

LABORATÓRIOS DE CAMPO PARA LEVANTAMENTO DO IMPACTO DA SATURAÇÃO GASOSA PEIXES

Carlos Barreira Martinez¹; Dieimys Santos Ribeiro²; Guilherme Ferraz³; Luiz Gustavo Martins Silva⁴; Andrey L. Fagundes de Castro⁵; Juliano Mafra Neves⁶ & Liandro da Rosa⁷.

Abstract: Studies of the effects of gas supersaturation (SSG) on ichthyofauna have been the subject of research on species in the Northern Hemisphere since the beginning of the 20th century. The results at the time indicated that the impacts of SSG were high and strategies were developed to reduce them. In addition, peripheral countries and those located in Neotropical regions began a process of building hydraulic systems, requiring thousands of structures with the most varied arrangements and dimensions. These projects were designed throughout the 20th and 21st centuries and were the subject of new techniques and solutions, and in the case of slope systems and their respective energy dissipation systems, a notable evolution was observed in terms of efficiency and cost reduction. However, the research was aimed at investigating new, more efficient geometries without necessarily worrying about the generation of impacts caused by SSG. This work presents an innovative field laboratory designed for the study of SSG on fish species and consists of an environment equipped with tanks where individuals (fish) are subjected to various concentrations of gas saturation and have their behavior and reactions recorded in order to identify the SSG limits that the various species can withstand during the operation of these structures. At the end, the result of the laboratory commissioning is presented with the characteristic curves of the test benches.

Resumo: Os estudos do efeito da supersaturação gasosa (SSG) sobre a ictiofauna tem sido objeto de pesquisas de espécies do Hemisfério Norte desde o início do século XX. Os resultados da época indicaram que os impactos da SSG eram elevados e assim foram desenvolvidas estratégias visando a redução dos mesmos. A par disso os países periféricos e localizados em regiões Neotropicais iniciaram um processo de construção de sistemas hidráulicos demandando milhares de estruturas com os mais variados arranjos e dimensões. Esses projetos foram idealizados ao longo dos séculos XX / XXI tendo sido objeto de novas técnicas e soluções sendo que, no caso de sistemas vertentes e dos seus respectivos sistemas de dissipação de energia, foi observado uma notável evolução em termos de eficiência e de redução de custos. Entretanto as pesquisas foram destinadas a investigar novas geometrias mais eficientes sem se preocupar necessariamente com a geração de impactos provocados pela SSG. Esse trabalho apresenta um laboratório de campo inovador destinado ao estudo da SSG sobre espécies de peixes e se constitui em um ambiente equipado com tanques onde indivíduos (peixes) são submetidos a diversas concentrações de saturação gasosa e tem seu comportamento e reação registrados de forma a identificar os limites de SSG que as diversas espécies podem suportar durante a operação dessas estruturas. Ao final é apresentado o resultado do comissionamento do laboratório com as curvas de características das bancadas de testes.

Palavras-Chave – Saturação gasosa, impacto ambiental, vertedores, dissipadores de energia.

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 Ecohidráulica da ETH-Zurich / Suiça, e-mail: lumartins@ethz.ch;

