG 1 (%);
- STDG2 = valor medido na sonda de TDG 2 (%);

### **4.3.3 Ensaios de exposição de peixes a água supersaturada**

Para realização dos experimentos de exposição aguda a água supersaturada foram considerados 04 níveis de saturação que definirão os grupos experimentais. Dessa forma, água saturada (100%) representará o nível mínimo e será utilizado com grupo controle para os experimentos. O limite máximo será definido em 180% de supersaturação. Entre esses dois valores, incrementos de 20% de saturação serão considerados a partir de 120% gerando, portanto, grupos experimentais. Com incrementos em intervalos menores de supersaturação (a cada 20%) espera-se que os dados permitam a identificação refinada de limiares de supersaturação que sejam mais letais aos peixes auxiliando, dessa forma, no estabelecimento de limites de supersaturação de menor risco durante a operação de UHEs. Além disso, sabe-se que níveis de supersaturação gasosa acima de 120% são aqueles relevantes para avaliação dos efeitos da exposição aguda dos peixes [93].

Para exposição, os peixes foram colocados em tanques experimentais. Para obtenção dos diferentes níveis de supersaturação nos tanques, água do reservatório (saturada) será utilizada com o grupo controle e água do tanque pressurizado (supersaturada) será utilizada para os grupos experimentais. O tanque pressurizado deverá manter níveis de supersaturação de até 180%. A partir dele, água será bombeada para os tanques experimentais e misturada com a água do reservatório até que o nível de supersaturação desejado para cada grupo experimental seja atingido. Um sistema automatizado de controle do bombeamento e fluxo de água para o tanque garanti a manutenção da supersaturação desejada por todo o período do experimento. O fluxo de água nos tanques será mantido de forma aberta e a água utilizada retornará para o rio.

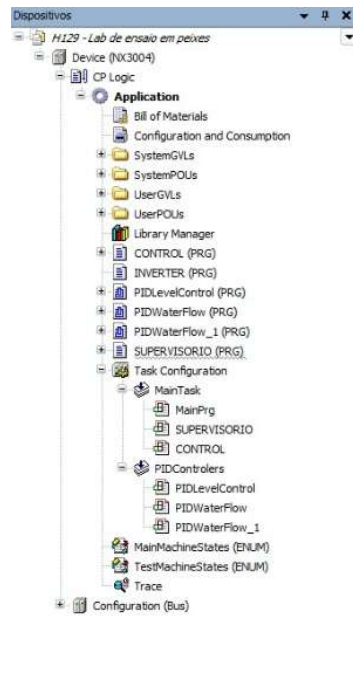
O total de peixes testados em ambos os estágios de TDGA deverá ser de no mínimo 2 indivíduos. A exposição será feita colocando-se indivíduos em tanques e cada grupo corresponderá a uma réplica. Independentemente do grupo experimental. A ordem de exposição conforme os grupos experimentais (definidos pelo nível de supersaturação) será aleatória. O tempo de exposição pode ser de até 72 horas, tempo suficiente para a determinação dos efeitos sendo as primeiras 24 horas mais críticas em relação à taxa de mortalidade [6].

Durante as primeiras 24 horas de exposição, os tanques serão verificados para identificação de peixes mortos em intervalos de 20 minutos. Aqueles identificados como mortos serão retirados do tanque e submetidos à necropsia para avaliação de lesões. O número de peixes mortos (no caso dos experimentos com grupos de indivíduos) e as lesões identificadas serão computados juntamente com o tempo de exposição à água supersaturada nos tanques. Além disso, durante todo o experimento o comportamento dos peixes será monitorado utilizando-se um sistema de vídeo.

#### **4.4 VARIÁVEIS DE CONTROLE**

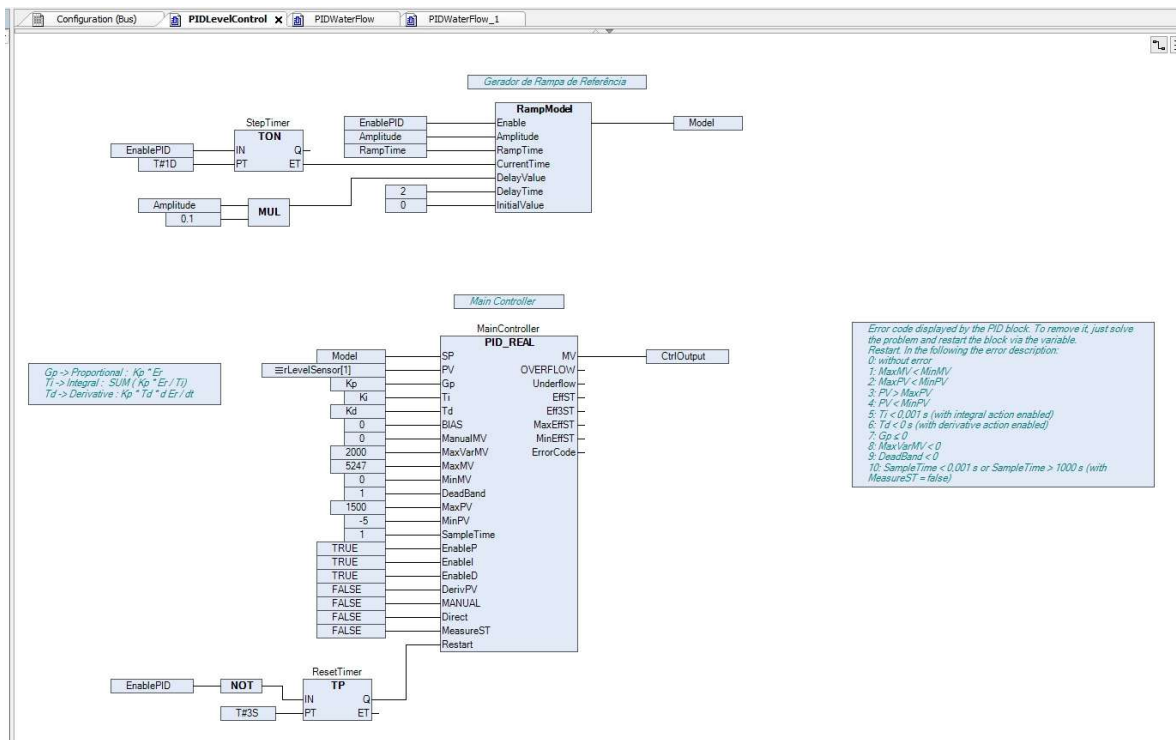
O projeto do “Laboratório de Ensaio em Peixes” implementou uma aplicação baseada na norma IEC 61131-3 vide a Figura 26, desenvolvida em Structured Text (ST), direcionada ao comando e à automação de um sistema hidráulico de testes. Foram implementados três controladores do tipo PID (Proporcional Integral Derivativo), sendo um controlador de nível, vide a Figura 27 dois destinados ao controle de fluxo. O controlador de nível é responsável pela etapa inicial de partida do equipamento, estabelecendo as condições adequadas para o funcionamento do sistema. Em sequência, é acionado o controlador de fluxo 1, vide a Figura 28 para promover a abertura da linha de processo. Após a estabilização da variável de saída, entra em operação o controlador de fluxo 2, vide a Figura 29, configurado para corrigir pequenas variações, de modo a acompanhar a referência de saída estabelecida. Esse ajuste é realizado por meio do controle da motobomba, cujo acionamento ocorre via inversor de frequência, garantindo estabilidade operacional e resposta consistente às demandas do processo.

Figura 26 - Estrutura hierárquica da aplicação em IEC 61131-3 para o Laboratório de Ensaio em Peixes.



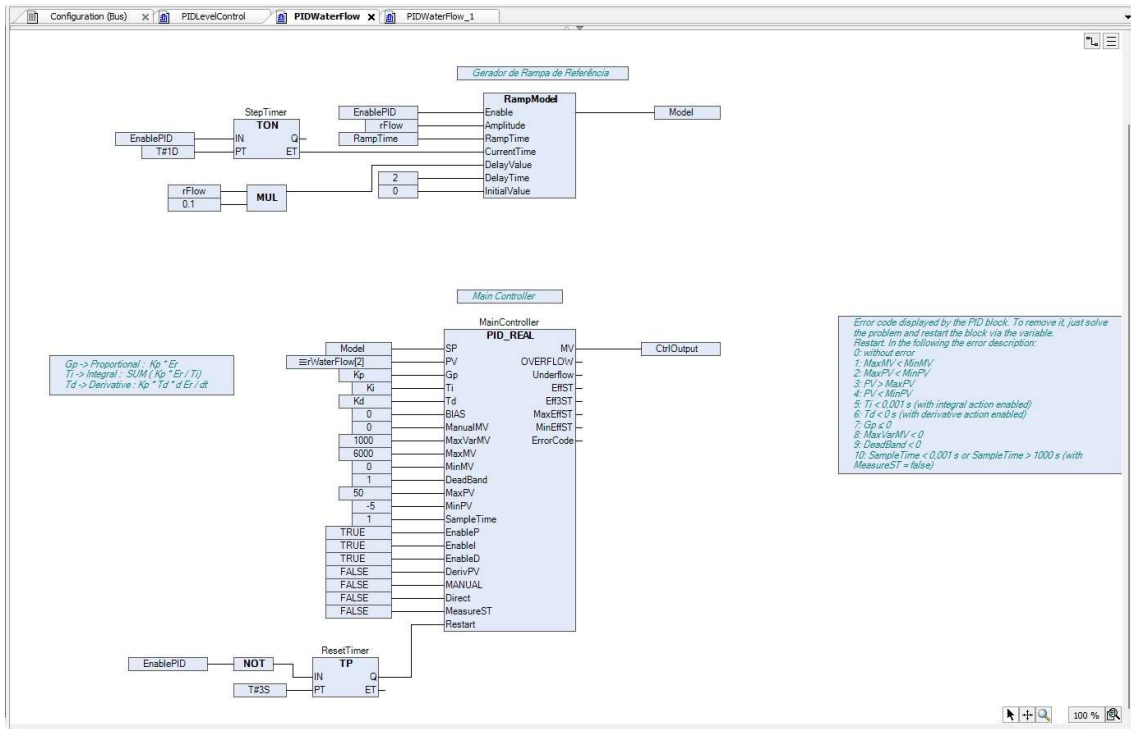
Fonte: Autor, 2025.

Figura 27- Parâmetros do controlador de nível.



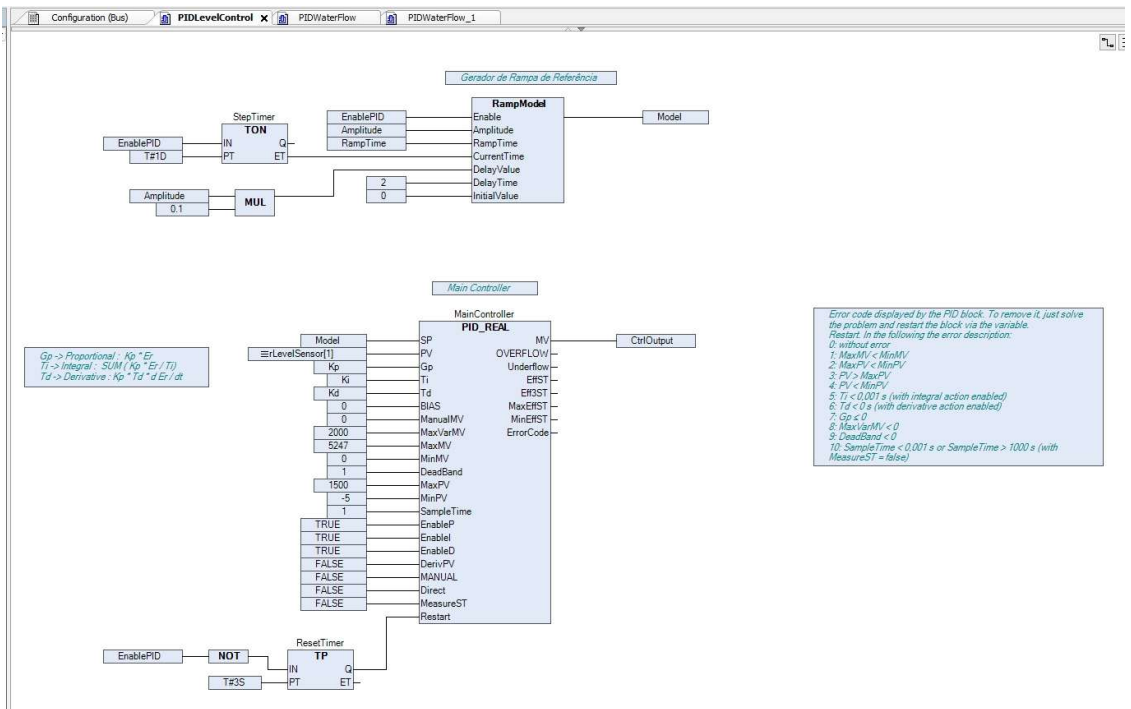
Fonte: Autor, 2025.

Figura 28 - Parâmetros do controlador de fluxo 1.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 29 - Parâmetros do controlador de fluxo 2.



Fonte: Autor, 2025.

A arquitetura proposta estabelece uma separação funcional explícita entre os módulos de aquisição e temporalização de sinais, lógica de segurança, condicionamento de medidas e rotinas de atuação, de forma a assegurar robustez e rastreabilidade ao processo de controle. A execução cíclica da aplicação é coordenada pela *MainTask*, responsável por organizar o fluxo determinístico de operações. A cada varredura, esta tarefa invoca um programa dedicado às variáveis especiais voltadas à temporização e ao gerenciamento de relógio do sistema. Neste contexto, uma rotina de inicialização é executada exclusivamente no primeiro ciclo, garantindo condições controladas de arranque. Em sequência, o controle é transferido ao código do usuário, o que possibilita a operação contínua do sistema dentro de um regime previsível e estável. O bloco de variáveis especiais desempenha papel central na gestão temporal do processo. Ele mantém pulsos periódicos variando de 100 m.s a 60 s, a partir da base de tempo de sistema em microssegundos, além de atualizar parâmetros como o pulso de varredura, a data/hora e variáveis derivadas, como *Hour\_Minute* e *Day\_Of\_Week*. Tais marcos temporais constituem a base para a implementação de funções críticas, incluindo *debouncing*, geração de rampas e a lógica sequencial necessária ao controle seguro e eficiente do processo hidráulico de testes. No núcleo de controle, o programa "CONTROL" executa ciclicamente duas ações fundamentais: *Measurements*, destinada à linearização e ao escalonamento dos sinais adquiridos, e *Safety*, responsável pela consolidação das barreiras de proteção. Essa estruturação garante que a leitura e o condicionamento dos sinais antecedam a etapa de tomada de decisão e de atuação em cada ciclo, assegurando consistência entre os estados internos do sistema e as variáveis de saída. A camada de segurança contempla intertravamentos de nível por coluna e de sobreaquecimento, os quais, ao ultrapassarem limites preestabelecidos, promovem a desativação imediata do inversor de frequência, a abertura forçada da válvula proporcional de descarga de água e a inibição dos controladores, quando necessário. Paralelamente, um mapa de *bits* de códigos de status é mantido, fornecendo ao sistema supervisor e à interface homem-máquina (IHM) um feedback sintético e robusto. Esse feedback agrega informações diagnósticas, incluindo a detecção de níveis mínimo e máximo em cada reservatório e a sinalização de alarmes térmicos da motobomba. A integração dessas funcionalidades não apenas reforça a robustez operacional do sistema, mas também concilia mitigação imediata de falhas com uma telemetria clara e

objetiva para o operador, contribuindo para maior confiabilidade, segurança e transparência na operação do processo.

As rotinas “*Init*”, “*Stop*”, “*CloseOutputs*” e “*ResetSystem*” desempenham a função de padronizar os estados de repouso, partida e esvaziamento do sistema, garantindo que válvulas de purga e de dreno, contadores da motobomba, habilitação do inversor e comandos às válvulas proporcionais sejam restabelecidos a condições seguras antes da execução de novas sequências operacionais. Essa disciplina de estados previne partidas sob condições residuais e contribui para a simplificação dos procedimentos de recuperação após falhas. A arquitetura de controle expõe métodos bem definidos para o acionamento de atuadores e a regulação de variáveis de processo. Os métodos “*SetContactor*” e “*ResetContactor*” realizam o gerenciamento dos contadores da bomba e do compressor, incorporando verificação explícita de realimentações e retornando códigos de êxito que possibilitam integração confiável com o sistema supervisorio. O método “*SetPressure*” implementa um controle proporcional sobre a válvula proporcional de ar, associado a uma banda morta (*deadband*) e a temporização em rampa, com o objetivo de elevar a pressão de ensaio até 105% do *setpoint* estabelecido. A saída é limitada a valores físicos entre 0,005 V e 9,0 V, posteriormente convertidos para *bits*. O uso do temporizador TON impõe uma cadência de ajuste que evita o fenômeno de *hunting*, assegurando a estabilização da malha de controle quando a variável de processo atinge a faixa de tolerância. A documentação de VP1/VP2 explicita as faixas de operação e a codificação adotada (0–10 V → 0–32767), garantindo coerência entre a interface analógica e o cálculo digital da saída. De maneira análoga, o método “*SetWaterFlow*” aplica controle proporcional com banda morta e rampa temporizada para a regulação da vazão por meio da válvula proporcional de água. Essa estratégia assegura a saturação adequada do sinal, a realização de ajustes incrementais e a retenção do último valor estável quando a variável de processo permanece dentro da faixa de tolerância. A conversão do sinal para *bits* é executada com ganho coerente à escala de 10 V do conversor analógico-digital. Adicionalmente, o método “*SetTank*” traduz as combinações de seleção de tanques provenientes do supervisorio em acionamentos determinísticos das válvulas de dreno de cada reservatório. Para tal, emprega lógica booleana explícita, eliminando conflitos de atuação e retornando

códigos de conclusão bem-sucedida. Essa abordagem confere reprodutibilidade e auditabilidade ao sequenciamento, o que favorece o diagnóstico de falhas e a realização de testes de FAT (*Factory Acceptance Test*) e SAT (*Site Acceptance Test*).

Em síntese, o código desenvolvido materializa uma aplicação de controle industrial determinístico, fundamentada em temporização baseada em tempo absoluto, condicionamento de sinais, intertravamentos de processo e encapsulamento de atuadores em métodos dotados de feedback de status. A utilização combinada de banda morta, saturação física, rampas temporizadas e verificações de realimentação reflete a adoção de boas práticas de controle discreto e de malhas de baixa complexidade, aplicáveis a plantas hidráulicas de ensaio, promovendo maior estabilidade, segurança operacional e rastreabilidade das ações de controle.

## ***Capítulo 5***

### **5 RESULTADOS DE EXPOSIÇÃO DE ESPÉCIES A SUPERSATURAÇÃO**

Os testes de saturação gasosa foram realizados nas dependências do LTHE, utilizando o protocolo de ensaios descritos no item 4.3 deste trabalho, devidamente autorizado pela comissão de ética no uso de animais sobre o número CEUA 3265040425 (ID 000625), os ensaios contemplaram os níveis de supersaturação de 115%, 125% e 135% de TDG, além de um tanque controle com 100% de TDG. As temperaturas durante os ensaios variaram entre 16°C e 24°C. Para cada condição, foram utilizados seis indivíduos por espécie (n = 6), os quais foram alocados simultaneamente em tanques de 50 litros. Foi também mantido um aquário controle, contendo indivíduos expostos à água com 100% de TDG. Esses peixes permaneceram no tanque por 96 horas sem que fosse registrado qualquer óbito. Após esse período, foram transferidos de volta para os tanques de manutenção

com capacidade de 2.000 litros. Durante os testes, foram registrados para cada exemplar: o tempo de exposição até o óbito, o peso e a temperatura média do ensaio. Observou-se, de forma consistente em todos os níveis de supersaturação, que os peixes buscavam regiões do tanque com menor influência de TDG. Antes do óbito, todos apresentaram sinais de desorientação e perda progressiva da capacidade natatória. Esses dados contribuem para a compreensão dos limites de tolerância das espécies à exposição à água supersaturada, bem como para a identificação dos sintomas comportamentais mais relevantes. As espécies utilizadas nos ensaios foram adquiridas de um fornecedor de alevinos localizado em Belo Horizonte e incluem: i) Tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*); ii) Lambari rabo amarelo (*Astyanax lacustris*); iii) Jundiá (*Rhamdia quelen*); iv) Piau-Três-Pintas (*Leporinus freiderici*).

Os dados levantados ajudam a entender o tempo de exposição que cada espécie suporta e quais são os principais sintomas identificados após essa exposição a níveis de água supersaturada.

