

## **XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS**

### **O POTENCIAL DE SUPERSATURAÇÃO GASOSA EM UHEs DO BRASIL**

*Carlos Barreira Martinez<sup>1</sup>; Dieimys Santos Ribeiro<sup>2</sup>; Guilherme Ferraz<sup>3</sup>; Luiz Gustavo Martins Silva<sup>4</sup>; Andrey L. Fagundes de Castro<sup>5</sup>; Juliano Mafra Neves<sup>6</sup> & Liandro da Rosa<sup>7</sup>*

**Abstract:** The intermittent operation of hydroelectric power plants (HPPs) can cause significant impacts on aquatic fauna, in particular fish mortality due to gas supersaturation caused by gas embolism or gas bubble disease (GBD). The intermittent operation of spillways causes excessive aeration and an increase in the concentration of dissolved gases such as oxygen and nitrogen. The consequences of gas supersaturation for fish include severe damage to vital organs such as the gills, swim bladder and nervous system, as well as suppression of the immune system, increasing susceptibility to disease. To mitigate these effects, strategies must be implemented to continuously monitor gas saturation and make operational adjustments to reduce abrupt variations in flow. The creation of refuge areas can also offer protection during critical periods. The aim of this study was to understand the formation of gaseous supersaturation and to propose measures for monitoring and mitigating this phenomenon. This is a complex challenge that requires multidisciplinary collaboration between engineers, biologists, environmental managers and communities, in order to reconcile energy generation and the conservation of aquatic biodiversity. This work aims to analyze the HPPs installed in the Rio Grande basin and the potential for generating gaseous supersaturation (TDG) from each project listed.

**Keywords:** Gas supersaturation; Ichthyofauna; Spillway; Hydroelectric power plant (HPP) operation.

**Resumo:** A operação intermitente de usinas hidrelétricas (UHEs) pode provocar impactos significativos na fauna aquática, destacando-se a mortalidade de peixes decorrente da supersaturação gasosa causada pela embolia gasosa ou doença da bolha de gás (DBG). A operação intermitente dos vertedouros causa a aeração excessiva e o aumento da concentração de gases dissolvidos, como oxigênio e nitrogênio. As consequências da supersaturação gasosa para os peixes incluem danos severos a órgãos vitais, como brânquias, bexiga natatória e sistema nervoso, além da supressão do sistema imunológico, aumentando a suscetibilidade a doenças. Para mitigar esses efeitos, tem-se que implementar estratégias de monitoramento contínuo da saturação gasosa, ajustes operacionais para reduzir variações abruptas de vazão. A criação de áreas de refúgio também pode oferecer proteção em períodos críticos. Este estudo teve como objetivo compreender a formação da supersaturação gasosa, e propor medidas de monitoramento e mitigação deste fenômeno. Trata-se de um desafio complexo que exige a colaboração multidisciplinar entre engenheiros, biólogos, gestores ambientais e comunidades, visando conciliar a geração de energia e a conservação da biodiversidade aquática. Este trabalho visa analisar as UHEs instaladas na bacia do rio Grande e o potencial de geração de supersaturação gasosa (TDG) de cada empreendimento listado.

**Palavras-Chave** – Saturação gasosa; Ictiofauna; Vertedouro; Operação de UHE.

1 PPGEM / MPEH / UNIFEI & PPGMEC / UFMG. Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: cmartines@unifei.edu.br;

2 PPPGEL / UNIFEI. Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: dieimys@unifei.edu.br;

3 HVEX. R. Ismael Pinto de Noronha, 86 / MG, Itajubá / MG. e-mail: hvexferraz@gmail.com;

4 Cientista G.P. em Ec hidráulica da ETH-Zurich / Suíça, e-mail: lumartins@ethz.ch;

5 DCNAT/ UFSJ. Pça Dom Helvécio, 74 Bairro Fábricas - São João del Rei – MG. e-mail: andreycastro@ufsj.edu.br

6 SINOP ENERGIA. Av. dos Flamboyants, 684, Jardim Botânico, Sinop/MT, CEP: 78.556-024.

e-mail: juliano.mafra@sinopenergia.com.br / liandro.rosa@sinopenergia.com.br.