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

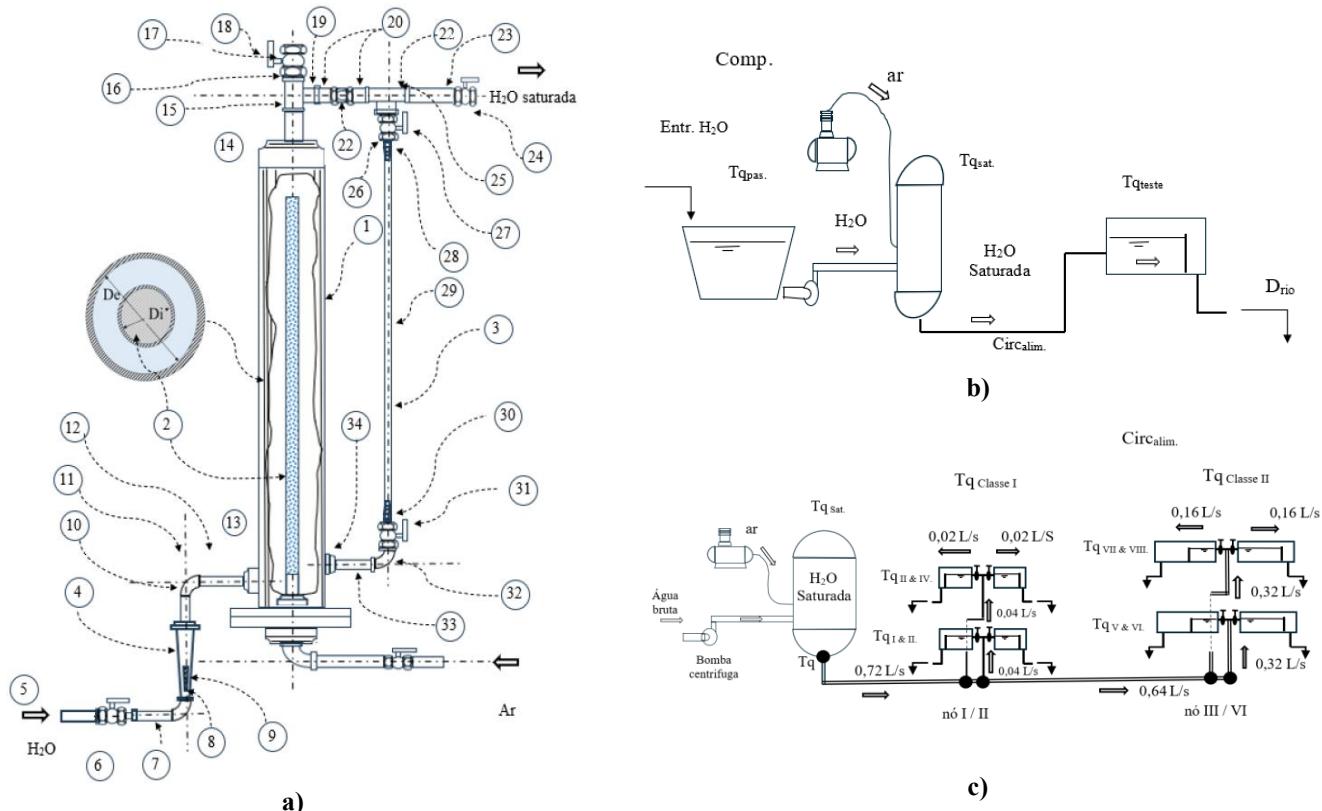
A descarga por vertedores de reservatórios de água tem potencial para gerar um fenômeno conhecido como supersaturação gasosa. Esse fenômeno se caracteriza pela concentração de Gases Dissolvidos Totais (TDG) na água que excede a capacidade de saturação natural sob determinadas condições de temperatura e pressão. Sabe-se que este fenômeno ocorre frequentemente a jusante dos descarregadores de superfície e pode resultar em um processo de formação de bolhas de gás nos tecidos dos peixes. Esse fenômeno pode resultar em embolia gasosa que é conhecida como doença da bolha de gás (DBG) que provoca eventos de mortalidade de peixes. A produção de supersaturação gasosa (TDG) em instalações hidrelétricas e o transporte desses gases, é um assunto estudado originalmente no início do século XX. Dentre estes esforços pode-se citar o trabalho de Marsh e Gorham (1905, pg. 343-376) *apud* (Nebeker *et.al*, 1976, pg. 50) que indicou o excesso de gás dissolvido como o agente causador da doença das bolhas de gás em peixes. Assim os estudos sobre esse tema procuraram definir os níveis críticos nos quais surgem problemas devido à supersaturação e descrever ocorrências e soluções para surtos específicos da DBG. O artigo “*Production of total dissolved gas supersaturation at hydropower facilities and its transport*” (Geist *et.al*, 2013), 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. 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 (Geist, 2013); (Huang *et.al*, 2022); (Li *et al*, 2022), (Kamal *et al*, 2021); (Yuan *et al*, 2021). A literatura também aborda as consequências da supersaturação do TGD, incluindo a mortalidade de peixes e invertebrados. Além disso, são apresentadas pelos autores (Geist *et.al*, 2013), 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. O impacto da Supersaturação gasosa e a sua correlação com as diferentes descargas por vertedores na sobrevivência e no desempenho de natação de espécies de peixes nativas em rios afetados por hidrelétricas foi objeto de estudos de Yuan (Yuan, Y. *et al*, 2021). Também é relevante levar em consideração os estudos desenvolvidos por Lu (Lu, J. *et al*, 2021) que investigou os fatores que afetam a geração de TDG durante o escoamento de barragens e propôs uma nova correlação empírica que leve em consideração a eficiência de dissipação de energia sobre esse fenômeno. Apesar desses estudos de caráter mundial pouco se sabe sobre o impacto da concentração de Gases Dissolvidos Totais (TDG) sobre peixes neotropicais. A partir dessa demanda foi instituído um acordo de parceria para pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) entre a Universidade Federal de Itajubá, a Universidade Federal de São João Del Rei e a Companhia Energética SINOP S.A. (PRE/UNIFEI (2023); MME/UNIFEI (2021); Martinez C. B. *et al*, (2023) com o objetivo de se quantificar a letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas. Esse acordo possibilitou a implantação de um laboratório de campo que será objeto desse artigo. O saturador gasoso utilizado se baseou em esquemas publicados na literatura e o arranjo do laboratório foi fruto da iteração entre as Universidades envolvidas e as empresas participantes desse projeto.