## **5.1 TILÁPIAS (*OREOCHROMIS NILOTICUS*)**

A tilápia (*Oreochromis niloticus*) é uma das espécies de peixes de água doce mais cultivadas no mundo, devido à sua rápida taxa de crescimento, resistência a diversas condições ambientais e alto valor nutricional, [94]. Originária da África, a tilápia se adaptou bem a diferentes regiões tropicais e subtropicais, tornando-se essencial para a aquicultura [95]. Contudo, sua introdução em novos habitats pode representar riscos ecológicos, incluindo competição com espécies nativas e impactos na biodiversidade local [96]. Os exemplares da espécie Tilápias (*Oreochromis niloticus*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nas brânquias, olhos, intestinos, nadadeira caudal, nadadeira dorsal e nadadeira lateral, vide as Figura 30 e Figura 31. O tempo de ensaio médio no aquário com TDG a 115% de TDG foi de 5:02 horas, enquanto no aquário com TDG a 125% foi de 3:10 horas, já no aquário a 135% de TDG o tempo médio foi de 2:35 horas, conforme Tabela 26, evidenciando assim que os níveis de exposição impactam diretamente no tempo de vida dos exemplares. Foi possível identificar ainda que os exemplares procuram áreas do aquário sob menor influência de TDG e que foram ficando desorientados, perdendo a capacidade natatória antes do óbito dos exemplares.

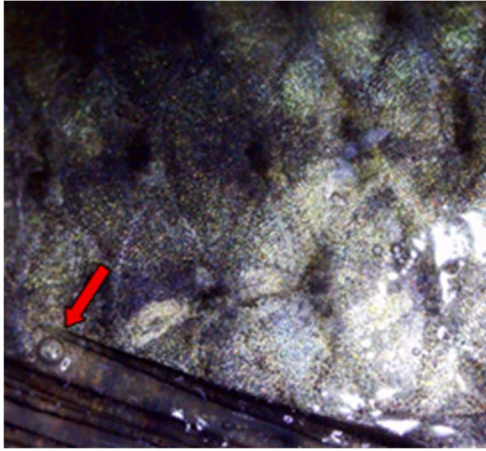
Tabela 26 - Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG em Tilápias.

% TDG	Tilápias ( <i>Oreochromis niloticus</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	5:02	145	4:45	21.8
		140	5:00	
		127	5:00	
		182	5:00	
		123	5:15	
		132	5:15	
125%	3:10	125	2:45	22.3
		135	3:00	
		155	3:00	
		140	3:15	
		115	3:30	
		135	3:30	
135%	2:35	132	1:45	22.3
		140	2:00	
		130	2:30	
		135	3:00	
		150	3:00	
		140	3:15	

Fonte: Autor, 2025.

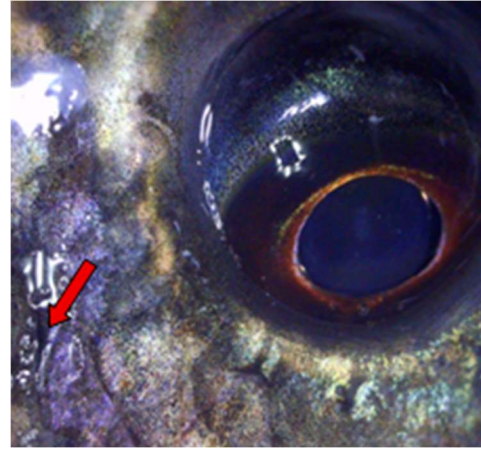
Figura 30 - Compilado de imagens da espécie Tilápias (*Oreochromis niloticus*), 115%.

(opérculo)



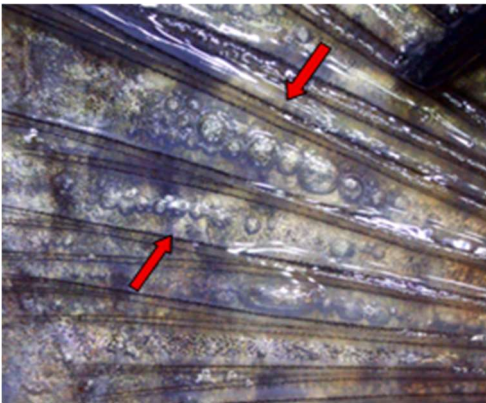
Fonte: Autor, 2025.

(olho)



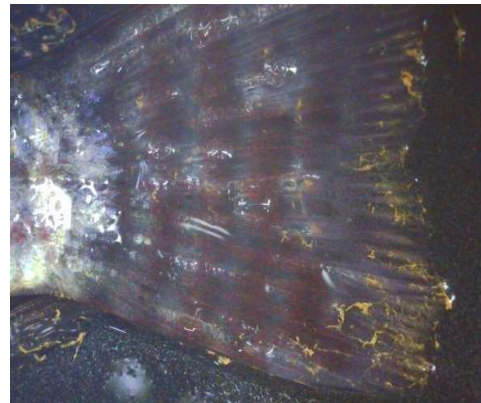
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira peitoral)



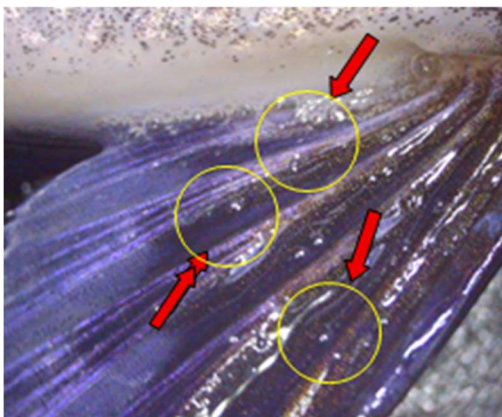
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



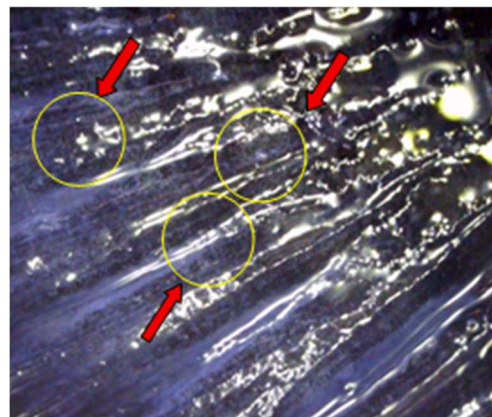
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira Peitoral)



Fonte: Autor, 2025.

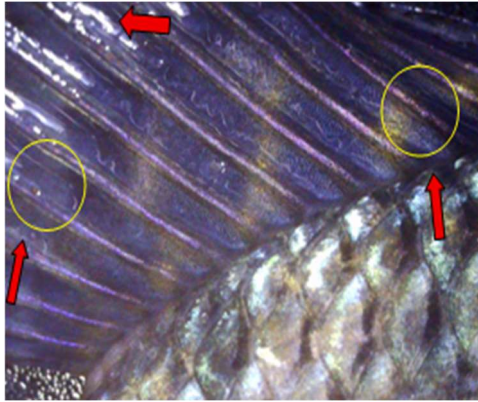
(Nadadeira peitoral)



Fonte: Autor, 2025.

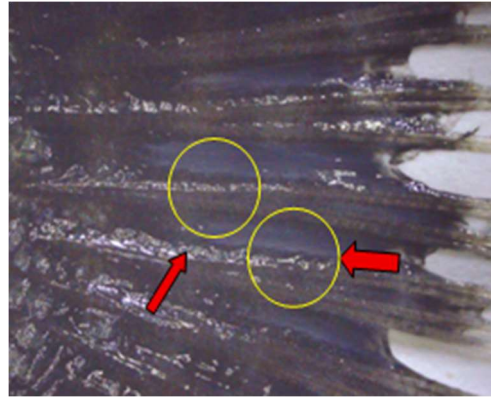
Figura 31 - Compilado de imagens da espécie Tilápias (*Oreochromis niloticus*), 125%.

(Nadadeira dorsal)



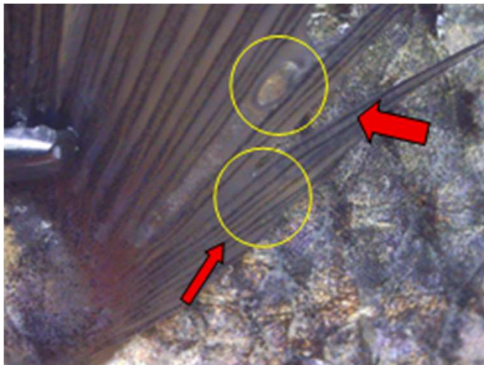
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



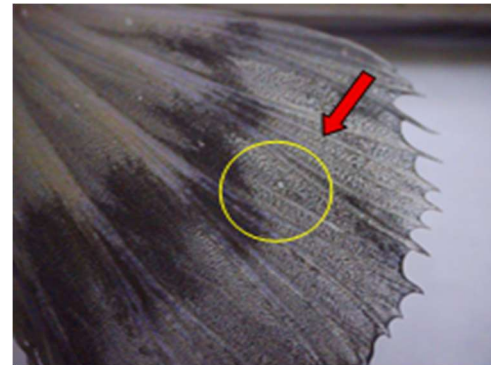
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira Peitoral)



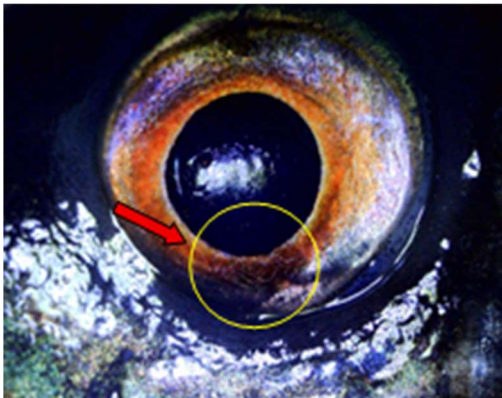
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira peitoral)



Fonte: Autor, 2025.

(Olhos)



Fonte: Autor, 2025.

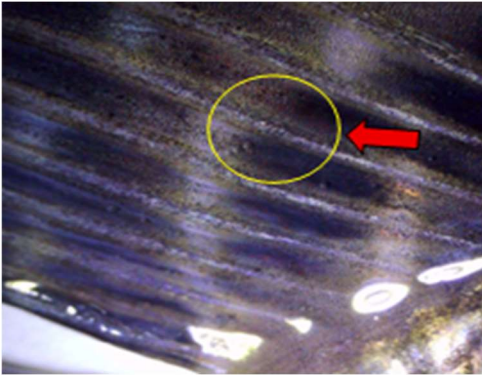
(Nadadeira dorsal)



Fonte: Autor, 2025.

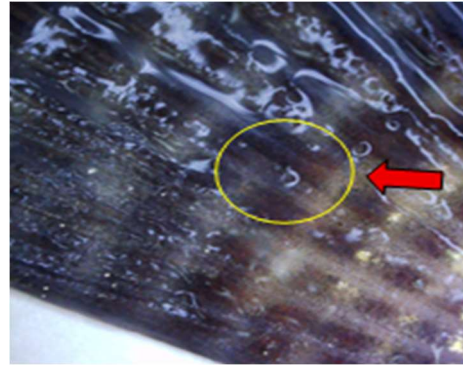
Figura 32 - Compilado de imagens da espécie Tilápias (*Oreochromis niloticus*), 135%.

(Brânquias)



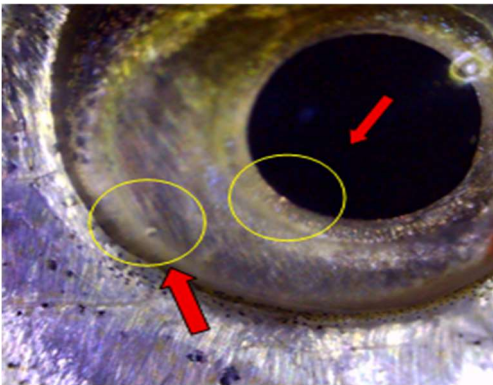
Fonte: Autor, 2025.

(Brânquias)



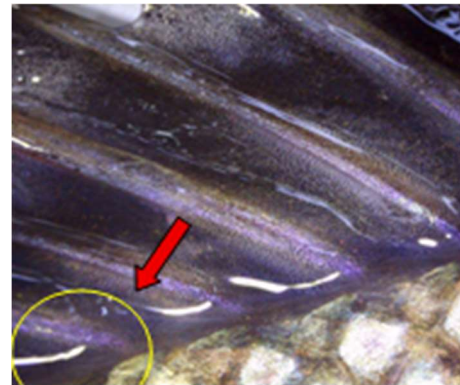
Fonte: Autor, 2025.

(Olhos)



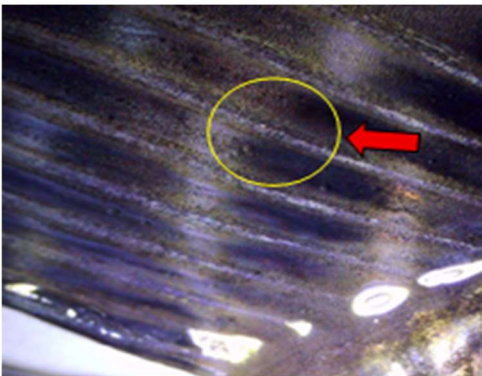
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira dorsal)



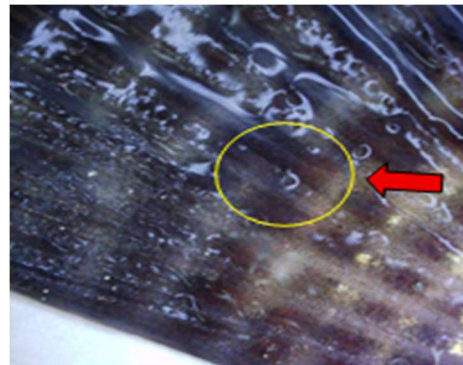
Fonte: Autor, 2025.

(Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

(Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

## 5.2 LAMBARI AMARELO (*ASTYANAX LACUSTRIS*)

O Lambari Amarelo (*Astyanax altiparanae*) é uma espécie de peixe de pequeno porte amplamente distribuída em regiões neotropicais. Entre suas principais características estão seu rápido crescimento, alta taxa de reprodução e resistência a variações ambientais [97].

A espécie se destaca pelo seu papel ecológico como elo fundamental na cadeia alimentar, servindo de presa para predadores naturais e contribuindo para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos [97].

Os exemplares da espécie Lambari Amarelo (*Astyanax altiparanae*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nas brânquias, nadadeira dorsal, nadadeira caudal, nadadeira lateral, olhos e nadadeira caudal inferior, vide, Figura 33, Figura 34 e Figura 35. O tempo médio de ensaio no aquário com TDG a 115% de TDG foi de 3:20 horas enquanto no aquário com TDG a 125% de TDG o tempo médio de ensaio foi de 2:20 horas, já em 135% de TDG o tempo foi de 1:20 horas, conforme evidenciado na Tabela 26, demonstrando assim que os níveis de exposição impactam diretamente no tempo de vida dos exemplares. Foi possível identificar ainda que os exemplares procuram áreas do aquário sob menor influência de TDG e que foram ficando desorientados, perdendo a capacidade natatória antes do óbito dos exemplares.

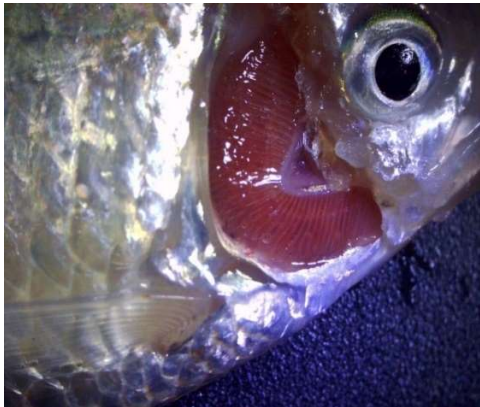
Tabela 26- Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG em Lambaris.

% TDG	Lambari rabo amarelo ( <i>Astyanax lacustris</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	3:20	2	3:15	15.6 graus
		3	3:15	
		4	3:15	
		2	3:30	
		3	3:30	
		3	3:30	
125%	2:20	2	1:45	22.3graus
		2	2:15	
		4	2:15	
		3	2:30	
		3	2:30	
		4	2:45	
135%	1:22	2	1:00	24.2 graus
		3	1:15	
		2	1:15	
		3	1:30	
		3	1:30	
		2	1:30	

Fonte: Autor, 2025

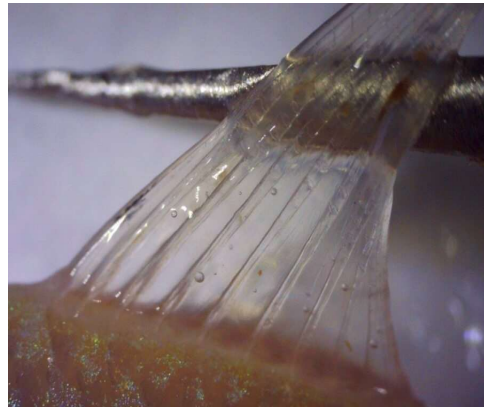
Figura 33 - Compilado de imagens da espécie Lambari Amarelo (*Astyanax lacustris*), 115%.

(Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira dorsal)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira lateral)



Fonte: Autor, 2025.

(Olhos)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira inferior caudal)



Fonte: Autor, 2025.

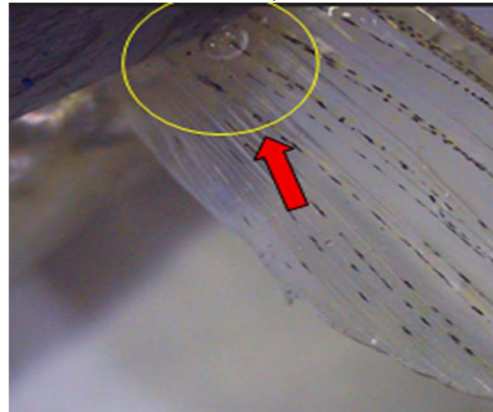
Figura 34 - Compilado de imagens da espécie Lambari Amarelo (*Astyanax lacustris*), 125%.

(Brânquias)



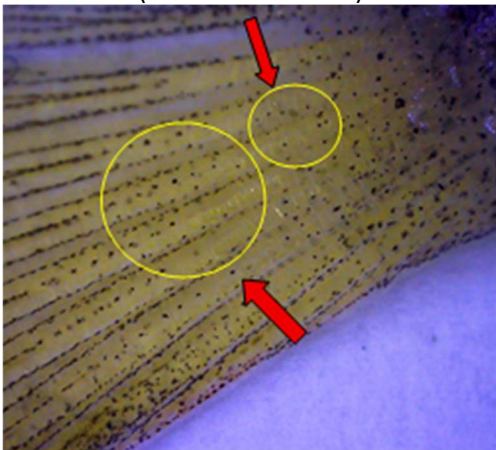
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira peitoral)



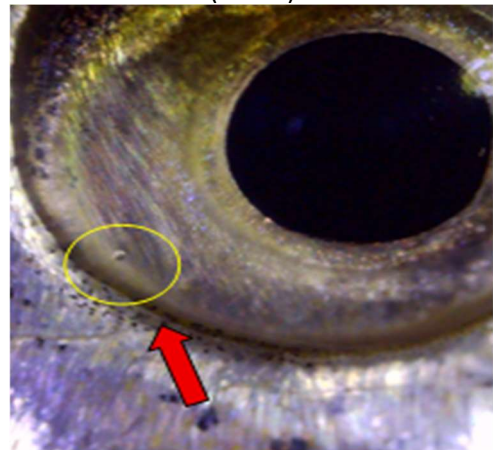
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



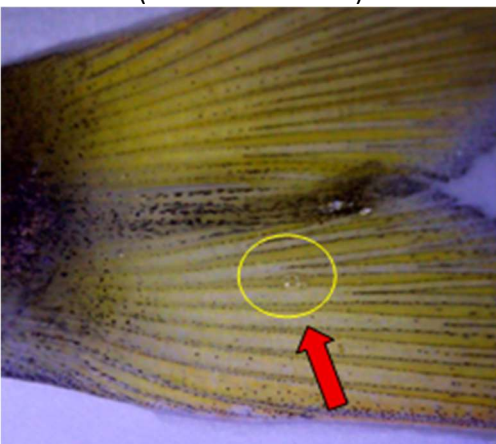
Fonte: Autor, 2025.