## INTRODUÇÃO

A análise dos diferentes tipos de vertedouros e dos impactos operacionais em usinas hidrelétricas brasileiras revela-se essencial para a preservação do equilíbrio ecológico e para a mitigação de efeitos adversos sobre a fauna aquática, com destaque para a ictiofauna. Embora os vertedouros desempenhem papel fundamental na regulação da vazão hídrica em barragens, sua operação inadequada ou desconsideração dos efeitos relacionados à supersaturação gasosa pode ocasionar consequências ecológicas graves, como episódios de mortandade de peixes. Tal fenômeno, ainda pouco documentado de forma sistemática no Brasil, constitui um problema de escala global, amplamente discutida na literatura técnico-científica. A supersaturação gasosa ocorre quando a pressão parcial dos gases dissolvidos na água excede a pressão atmosférica, frequentemente induzida por processos turbulentos e pela incorporação de bolhas de ar em ambientes de alta energia, como os vertedouros. Este processo é potencialmente letal para organismos aquáticos, uma vez que pode ocasionar embolia gasosa, comprometendo severamente funções fisiológicas dos peixes. Estudos recentes conduzidos em usinas brasileiras, demonstraram que eventos de supersaturação, estiveram associados a episódios expressivos de mortandade de peixes. Apesar da relevância do tema, a escassez de dados sistematizados sobre as condições hidráulicas associadas à operação dos vertedouros limita o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação. Assim, torna-se imperativo o avanço em pesquisas que explorem a relação entre hidrodinâmica, supersaturação gasosa e impacto ecológico, utilizando modelos físicos e computacionais para embasar diretrizes operacionais mais sustentáveis. Os vertedouros desempenham um papel fundamental na operação de UHEs, sendo responsáveis pelo controle e descarregamento seguro do excesso de água dos reservatórios Agostinho *et al.*, (2021) [1]. Cada tipo de vertedouro é projetado para atender às condições específicas de vazão e topografia, garantindo eficiência hidráulica e segurança estrutural, Pereira (2017) [2]. Porém essas estruturas, operadas em diferentes situações, podem gerar níveis elevados de supersaturação gasosa que impactam a ictiofauna local.

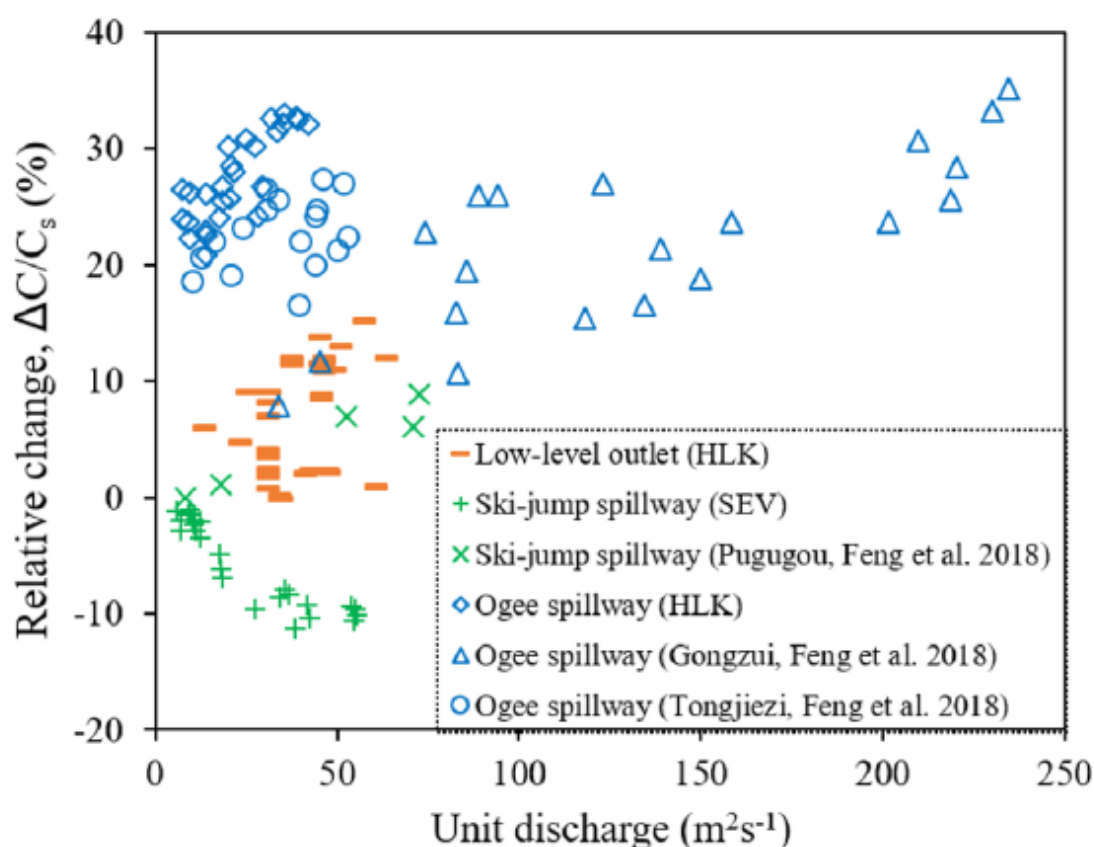
## REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A supersaturação de Gás Dissolvido Total (TDG) em corpos hídricos, decorrente principalmente da operação de usinas hidrelétricas (UHEs). Configura-se como um problema ambiental de relevância significativa, com impactos diretos sobre a biota aquática, em especial as comunidades ícticas Li *et al.*, (2022 [3]; Yuan *et al.*, (2021)) [4]. Esse fenômeno ocorre quando a pressão total dos gases dissolvidos na água ultrapassa os níveis de saturação naturais, resultando na formação de bolhas de gás nos tecidos dos organismos, condição patológica denominada Doença das Bolhas de Gás (DBG), Geist *et al.*, (2013) [5]; Yuan *et al.*, (2022) [6]. Os impactos da supersaturação de TDG sobre a vida aquática são amplamente documentados, evidenciando reduções na sobrevivência e no crescimento de peixes, com variações dependentes de fatores como espécie, estágio de desenvolvimento e tempo de exposição. Estudos comparativos demonstram, por exemplo, que a carpa herbívora juvenil (*Ctenopharyngodon idellus*) exibe maior tolerância fisiológica em comparação a espécies como o