SATURADORES, TANQUES E SISTEMAS HIDRÁULICOS

O sistema de saturação gasosa adotado foi idealizado a partir dos diagramas e orientações obtidas em quatro publicações clássicas (Dawley *et al*, 1976); (Nebeker *et al*, 1976); (Velázquez *et al*, 2022); (Abernethy *et al*, 2001). Isso resultou em um saturador de coluna única com sistema de alimentação de água e injeção de ar inferior conforme apresentado no artigo dimensionamento de aparato de saturação gasosa para ensaios em peixes neotropicais (Martinez *et al*, 2024a) e que se encontra

reproduzido na figura 1(a). O projeto foi desenvolvido de forma a permitir que o laboratório fosse montado dentro de um container naval de 40 pés com dimensões aproximadas de 12 metros de comprimento, 2,4 metros de largura e 2,6 metros de altura. O esquema do circuito hidráulico e alimentação dos tanques seguiu as orientações do artigo dimensionamento de sistema hidráulico para alimentação de tanques de teste de supersaturação gasosa (Martinez *et al.*, 2024b) e está reproduzido nas figuras 1(b) e 1(c). O arranjo assim obtido permitiu conceber um espaço de laboratório tal como apresentado nas figuras 2 e 3. A sala de máquinas (a) é composta por: bomba hidráulica, compressor de ar, gerador de água supersaturada e o painel elétrico e com 2 portas corta fogo com barras antipânico para acesso. A área de ensaios (b) é composta por: 8 tanques de ensaio de médio porte, 1 tanque de ensaio para indivíduos de maior porte, prateleiras de apoio dos tanques e tubulações e se destina a realização dos testes de supersaturação gasosa em peixes. A área de dissecação e análises (c) é composta por: armários, bancadas de dissecação, mesa para análises e um freezer de armazenamento de material biológico. O sistema de alimentação do laboratório com água captada do rio está apresentado na figura 4.

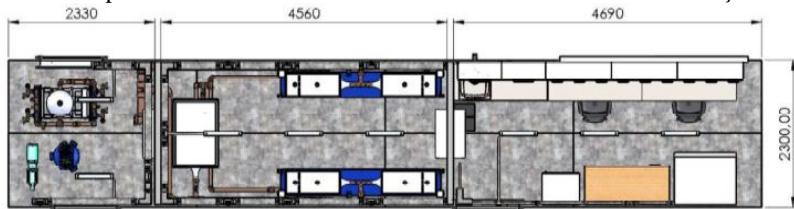
Figura 1 – Esquema de saturador mono coluna e do circuito de alimentação dos tanques



(1) duto do saturador	(10) duto (0,5 m)	(19) bucha de redução	(28) espigão / mangueira
(2) difusor gasoso	(11) cotovelo	(20) duto com 1,5 (m)	(29) mangueira
(3) visor de nível externo	(12) duto (1 m)	(21) válvula unidirecional	(30) visor externo
(4) entrada do duto	(13) entrada do saturador	(22) "T" de passagem	(31) registro de esfera
(5) entrada de água	(14) saída do saturador	(23) duto com 0,5 (m)	(32) cotovelo
(6) registro	(15) niple de ligação	(24) registro de saída	(33) duto com 0,5 (m)
(7) duto (1m)	(16) "T" de saída	(25) bucha de redução	(34) de entrada de 1/2"
(8) cotovelo	(17) niple de ligação	(26) niple de ligação	
(9) niple	(18) registro de serviço	(27) registo de esfera	

Fonte: (Martinez *et al.*, 2024a); (Martinez *et al.*, 2024b).