(Olhos)



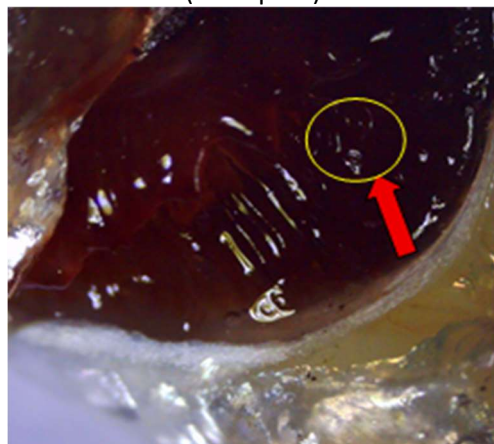
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

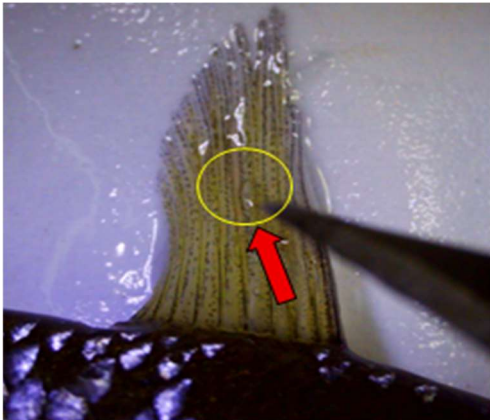
(Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

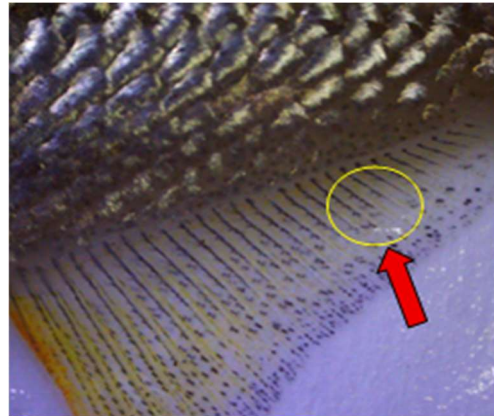
Figura 35 - Compilado de imagens da espécie Lambari Amarelo (*Astyanax lacustris*), 135%.

(Nadadeira dorsal)



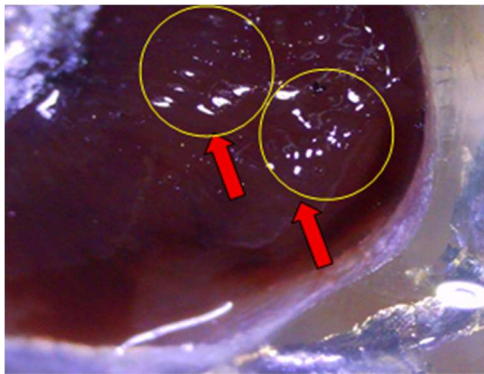
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira anal)



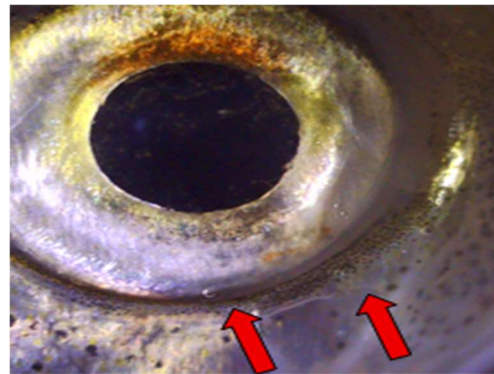
Fonte: Autor, 2025.

(Brânquias)



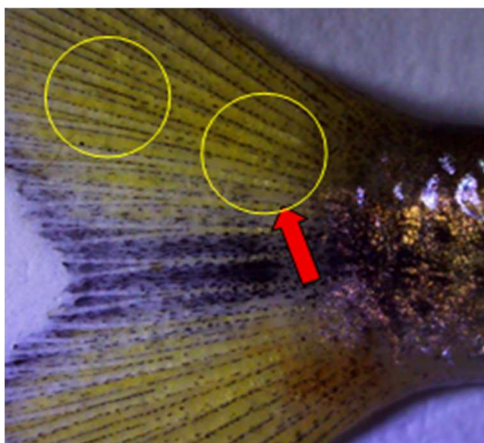
Fonte: Autor, 2025.

(Olhos)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(Bexiga)



Fonte: Autor, 2025.

### 5.3 JUNDIÁ (*RHAMDIA QUELEN*)

Os exemplares da espécie Jundiá (*Rhamdia quelen*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nas brânquias, nadadeira caudal, nadadeira dorsal, nadadeira lateral, órgãos internos e nadadeira caudal inferior, vide Figura 36, Figura 37 e Figura 38. O tempo médio de óbito no aquário com TDG está apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG.

% TDG	Jundiá ( <i>Rhamdia quelen</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	4:00	11	3:15	17,7 graus
		12	4:00	
		10	4:00	
		15	4:00	
		13	4:15	
		12	4:30	
125%	2:52	12	2:30	23,0 graus
		12	2:45	
		14	2:45	
		13	3:00	
		12	3:00	
		15	3:15	
135%	2:20	14	1:45	23.4 graus
		13	2:15	
		14	2:15	
		11	2:15	
		11	2:45	
		15	2:45	

Fonte: Autor, 2025.

Figura 36 - Sintomas Jundiá (*Rhamdia quelen*) 115%.

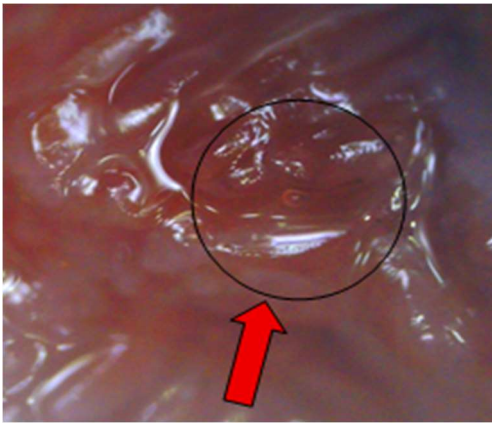
(Nadadeira dorsal)



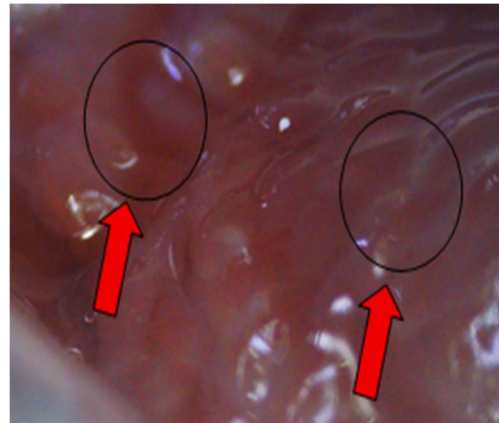
(Nadadeira Peitoral)



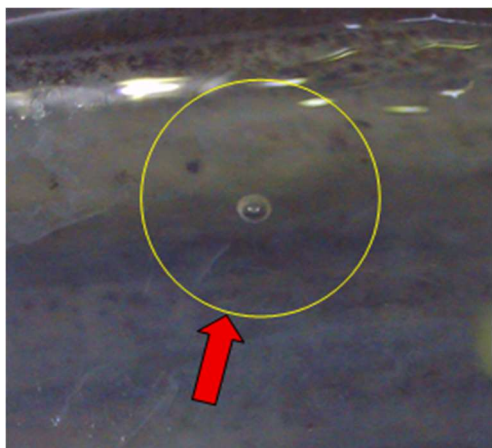
(Brânquias)



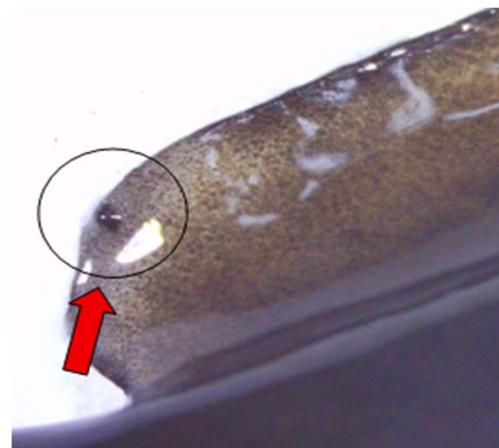
(Brânquias)



(Nadadeira caudal)



(Nadadeira dorsal)



Fonte: Autor, 2025.

Figura 37 - Sintomas Jundiá (*Rhamdia quelen*) 125%.

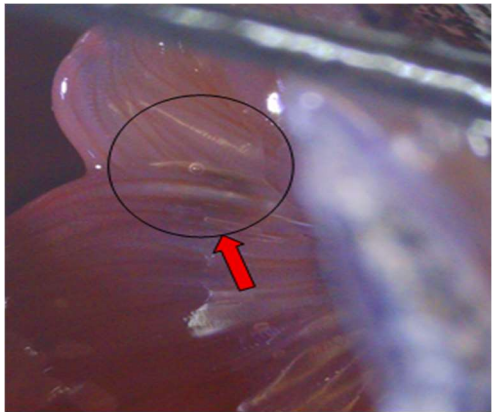
(Nadadeira dorsal)



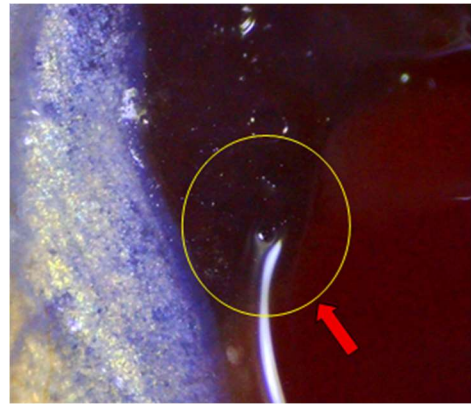
(Nadadeira Peitoral)



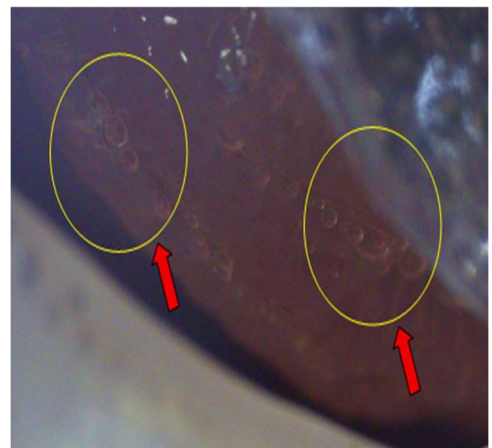
(Brânquias)



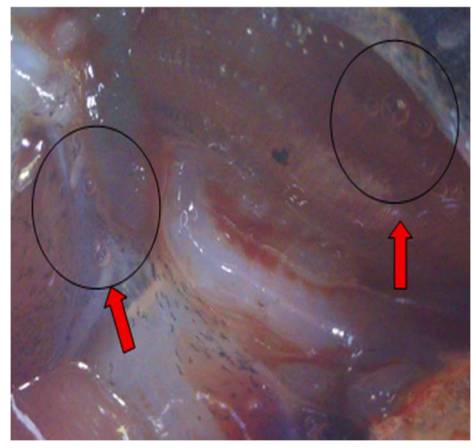
(Brânquias)



(Brânquias)



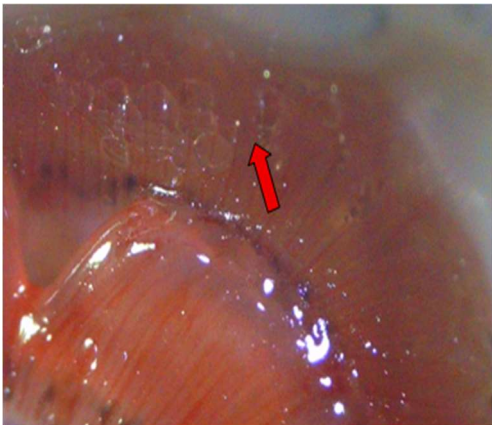
(Orgãos internos)



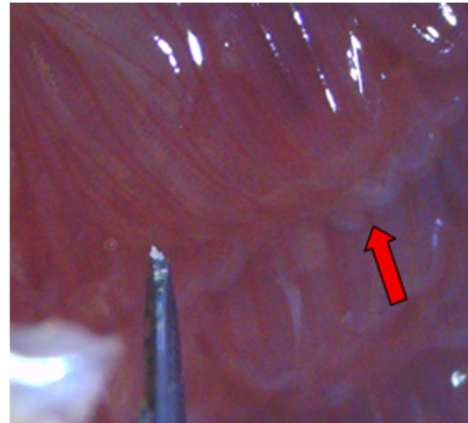
Fonte: Autor, 2025.

Figura 38 - Sintomas Jundiá (*Rhamdia quelen*) 135%.

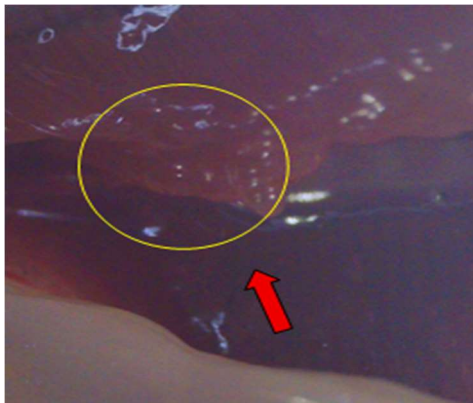
(Brânquias)



(Brânquias)



(Brânquias)



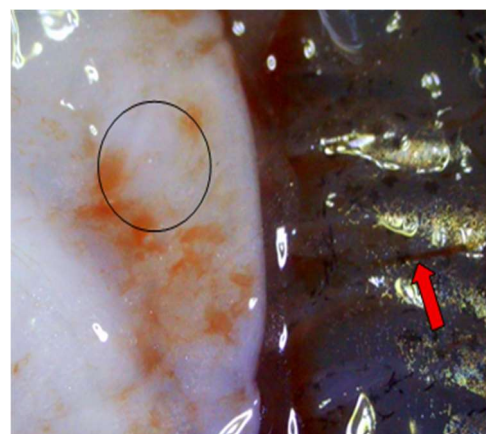
(Brânquias)



(Brânquias)



(Orgãos internos)



Fonte: Autor, 2025.

#### 5.4 PIAU-TRÊS-PINTAS (*LEPORINUS FRIDERICI*)

O piau-três-pintas (*Leporinus friderici*) é uma espécie de peixe da família *Anostomidae* amplamente distribuída nas bacias dos rios Amazonas, Teles Pires, Tocantins-Araguaia, São Francisco e Paraná [98]. Esse peixe de médio porte apresenta corpo alongado, boca terminal e três manchas escuras características ao longo do corpo, [5].

A espécie desempenha um papel ecológico importante, atuando como onívora com tendência herbívora, alimentando-se de frutos, sementes, algas e pequenos invertebrados, o que contribui para a dispersão de sementes em ambientes aquáticos. O *Leporinus friderici* apresenta crescimento relativamente lento e maturação sexual tardia, características que o tornam vulnerável à sobrepesca quando não há controle adequado.

Portanto, o manejo sustentável do *Leporinus friderici* é essencial para a conservação da espécie e para o desenvolvimento de sua aquicultura, necessitando de regulamentação pesqueira e avanços na tecnologia de cultivo.

Os exemplares da espécie Piau-Três-Pintas (*Leporinus friderici*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nas brânquias, nadadeira caudal, nadadeira dorsal, nadadeira lateral, órgãos internos e nadadeira caudal inferior, vide as Figura 39, Figura 40 e Figura 41. O tempo médio de ensaio no aquário com TDG a 115% foi de 2:55 horas, enquanto no aquário com TDG a 125% o tempo médio de ensaio foi de 2:15 horas, já em 135% de TDG o tempo médio de ensaio foi de 2:00 horas, vide a Tabela 27. Evidenciando assim que os níveis de exposição impactam diretamente no tempo de vida dos exemplares. Foi possível identificar ainda que os exemplares procuram áreas do aquário sob menor influência de TDG e que foram ficando desorientados, perdendo a capacidade natatória antes do óbito dos exemplares.

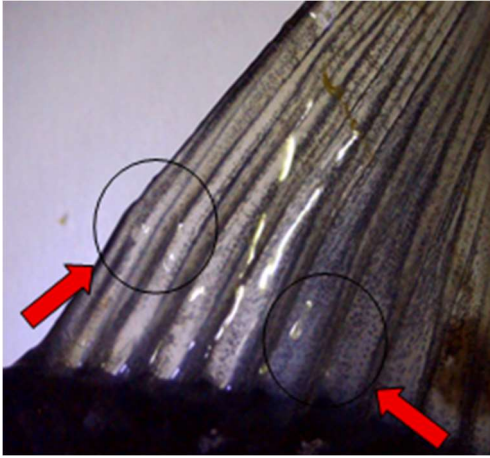
Tabela 27 - Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG.

% TDG	Piau-Três-Pintas ( <i>Leporinus friderici</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	2:45	20	2:00	16,1 graus
		22	2:30	
		19	2:45	
		23	2:45	
		19	3:00	
		14	3:00	
125%	2:15	25	1:45	19,1 graus
		20	2:00	
		22	2:15	
		22	2:15	
		19	2:30	
		25	2:30	
135%	1:45	33	1:30	20,1 graus
		24	1:30	
		21	1:45	
		18	2:15	
		19	1:45	
		35	2:00	

Fonte: Autor, 2025.

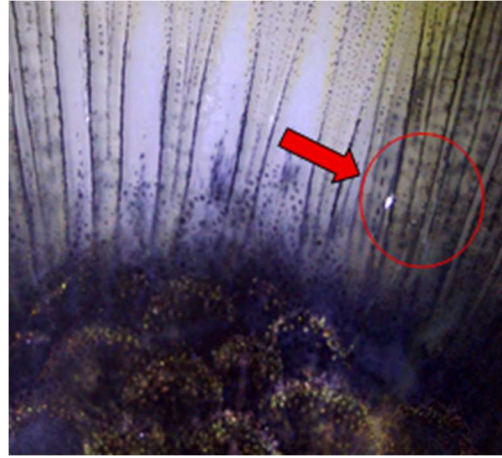
Figura 39 - Compilado de imagens da espécie Piau-Três-Pintas (*Leporinus friderici*) 115%.

(Nadadeira dorsal)



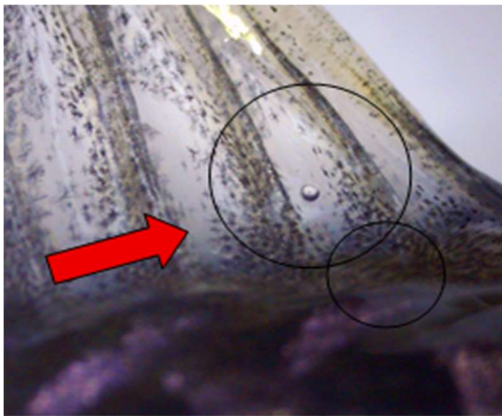
Fonte: Autor, 2025.

(II – Nadadeira peitoral)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira dorsal)



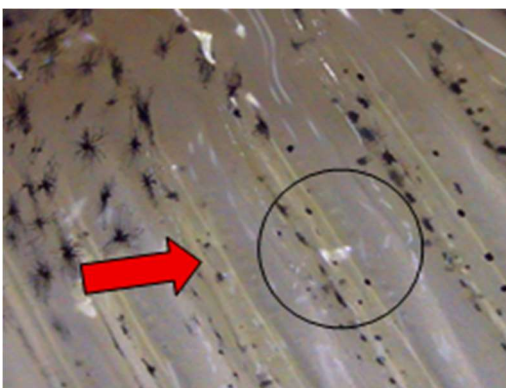
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira anal)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira peitoral)



Fonte: Autor, 2025.

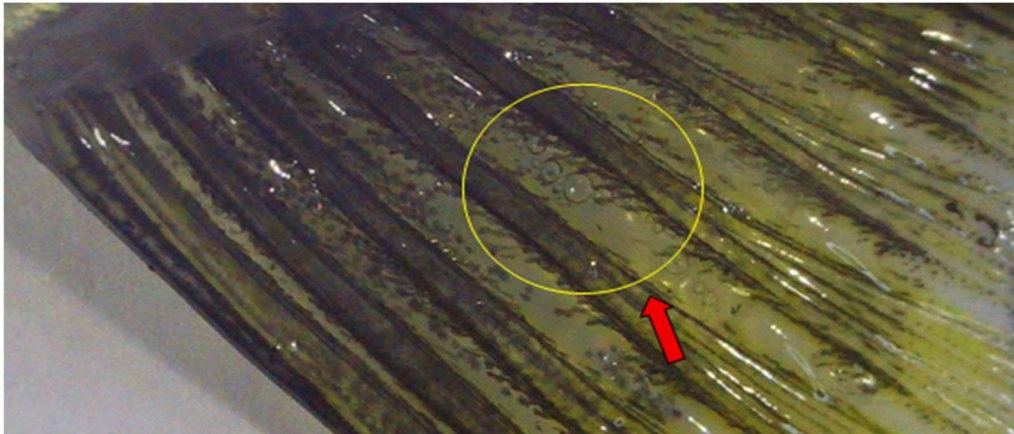
(Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

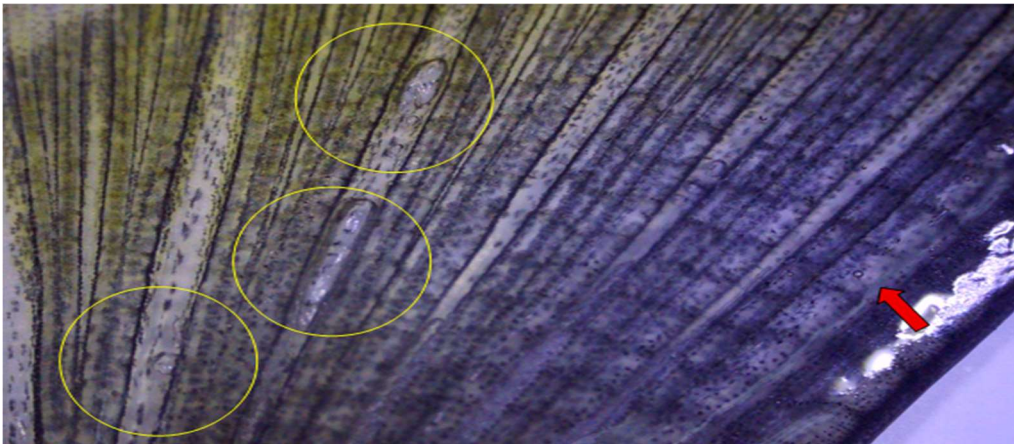
Figura 40 - Compilado de imagens da espécie Piau-Três-Pintas (*Leporinus friderici*) 125%.