esturjão do rio (*Acipenser dabryanus*), particularmente sensível a níveis elevados de TDG, [7] Fan *et al.*, (2020); [8] Liu *et al.*, (2019). A exposição crônica em concentrações superiores a 120% de saturação mostrou-se letal para a maioria das espécies, enquanto exposições agudas podem induzir comportamentos de evitação Huang *et al.*, (2010) [9]; Cao *et al.*, (2016) [10]. Adicionalmente, a interação entre TDG e sedimentos suspensos potencializa os danos ecológicos, afetando não apenas os organismos, mas também a persistência do DNA ambiental e a integridade dos ecossistemas, Huang L. *et al.*, (2022) [11]. Os mecanismos de geração de TDG estão intrinsecamente associados a processos hidráulicos característicos de UHEs, como a operação de vertedouros e a formação de jatos mergulhantes, os quais promovem a incorporação de ar na coluna d'água, Lu *et al.*, (2019) [12] e Wang *et al.*, (2019) [13]. Modelos matemáticos têm sido empregados para prever a dinâmica de TDG em reservatórios, destacando-se as contribuições de Witt *et al.*, (2017), [14] que enfatizam o papel crítico da dissipação de energia na redução da supersaturação. Intervenções estruturais, como a instalação de defletores, têm se mostrado eficazes na modulação da distribuição de gases, Andriolo *et al.*, (2023) [15], enquanto técnicas inovadoras, como aeração por microbolhas, aceleram a remoção de TDG, Ou *et al.*, (2023) [16]. Diante dos impactos documentados, diversas estratégias de mitigação têm sido propostas, abrangendo desde o monitoramento avançado, utilizando sensores específicos e modelos preditivos de risco, Kamal *et al.*, (2021) [17] ; Pleizier *et al.*, (2021) [18], até a adoção de medidas operacionais, como a coordenação entre UHEs para minimizar picos de TDG, Witt *et al.*, (2017) [19]. Intervenções físicas, como aeração e adsorção por carvão ativado, emergem como alternativas viáveis para a redução das concentrações de TDG, Yuan *et al.*, (2022) [6]; enquanto o redesenho de estruturas hidráulicas, com foco na minimização da captura de ar, representa uma abordagem preventiva de longo prazo, Politano *et al.*, (2017) [20]. Alguns autores, Agostinho *et al.*, (2021); Silva *et al.*, (2018) citam que a supersaturação de TDG constitui um desafio multifatorial, demandando abordagens interdisciplinares que conciliem a geração de energia com a conservação dos ecossistemas aquáticos. Persistem, contudo, lacunas críticas, como a carência de estudos sobre os efeitos em longo prazo em ecossistemas tropicais, as sinergias entre TDG e mudanças climáticas Yuan *et al.*, (2022) e o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo aplicáveis a contextos de países em desenvolvimento. No seu artigo de revisão Agostinho *et al.*, (2021) [1] cita que a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) limita o valor de TDG a 110% de saturação ( $\Delta P = 76$  mmHg ao nível do mar) e considera que TDG acima de 125% são letais. Esse mesmo autor cita que o uso de defletores pode reduzir os níveis de saturação e que o vertedouro *Sky-jump* é considerado o melhor para dissipar energia e evitar a supersaturação. Outra afirmação, a partir da literatura, é que a escavação do leito do rio e mesmo a implementação de obstáculos pode criar áreas de refúgio para peixes. Nesse sentido Andriolo *et al.*, (2023) [15] apresentam um estudo desenvolvido na UHE Colider que objetivou a redução do percentual de TDG a jusante da barragem onde foram construídos quatro defletores no vertedouro, uma em cada vão. Para auxiliar no projeto deste defletor foram realizados dois estudos: o primeiro em modelo hidráulico reduzido e no segundo foi elaborada uma modelagem matemática utilizando o *OpenFoam*. Os estudos Li, *et al.*, (2022) [21] visaram identificar o potencial de geração de TDG de vertedouro em ogiva; rampa de esqui; orifício de descarga e apresentaram um levantamento que pode ser observado na Figura 1 onde se percebe que os vertedouros em jato de ski e vertedouros do tipo orifício em tunel, tem níveis de saturação bastante baixos não ultrapassando os 15%. A maior parte dos vertedouros de ogiva (*Creger*) tem potencial