Figura 2 – Esquema de saturador mono coluna e do circuito de alimentação dos tanques



a. Sala de máquinas b. Área de ensaios c. Área de dissecação e análises.

Figura 3 – Vista em perspectiva do laboratório de campo

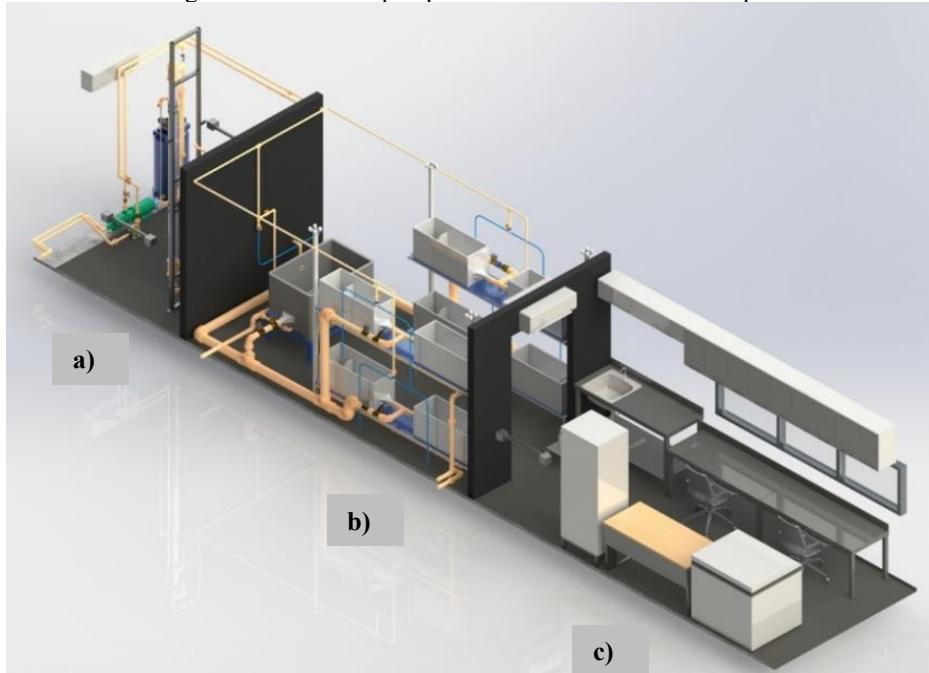
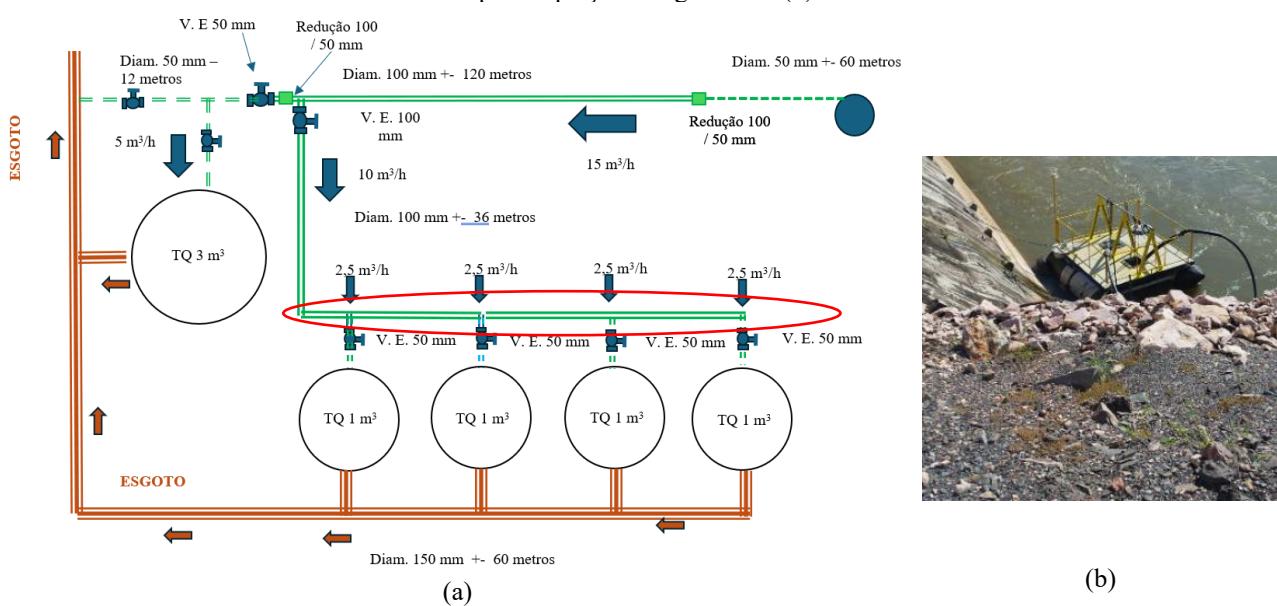