(Nadadeira anal)



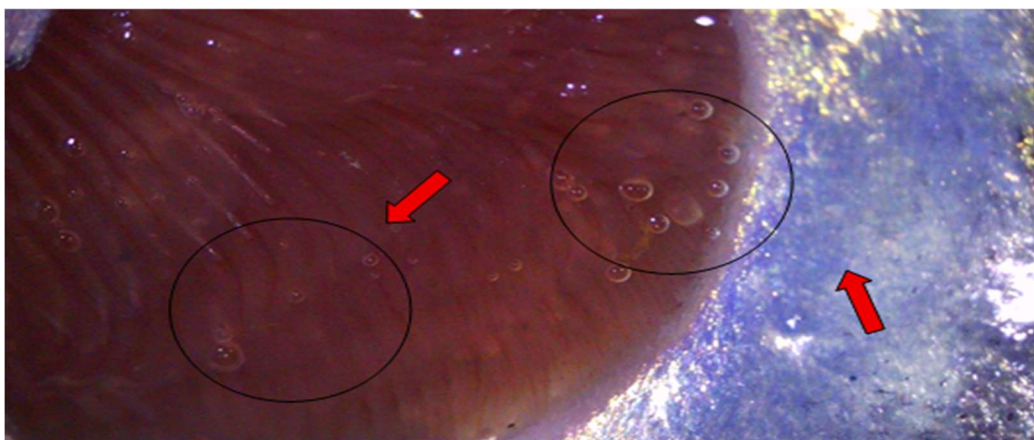
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira peitoral)



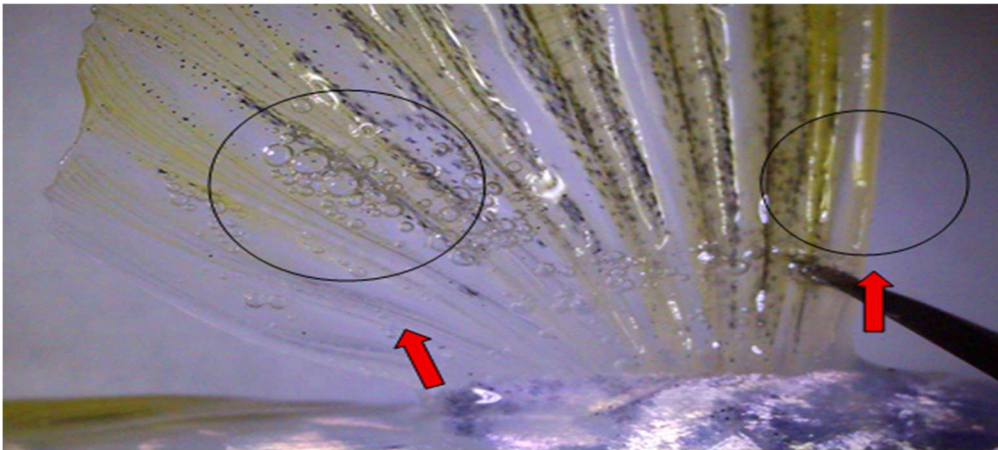
Fonte: Autor, 2025.

(Brânquias)



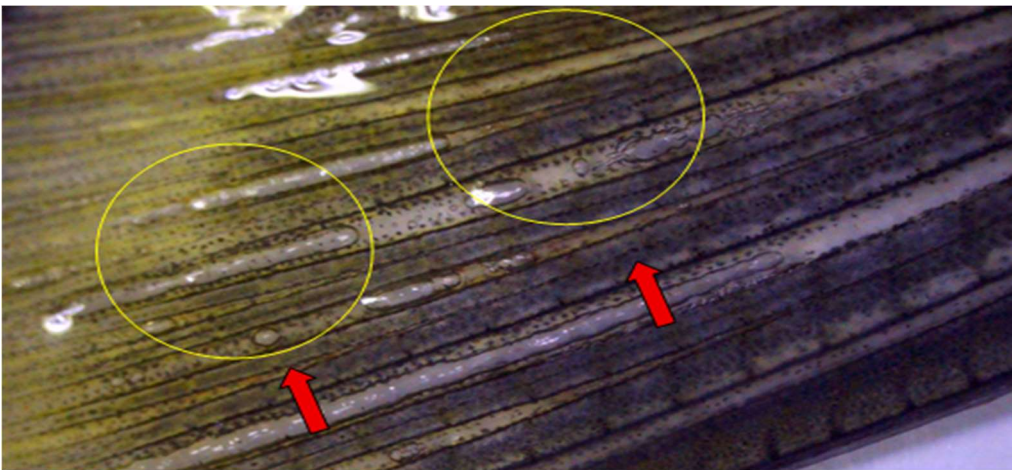
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira dorsal)



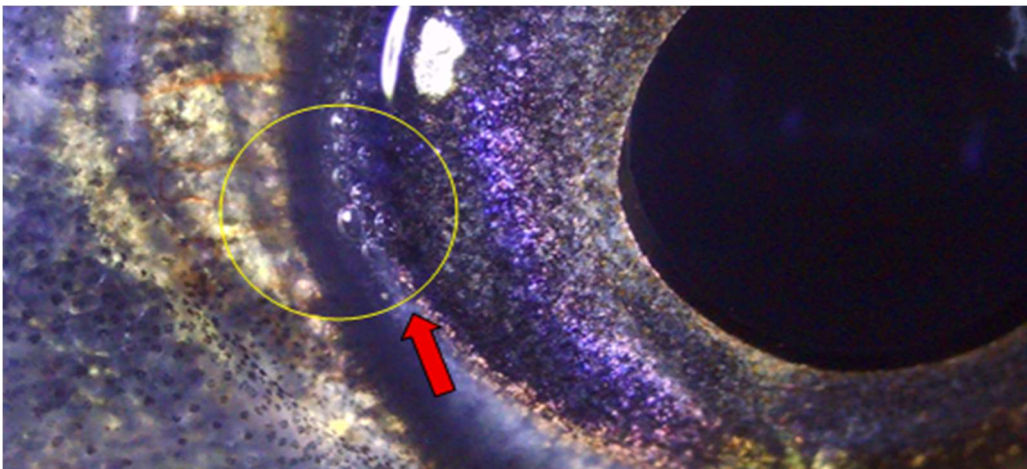
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

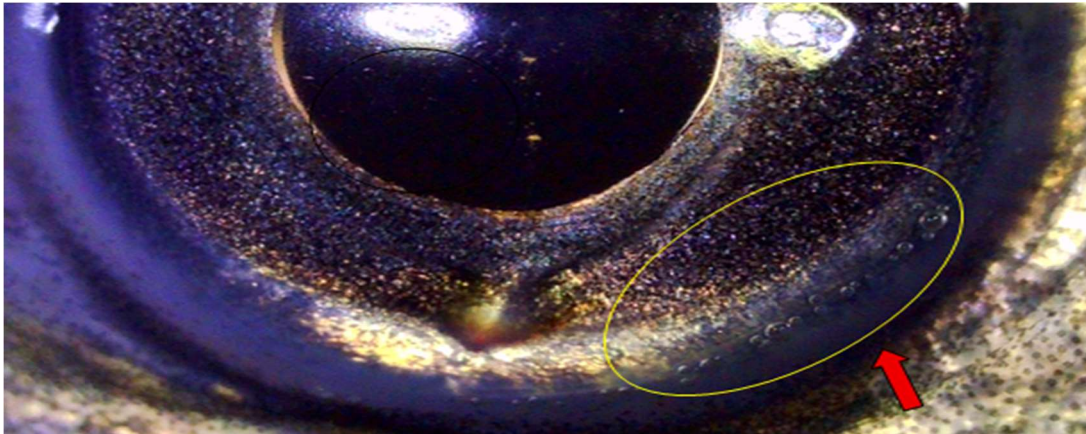
(Olhos)



Fonte: Autor, 2025.

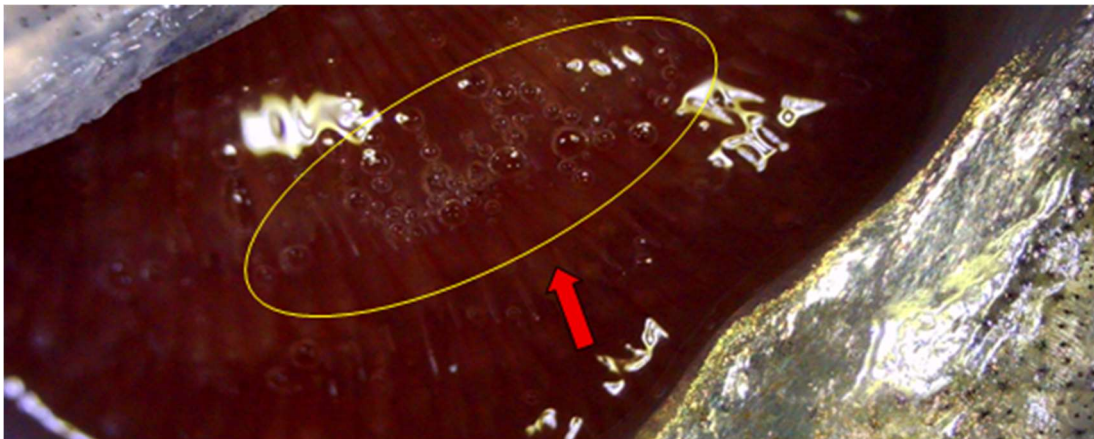
Figura 41 - Compilado de imagens da espécie Piau-Três-Pintas (*Leporinus friderici*) 135%.

(Olhos)



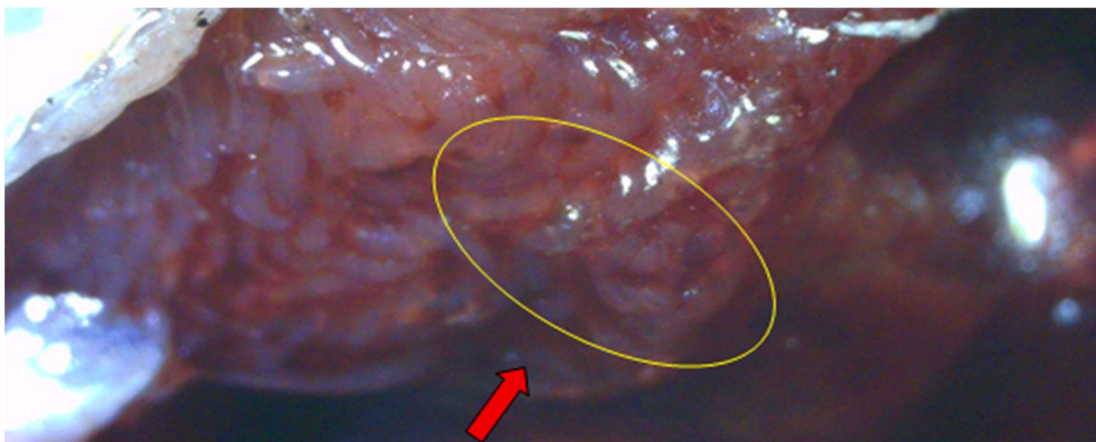
Fonte: Autor, 2025.

(Brânquias)



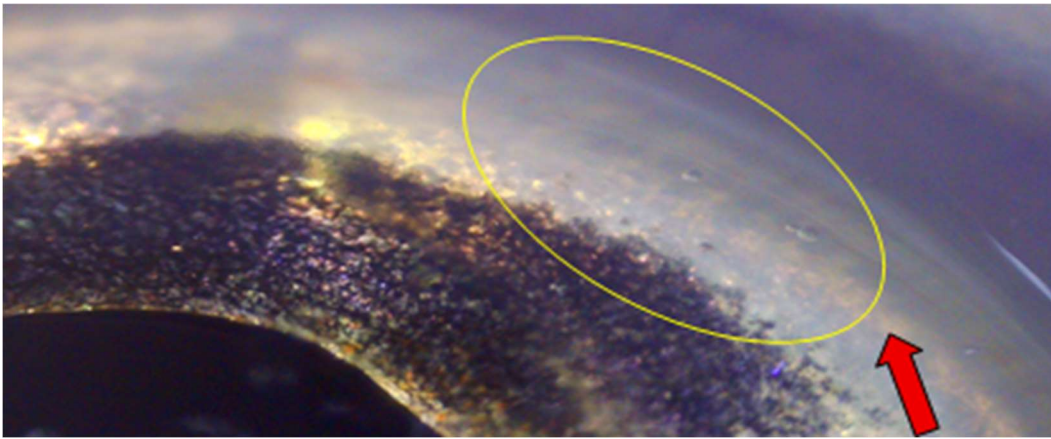
Fonte: Autor, 2025.

(Órgãos internos)



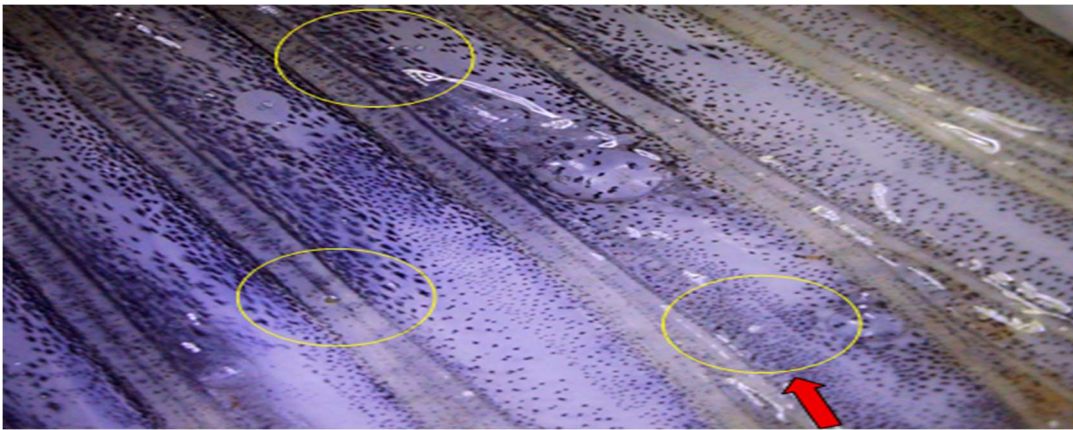
Fonte: Autor, 2025.

(Olhos)



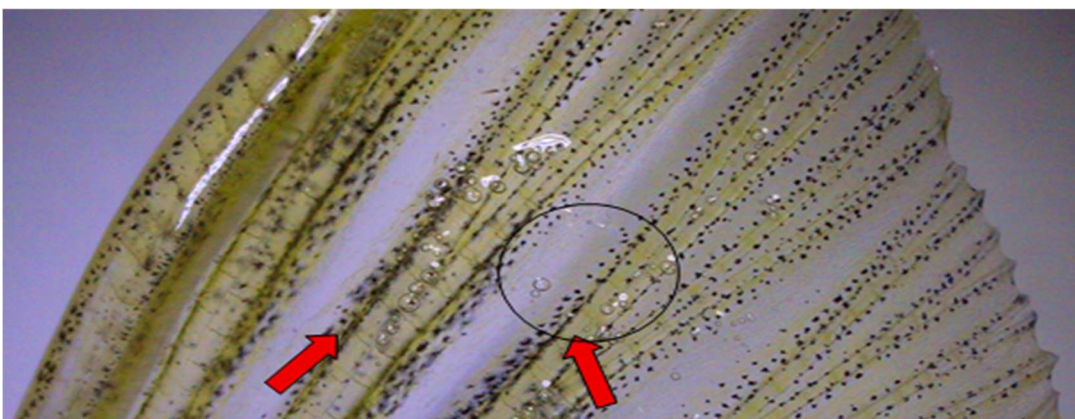
Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(Nadadeira dorsal)



Fonte: Autor, 2025.

## 5.5 CURIMATÃ (*PROCHILODUS LINEATUS*)

O curimatã (*Prochilodus lineatus*), também conhecido como curimba, é um peixe da família Prochilodontida e amplamente distribuído na América do Sul, esta espécie tem grande importância ecológica [100].

Ecologicamente, o curimatã é um detritívoro, alimentando-se de matéria orgânica depositada no fundo dos rios, desempenhando um papel fundamental no ciclo de nutrientes e na manutenção da qualidade da água [100]. Trata-se de uma espécie migradora que realiza longas viagens reprodutivas, dependendo da conectividade dos rios para completar seu ciclo de vida. No entanto, barragens e outros impactos ambientais vêm comprometendo suas rotas migratórias, afetando suas populações naturais [5].

Os exemplares da espécie Curimatã (*Prochilodus lineatus*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nas brânquias (I), nadadeira caudal (II), nadadeira inferior caudal (III), bexiga natatória (IV), nadadeira lateral (V) e nadadeira lateral (VI) e órgãos internos (VI) vide Figura 42. O tempo médio de ensaio no aquário com TDG a 135% foi de 2:45 horas, no aquário com TDG a 125% o tempo médio de ensaio foi de 5:35 horas já no aquário com TDG a 115% o tempo médio de ensaio foi de 8:35 horas, vide Tabela 28, evidenciando assim que os níveis de exposição impactam diretamente no tempo de vida dos exemplares. Foi possível identificar ainda que os exemplares procuram áreas do aquário sob menor influência de TDG e que foram ficando desorientados, perdendo a capacidade natatória antes do óbito dos exemplares.

Tabela 28 - Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG.

% TDG	Curimatã ( <i>Prochilodus lineatus</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	8:35	17	8:11	17,3 graus
		21	9:14	
		19	8:47	
		22	8:32	
		16	8:51	
		18	8:03	
125%	5:35	22	4:41	18,7 graus
		19	5:54	
		21	5:13	
		23	4:59	
		26	06:10	
		25	5:37	
135%	2:45	19	2:42	19,4 graus
		23	2:33	
		21	2:41	
		18	2:26	
		21	2:47	
		23	2:52	

Fonte: Autor, 2025.

Figura 42 - Compilado de imagens da espécie Curimatã (*Prochilodus lineatus*).

(I – Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

(II – Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(III – Nadadeira inferior caudal)



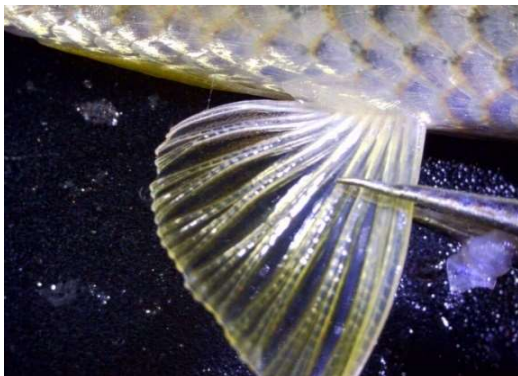
Fonte: Autor, 2025.

(IV – bexiga natatória)



Fonte: Autor, 2025.

(V – Nadadeira lateral)



Fonte: Autor, 2025.

(VI – órgãos internos)



Fonte: Autor, 2025.

## 5.6 PACU (*PIARACTUS MESOPOTAMICUS*)

O pacu (*Piaractus mesopotamicus*) é um peixe, nativo da bacia do rio Paraná-Paraguai, com grande importância para a pesca e a aquicultura na América do Sul. Trata-se de uma espécie de médio a grande porte, com corpo achatado lateralmente, boca forte e dentes adaptados à alimentação onívora, com destaque para a ingestão de frutos e sementes, contribuindo para a dispersão vegetal nos ecossistemas aquáticos [100].

Ecologicamente, o pacu desempenha papel fundamental na manutenção do equilíbrio ambiental, sendo um dos principais peixes frugívoros das planícies alagáveis do Pantanal [102]. A espécie apresenta comportamento migratório, necessitando de rios conectados para completar seu ciclo de vida, o que torna sua população vulnerável à fragmentação de habitats causada por barragens e outros impactos ambientais [102].