de supersaturar a água em valores que variam de 10% a 35% acima do valor de saturação a montante sendo que o valor médio esperado pode ser considerado como 25%. Para os vertedouros de ogiva com descargas unitárias variando de  $10 \text{ m}^3/\text{m.s}$  a  $50 \text{ m}^3/\text{m.s}$ , pode-se esperar níveis de acréscimo de saturação entre 25% e 35 %. Para esse mesmo tipo de vertedouro com descargas unitárias variando de  $50 \text{ m}^3/\text{m.s}$  a  $200 \text{ m}^3/\text{m.s}$ , pode-se esperar acréscimos de saturação de 10% a 25%. Para descargas unitárias maiores que  $200 \text{ m}^3/\text{m.s}$  tem-se a expectativa de taxas de aumento de saturação gasosa acima de 20% podendo chegar a 35%.

Figura 1 - Mudança na concentração de TDG em diferentes tipos de estruturas de descarga.



## UHES DA BACIA DO RIO GRANDE E POTENCIAL DE GERAÇÃO DE TDG

A Bacia do Rio Grande é uma das mais importantes para a geração de energia elétrica no Brasil e, portanto, foi selecionada como objeto de investigação. A bacia do Rio Grande abrange usinas de variados portes, desde grandes empreendimentos, como Furnas e Marimondo (com potências superiores a 500 MW), até unidades menores, como Limoeiro (com potência de 32 MW). A Figura 2 apresenta um esquema dessa bacia e a Tabela 1 apresenta um levantamento detalhado das Usinas Hidrelétricas (UHES) localizadas nesta bacia e reúne informações das usinas, quais sejam: i) potência física (em kW); ii) capacidade de descarga do vertedouro (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ) e; iii) vazão unitária ( $\text{m}^3/\text{m.s}$ ). Esses dados permitem calcular a vazão unitária dos vertedouros e com auxílio do abaco da Figura 1

verificar o potencial de geração de TDG dessas estruturas. Esse resultado está apresentado na Tabela 2.

Figura 2 - Bacia do Rio Grande e suas principais usinas hidrelétricas.