Figura 4 - Sistema de alimentação do laboratório com água captada do rio(a) e detalhe da balsa equipada bom bomba para captação de água do rio(b).



A figura 5 apresentam detalhes da instalação em campo onde é possível observar detalhes do sistema de alimentação dos tanques de teste posicionados em prateleiras e com um medidor digital de vazão (em destaque) para auxiliar o controle de vazão e os níveis de saturação dos tanques (Fig. 5a). Os tanques de aclimatação e manutenção de peixes capturados no rio estão apresentados na figura 5b onde se pode notar os dutos de alimentação de 100 mm (tb. apresentados em destaque na figura 4). O tanque de ensaio para indivíduos de maior porte (destaque linha continua), pode ser observado na figura 5c assim como os tanques de ensaio de médio porte (destaque linha tracejada). O painel de comando do sistema pode ser observado na figura 5d. A figura 5e apresenta a sala da dissecação de peixes. Os tanques de médio porte possuem um vertedor triangular de controle de nível que também pode ser usado para aferição da vazão de trânsito. A entrada de água no sistema é feita por meio de cone de transição que tem a função de reduzir a turbulência na saída dos dutos de alimentação. O sistema também tem um circuito de inserção de água bruta (detalhe Fig. 5a) que permite inserir água bruta permitindo o ajuste de níveis de saturação gasosa. O laboratório possui um laboratório de biologia – cômodo C apresentado nas figuras 2c e 5e - para análise dos efeitos da SSG sobre peixes (Fig. 5e) equipado com mesas de escritório armários para organização das ferramentas de dissecação e análise, bancadas e mesas, freezer, pia, iluminação dedicada, janelas, tomadas elétricas e demais componentes. Alguns controles do sistema são localizados no laboratório de biologia como visto na Fig. 5d. Por meio dessa interface de controle do sistema supervisório possível definir, alterar e monitorar a pressão do compressor, a vazão da motobomba, a altura da coluna de água/ar, a pressão interna do saturador e a vazão no tanque de estabilização para a distribuição aos aquários / tanques de teste. Também permite selecionar quais aquários / tanques serão utilizados no ensaio e controlar o tempo de ensaio.

Figura 5 – Detalhes dos tanques de médio porte (5 a), dos tanques de manutenção de peixes externos (5 b).