Os exemplares da espécie Pacu (*Piaractus mesopotamicus*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nos olhos (I), nadadeira dorsal (II), nadadeira inferior caudal (III), brânquias (IV), bolha no corpo (V) e bexiga natatória (VI) vide a Figura 43. O tempo médio de ensaio no aquário com TDG a 135% foi de 2:37 horas, no aquário com TDG a 125% o tempo médio de ensaio foi de 5:18 horas, enquanto no aquário com TDG a 115% o tempo médio de ensaio foi de 7:56 horas, evidenciando assim que os níveis de exposição impactam diretamente no tempo de vida dos exemplares, Tabela 29. Foi possível identificar ainda que os exemplares procuram áreas do aquário sob menor influência de TDG e que foram ficando desorientados, perdendo a capacidade natatória antes do óbito dos exemplares.

Tabela 29 - Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG.

% TDG	Pacu ( <i>Piaractus mesopotamicus</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	8:20	19	8:23	17,9 graus
		18	9:02	
		21	8:56	
		26	7:59	
		24	7:22	
		22	8:18	
125%	5:43	21	4:51	18,2 graus
		28	6:02	
		27	5:39	
		20	05:49	
		29	05:56	
		25	6:03	
135%	2:36	29	2:51	18,4 graus
		30	2:33	
		27	2:13	
		23	2:23	
		27	2:41	
		24	3:03	

Fonte: Autor, 2025.

Figura 43 - Compilado de imagens da espécie Pacu (*Piaractus mesopotamicus*).

(I – Olhos)



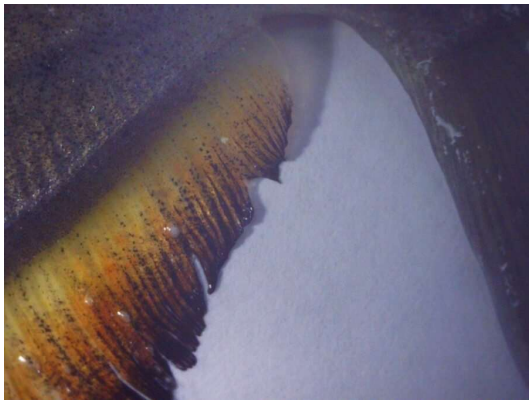
Fonte: Autor, 2025.

(II – Nadadeira dorsal)



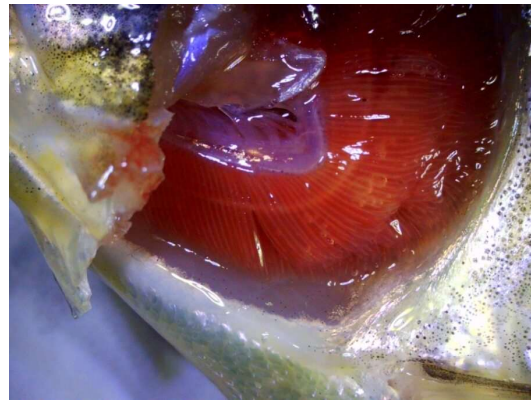
Fonte: Autor, 2025.

(III – nadadeira inferior caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(IV – Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

(V - Bolhas no corpo)



Fonte: Autor, 2025.

(V - Bexiga natatória)



Fonte: Autor, 2025.

## 5.7 PINTADO (*PSEUDOPLATYSTOMA CORRUSCANS*)

O pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), também conhecido como surubim, é um peixe nativo das bacias dos rios Paraná, Paraguai e São Francisco e Teles Pires. Com corpo alongado, padrão de manchas características e hábitos bentônicos, essa espécie predadora ocupa o topo da cadeia alimentar nos ambientes aquáticos, [103].

Ecologicamente, o pintado desempenha um papel essencial no controle populacional de espécies menores, contribuindo para o equilíbrio ecológico dos rios onde habita. Trata-se de um peixe migrador que realiza deslocamentos reprodutivos, dependendo da conectividade dos rios para completar seu ciclo de vida. No entanto, impactos ambientais, como a construção de barragens e a pesca excessiva, ameaçam suas populações naturais [104].

Os exemplares utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas na nadadeira dorsal (I), nadadeira lateral (II), nadadeira caudal (III), brânquias, (IV), órgãos internos (a) (V) e órgãos internos (b) (VI), vide a Figura 44. O tempo médio de ensaio no aquário com TDG a 135% foi de 2:17 horas, enquanto no aquário com TDG a 125% o tempo médio de ensaio foi de 5:35 horas, a 115% de TDG tempo médio de ensaio foi de 7:53 horas, Tabela 30, evidenciando assim que os níveis de exposição impactam diretamente no tempo de vida dos exemplares. Foi possível identificar ainda que os exemplares procuram áreas do aquário sob menor influência de TDG e que foram ficando desorientados, perdendo a capacidade natatória antes do óbito dos exemplares.

As bolhas nas brânquias, observadas nos exemplares de Pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) durante os ensaios, relacionada à supersaturação de gases dissolvidos (TDG) na água. Essas bolhas ou "rastros de bolhas", formam-se quando a concentração de gases dissolvidos na água excede a capacidade de saturação, levando à formação de microbolhas no sistema circulatório e tecidos dos peixes.

A presença de bolhas nas brânquias é particularmente preocupante, pois as brânquias são órgãos vitais responsáveis pela troca gasosa, essencial para a respiração dos peixes. A obstrução causada pelas bolhas pode comprometer severamente a capacidade respiratória, levando à asfixia e, conseqüentemente, à morte dos exemplares. Além

disso, a formação de bolhas em outros tecidos, como nadadeiras e órgãos internos, pode causar danos físicos e fisiológicos adicionais, como embolia gasosa e falência de órgãos.

Os resultados dos ensaios mostram que o tempo de sobrevivência dos exemplares está diretamente relacionado aos níveis de TDG, com tempos médios de ensaio significativamente menores em condições de maior supersaturação (135% de TDG) em comparação com níveis mais baixos (125% de TDG). Isso reforça a sensibilidade do Pintado a alterações na qualidade da água, especialmente em ambientes impactados por atividades humanas, como a construção de barragens, que podem aumentar os níveis de TDG, vide a Figura 44.

A desorientação e a perda da capacidade natatória observadas nos exemplares antes do óbito são indicativas que os peixes estão sob estresse severo e com suas funções vitais comprometidas. Esses achados destacam a importância de monitorar e controlar os níveis de TDG em ambientes aquáticos, especialmente em regiões onde espécies sensíveis, como o Pintado, desempenham papéis ecológicos cruciais. A conservação dessas espécies depende da manutenção de condições ambientais adequadas e da mitigação de impactos antrópicos que possam alterar a qualidade da água.

Tabela 30 - Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG.

% TDG	Pintado ( <i>Pseudoplatystoma corruscans</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	3:37	23	3:00	18,1 graus
		34	3:00	
		27	3:45	
		22	3:30	
		18	4:00	
		22	4:30	
125%	2:42	19	2:30	15,9 graus
		18	2:45	
		15	2:30	
		10	2:45	
		10	2:45	
		8	3:00	
135%	0:50	08	0:30	15,7 graus
		13	0:45	
		06	0:45	
		09	0:45	
		10	2:45	
		24	1:00	

Fonte: Autor, 2025.

Figura 44 - Compilado de imagens da espécie Pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*).

(I – Nadadeira dorsal)



Fonte: Autor, 2025.

(II – Nadadeira lateral)



Fonte: Autor, 2025.

(III – Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(IV – Brânquias)



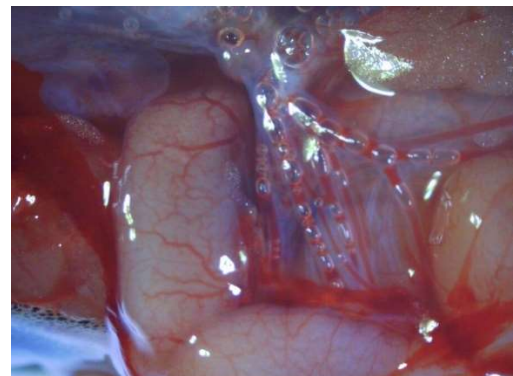
Fonte: Autor, 2025.

(V – Órgãos internos (a))



Fonte: Autor, 2025.

(VI – Órgãos internos (b))



Fonte: Autor, 2025.

## 5.8 TAMBAQUI (*COLOSSOMA MACROPOMUM*)

Os exemplares da espécie Tambaqui (*Colossoma macropomum*) utilizados nos ensaios apresentaram concentração de bolhas nos olhos, nas brânquias, nadadeira caudal, nadadeira dorsal, nadadeira lateral, órgãos internos e nadadeira caudal inferior, vide

Tabela 31 - Resumo dos testes em 115%; 125% e 135% de TDG.

% TDG	Tambaqui ( <i>Colossoma macropomum</i> )			
	tempo médio morte (horas)	peso gramas	tempo morte (horas)	temp. graus
115%	3:10	04	2:45	17,1 graus
		02	3:00	
		02	3:15	
		01	3:15	
		03	3:15	
		05	3:30	
125%	2:40	04	2:00	16,3 graus
		03	2:15	
		03	2:30	
		06	2:30	
		04	3:00	
		03	3:45	
135%	1:35	04	1:30	17,5 graus
		04	1:30	
		06	1:15	
		04	2:00	
		04	1:30	
		05	1:45	

Fonte: Autor, 2025.

Figura 36. O tempo médio de óbito no aquário com TDG está apresentado na Tabela 32.

(I – Nadadeira dorsal)



Fonte: Autor, 2025.

(II – Nadadeira lateral)



Fonte: Autor, 2025.

(III – Nadadeira caudal)



Fonte: Autor, 2025.

(IV – Brânquias)



Fonte: Autor, 2025.

(V – Órgãos internos (a))



Fonte: Autor, 2025.

(VI – Olhos)



Fonte: Autor, 2025.

# Capítulo 6

## 6 ÁREA DE ESTUDO

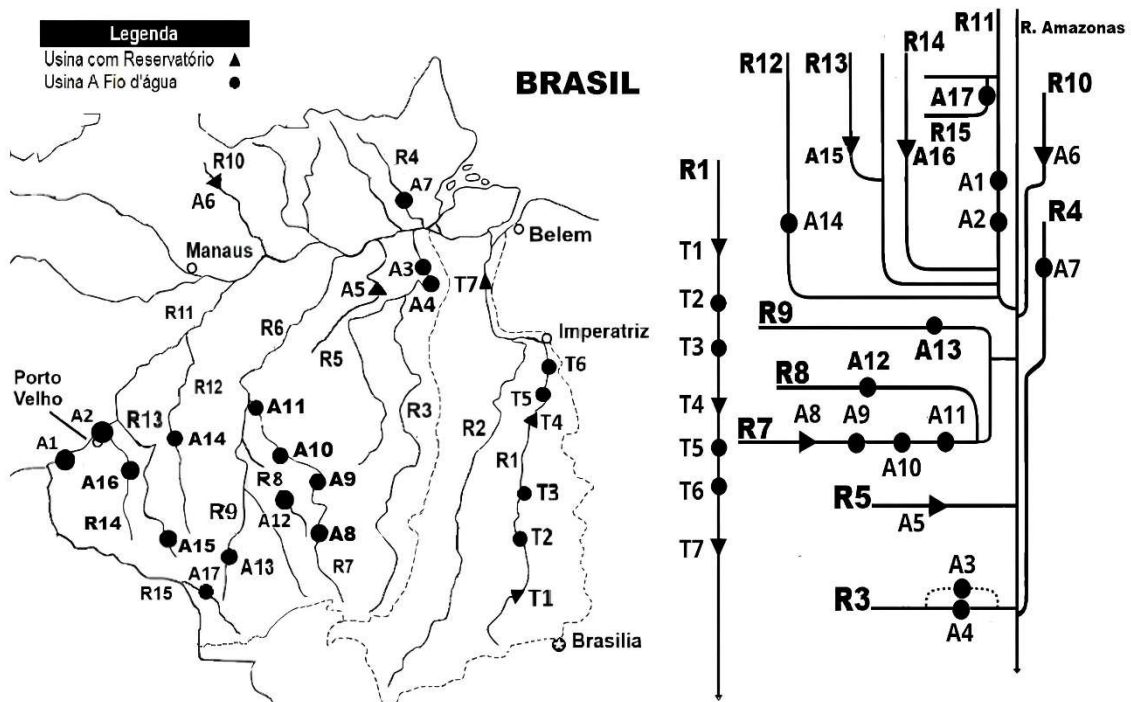
Este estudo abrange as bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia. A Figura 45, mostra ambas e, adicionalmente, a distribuição das UHEs despacháveis, classificadas por tipo de reservatório (a fio d'água ou de acumulação). No Brasil, a Região Hidrográfica Amazônica ocupa ~3,87 milhões de km<sup>2</sup> (≈45% do território nacional) e a do Tocantins–Araguaia, ~920 mil km<sup>2</sup> (≈10%); juntas, somam ~56% da área do país, [105] e [106]. Do ponto de vista hidroenergético, a agregação por sub-bacias no SIGA/ANEEL (Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL) indica potências instaladas da ordem de 23 a 24 GW na Amazônica e 12 a 13 GW no Tocantins–Araguaia, contribuindo, em conjunto, com cerca de um terço da capacidade hidrelétrica instalada do Brasil que é de 110 GW em 2025, [58] e [57].

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA E DAS UHES

A participação na geração efetiva de energia (MWh) varia conforme a hidrologia e o modo de operação. Séries históricas do ONS evidenciam oscilações interanuais típicas de 25–35% quando as duas bacias são analisadas em conjunto, [53]. Na Amazônia, destacam-se aproveitamentos a fio d'água, como o Complexo Belo Monte dividida entre Casa de Força Principal e Sítio Pimental, no rio Xingu, [107] e [108] e as UHEs Jirau e Santo Antônio, no rio Madeira, [58], [57] e [53], que coexistem com usinas de acumulação, como Balbina e Curuá-Una, [109]. No Tocantins–Araguaia, sobressaem Tucuruí e Serra da Mesa, além da cascata Lajeado, Estreito, Peixe Angical, Cana Brava e São Salvador, [39], [67], [107], [108], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116] e [117]. No rio Teles Pires há as UHEs Sinop, Colíder, Teles Pires e São Manoel, [108], [118], [119], [120], [121], [122], [123] e [124]. A Tabela 32, consolida dados de potência instalada, tipologia de vertedouros e dispositivos de dissipação, capacidades de descarga e parâmetros geométricos das principais UHEs dessas bacias.

Algumas UHEs dispõem de séries concomitantes de descarga pelos vertedouros e de níveis de TDG um exemplo é a UHE Sinop, no rio Teles Pires, onde variações diárias no despacho, decorrentes de restrições de transmissão e de testes de comissionamento levaram à abertura de vertedouros, vide. O monitoramento a jusante da UHE Sinop durante esses eventos evidencia aumento progressivo de TDG durante a abertura e, posteriormente, redução significativa quando a usina retorna à geração, com o fechamento dos vertedouros, vide Figura 46 e Figura 47. A sequência de aberturas coincidiu com elevada mortalidade a jusante, sugerindo forte correlação entre os eventos. Cada UHE possui uma “vazão sanitária” (ou vazão ecológica) definida pela legislação do estado onde se localiza os respectivos valores podem ser consultados na Tabela 1 e em [67].

Figura 45 - Bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia e distribuição das UHEs despacháveis por tipo de reservatório (fio d’água e acumulação).



UHE	Rio	UHE	Rio	UHE	Rio
T1	Serra da Mesa	A2	Santo Antônio	R11	Madeira
T2	Cana Brava	A3	Belo Monte – Casa de Força Principal	R3	Xingu
T3	São Salvador	A4	Sítio Pimental (Belo Monte)	R3	Xingu
T4	Peixe Angical	A5	Curuá-Una	R5	Curuá-Una
T5	Lajeado	A6	Balbina	R10	Uatumã
T6	Estreito	A7	Santo Antônio do Jari	R4	Jari
T7	Tucuruí	A8	Sinop	R7	Teles Pires
A1	Jirau	A9	Colíder	R7	Teles Pires
				A10	Teles Pires
				A11	São Manoel
				A12	Salto Apicacás
				A13	Juruena
				A14	Dardanelos
				A15	Rondon II
				A16	Samuel
				A17	Guaporé
				R7	Teles Pires
				R7	Teles Pires

Fonte: Autor,2025.

Tabela 32 - UHEs/vertedouros na bacia Amazônica e Tocantins–Araguaia

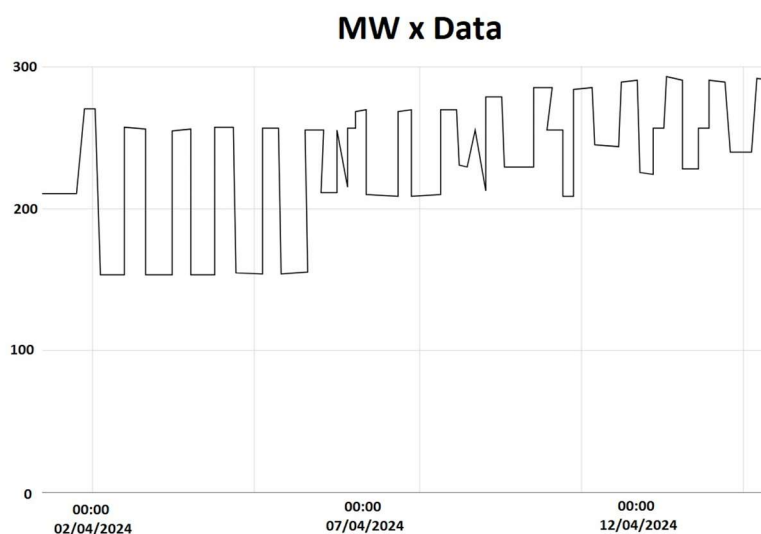
	UHE	(MW)	Vertedouro /Dissipação	Tipo	Vão / Comporta	Q proj. (m³/s)	Larg. Ef. (m)	Q <sub>esp</sub> m³/(m/s)
<b>T1</b>	Serra da Mesa [115]	1.275,0	CT / BD	AC	5	15.000	75	200
<b>T2</b>	Cana Brava [116] e [117]	450,0	CT / BD	FD	6	17.800	90	198
<b>T3</b>	São Salvador [125]	243,2	CT / BD	FD	6	19.300	92	209
<b>T4</b>	Peixe Angical [126] e [127]	498,8	CT / BD	AC	9	37.044	153	242
<b>T5</b>	Lajeado [119] e [128]	902,5	CT / BD	FD	14	49.870	238	210
<b>T6</b>	Estreito [120]	1.087,0	CT / BD	FD	14	62.719	267	235
<b>T7</b>	Tucuruí [107], [108] e [121]	8.370,0	CT / SE	AC	23	110.000	460	239
<b>A1</b>	Jirau [57]	3.750,0	CT / BD	FD	18	81.899	450	182
<b>A2</b>	Santo Antônio (Madeira) [122]	3.568,3	CT / BD	FD	18	84.000	370	227
<b>A3</b>	Belo Monte * [105] e [125]	11.233,1	CT / BD	FD	-	-	-	-
<b>A4</b>	Belo Monte ** [105] e [125]	233,1	CT / BD	FD	18	62.000	433	143
<b>A5</b>	Curuá-Una [108]	30,3	CT / BD	AC	3	2.000	36	56
<b>A6</b>	Balbina [108]	250	CT / BD	AC	4	6.450	70	92
<b>A7</b>	Santo Antônio do Jari [124] e [129]	373,4	LV/ BD	FD	-	9.593	55	174
<b>A8</b>	Sinop [130]	401,9	CT / BD	FD	3	6.702	36	186
<b>A9</b>	Colíder [39], [110] e [111]	300,0	CT / BD	FD	4	6.935	58	120
<b>A10</b>	Teles Pires [114]	1.820,0	CT / SE	FD	4	13.704	80	171
<b>A11</b>	São Manoel [112] e [113]	700,0	CT / BD	FD	3	13.382	63	212
<b>A12</b>	Salto Apiacás [131], [132] e [133]	45	LV / BD	FD	-	360	38	9
<b>A13</b>	Juruena [134], [135], [136], e [137]	50	CT / BD	FD	3	375	13,5	28
<b>A14</b>	Dardanelos [138], [139]	261,0	LV / BD	FD	-	2.880	900	3
<b>A15</b>	Rondon II [140]	73,5	CT / BD	FD	6	1.200	45	27
<b>A16</b>	Samuel [141]	216,0	CT / BD	AC	5	5.200	95	55
<b>A17</b>	Guaporé [142]	120,0	CT / BD	FD	3	4.200	47	90

BD - Bacia de dissipação; SE - Salto de esqui; CT - Vertedor controlado; LV - Superfície livre; AC - Acumulação / Regularização; FD - Fio d'água / \* Casa de Força Principal / \*\* Sítio Pimental.