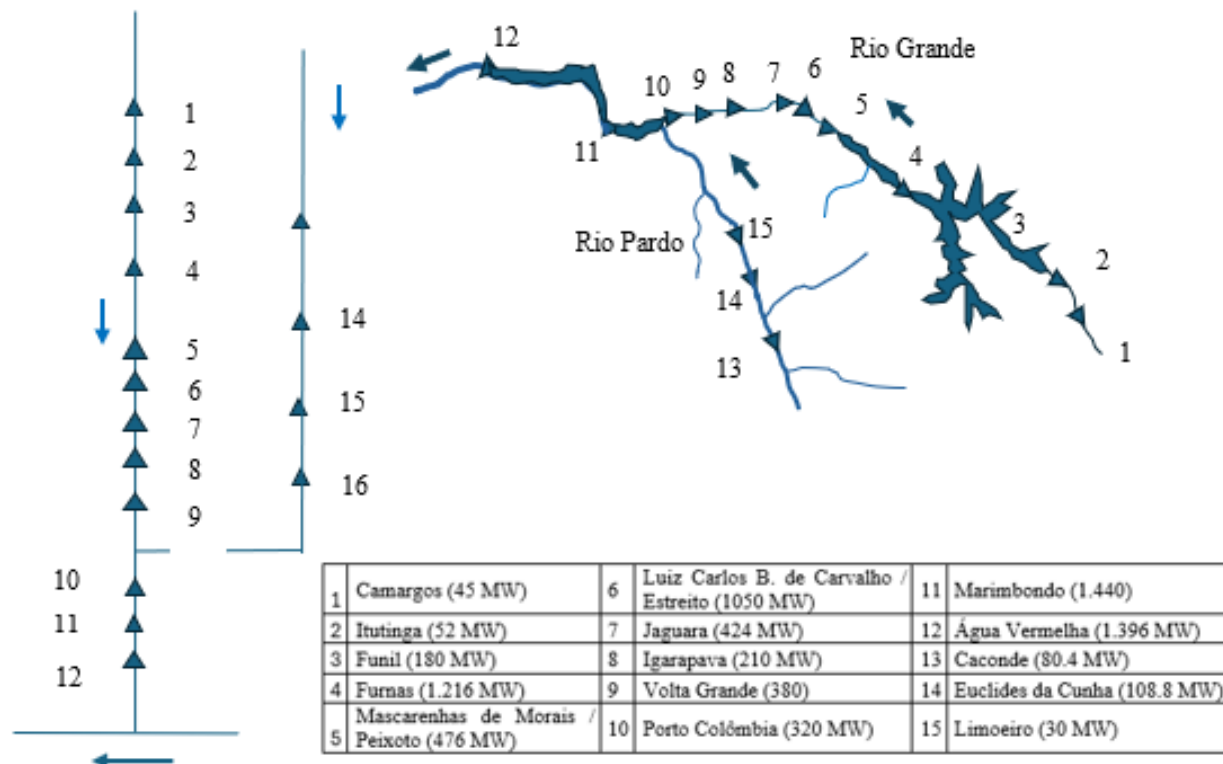


Tabela 1 - Levantamento das UHEs do Rio Grande.

UHE	Pot. (MW)	Rio	Vertedouro (m³/s)	L.vertedouro (m)
Camargos (ONS)	45	Rio Grande	2.070	82
Itutinga (ONS)	52	Rio Grande	2.230	65
Funil (ONS)	180	Rio Grande	7.347	65
Furnas (ONS)	1.2160	Rio Grande	13.000	107
Mascarenhas de Moraes / Peixoto (ONS)	476	Rio Grande	10.400	160
Luiz Carlos B. de Carvalho / Estreito (ONS)	1050	Rio Grande	13.000	105
Jaguara (ONS)	424	Rio Grande	14.500	103
Igarapava (Consortio)	210	Rio Grande	14.300	100
Volta Grande (site Enel)	380	Rio Grande	16.580	165
Porto Colômbia (ONS)	320	Rio Grande	16.000	175
Marimbondo (ONS)	1440	Rio Grande	21.400	160
Água Vermelha (ONS)	1.396	Rio Grande	20.000	160
Caconde (ONS)	80,40	Rio Pardo	852 ogiva 726 tulipa	20
Euclides da Cunha (ONS)	108,8	Rio Pardo	2.200 1.250	30 30



Limoeiro (ONS)	32	Rio Pardo	2.984	30
----------------	----	-----------	-------	----

OBS: Os vertedouros que não foram identificados são do tipo ogiva

## RESULTADOS

Com os dados da Tabela 1 pode-se calcular a vazão unitária dos vertedouros e com auxílio do abaco da Figura 1 verificar o potencial de geração de TDG dessas estruturas. Esse resultado está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Potencial de supersaturação dos vertedouros das principais UHEs do Rio Grande.