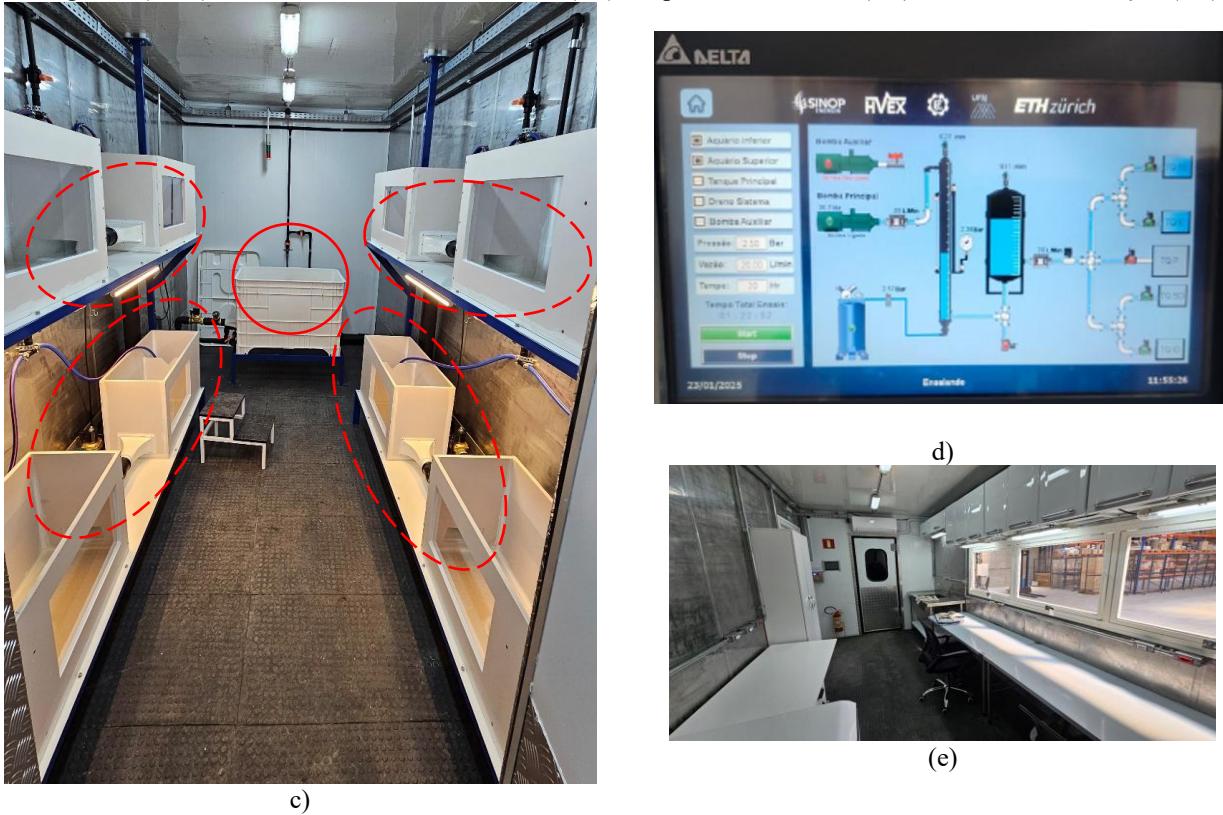


a)



b)

Figura 5 (cont.) – Detalhes da sala com de testes (5 c), do painel de controle (5 d) e da sala de dissecação (5 e)



A figura 6a apresenta uma vista lateral do laboratório em fábrica onde se pode observar a janela lateral da seção de dissecação e a porta da casa de máquinas onde o saturador está instalado. A figura 6b apresenta o local da instalação do laboratório em campo na UHE SINOP ao lado do escritório da equipe de meio ambiente.

Figura 6 – Laboratório de campo



ENSAIOS DE COMISSIONAMENTO E RESULTADOS OBTIDOS

Para o comissionamento do sistema foram testados vários cenários de operação com pontos de pressão variando de 1,5 a 2,5 bar e vazões de 10 a 40 litros por minuto considerando uma saturação de entrada de 95%. Os resultados destes testes estão apresentados nas Tabela 1 e nas figuras 6 e 7.

Tabela 1 – Valores de ganho de TDG sob diversas pressões e vazões de teste

			2 Tanques superiores		4 Tanques superiores		8 tanques	
TDG	Delta	Pressão	Vazão	Dopagem	Vazão	Dopagem	Vazão	Dopagem
100	5	3	40.0	6.7	40.0	16.8	40.0	82.8
110	15	3	36.8	-	31.1	-	40.0	47.0
120	25	3	21.6	-	39.6	-	40.0	17.3
130	35	2	37.1	-	32.3	-	33.6	-
140	45	2	29.9	-	22.1	-	15.9	-
150	55	2	22.8	-	10.0	10.1	21.7	-
160	65	2	15.9	-	10.0	17.0	13.2	-
170	75	2	10.0	0.8	10.0	36.0	10.0	10.5
			4 tanques inferiores		Tanque único			
TDG	Delta	Pressão	Vazão	Dopagem	Delta	Pressão	Vazão	Dopagem
100	5	2,5	40.0	16.8	5	2,25	40.0	7.9
110	15	2,5	31.1	-	15	2,25	31.9	-
120	25	2	39.6	-	25	2,25	20.2	-
130	35	2	32.3	-	35	2,25	12.9	-
140	45	2	22.1	-	45	1,5	29.9	-
150	55	2	10.0	10.1	55	1,5	22.8	-
160	65	2	10.0	17.0	65	1,5	15.9	-
170	75	2	10.0	36.0	75	1,5	10.0	0.8

Figura 6 – Resultado dos testes de elevação de % de TDG sob pressões de 2 a 3 bar – 2 e 4 tanques