Fonte: Autor,2025.

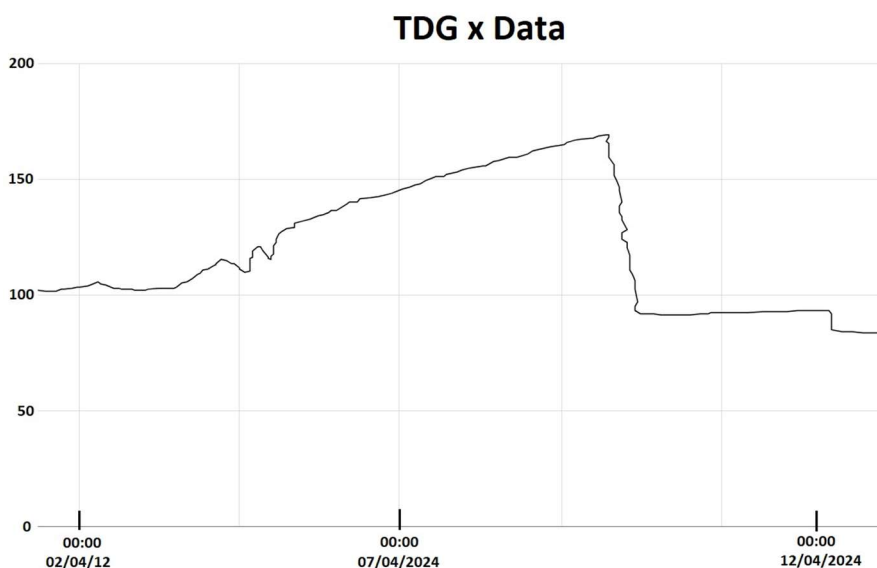
Inicialmente, havia indícios de que a supersaturação de gases (TDG) poderia explicar a mortalidade de peixes observada durante o evento. Contudo, a análise dos indivíduos coletados foi inconclusiva, provavelmente devido ao intervalo superior a seis horas entre o evento e a coleta. Do ponto de vista biológico, esse atraso é particularmente crítico, pois, após a morte, as bolhas gasosas tendem a se dissipar rapidamente, o que dificulta — e pode comprometer — a detecção posterior dos sinais de DBG nos peixes.

Figura 46 - Geração despachada pela UHE Sinop ao longo de duas semanas, evidenciando variações abruptas de potência. Segundo relatório técnico interno da SINOP.



Fonte: Adaptado de [54].

Figura 47- Geração despachada pela UHE Sinop ao longo de duas semanas, evidenciando variações abruptas de potência. Segundo relatório técnico interno da SINOP.



Fonte: Adaptado de [143].

## 6.2 DISCUSSÃO

A estratégia de despacho de carga nas UHEs, frente à entrada de geração intermitente, reside na interrupção da geração das UHEs e na manutenção da vazão sanitária mediante a abertura de vertedouros. Os vertedouros podem ser abertos individualmente ou simultaneamente, em função da regra operativa da UHE. Isso pode levar a níveis diferenciados de saturação gasosa. Os valores de TDG das UHEs das bacias Amazônica e Tocantins–Araguaia, durante eventos de manutenção de vazão sanitária, estão apresentados na Tabela 33. Pela análise da tabela, pode-se perceber que a estratégia de abertura de um único vertedouro, durante o processo de manutenção de vazão sanitária, tende a gerar valores de TDG mais elevados. Ao observarmos os resultados de manutenção de vazão sanitária com um único vertedouro aberto nas UHEs Estreito, Tucuruí, Jirau e Santo Antônio (Madeira), notamos que os valores de TDG ficam entre 117 e 131%, que, de acordo com, [9] e devem ser evitados. Em contrapartida, ao observarmos, nessas UHEs, a condição de TDG sob a hipótese de abertura de todos os vertedouros, nota-se que esses valores ficam no limite preconizado pela EPA. Apesar de o cálculo obtido para a condição de todos os vertedouros abertos estar abaixo do limite estabelecido, pode-se notar que estes se encontram próximos do limite, o que acende um sinal de alerta, uma vez que a equação ajustada não fornece um valor absoluto, mas sim um indicativo que pode ter uma variação que exceda o limite. Os valores alcançados estão muito próximos daqueles que a literatura indica como limiar de início de mortalidade de peixes, [4], [5], [6] e [7].

Tabela 33 - Aumento estimado de TDG nos vertedouros de UHEs da bacia Amazônica e Tocantins–Araguaia.

	UHE	Vãos	Larg. (m)	q m <sup>3</sup> /(m·s)	Q sanitária (m <sup>3</sup> /s)	TDG final (%) — Todos os vertedouros abertos (a)		TDG final (%) — Um único vertedor aberto (b)	
						Q <sub>esp</sub> (a) m <sup>3</sup> /(m/s)	TDG inicial 100%	Q <sub>esp</sub> (b) m <sup>3</sup> /(m/s)	TDG inicial 100%
<b>T1</b>	Serra da Mesa	5	75	200	300	4.0	114	20	116
<b>T2</b>	Cana Brava	6	90	198	90	1.0	114	6	115
<b>T3</b>	São Salvador	6	92	209	90	1.0	114	6	115
<b>T4</b>	Peixe Angical	9	153	242	182	1.2	114	11	115
<b>T5</b>	Lajeado	14	238	210	255	1.1	114	15	115
<b>T6</b>	Estreito	14	267	235	744	2.8	114	39	117
<b>T7</b>	Tucuruí	23	460	239	2,000	4.3	114	100	123
<b>A1</b>	Jirau	18	450	182	3,240	7.2	115	130	127
<b>A2</b>	Santo Antônio*	18	370	227	3,293	8.9	115	160	131
<b>A3</b>	Belo Monte **	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>A4</b>	Belo Monte ***	18	433	143	700	1.6	114	29	116
<b>A5</b>	Curuá-Una	3	36	56	17.4	0.5	114	1	114
<b>A6</b>	Balbina	4	70	92	90	1.3	114	5	114
<b>A7</b>	Santo Antônio do Jari	-	55	174	45	0.8	114		114
<b>A8</b>	Colíder	4	58	120	192	3.3	114	13	115
<b>A9</b>	Sinop	3	36	186	272	7.6	115	23	116
<b>A10</b>	Teles Pires	4	80	171	566	7.1	115	28	116
<b>A11</b>	São Manoel	3	63	212	566	9.0	115	27	116
<b>A12</b>	Salto Apiacás ****	-	38	0,2	9	0,2	114	0,2	114
<b>A13</b>	Juruena	3	375	14	9	0,7	114	2	114
<b>A14</b>	Dardanelos	-	900	3	21	0.1	114	0.1	114
<b>A15</b>	Rondon II	6	45	27	9	0.2	114	1	114
<b>A16</b>	Samuel	5	95	55	300	3.2	114	16	115
<b>A17</b>	Guaporé	3	47	90	3	0.1	114	0	114

Fonte: Autor,2025.

O trabalho de [39], desenvolvido na UHE Colíder, avaliou o TDG antes e depois da instalação de defletores e apresenta dados de saturação que apontam reduções relevantes a jusante do vertedouro. Entretanto, a ausência de séries de TDG a montante limita a quantificação do ganho líquido do arranjo, sobretudo sob diferentes regimes operativos.

### **6.3 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO**

A mitigação da supersaturação de gás total dissolvido (TDG) a jusante de instalações hidrelétricas exige integração de estratégias operacionais e estruturais. Operacionalmente, a coordenação das UHEs em cascata é crucial para prevenir vertimentos sobrepostos e o consequente acúmulo de TDG. Evitar aberturas abruptas e não coordenadas de comportas reduz o arraste súbito de ar. A sincronização de reservatórios, sobretudo em períodos de alta vazão, pode ajudar a manter TDG dentro de limiares ecológicos. As condições hidrodinâmicas durante vertimentos são determinantes: turbulência intensa, especialmente em jatos mergulhantes, promove incorporação de ar em maiores profundidades, elevando a dissolução de gases e reduzindo a desgaseificação superficial. Em cristas submersas com bacias de dissipação, descargas com vazões específicas menores tendem a reduzir TDG; por outro lado, descargas concentradas e com vazões específicas maiores podem aumentar TDG [9] e [73]. Além disso, recomenda-se um programa de manutenção preventiva e de condicionamento hidráulico para evitar vertimentos desnecessários. A degradação hidráulica eleva perdas de carga e reduz a energia disponível à geração, o que pressiona a operação e pode aumentar a probabilidade de vertimentos [78]. Ao mitigar essas perdas, reduz-se a necessidade de descargas pela estrutura de extravasão, com efeito indireto de contenção de TDG. No âmbito estrutural, sistemas de aeração/desgaseificação controlada, ajustes geométricos de dissipadores e defletores de vertedouro podem redirecionar o escoamento, limitar o arraste submerso e favorecer a liberação de gases na superfície [65], [19], [24], [30], [31], [40], [52], [64] e [145].

# Capítulo 7

## 7 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DA SUPERSATURAÇÃO GASOSA EM USINAS

As usinas hidrelétricas com vertedouro de soleira afogada constituem elementos centrais da matriz energética brasileira e global. Contudo, a operação desses sistemas acarreta riscos ambientais significativos, entre os quais se destaca a supersaturação gasosa e a consequente mortalidade de peixes. A mitigação desse fenômeno exige o equilíbrio entre a eficiência operacional e a preservação ambiental, conciliando requisitos energéticos, hidráulicos e ecológicos. Diversos métodos vêm sendo propostos, incluindo restrição da flexibilidade operativa, alterações estruturais em vertedouros e operações síncronas. Além das soluções de engenharia, evidências empíricas oriundas da Amazônia reforçam a urgência de estratégias robustas, em especial em cascatas de usinas a fio d'água, onde o tempo de trânsito da água é curto e a pluma de TDG se propaga rapidamente a jusante, sobrepondo-se a processos locais de (des)saturação.

### 7.1 RESTRIÇÃO DA FLEXIBILIDADE OPERATIVA

Um dos métodos de mitigação mais utilizados consiste em restringir oscilações bruscas de vazão, adotando uma programação mais suave de abertura de vertedouros. A operação intermitente, necessária em muitos casos para atender ao Sistema Interligado Nacional (SIN), agrava a supersaturação ao provocar variações repentinas de pressão hidrodinâmica. Assim, a distribuição uniforme das descargas entre múltiplos vãos reduz o risco ecológico, pois evita concentrações locais de alta turbulência e aprisionamento excessivo de ar. Estudos de campo nas usinas amazônicas ilustram esse efeito: operar com um único vão durante descargas sanitárias elevou o TDG para 123% em Tucuruí, 127% em Jirau e 131% em Santo Antônio, superando o limite protetivo de 110–115% e alcançando a faixa de alto risco ( $\geq 125\%$ ). Em contraste, a abertura de todos os vãos manteve os níveis em aproximadamente 114–115%, ainda dentro da zona crítica, mas próximos do limite aceitável.

A adoção de sistemas de monitoramento contínuo de TDG possibilita ajustes em tempo real, permitindo maior controle sobre a qualidade da água. Contudo, tais medidas restringem a flexibilidade operativa, exigindo maior coordenação entre agentes do setor elétrico para evitar *curtailment* com descargas concentradas, que agravam riscos biológicos.

## **7.2 ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS E IMPACTO NAS VAZÕES EXTREMAS**

Outra abordagem de mitigação envolve modificações físicas nos vertedouros. A introdução de defletores, aeradores e dissipadores de energia pode reduzir a turbulência e limitar a dissolução de gases. Nas usinas amazônicas, simulações indicam incrementos de aproximadamente 14 a 31 pontos percentuais na saturação a jusante de vertedouros de crista submersa com ressalto hidráulico, assumindo TDG a montante de 100%. Comparativamente, vertedouros em salto de esqui tendem a gerar menores níveis de supersaturação, embora os efeitos dependam da geometria e do regime de escoamento.

Todavia, alterações estruturais devem ser analisadas com cautela, pois podem comprometer a capacidade de escoamento das vazões deca-milenares, parâmetro essencial para a segurança da barragem. Qualquer modificação deve ser precedida de modelagens hidrológicas e simulações computacionais que avaliem a interação entre mitigação ambiental, estabilidade estrutural e segurança hidrológica. O desafio é equilibrar a redução da supersaturação gasosa com a manutenção da capacidade de lidar com cheias extremas.

## **7.3 OPERAÇÕES SÍNCRONAS E COORDENAÇÃO EM CASCATA**

A sincronização das operações entre múltiplas usinas representa alternativa eficaz para reduzir impactos ambientais e otimizar o despacho energético. Essa abordagem consiste em harmonizar a abertura de vertedouros e a regulação de descargas, minimizando a formação de turbulência e a incorporação de ar na coluna d'água.

Na Amazônia, onde cascatas de aproveitamentos estão dispostas em curtas distâncias, esse método é particularmente relevante: valores iniciais de TDG >100% em uma usina podem ser amplificados a jusante, potencializando efeitos cumulativos. A coordenação

em cascata, ao distribuir a descarga e evitar variações abruptas, reduz a propagação da pluma supersaturada e seus efeitos sobre a ictiofauna.

A implementação das operações síncronas demanda infraestrutura tecnológica avançada, incluindo sistemas de monitoramento em tempo real, algoritmos preditivos e modelos computacionais hidrodinâmicos. Além de reduzir o TDG, essa estratégia contribui para a estabilidade do SIN e para o uso racional dos recursos hídricos.

#### **7.4 EVIDÊNCIAS BIOLÓGICAS E DIRETRIZES DE MONITORAMENTO**

Dados experimentais indicam faixas críticas para organismos aquáticos: 110–115% como alerta de estresse subletal e risco de mortalidade em exposições prolongadas, e  $\geq 125\%$  como patamar de alto risco de mortalidade aguda. Essas respostas variam conforme a espécie, temperatura e tempo de exposição. No rio Teles Pires, por exemplo, já foram registradas 342 espécies (191 gêneros, 42 famílias, 11 ordens), [146] ressaltando a vulnerabilidade da ictiofauna local.

Além do monitoramento de TDG, a necropsia de peixes coletados em campo é ferramenta essencial para investigar causas de morte. Contudo, deve respeitar critérios temporais rigorosos: 12 a 24 horas pós-morte como intervalo recomendado, [147], preferencialmente 6 a 12 horas [148], já que em ambientes neotropicais as altas temperaturas aceleram a decomposição. A adequada avaliação da condição da carcaça é indispensável para evitar interpretações equivocadas dos achados.

#### **7.5 DIRETRIZES AMBIENTAIS E RECOMENDAÇÕES**

Os autores [9] recomendam 110% como limite operacional prudente e acima de 125% como potencialmente letal. Dados do relatório [143], da UHE Sinop demonstram TDG de aproximadamente 180%, e mostram que modelos simplificados subestimam as condições locais, justificando campanhas adicionais de medição e construção de curvas  $\Delta\text{TDG}\%$  específicas por usina.

As diretrizes resultantes incluem:

- Distribuir descargas entre múltiplos vãos, reduzindo vazão unitária;
- Evitar aberturas abruptas e concentrações de fluxo;
- Aperfeiçoar a coordenação em cascata;

- Adotar medidas estruturais como defletores e aeradores;
- Retirar o empreendimento de *curtailment* quando os valores não puderem ser mantidos abaixo dos limites críticos.

A mitigação da supersaturação gasosa em UHEs com vertedouro de soleira afogada requer abordagem integrada, combinando restrições operativas, modificações estruturais e operações síncronas. Evidências empíricas da Amazônia confirmam que descargas concentradas e *curtailment* agravam riscos ambientais, podendo ultrapassar níveis críticos de TDG. Ao articular soluções de engenharia com diretrizes ambientais e protocolos biológicos, é possível avançar para uma operação hidrelétrica que concilie segurança energética, proteção da ictiofauna e sustentabilidade a longo prazo.

# Capítulo 8

## 8 CONCLUSÕES

A análise integrada dos resultados apresentados nesta pesquisa, bem como da literatura nacional e internacional sobre supersaturação de gases em sistemas hidrelétricos, permite delinear um quadro abrangente das implicações da operação intermitente de usinas hidrelétricas na ictiofauna, em especial no contexto amazônico e do Tocantins–Araguaia.

A presente conclusão busca articular evidências empíricas, referenciais normativos e diretrizes técnicas, oferecendo um panorama crítico que possa orientar tanto a operação das UHEs quanto políticas públicas de regulação e proteção ambiental. O fenômeno da supersaturação de gases totais dissolvidos (TDG) tem sido reiteradamente associado à mortalidade de peixes, por meio da doença da bolha de gás (DBG). Como demonstrado nos experimentos laboratoriais e nas campanhas de campo, valores acima de 110% já configuram risco subletal significativo, enquanto concentrações superiores a 125% situam-se na zona de letalidade aguda. A ictiofauna neotropical, marcada por ampla diversidade taxonômica, apresenta respostas diferenciadas conforme espécie, tamanho, idade e condição fisiológica, mas o padrão geral é de elevada vulnerabilidade quando exposta a TDG em níveis intensos e recorrentes. Isso é particularmente grave em bacias de elevada biodiversidade, como a amazônica, onde o rio Teles Pires, por exemplo, abriga centenas de espécies em coexistência ecológica. A operação intermitente, induzida pelo *curtailment* para priorização de fontes intermitentes como eólica e solar, cria condições em que a vazão sanitária ou ambiental é frequentemente mantida por descargas concentradas em vertedouros. Esse mecanismo, embora necessário à confiabilidade elétrica, produz oscilações abruptas na pressão hidrodinâmica, potencializando o arraste de ar e a dissolução de gases. Registros de campo na UHE Sinop documentaram valores próximos de 180% de TDG, evidência contundente de que modelos generalistas de predição subestimam a realidade operacional. Este resultado reforça a importância de curvas  $\Delta\text{TDG}\%$  específicas por usina, ajustadas à geometria dos vertedouros, ao regime do jato e às características

hidrodinâmicas locais. Do ponto de vista operacional, a literatura revisada e os experimentos conduzidos convergem em algumas recomendações centrais. Primeiramente, evitar a abertura de um único vão de vertedouro em descargas de pequena monta, priorizando a distribuição entre múltiplos vãos. Essa medida, aparentemente simples, tem efeito significativo em reduzir o TDG gerado, mantendo-o próximo aos limites protetivos de 110%. Em segundo lugar, a adoção de operações síncronas em cascatas hidrelétricas é uma estratégia promissora. A coordenação entre diferentes usinas, ajustando o despacho hídrico e distribuindo uniformemente as descargas, pode reduzir os efeitos cumulativos da supersaturação e otimizar a qualidade da água a jusante. Outro eixo de mitigação recai sobre soluções estruturais. Defletores submersos, aeradores e bacias de dissipação redesenhadas podem reduzir a incorporação de ar na coluna d'água. Contudo, essas soluções exigem cuidado, pois podem comprometer a capacidade de escoamento em eventos de vazões deca milenares, impactando a segurança hidrológica. Assim, modificações em vertedouros devem sempre ser precedidas de modelagem hidrológica robusta, capaz de avaliar tanto a mitigação ambiental quanto a resiliência da estrutura diante de cheias extremas. O componente biológico também merece atenção. A análise de necropsias em campo revelou-se essencial para vincular mortalidade de peixes a episódios de supersaturação. Entretanto, a prática enfrenta limitações metodológicas: muitas vezes o tempo de óbito é desconhecido, e a rápida decomposição em ambientes tropicais compromete a acurácia das análises. Por isso, recomenda-se que necropsias sejam realizadas em intervalos de 6 a 12 horas após a morte, no máximo, garantindo que os achados reflitam as condições reais de exposição. A integração de equipes de campo, laboratórios de patologia e sistemas de monitoramento de TDG em tempo real pode criar uma rede mais eficiente de diagnóstico e resposta rápida. Do ponto de vista normativo, as diretrizes internacionais fornecem referências úteis, mas nem sempre suficientes para o contexto brasileiro. O critério de 110% do documento EPA 440/5-86-001 (Quality Criteria for Water), [9], constitui um parâmetro protetivo adequado, mas a ocorrência de valores muito superiores em usinas amazônicas exige medidas adicionais. Uma possibilidade seria a adoção de protocolos específicos de desligamento ou redespacho quando os níveis de TDG ultrapassarem limites críticos, salvaguardando a ictiofauna. Tal medida, ainda que reduza momentaneamente a geração, representa uma salvaguarda

ambiental que deve ser incorporada às práticas de operação. A pesquisa também contribui ao demonstrar a eficácia de aparatos laboratoriais desenvolvidos para reproduzir condições de supersaturação em ambiente controlado. Esses sistemas permitiram quantificar os limiares de tolerância de espécies neotropicais, estabelecendo parâmetros técnicos para orientar a operação das usinas. A utilização desses dados, aliada às observações de campo, cria uma base científica sólida para o estabelecimento de curvas de risco e protocolos de mitigação. Os resultados apresentados aprofundam e fortalecem as conclusões gerais previamente estabelecidas, trazendo evidências experimentais consistentes sobre a vulnerabilidade da ictiofauna neotropical, incluindo espécies relevantes amazônicas, e para a gestão ambiental diante da supersaturação gasosa. Ao submeter espécies de diferentes portes, hábitos ecológicos e importância econômica a níveis controlados de TDG (115%, 125% e 135%), o estudo não apenas confirmou limites já reportados na literatura, o conjunto de observações demonstrou de forma inequívoca que a faixa de 115% deve ser interpretada como zona de alerta subletal, capaz de provocar estresse fisiológico e alterações comportamentais, enquanto 125% constitui um limiar crítico de mortalidade aguda, independentemente da espécie analisada. Em 135%, a resposta foi de colapso generalizado em todas as espécies, indicando que descargas capazes de gerar tais níveis representam risco extremo à ictiofauna. Entre as espécies testadas, algumas se destacaram pela maior sensibilidade. O lambari amarelo (*Astyanax lacustris*) e o jundiá (*Rhamdia quelen*) apresentaram mortalidade mais rápida e dificuldade de fuga comportamental, sugerindo que populações dessas espécies em rios sujeitos a vertimentos críticos podem ser impactadas em eventos de curta duração. Já o pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) exibiu sintomas clássicos da doença da bolha de gás (DBG), incluindo nado errático, embolias visíveis e hemorragia. O curimatã (*Prochilodus lineatus*), espécie detritívora e migradora de alta importância ecológica e pesqueira, demonstrou sensibilidade semelhante: em 115% apresentou sinais subletais, mas em 125% já havia mortalidade significativa e em 135% a letalidade foi praticamente total em poucas horas. Esse padrão reforça a vulnerabilidade de migradores de longa distância, que dependem de rotas livres para reprodução e encontram justamente nas áreas de jusante condições críticas de turbulência e supersaturação. O piau-três-pintas (*Leporinus friderici*), espécie onívora de médio porte, mostrou resistência relativa em