UHE	Rio	Q (m³/m.s)	Potencial % de supersaturação	
			min.	máx.
Camargos	Grande	25	20	30
Itutinga	Grande	34	18	30
Funil	Grande	113	15	25
Furnas	Grande	121	15	28
Mascarenhas de Moraes (Peixoto)	Grande	91	10	25
Luiz Carlos B. de Carvalho (Estreito)	Grande	124	15	28
Jaguara	Grande	141	15	23
Igarapava	Grande	143	15	23
Volta Grande	Grande	100	15	25
Porto Colômbia	Grande	91	10	25
Marimbondo	Grande	134	15	20
Água Vermelha	Grande	125	15	28
Caconde	Pardo	43	10	30
Euclides da Cunha	Pardo	73	10	25
Limoeiro	Pardo	42	10	30
		99	15	25

Analisando os dados da Tabela 2 e consultando ao ábaco da Figura 1 pode-se perceber que o potencial de aumento de TDG mínimo por meio de descarga dos vertedouros se situa em torno de 10% e o máximo pode alcançar valores de até 35%. Se levarmos em consideração que a saturação gasosa a montante dos aproveitamentos pode ser de aproximadamente 100% verificamos que existe um potencial risco dos níveis de TDG nessas UHEs chegar acima daquele preconizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) que é de 125%, Agostinho *et al.*, (2021). Isso é um indicio que esse problema pode estar presente em UHEs que já operam há décadas e que esse problema não está sendo identificado. Sugere-se que os estudos sobre a Supersaturação gasosa (TDG) sejam ampliados a todas usinas do Sistema elétrico Nacional (SIN) de forma a se mapear potenciais dados ambientais. Isso pode gerar uma ação sistêmica de mitigação desse tipo de impacto ambiental com benefícios para a sociedade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à UNIFEI, ANEEL, SINOP, FAPEMIG e CNPQ pelo suporte para realização desse trabalho.