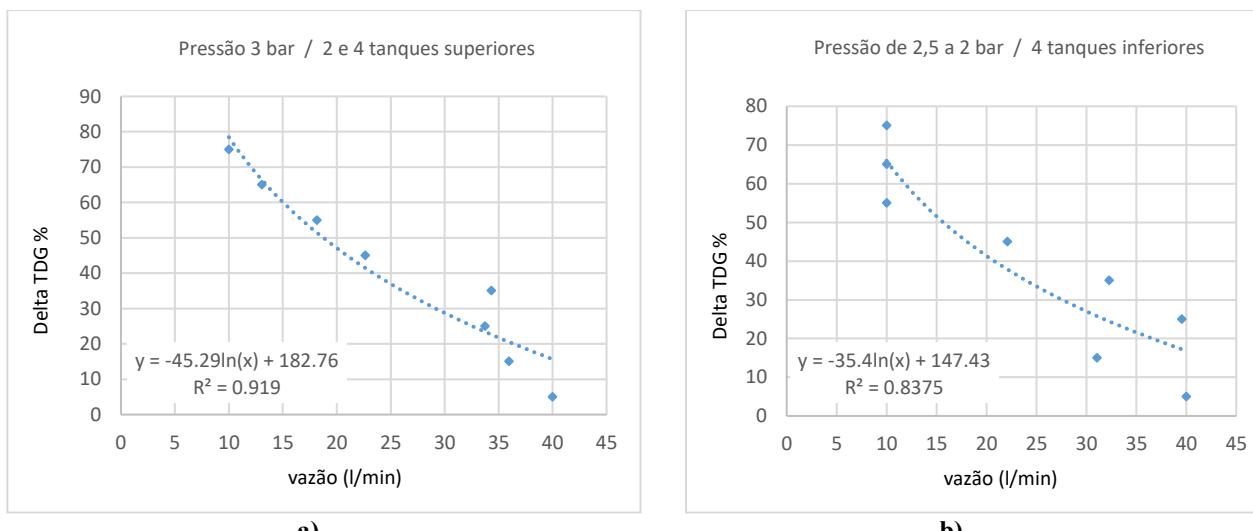
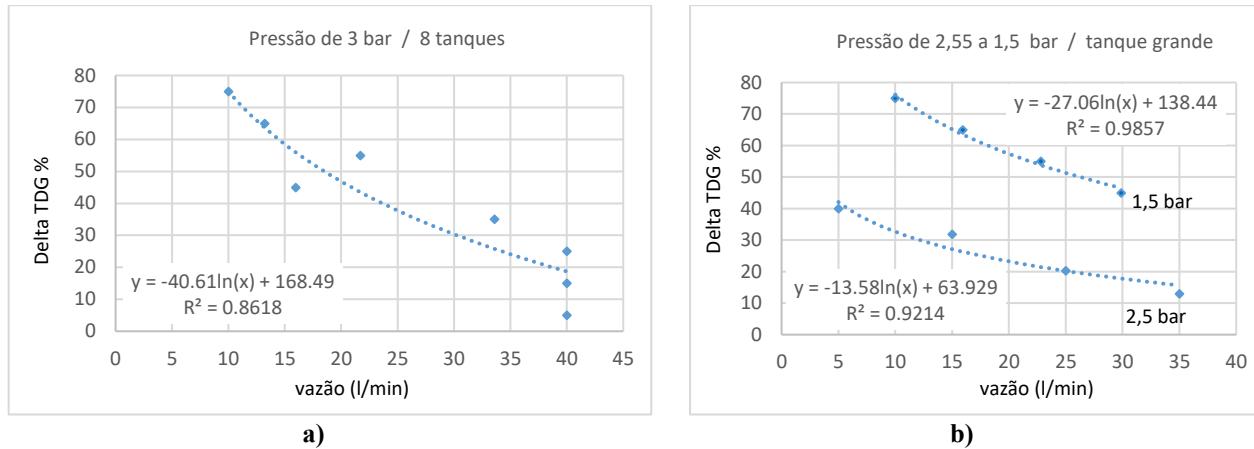


Figura 7 – Resultado dos testes de elevação de % de TDG sob pressões de 1,5 a 3,0 bar – 2 e 4 tanques