115%, mas sucumbiu em 125% e 135% com sintomas fisiológicos semelhantes aos do lambari e do jundiá, incluindo perda de equilíbrio e dificuldade de manter o nado ativo. Embora robusto em condições ambientais normais, o piau apresentou elevada mortalidade em cenários de supersaturação, revelando vulnerabilidade em situações de descargas abruptas. O pacu (*Piaractus mesopotamicus*), espécie de relevância econômica e cultivada em tanques-rede, apresentou comportamento de resistência inicial em 115%, mas manifestou sintomas evidentes em 125%, como distensão abdominal, dificuldades motoras e embolias gasosas. A 135%, a mortalidade foi alta, acompanhada de hemorragias internas. Esses resultados evidenciam que mesmo espécies de grande porte e importância comercial não estão protegidas diante da supersaturação elevada. A inclusão da tilápia (*Oreochromis niloticus*) no conjunto experimental é particularmente significativa. Embora seja uma espécie exótica ao Brasil, sua ampla utilização em sistemas de cultivo em tanques-rede nos grandes reservatórios torna-a um modelo de referência, tanto do ponto de vista experimental (pela facilidade de obtenção e manejo) quanto econômico. A mortalidade observada nessa espécie sob supersaturação elevada tem implicações diretas para a aquicultura, indicando que episódios de operação intermitentes de vertedores. Outro ponto de destaque diz respeito à interação entre tempo de exposição e temperatura da água. Os testes mostraram que temperaturas mais elevadas aceleram a manifestação de sintomas e antecipam a mortalidade. Esse achado é particularmente crítico para rios amazônicos e neotropicais, onde as temperaturas médias permanecem elevadas durante grande parte do ano, aumentando a severidade dos efeitos da supersaturação. Do ponto de vista metodológico, a pesquisa avança ao fornecer curvas de sobrevivência por espécie em função da saturação, apoiadas em observações de comportamento, sintomas fisiológicos e mortalidade. A utilização de aparatos desenvolvidos especificamente para gerar e controlar o TDG em laboratório representa uma inovação importante, permitindo a simulação de condições reais de vertimento em ambiente experimental controlado. Essa contribuição metodológica fortalece a base científica disponível no Brasil. Os resultados também têm aplicação prática imediata na gestão de usinas hidrelétricas. O estudo demonstra que descargas concentradas em um único vão devem ser evitadas, pois são as mais propensas a gerar níveis superiores a 125%. Em contrapartida, descargas distribuídas entre múltiplos vãos se mostraram capazes de

manter o TDG próximo de 110–115%, reduzindo o risco de mortalidade em massa. A integração dessas evidências às rotinas de operação é essencial, sobretudo em cascatas de usinas amazônicas, onde o curto tempo de trânsito entre reservatórios potencializa a propagação da pluma supersaturada e amplia seus efeitos cumulativos sobre a ictiofauna a jusante. Finalmente, cabe destacar que a mortalidade de peixes causada por supersaturação não é apenas uma questão ambiental, mas também socioeconômica. O impacto sobre espécies de valor pesqueiro, sobre a subsistência de comunidades ribeirinhas e sobre a produção aquícola organizada, como no caso da tilápia e do pacu, exige que protocolos de mitigação e monitoramento sejam incorporados ao licenciamento e à operação cotidiana de UHEs. Em síntese foi demonstrado de forma robusta que a supersaturação gasosa é um fenômeno letal para múltiplas espécies da ictiofauna neotropical, incluindo espécies relevantes amazônicas, além de representar risco econômico para a aquicultura. A conjugação de dados laboratoriais e de observações de campo confere robustez científica às recomendações apresentadas: manter TDG abaixo de 110–115% como zona segura, adotar operações distribuídas em múltiplos vãos, e implementar monitoramento contínuo em tempo real, especialmente em cascatas de usinas, de modo a permitir ajustes operacionais imediatos que evitem a ultrapassagem dos limites críticos de supersaturação e reduzam riscos à ictiofauna e à aquicultura regional. Em síntese, a conclusão geral aponta para a necessidade de um modelo de gestão integrada que considere simultaneamente os aspectos hidráulicos, biológicos e energéticos. A geração de energia hidrelétrica deve caminhar em consonância com a preservação da biodiversidade aquática, sob pena de comprometer não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a própria legitimidade social dos empreendimentos hidrelétricos. O equilíbrio entre segurança energética e proteção ambiental é, portanto, não apenas possível, mas imprescindível. Essa perspectiva exige maior coordenação institucional, investimentos em tecnologia de monitoramento, ajustes normativos e a internalização de práticas ambientais no centro da operação hidrelétrica. O avanço científico nesta área abre caminho para políticas públicas mais assertivas e práticas operacionais mais responsáveis. Cabe ao setor elétrico, em diálogo com órgãos ambientais, comunidades locais e a academia, transformar essas evidências em ações concretas, assegurando que a expansão e operação das hidrelétricas brasileiras não se faça em detrimento da rica biodiversidade

dos rios amazônicos e tocantinenses. O desafio é grande, mas os instrumentos técnicos e científicos estão disponíveis. O próximo passo é a vontade política e institucional para implementá-los. Assim, esta pesquisa reforça a tese de que a operação intermitente das usinas, quando conduzida sem protocolos de mitigação, amplifica a supersaturação de gases e a mortalidade da ictiofauna. Contudo, ao mesmo tempo, demonstra que soluções existem e podem ser aplicadas. Cabe, portanto, avançar em sua implementação, garantindo que a energia hidrelétrica siga sendo uma fonte estratégica para o país, mas que o faça de maneira sustentável e responsável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS, “DIAGNÓSTICO E PERSPECTIVA DA EVOLUÇÃO DOS CORTES DE GERAÇÃO NO BRASIL,” Rio de Janeiro, May 2005.
- [2] P. Li, D. Z. Zhu, R. Li, Y. Wang, J. A. Crossman, and W. L. Kuhn, “Production of total dissolved gas supersaturation at hydropower facilities and its transport: A review,” *Water Res*, vol. 223, p. 119012, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.119012.
- [3] P. C. Kusnierz, “Reducing Total Dissolved Gas and Gas Bubble Trauma in a Regulated River,” *Fishes*, vol. 9, no. 11, p. 427, Oct. 2024, doi: 10.3390/fishes9110427.
- [4] D. E. Weitkamp and M. Katz, “A Review of Dissolved Gas Supersaturation Literature,” *Trans Am Fish Soc*, vol. 109, no. 6, pp. 659–702, Nov. 1980, doi: 10.1577/1548-8659(1980)109<659:ARODGS>2.0.CO;2.
- [5] A. A. Agostinho, D. C. Alves, L. C. Gomes, R. M. Dias, M. Petrere Jr, and F. M. Pelicice, “Fish die-off in river and reservoir: A review on anoxia and gas supersaturation,” *Neotropical Ichthyology*, vol. 19, no. 3, 2021, doi: 10.1590/1982-0224-2021-0037.
- [6] Z. Fan *et al.*, “Effect of total dissolved gas supersaturation on the tolerance of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*),” *Environ Sci Eur*, vol. 32, no. 1, pp. 55–65, Dec. 2020, doi: 10.1186/s12302-020-00330-9.
- [7] Q. Ji *et al.*, “The Tolerance Characteristics of Resident Fish in the Upper Yangtze River under Varying Gas Supersaturation,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 11, p. 2021, Jun. 2019, doi: 10.3390/ijerph16112021.
- [8] Y. Yuan *et al.*, “Impact of TDG supersaturation on native fish species under different hydropower flood discharge programs,” *Aquatic Toxicology*, vol. 237, p. 105898, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.aquatox.2021.105898.
- [9] Department of Ecology State of Washington, “Proposed Updates to Natural Conditions Provision in Chapter 173-201A WAC,” Olympia, May 2024.
- [11] J. Colt, *Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity, and pressure*. American Fisheries Society, 1984.

- [12] F. D. H and M. J. Schneider, *Gas Bubble Disease*, Tec. Inf. Center., vol. 1. Washington, 1976.
- [13] Chris Maynard, "Evaluation of Total Dissolved Gas Criteria (TDG) Biological Effects Research. A literature review," Washington, Jul. 2008.
- [14] Y. Deng *et al.*, "Effect of Total Dissolved Gas Supersaturation on the Survival of Bighead Carp (*Hypophthalmichthys Nobilis*)," *Animals*, vol. 10, no. 1, p. 166, Jan. 2020, doi: 10.3390/ani10010166.
- [15] X. Huang, K. Li, J. Du, and R. Li, "Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang)," *J Zhejiang Univ Sci B*, vol. 11, no. 10, pp. 806–811, Oct. 2010, doi: 10.1631/jzus.B1000006.
- [16] L. Cao, K. Li, R. Liang, S. Chen, W. Jiang, and R. Li, "The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation," *Aquac Res*, vol. 47, no. 9, pp. 2804–2813, Sep. 2016, doi: 10.1111/are.12730.
- [17] L. Huang, J. Zhang, and Y. Wang, "Effects of total dissolved gas supersaturation and sediment on environmental DNA persistence of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) in water," *Front Environ Sci*, vol. 10, Aug. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.952414.
- [18] D. R. Geist, T. J. Linley, V. Cullinan, and Z. Deng, "The Effects of Total Dissolved Gas on Chum Salmon Fry Survival, Growth, Gas Bubble Disease, and Seawater Tolerance," *N Am J Fish Manag*, vol. 33, no. 1, pp. 200–215, Feb. 2013, doi: 10.1080/02755947.2012.750634.
- [19] R. Kamal, D. Z. Zhu, J. A. Crossman, and A. Leake, "A System Model for Total Dissolved Gas Risk Assessment Due to Multidam Spill Operations," *J Water Resour Plan Manag*, vol. 147, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001487.
- [20] J. Lu *et al.*, "Energy dissipation efficiency as a new variable in the empirical correlation of total dissolved gas," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 7414, Apr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-86144-y.

- [21] Qian Ma, Ran Li, Jingjie Feng, and L.L. Wang, "Relationship between total dissolved gas and dissolved oxygen in water," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 22, pp. 3243–3250, Jan. 2013.
- [22] B. G. D'Aoust, "Technical Note: Total Dissolved Gas Pressure (TDGP) Sensing in the Laboratory," *Dissolut Technol*, vol. 14, no. 2, pp. 38–41, 2007, doi: 10.14227/DT140207P38.
- [23] A. Witt, K. Stewart, and B. Hadjerioua, "Predicting Total Dissolved Gas Travel Time in Hydropower Reservoirs," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 143, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001281.
- [24] J. Lu *et al.*, "Model for Total Dissolved Gas Supersaturation from Plunging Jets in High Dams," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 145, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001550.
- [25] S. K. Stenberg, G. Velle, U. Pulg, and H. Skoglund, "Acute effects of gas supersaturation on Atlantic salmon smolt in two Norwegian rivers," *Hydrobiologia*, vol. 849, no. 2, pp. 527–538, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10750-020-04439-z.
- [26] X. Liu *et al.*, "Lethal Effect of Total Dissolved Gas-Supersaturated Water with Suspended Sediment on River Sturgeon (*Acipenser dabryanus*)," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 13373, Sep. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-49800-y.
- [27] Y. Ou, Z. Li, R. Li, J. Feng, and S. Faisal, "Experimental study on the dissipation performance of supersaturated total dissolved gas in microbubble treatment," *Water Science & Technology*, vol. 88, no. 1, pp. 185–198, Jul. 2023, doi: 10.2166/wst.2023.185.
- [28] N. K. Pleizier, S. J. Cooke, and C. J. Brauner, "A Simple Chamber Design for Calibrating Weiss Satrometers and Recommendations for Measuring and Reporting Total Dissolved Gases," *Water Resour Res*, vol. 57, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.1029/2020WR029083.
- [29] R. Li, B. R. Hodges, J. Feng, and X. Yong, "Comparison of Supersaturated Total Dissolved Gas Dissipation with Dissolved Oxygen Dissipation and Reaeration," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 139, no. 3, pp. 385–390, Mar. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000598.

- [30] R. Kamal, D. Z. Zhu, J. A. Crossman, and A. Leake, "Case Study of Total Dissolved Gas Transfer and Degasification in a Prototype Ski-Jump Spillway," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 146, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001801.
- [31] Y. Wang, M. Politano, and L. Weber, "Spillway jet regime and total dissolved gas prediction with a multiphase flow model," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 57, no. 1, pp. 26–38, Jan. 2019, doi: 10.1080/00221686.2018.1428231.
- [33] Y. Qing, Q. Ma, R. Li, X. Shen, X. Zhang, and L. Han, "Influence of Channel Regulating Structures on the Transportation and Dissipation of Supersaturated Total Dissolved Gas," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–8, Jan. 2021, doi: 10.1155/2021/6634972.
- [34] Q. Yuan, K. Li, Y. Wang, Q. Ji, and R. Liang, "Tolerance and Growth of Adult Schizothorax prenanti Exposed and Re-Exposed to Supersaturated Gas Downstream of a Dam," *Water (Basel)*, vol. 14, no. 16, p. 2501, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14162501.
- [35] Y. Yuan, Z. Wang, J. Feng, R. Li, X. Cheng, and K. Li, "Experiments about the removal of supersaturated total dissolved gas from water environment by activated carbon adsorption," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 51, pp. 77809–77820, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-21181-2.
- [36] X. qing Liu, K. feng Li, W. Jiang, and S. Wu, "Biochemical responses and survival of rock carp (*Procypris rabaudi*) to total dissolved gas supersaturated water," *Ichthyol Res*, vol. 62, no. 2, pp. 171–176, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10228-014-0420-0.
- [37] J. J. Orlins and J. S. Gulliver, "Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway II: Computational model," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 38, no. 2, pp. 151–159, Mar. 2000, doi: 10.1080/00221680009498350.
- [39] A. N. de A. C. F. Marcos Vinicius Andriolo, "Installation of deflector in Colider Dam to minimize the percentual of total dissolved gases," *Brazilian Journal of Water Resources*, vol. 28, no. 25, 2023., vol. 28, 2023.

- [40] M. Politano, A. Castro, and B. Hadjerioua, "Modeling Total Dissolved Gas for Optimal Operation of Multireservoir Systems," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 143, no. 6, Jun. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001287.
- [41] Francisco de Andrade, Ivo Gavião Prado, Raquel Coelho Loures, and Alexandre Lima Godinho, "Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil," *Sociedade Brasileira de Ictiologia*, 2012.
- [42] L. G. M. Silva, L. J. Baumgartner, Z. D. Deng, and H.-P. Fjeldstad, "Hydropower development and fish management: a food–water–energy nexus requiring international and multidisciplinary approach," *Mar Freshw Res*, vol. 69, no. 12, p. i, 2018, doi: 10.1071/MFv69n12\_ED.
- [43] RAQUEL COELHO LOURES *et al.*, "METHODOLOGY FOR RISK ASSESSMENT OF FISH DEATH AT HYDROPOWER PLANTS," *Companhia Energética de Minas Gerais*, 2007.
- [44] N. K. Pleizier, D. Algera, S. J. Cooke, and C. J. Brauner, "A meta-analysis of gas bubble trauma in fish," *Fish and Fisheries*, vol. 21, no. 6, pp. 1175–1194, Oct. 2020, doi: 10.1111/faf.12496.
- [45] C. S. Abernethy and B. G. Amidan, "Laboratory Studies of the Effects of Pressure and Dissolved Gas Supersaturation on Turbine-Passed Fish," Richland, WA (United States), Mar. 2001. doi: 10.2172/782074.
- [46] Li Ran *et al.*, "CN201479739U," 2010
- [47] Li Ran, Li Jia, Li Kefeng, Deng Yun, and Jiang Liangqi, "CN 101303336 B," May 30, 2012
- [48] Qu Lu, Li Ran, Li Jia, Li Kefeng Deng, and Yun Yi, "CN 101806793 B," Jul. 24, 2013
- [49] Li Ran, Qu Lu, Li Jia Li, Kefeng Deng, and Yun Yi, "CN 101793888 B," Oct. 31, 2012
- [50] Li Ran, Qu Lu, Li Jia, Li Kefeng, and Deng Yun, "CN 101793889 B," Jan. 23, 2013
- [51] Li Yunfeng, Ni Chaohui, and Shengqiang Zhang Yan, "CN 206863597U," Sep. 01, 2018

- [52] M. Politano, P. Carrica, and L. Weber, "A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 35, no. 11, pp. 1036–1050, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.06.009.
- [53] "ONS," <https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/details.aspx?i=11538>.
- [54] "ANEEL," <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021>.
- [55] *Relatório Anual ONS*. Rio de Janeiro, 2022.
- [56] L. Bird *et al.*, "Wind and solar energy curtailment: A review of international experience," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 577–586, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.082.
- [57] EPE, "<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>."
- [58] ANEEL, "SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL," <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>.
- [59] G. Liu, J. Zhou, X. Xiao, L. Mo, Y. Yuqi, and L. Chengwei, "Dynamic Economic Dispatch in Thermal-Wind-Small Hydropower Generation System," *MATEC Web of Conferences*, vol. 246, p. 01085, Dec. 2018, doi: 10.1051/matecconf/201824601085.
- [60] L. Kane and G. Ault, "A review and analysis of renewable energy curtailment schemes and Principles of Access: Transitioning towards business as usual," *Energy Policy*, vol. 72, pp. 67–77, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.04.010.
- [61] E. O'Shaughnessy, J. R. Cruce, and K. Xu, "Too much of a good thing? Global trends in the curtailment of solar PV," *Solar Energy*, vol. 208, pp. 1068–1077, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.08.075.
- [62] Q. Cheng *et al.*, "An analytical method to evaluate curtailment of hydro-photovoltaic hybrid energy systems and its implication under climate change," *Energy*, vol. 278, p. 127800, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127800.
- [63] E. Nycander, L. Söder, J. Olauson, and R. Eriksson, "Curtailment analysis for the Nordic power system considering transmission capacity, inertia limits and generation

- flexibility,” *Renew Energy*, vol. 152, pp. 942–960, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.059.
- [64] D. A. Geldert, J. S. Gulliver, and S. C. Wilhelms, “Modeling Dissolved Gas Supersaturation Below Spillway Plunge Pools,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 124, no. 5, pp. 513–521, May 1998, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:5(513).
- [65] A. L. Urban, J. S. Gulliver, and D. W. Johnson, “Modeling Total Dissolved Gas Concentration Downstream of Spillways,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 5, pp. 550–561, May 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(550).
- [66] Y. Yuan, Y. Huang, J. Feng, R. Li, R. An, and J. Huang, “Numerical Model of Supersaturated Total Dissolved Gas Dissipation in a Channel with Vegetation,” *Water (Basel)*, vol. 10, no. 12, p. 1769, Dec. 2018, doi: 10.3390/w10121769.
- [67] W. M. F. da Silva, A. S. Bastos, E. M. de F. Viana, and C. B. Martinez, “The impact of residual flow on energy generation in hydroelectric power plants,” *REM - International Engineering Journal*, vol. 77, no. 1, pp. 39–48, Mar. 2024, doi: 10.1590/0370-44672023770013.
- [68] “Technical Analysis of TDG Processes,” in *Technical Analysis of TDG Processes*, 2025, pp. 1–12.
- [69] L. Xu, L. Jiang, Y. Huang, and Q. Ren, “An efficient approach for mesoscale fracture modeling of fully-graded hydraulic concrete,” *Water Science and Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 337–347, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.wse.2022.09.002.
- [70] P. Li, D. Z. Zhu, J. Crossman, and X. Cheng, “Spillway deflector designs for mitigating supersaturated total dissolved gases,” *J Clean Prod*, vol. 426, p. 139027, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139027.
- [71] A. A. Farooque and K. Khosravi, “Modeling total dissolved gas supersaturation in high dam reservoir using advanced novel bidirectional best-first disjoint aggregating M5-rule based algorithms: An innovative framework for ungauged regions,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 641, p. 131795, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131795.