## Bibliografia

- [1] A. A. Agostinho, D. C. Alves, L. C. Gomes, R. M. Dias, M. Petrere Jr e F. M. Pelicice, "Fish die-off in river and reservoir: A review on anoxia and gas supersaturation," *Neotropical Ichthyology*, 2021.
- [2] G. M. Pereira, *Projetos de vertedouros passo a passo*, 1 ed., Rio de Janeiro: Planeta Azul, 2017.
- [3] 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.
- [4] Y. W. Q. Y. Q. W. Y. L. R. L. K. & Z. D. Z. YYuan, "Impact of TDG supersaturation on native fish species under different hydropower flood discharge programs," *Aquatic Toxicology*, p. p. 105898, 2021.
- [5] 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 no. 1, p. 200–215, Feb. 2013.
- [6] Yuan, Quan, Kefeng Li, Yuanming Wang, Qianfeng Ji, and Ruifeng Liang, "Tolerance and Growth of Adult Schizothorax prenanti Exposed and Re-Exposed to Supersaturated Gas Downstream of a Dam," *Water*, Vols. %1 de %214, no. 16: 2501, 2022.
- [7] Zequn Fan, Yuxuan Deng, Quan Yuan, Xiaoqing Liu, Haoran Shi, Cuixia Feng, Yao Yang, "Effect of total dissolved gas supersaturation on the tolerance of grass carp (Ctenopharyngodon idellus)," *Environmental Sciences Europe*, vol. 32, p. 10, 03 april 2020.
- [8] Liu Xiaoqing; Li, Na; Feng, Cuixia; Fu, Chenghua; Gong, Quan; Lai, Jiansheng; Jiang, Zhu Jiang, "Lethal Effect of Total Dissolved Gas-Supersaturated Water with Suspended Sediment on River Sturgeon (Acipenser dabryanus)," *Scientific Reports*, 2019.
- [9] Huang, X., Li, Kf., Du, J. et al., "Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (Procypris rabaudi Tchang).," *J. Zhejiang Univ. Sci.*, pp. 806 - 811, 09 October 2010.
- [10] Cao, L., Li, K., Liang, R., Chen, S., Jiang, W. and Li, R. , "The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation.," *Cao, L., Li, K., Liang, R., Chen, S., Jiang, W. and Li, R. (2016), The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation. Aquac Res, 47: 2804-2813. <https://doi.org/10.1111/are.12730>, Cao, L., Li, K., Liang, R., Chen, S., Jiang, W. and Li, R. (2016), The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation. Aquac Res, 47: 2804-2813. <https://doi.org/10.1111/are.12730>.*
- [11] Z. J. a. W. Y. (. Huang L, "Effects of total dissolved gas supersaturation and sediment on environmental DNA persistence of grass carp (Ctenopharyngodon idella) in water," *Front. Environ. Sci.* 10:952414, 2022.
- [12] Jingying Lu, Ran Li, Qian Ma, Jingjie Feng, Weilin Xu, Faxing Zhang and Zhong Tian, "Model for Total Dissolved Gas Supersaturation from Plunging Jets in High Dams," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. Volume 145, 31 oct 2018.
- [13] Wang, Y., Politano, M., & Weber, L., "Spillway jet regime and total dissolved gas prediction with a multiphase flow model.," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 57, pp. 26-38, 2018.
- [14] Adam Witt, Kevin Stewart, Boualem Hadjerioua, "Predicting Total Dissolved Gas Travel Time in Hydropower Reservoirs," *Journal of Environmental Engineering*, 2017.
- [15] Marcos Vinicius Andriolo, Anderson Nascimento de Araújo, Carolina Fontanelli, Cássia Silmara Aver Paranhos, Marcela Politano & Paulo Henrique Cabral Dettmer, "Construção do defletor na UHE Colíder para minimizar o percentual total de gases dissolvidos (TDG)," *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 28 , 2023.
- [16] Yangming Ou , Zhenjun Li , Ran Li , Jingjie Feng , Shah Faisal, "Experimental study on the dissipation performance of supersaturated total dissolved gas in microbubble treatment," *Water Sci Technol*, jul 2023.
- [17] 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 no. 12, Dec. 2021.
- [18] Pleizier, N. K., Cooke, S. J., & Brauner,, "A Simple Chamber Design for Calibrating Weiss Saturometers and Recommendations for Measuring and Reporting Total Dissolved Gases," *Water Resources Research*, 2021.

- [19] Witt Adam, Stewart Kevin Stewart, and Hadjerioua Boualem, “Predicting Total Dissolved Gas Travel Time in Hydropower Reservoirs,” *Journal of Environmental Engineering*, vol. 143, 12 oct 2017.
- [20] M. Politano, A. Arenas Amado, S. Bickford, J. Murauskas, D. Hay, “Evaluation of operational strategies to minimize gas supersaturation downstream,” *Computers & Fluids*, vol. 68, pp. 168-185, 15 september 2012.
- [21] Li Pengcheng, Zhu David Z., Li Ran, Wang Yuanming, Crossman J.A., Kuhn W. Ludwig, “Production of total dissolved gas supersaturation at hydropower facilities,” *Water Research*, 20 20 August 2022.
- [22] Quan Yuan, Zhiguang Zhang, Kefeng Li, Ruifeng Liang, Bo Zhu, Yuanming Wang, “Effect of Total Dissolved Gas Supersaturation on Swimming Performance of Migratory Fish for Traversing Velocity Barriers,” *Aquaculture Research*, p. 11, 19 08 2024.
- [23] 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.
- [24] 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.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, A. A. *et al.* (2021). “Fish die-off in river and reservoir: A review on anoxia and gas supersaturation.” *Neotropical Ichthyology*, v. 19, n. 3.

CAO, L. *et al.* (2016). “The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation.” *Aquaculture Research*, v. 47, n. 9, p. 2804–2813.

EPE. (2025). <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. acesso em 18/05/2025.