CONCLUSÕES FINAIS

O desenvolvimento do laboratório de supersaturação gasosa partiu da pesquisa bibliográfica sobre sistemas semelhantes existentes no mundo. Foi identificado que existem diversas alternativas e soluções que são instaladas em ambiente laboratorial e não necessariamente próximos aos pontos de captura de indivíduos das espécies alvo. A proposta desenvolvida nessa investigação foi desenvolver uma estrutura laboratorial em um Container de 40 pés que pudesse ser deslocada para campo e instalada em trechos próximos a locais onde existem problemas de supersaturação gasosa com eventos de mortandade de peixes severa. Iniciou-se o projeto com a concepção e teste do saturador gasoso e dos tanques de teste com uma meta de aumento de saturação gasosa de 40% a partir da taxa de entrada. Fez-se também o dimensionamento dos tanques e a partir daí foi desenvolvido o projeto do laboratório de forma a permitir os testes em campo. Na sequência foi dado início a construção e depois nos testes de comissionamento. Os resultados alcançados indicaram que é possível alcançar taxas de saturação nos tanques que variam de 15% (2,5 bar / 35 l/min – tanque único) até taxas de ganho de TDG de 70% de aumento de saturação gasosa com 10 l/min (2 e 4 tanques superiores) que permite uma ampla faixa de ensaios em diversas espécies de peixes. Espera-se que esse sistema possa ser utilizado em diversas oportunidades gerando dados que possam auxiliar no levantamento da capacidade de suportar taxas de supersaturação gasosa de forma a gerar estratégias de operação das estruturas hidráulicas sem acusar danos a ictiofauna local.

AGRADECIMENTOS

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

BIBLIOGRAFIA

- ABERNETHY, CARY S, AND AMIDAN, BRETT G., “*Laboratory Studies of the Effects of Pressure and Dissolved Gas Supersaturation on Turbine-Passed Fish*,” U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RL01830, Printed in the United States of America, 2001.
- DAWLEY, E. M.; M. SCHIEWE; SCHIEWE, “*Effects of Long-Term Exposure to Supersaturation of Dissolved Atmospheric Gases on Juvenile Chinook Salmon and Steelhead Trout in Deep and Shallow Test Tanks - in Gas Bubble Disease*” / D. H. Fickeisen & M. J. Schneider,” 1976.
- GEIST, D. R., 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.
- HUANG, L., 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.
- KAMAL, R., 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.
- LI, P., 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.
- LU, J. ET AL, “*Energy dissipation efficiency as a new variable in the empirical correlation of total dissolved gas*,” Sci Rep, vol. 11, nº no. 1, p. 7414, Apr. 2021.
- MARTINEZ, C. B., RIBEIRO, D.S. FERRAZ, G.M.F. FERRAZ, MARTINS, L.G., CASTRO, A. L. F., NEVES J. M., “*Dimensionamento de aparato de saturação gasosa para ensaio em peixes neotropicais*,” em Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Curitiba - PR, agosto de 2024.
- MARTINEZ, CARLOS BARREIRA; CASTRO, A. L. FAGUNDES DE; SILVA L.G.M. NEVE, J. M., “*Quantificando letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas*”, Itajubá, Minas Gerais: FUPAI, 2023.
- MME / UNIFEI - Ministério da Educação / Universidade Federal de Itajubá, “*Acordo de Parceria, Desenvolvimento e Inovação - Desenvolvimento e Inovação (PD&I) / Plano de trabalho*,” Reitoria, Ed., Itajubá, Minas Gerais: Universidade Federal de Itajubá / Reitoria, 2021, p. 19.
- NEBEKER, A.V.; D. G. STEVENS; J. R. BRETT, “*Effects of Gas Supersaturated Water on Freshwater Aquatic Invertebrates. in Gas Bubble Disease*,” O. R. T. ERDA Technical Information Center, Ed., Oak Ridge, Tennessee, 1976, p. 50 - 61.
- PRE / UNIFEI - Pro Reitoria de Extensão da Universidade Federal de Itajubá, “*Extrato de acordo - Processo nº 23088.012191/2023-30 - Execução de projeto*,” Diário Oficial da União - seção 3, p. 56, 21 agosto 2023
- VELÁZQUEZ-WALLRAF, A., FERNÁNDEZ, A., CABALLERO, M.J. et al., “*Establishment of a fish model to study gas-bubble lesions.*,” Scientific reports, 2022.
- YUAN, Y. et al., “*Impact of TDG supersaturation on native fish species under different hydropower flood discharge programs*,” Aquatic Toxicology, vol. 237, p. 105898, Aug. 2021