- [72] X. Chen *et al.*, “An in-situ study in the Xijiang River basin revealed adverse effects of total dissolved gas supersaturation on fish,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 289, p. 117663, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.117663.
- [73] J. Feng, L. Wang, R. Li, K. Li, X. Pu, and Y. Li, “Operational regulation of a hydropower cascade based on the mitigation of the total dissolved gas supersaturation,” *Ecol Indic*, vol. 92, pp. 124–132, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.04.015.
- [74] L. D., Luz, F. B., Amorin, C., Proença, and A. S. Pires, “Vazões mínimas e vazões ecológicas - Qual a necessidade de água em um rio,” *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.*, 2004.
- [75] F. V. A. Souza-Cruz-Buenaga, S. A. Espig, T. L. C. Castro, and M. A. Santos, “Environmental impacts of a reduced flow stretch on hydropower plants,” *Brazilian Journal of Biology*, vol. 79, no. 3, pp. 470–487, Sep. 2019, doi: 10.1590/1519-6984.183883.
- [76] BRASIL, *LEI Nº 9.433, DA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS.* 1997.
- [77] Agência Nacional de Águas, “Outorga e Fiscalização.”
- [78] A. S. Bastos, D. S. Ribeiro, and C. B. Martinez, “GENERATION LOSSES DUE TO THE TEMPORAL FACTOR INFLUENCE IN LOAD LOSS: A STUDY CASE OF SHP REPI,” *Journal of Engineering Research*, vol. 2, no. 6, pp. 2–11, Apr. 2022, doi: 10.22533/at.ed.317262221049.
- [79] P. Novak, AIB. Moffat, C. Nalluri, and R. Narayanan, *Hydraulic Structures*, 4<sup>a</sup> Edição. Londres: CRC Press, 2007. doi: 10.1201/9781315274898.
- [80] H. Chanson, *Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*, CRC Press. 1999.
- [81] C. A. Pugh, *Hydraulic Design of Spillways and Energy Dissipators*. ASCE Press, 1985.
- [82] J. P. Silva, M. A. Souza, and L. C. Ribeiro, “Impactos da operação de vertedouros na mortalidade de peixes: Um estudo de caso na UHE Sinop.,” *Journal of Environmental Engineering and Sustainability*, vol. 28, pp. 67–74, 2021.
- [83] H. Chanson, *Hydraulics of Open Channel Flow*, 2nd ed. Elsevier, 2004.

- [84] J. M. AZEVEDO NETTO and G. A. ALVAREZ, *Manual de Hidráulica*, 7th ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.
- [85] Davila Victor Oscar Rendon, “Modelamiento Hidraulico de Aliviaderos con Dissipadores de Energia del Tipo Salto de Esquí,” Arequipa, 2018.
- [86] M. Oertel and D. B. Bung, “Initial stage of two-dimensional dam-break waves: laboratory versus VOF,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 50, no. 1, pp. 89–97, Feb. 2012, doi: 10.1080/00221686.2011.639981.
- [87] Paulo Henrique Cabral Dettmer, José Junji Ota, José Junji Ota, and Ingrid Illich Muller, “PERFIS DE SOLEIRAS DE VERTEDOUROS DE BAIXA QUEDA AFOGADOS POR JUSANTE,” Lima, Sep. 2016.
- [88] A. Velázquez-Wallraf *et al.*, “Establishment of a fish model to study gas-bubble lesions,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 6592, Apr. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10539-8.
- [89] “<https://www.pngegg.com/pt/png-ddsmd>.”
- [90] “<https://pisciculturadalbosco.com.br/pintado/>.”
- [91] “<https://pisciculturadalbosco.com.br/curimbata/>.”
- [92] “<https://www.oxyguard.dk/en/hand-held-portable/handy-polaris-tgp/#>.”
- [93] W. Sun, Z. Wang, J. Hu, and J. Lian, “Research on Optimal Dispatch of Water-Fire-New Energy Power System,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 558, no. 5, p. 052057, Aug. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/558/5/052057.
- [94] *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020*. FAO, 2020. doi: 10.4060/ca9229en.
- [95] A. M. El-Sayed and K. Fitzsimmons, “From Africa to the world—The journey of Nile tilapia,” *Rev Aquac*, vol. 15, no. S1, pp. 6–21, Feb. 2023, doi: 10.1111/raq.12738.
- [96] G. C. Canonico, A. Arthington, J. K. McCrary, and M. L. Thieme, “The effects of introduced tilapias on native biodiversity,” *Aquat Conserv*, vol. 15, no. 5, pp. 463–483, Sep. 2005, doi: 10.1002/aqc.699.

- [97] A. A. Agostinho, F. M. Pelicice, A. C. Petry, L. C. Gomes, and H. F. Júlio, "Fish diversity in the upper Paraná River basin: habitats, fisheries, management and conservation," *Aquat Ecosyst Health Manag*, vol. 10, no. 2, pp. 174–186, Jun. 2007, doi: 10.1080/14634980701341719.
- [98] T. Contreras-MacBeath *et al.*, "Freshwater Fishes of Central America: Distribution, Assessment, and Major Threats," *Diversity (Basel)*, vol. 14, no. 10, p. 793, Sep. 2022, doi: 10.3390/d14100793.
- [100] M. Barletta *et al.*, "Fish and aquatic habitat conservation in South America: a continental overview with emphasis on neotropical systems," *J Fish Biol*, vol. 76, no. 9, pp. 2118–2176, Jun. 2010, doi: 10.1111/j.1095-8649.2010.02684.x.
- [102] R. M. R. da Costa and L. A. de F. Mateus, "Reproductive biology of pacu *Piaractus mesopotamicus* (Holmberg, 1887) (Teleostei: Characidae) in the Cuiabá River Basin, Mato Grosso, Brazil," *Neotropical Ichthyology*, vol. 7, no. 3, pp. 447–458, Sep. 2009, doi: 10.1590/S1679-62252009000300012.
- [103] U. A. BUITRAGO–SUÁREZ and B. M. BURR, "Taxonomy of the catfish genus *Pseudoplatystoma* Bleeker (Siluriformes: Pimelodidae) with recognition of eight species," *Zootaxa*, vol. 1512, no. 1, Jun. 2007, doi: 10.11646/zootaxa.1512.1.1.
- [104] A. F. G. N. Santos, C. Alcaraz, L. N. Santos, C. Hayashi, and E. García-Berthou, "Experimental assessment of the effects of a Neotropical nocturnal piscivore on juvenile native and invasive fishes," *Neotropical Ichthyology*, vol. 10, no. 1, pp. 167–176, 2012, doi: 10.1590/S1679-62252012000100016.
- [105] A. N. de Águas e Saneamento Básico ANA, "Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens," jun. 2024. [Online]. Available: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/inicio>
- [106] "Gestão do Território 2024," Brasília, Feb. 2024.
- [107] E. L. LaRovere and F. E. Mendes, *Tucuruí Hydropower Complex Brazil*, vol. 1. 2000, pp. 1–244.
- [108] Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, *Main Brazilian Dams, design, construction and performance*, 1st ed., vol. 1. 1982.

- [109] “<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53090355/uhe-sinop-e-multada-em-r-50-milhoes-por-poluicao-e-morte-de-peixes>.” 19.12.2025.
- [110] Fernanda Hiromi Scheffer Yamakawa, Fernando RibasTerabe, José JunjiOta, and Giovani MoserGirardi, “AVALIAÇÃO DA EROSIÃO A JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO EM MODELO REDUZIDO,” *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, pp. 1–7, nov. 22, 2013.
- [111] Marcos Vinicius Andriolo and Eduardo de Oliveira, “PROTEÇÃO CONTRA EROSIÃO REGRESSIVA EM ROCHA BRANDA NA SAÍDA DA BACIA DE DISSIPAÇÃO - O EXEMPLO DA UHE COLIDER,” *XXX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, Foz do Iguaçu, pp. 1–18, May 01, 2015.
- [112] LUCAS AZIZ TREVISAN, “PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA (PAE) Barragem da UHE São Manoel,” 2022.
- [113] FILL, G. C.; OTA, J. J.; FABIANI, A. L. T. Modelagem Hidrodinâmica 3D de escoamentos em Vertedouros. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, DF, 2015. Anais... Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), 2015.
- [114] Danilo Ferreira de Souza, Celio Bermann, Christiany Regina Fonseca, and Evandro Aparecido Soares da Silva, “UHE TELES PIRES: UM ESTUDO DE CASO DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA NA AMAZÔNIA,” Barra das Grças, Dec. 2016.
- [115] Eletrobras Furnas, “Usina de Serra da Mesa,” <https://www.furnas.com.br/subsecao/129/usina-de-serra-da-mesa>.
- [116] ENGIE, “Usina Hidrelétrica Cana Brava,” <https://www.engie.com.br/usinas/usina-hidreletrica-cana-brava/>.
- [117] ENGIE Brasil Energia S.A., “USINA HIDRELÉTRICA CANA BRAVA,” Goiania, jul. 2018.
- [118] “UHE Balbina inicia abertura de vertedouro,” <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53239505/uhe-balbina-inicia-abertura-do-vertedouro>. 22.01.2026.

- [119] Themag Engenharia, “USINA HIDRELÉTRICA LAJEADO - Estudo de Impacto Ambiental EIA,” nov. 1996.
- [120] Consórcio Estreito Energia, “Usina de Estreito - Informações técnicas,” <https://uhe-estreito.com.br/o-empresendimento/informacoes-tecnicas.html>.
- [121] Eletrobras, “UHE Belo Monte,” <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Usinas.aspx>.
- [122] Eletrobras, “PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA UHE SANTO ANTÔNIO,” Mar. 2025.
- [123] M. Filho and J. OTA, “Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda / Tridimensional Computational Modelling of a Low-drop Spillway,” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 21, no. 2, pp. 360–376, Apr. 2016, doi: 10.21168/rbrh.v21n2.p360-376.
- [124] Lourival Teixeira dos Santos Sobrinho, Helcio Luis Todan, Rodrigo Alves Ramos, and Pedro Guilherme de Lara, “Plano de Ação de Segurança - UHE Santo Antonio do Jari,” jan. 2024.
- [125] PAULO HENRIQUE CABRAL DETTMER, “ESTUDO DA CAPACIDADE DE DESCARGA DE VERTEDOUROS DE BAIXA QUEDA COM ELEVADO GRAU DE SUBMERGÊNCIA,” UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba, 2013.
- [126] Glauciney de Castro, “PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA - PAE, Barragem da UHE Peixe Angical,” Peixe, jan. 2017.
- [127] Eletrobras Furnas, “Usina de Peixe Angical,” <https://www.furnas.com.br/subsecao/127/usina-de-peixe-angical>.
- [128] EDP, “UHE Lajeado,” <https://www.investco.com.br/pt-br>.
- [129] COMPANHIA ENERGÉTICA DO JARI - CEJA, “UHE Santo Antônio do Jari Plano de Segurança de Barragem,” 2022.
- [130] Sinop Energia, “[https://www.sinopenergia.com.br/.](https://www.sinopenergia.com.br/)”
- [131] EDISON LOBÃO, “PORTARIANo 112, DE 19 DE MARÇO DE 2014,” Brasília, 112, Mar. 2014.

- [132] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica– CEPEL, “Revisão Ordinária de Garantia Física de Energia das Usinas Hidrelétricas- UHEs,” Brasília, nov. 2016.
- [133] PEDRO ERNESTO, BRUNA GOMIDES GOUVEIA, and JULIANA MARTINS PEREIRA, “Plano de Ação de Emergência UHE SALTO APIACÁS - RN1064-23 ANEEL,” 2023.
- [134] C. Jurídica, “Ministério de Minas e Energia.”
- [135] “[56] DESPACHO Nº 3.854”.
- [136] “[57] Plano de Ação de Emergência”.
- [137] Agência Nacional de Energia Elétrica, “NOTA VTÉCNICA Nº 436/2023-SCE/ANEEL,” Brasília, Aug. 2023.
- [138] NEOENERGIA, “Dardanelos,” <https://www.neoenergia.com/energia-hidrica/dardanelos>.
- [139] “[49] UHE Dardanelos - revisão”.
- [140] Lívio Costa, Christian Almeida, and Patricia Becke, “PCH RONDON PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIAS,” Apr. 2024.
- [141] Ministério de Minas e Energia, *Usina Hidrelétrica Samuel, memória Técnica*, 1st ed., vol. 1. Brasília, 1996.
- [142] “Guaporé hydroelectric plant,” [https://www.gem.wiki/Guapor%C3%A9\\_hydroelectric\\_plant](https://www.gem.wiki/Guapor%C3%A9_hydroelectric_plant).
- [143] SINOP ENERGIA S/A, “Código DOC-123, rev. 5. SINOP ENERGIA S.A. Banco de dados de qualidade da água – TDG,” Sinop - MT, 123, 2025.
- [145] R. Kamal, D. Z. Zhu, A. Leake, and J. A. Crossman, “Dissipation of Supersaturated Total Dissolved Gases in the Intermediate Mixing Zone of a Regulated River,” *Journal of Environmental Engineering*, vol. 145, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001477.
- [146] Willian M. Ohara, Flávio C. T. Lima, Gilberto N. Salvador, and Marcelo C. Andrade, *Peixes do Rio Teles Pires: diversidade e guia de identificação*, 1st ed., vol. 1. Aparecida de Goiânia, 2017.

- [147] Y. Bernaldo de Quirós *et al.*, "Differentiation at autopsy between in vivo gas embolism and putrefaction using gas composition analysis," *Int J Legal Med*, vol. 127, no. 2, pp. 437–445, Mar. 2013, doi: 10.1007/s00414-012-0783-6.
- [148] K. R. Pugliares, A. Bogomolni, K. M. Touhey, S. M. Herzig, C. T. Harry, and M. J. Moore, *Marine mammal necropsy: an introductory guide for stranding responders and field biologists*. Woods Hole, MA: Woods Hole Oceanographic Institution, 2007. doi: 10.1575/1912/1823.

# ANEXO



Governo de Mato Grosso  
SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE



## LICENÇA ESPECIAL DE PESCA

**Processo nº:** SEMA-PRO-2024/41489

**LEP nº:** 001/2025/CFRP/SUBIO/SEMA-MT

**Interessado:** Universidade Federal de São João Del-Rei – MG.

**CNPJ:** 21.186.804/0001-05

**Projeto:** Quantificando letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas.

**Município:** Sinop, MT.

**Localidade:** Rio Teles Pires - Área de influência da UHE SINOP SA.

### Responsável pela Equipe de Captura Coleta e Transporte

**Coordenador:** Lorena Bettinelli Nogueira    **CPF:** 071.496.726-20

### Descrição das Atividades Autorizadas

- 1. Local de captura, coleta, transporte e manutenção:** Área de influência direta da UHE Sinop SA.
- 2. Petrechos de captura e coleta:** Rede de espera de emalhar com dimensões variando conforme as necessidades de coleta, tarrafas, outros petrechos de pesca que possam aumentar a eficiência de captura sem comprometer a saúde dos peixes capturados.
- 3. Espécies autorizadas para captura, coleta e transporte:** mandi, mandi-açu, bico-de-pato, cachara, cascudo-panaque, abotoado, piau, jatuarana, matrinchã, cachorra, curimba e tuvira.
- 4.** A soltura dos exemplares vivos deverá ser realizada no mesmo local de captura.
- 5.** Esta licença autoriza o transporte dos exemplares somente na área de influência direta da UHE Sinop SA.

### Observações

- 1.** Esta licença não exclui a obrigatoriedade de outros documentos exigidos nas legislações federal, estadual e municipal.
- 2.** Esta licença NÃO autoriza:
  - O uso de rotenona e a eletropesca.
  - O acesso à área particular sem o consentimento do proprietário.
  - A captura/coleta/transporte em Unidades de Conservação federais, estaduais ou municipais, salvo quando acompanhadas da anuência do órgão ambiental competente.
- 3.** Para a renovação da licença é obrigatória a apresentação do relatório parcial das atividades.
- 4.** As pessoas físicas e jurídicas licenciadas são obrigadas a fornecer à SEMA o resultado das atividades efetuadas, conforme roteiro disponível na página da SEMA.
- 5.** O coordenador poderá delegar funções para terceiros mediante procuração e cópia autenticada desta Licença.



Assinado com senha por EDER RODRIGUES DE TOLEDO - COORDENADOR / CFRP - 26/03/2025 às 11:54:18 e SANNY COSTA SAGGIN - SUPERINTENDENTE / SUBIO - 31/03/2025 às 08:36:40.  
+0 Pessoas - Para verificar todas as assinaturas consulte o link de autenticação.  
Documento Nº: 25688249-5012 - consulta à autenticidade em  
<https://www.sigadoc.mt.gov.br/sigaex/public/app/autenticar?n=25688249-5012>



SEMADIC202514040A

SIGA



## CERTIFICADO

Certificamos que a proposta intitulada "Quantificando letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas.", protocolada sob o CEUA nº 3265040425 (ID 000625), sob a responsabilidade de **Andrey Leonardo Fagundes de Castro** - que envolve a produção, manutenção e/ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto o homem), para fins de pesquisa científica ou ensino - está de acordo com os preceitos da Lei 11.794 de 8 de outubro de 2008, com o Decreto 6.899 de 15 de julho de 2009, bem como com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle da Experimentação Animal (CONCEA), e foi **aprovada** pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal de São João Del-Rei (CEUA/UFSJ) na reunião de 09/05/2025.

We certify that the proposal "Quantifying lethality and behavior of fish exposed to total dissolved gas supersaturation.", utilizing 2880 Fishes (males and females), protocol number CEUA 3265040425 (ID 000625), under the responsibility of **Andrey Leonardo Fagundes de Castro** - which involves the production, maintenance and/or use of animals belonging to the phylum Chordata, subphylum Vertebrata (except human beings), for scientific research purposes or teaching - is in accordance with Law 11.794 of October 8, 2008, Decree 6899 of July 15, 2009, as well as with the rules issued by the National Council for Control of Animal Experimentation (CONCEA), and was **approved** by the Ethic Committee on Animal Use of the São João Del-Rei Federal University (CEUA/UFSJ) in the meeting of 05/09/2025.

Finalidade da Proposta: [Pesquisa \(Acadêmica\)](#)

Vigência da Proposta: de [05/2025](#) a [09/2026](#) Área: [Ecologia](#)

Origem: [Não aplicável biotério](#)

Espécie: [Peixes](#)

sexo: [Machos e Fêmeas](#)

idade: [1 a 48 meses](#)

N: [2880](#)

Linhagem: [Diversa](#)

Peso: [5 a 3000 g](#)

Local do experimento: Um dos caracteres inovadores do projeto é o desenvolvimento de aparato laboratorial e experimental que permita o desenvolvimento de experimentos próximo aos locais onde tem sido registrados eventos de mortandade de peixes em função da supersaturação de gases totais. O laboratório está sendo instalado à jusante da barragem da UHE Sinop, (Sinop - MT), em uma distância de aproximadamente 30 m da margem do rio, nos locais onde eventos de mortandade de peixes tem sido reportados. Tanques de manutenção de peixes foram instalados no lado externo do laboratório, sendo 4 tanques de 1.000 L, operando em sistema de fluxo aberto, com bombeamento de água do rio para um tanque de 5.000L (pulmão) que abastecerá os tanques de manutenção e alimentará os tanques experimentais dentro do laboratório, com os objetivos propostos. Os peixes serão capturados utilizando o Sistema de Transposição de Peixes (STP) da própria usina, que se localiza à cerca de 80 m de onde o laboratório está sendo instalado.

São João Del-Rei, 09 de maio de 2025

Michel Alves da Silva

Coordenador da Comissão de Ética no Uso de Animais  
Universidade Federal de São João Del-Rei

Vanusa Patrícia de Araújo Ferreira

Vice-Coordenador da Comissão de Ética no Uso de Animais  
Universidade Federal de São João Del-Rei