FAN, Z. *et al.* (2020). “Effect of total dissolved gas supersaturation on the tolerance of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)”. *Environmental Sciences Europe*, v. 32, n. 1, p. 55–65, 3 dez.

GEIST, D. R. *et al.* (2023). “The Effects of Total Dissolved Gas on Chum Salmon Fry Survival, Growth, Gas Bubble Disease, and Seawater Tolerance.” *North American Journal of Fisheries Management*, v. 33, n. 1, p. 200–215.

PEREIRA G. M. (2017). *Projetos de Vertedouros passo a passo*. Rio de Janeiro, RJ: Planeta Azul Editora, 2017. v. 1, 416 p.

HUANG, L.; ZHANG, J.; WANG, Y. (2022) “Effects of total dissolved gas supersaturation and sediment on environmental DNA persistence of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) in water.” *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, 5.

HUANG, X. *et al.* (2010). “Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi Tchang*)”. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, v. 11, n. 10, p. 806–811, 9.

KAMAL, R. *et al.* (2021). “A System Model for Total Dissolved Gas Risk Assessment Due to Multidam Spill Operations”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 147, n. 12.

LI, P. *et al.* (2022). “Production of total dissolved gas supersaturation at hydropower facilities and its transport: A review”. *Water Research*, v. 223.



- LIU, X. *et al.* (2019). “*Lethal Effect of Total Dissolved Gas-Supersaturated Water with Suspended Sediment on River Sturgeon (Acipenser dabryanus).*” Scientific Reports, v. 9, n. 1.
- LU, J. *et al.* (2019). “*Model for Total Dissolved Gas Supersaturation from Plunging Jets in High Dams*”. Journal of Hydraulic Engineering, v. 145, n. 1.
- ANDRIOLO M. V. A. *et al.* (2023). “*Installation of deflector in Colider Dam to minimize the percentual of total dissolved gases.*” Brazilian Journal of Water Resources, vol. 28, no. 25, 2023., v. 28.
- OU, Y. *et al.* (2023). “*Experimental study on the dissipation performance of supersaturated total dissolved gas in microbubble treatment.*” Water Science & Technology, v. 88, n. 1, p. 185–198.
- ONS (2025). *Manual de procedimentos de operação*. São Paulo, SP. Operador Nacional do Sistema Elétrico. V1, 122 p.
- PLEIZIER, N. K.; COOKE, S. J.; BRAUNER, C. J. (2021). “*A Simple Chamber Design for Calibrating Weiss Satrometers and Recommendations for Measuring and Reporting Total Dissolved Gases.*” Water Resources Research, v. 57, n. 8.
- POLITANO, M.; CASTRO, A.; HADJERIOUA, B. (2017). “*Modeling Total Dissolved Gas for Optimal Operation of Multireservoir Systems.*” Journal of Hydraulic Engineering, v. 143, n. 6.
- QING, Y. *et al.* (2021). “*Influence of Channel Regulating Structures on the Transportation and Dissipation of Supersaturated Total Dissolved Gas.*” Advances in Civil Engineering, v. 2021, p. 1–8.
- SILVA, L. G. M. *et al.* (2018). “*Hydropower development and fish management: a food–water–energy nexus requiring international and multidisciplinary approach.*” Marine and Freshwater Research, v. 69, n. 12.
- WANG, Y.; POLITANO, M.; WEBER, L. (2019). “*Spillway jet regime and total dissolved gas prediction with a multiphase flow model*”. Journal of Hydraulic Research, v. 57, n. 1, p. 26–38.
- WITT, A.; STEWART, K.; HADJERIOUA, B. (2017). “*Predicting Total Dissolved Gas Travel Time in Hydropower Reservoirs*”. Journal of Environmental Engineering, v. 143, n. 12.
- YUAN, Q. *et al.* (2022 a). “*Tolerance and Growth of Adult Schizothorax prenanti Exposed and Re-Exposed to Supersaturated Gas Downstream of a Dam.*” Water, v. 14, n. 16, p. 2501.
- YUAN, Y. *et al.* (2022 b) “*Experiments about the removal of supersaturated total dissolved gas from water environment by activated carbon adsorption.*” Environmental Science and Pollution Research, v. 29, n. 51, p. 77809–77820.