

Modelagem simplificada da supersaturação de gás total dissolvido em vertedouros de usinas hidrelétricas

Dieimys Santos Ribeiro¹ Carlos Barreira Martinez,² e Walker Matheus Ferreira da Silva³

Resumo: A supersaturação de gás total dissolvido (TDG) em rios a jusante de barragens hidrelétricas constitui fenômeno de elevada relevância técnica, ambiental e acadêmica, estando diretamente associada à operação de vertedouros sob grandes descargas. A combinação entre elevadas velocidades do escoamento, intensa turbulência, arraste de ar atmosférico e aumento de pressão em regiões submersas favorece a dissolução de gases na água, elevando a pressão total dos gases dissolvidos acima do equilíbrio natural. Em determinadas condições, esse processo pode provocar alterações fisiológicas severas na ictiofauna, incluindo a doença das bolhas de gás, redução de desempenho natatório e aumento da mortalidade. O presente trabalho apresenta uma revisão aplicada integrando fundamentos de Mecânica dos Fluidos, hidráulica e Mecânica dos Fluidos Ambiental, propondo adicionalmente uma modelagem simplificada que relaciona a supersaturação de TDG à vazão específica descarregada. Os resultados indicam que descargas unitárias elevadas podem conduzir rapidamente a níveis críticos de TDG, exigindo estratégias estruturais e operacionais compatíveis com segurança hidráulica e proteção ecológica.

Abstract: Total dissolved gas supersaturation (TDG) downstream of hydropower dams is a relevant hydraulic, environmental and academic phenomenon directly associated with spillway operation under high discharge conditions. The combination of high flow velocities, intense turbulence, atmospheric air entrainment and pressure increase in submerged zones enhances gas dissolution into water, raising total dissolved gas pressure above natural equilibrium. Under certain conditions, this process may cause severe physiological impacts on fish populations, including gas bubble disease, reduced swimming performance and increased mortality. This study presents an applied review integrating Fluid Mechanics, Hydraulics and Environmental Fluid Mechanics, and additionally proposes a simplified model relating TDG supersaturation to specific discharge. The didactic potential of the subject in engineering education is also discussed, since it connects classical theory, mathematical modeling and real sustainability problems. Results indicate that high unit discharges may rapidly lead to critical TDG levels, requiring structural and operational strategies compatible with hydraulic safety and ecological protection.

Palavras-Chave: Mecânica dos Fluidos; TDG; vertedouros; hidráulica ambiental.

Keywords: Fluid Mechanics; TDG; spillways; environmental hydraulics.

INTRODUÇÃO

A Mecânica dos Fluidos constitui uma das áreas mais relevantes das ciências aplicadas, fornecendo fundamentos teóricos e matemáticos para a análise de líquidos e gases em repouso ou movimento. Seus princípios são amplamente utilizados no dimensionamento e operação de canais, tubulações, reservatórios, redes de abastecimento, sistemas de bombeamento, drenagem urbana e grandes estruturas hidráulicas. Entre essas aplicações, as barragens e usinas hidrelétricas ocupam posição estratégica, uma vez que dependem diretamente do controle eficiente do escoamento da água para geração de energia, segurança operacional e gestão de cheias.

1 MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá / MG. e-mail: dieimys@unifei.edu.br

2 PPG-EME / MPEH / UNIFEI & PPGMEC / UFMG. Av. BPS, 1303, Itajubá / MG. e-mail: cmartinez@unifei.edu.br

3 PPG-EME / UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá / MG. e-mail: d2026101217@unifei.edu.br

Durante eventos hidrológicos extremos ou em condições específicas de operação, vertedouros são acionados para descarregar volumes excedentes do reservatório. Nessas situações, grandes massas de água escoam com elevada energia cinética, produzindo intensa turbulência e significativa incorporação de ar atmosférico ao fluxo líquido (Li *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2021). O transporte dessas bolhas para regiões submersas sob maior pressão hidrostática favorece sua dissolução, elevando a pressão total dos gases dissolvidos e caracterizando a supersaturação de gás total dissolvido (TDG), (Lu *et al.*, 2019).

Esse fenômeno possui implicações ambientais importantes. Diversos estudos demonstram que níveis elevados de TDG podem provocar a doença das bolhas de gás em peixes, condição associada à formação de bolhas em tecidos, danos fisiológicos, perda de equilíbrio, alterações comportamentais e mortalidade (Weitkamp e Katz, 1980; Agostinho *et al.*, 2021; Colt, 1984; Cao *et al.*, 2016). Em rios com aproveitamentos hidrelétricos em cascata, o problema pode adquirir escala regional, pois a água supersaturada liberada por uma barragem pode alcançar estruturas a jusante sem dissipação completa (Witt, Stewart e Hadjerioua, 2017; Politano, Castro e Hadjerioua, 2017).

Apesar da relevância técnica e ecológica, o tema ainda recebe atenção limitada em currículos tradicionais de engenharia. Em muitos casos, disciplinas de Mecânica dos Fluidos concentram-se em escoamentos idealizados e aplicações clássicas, sem incorporar fenômenos envolvendo múltiplas fases, transferência de massa e sustentabilidade ambiental. Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão aplicada sobre a supersaturação de TDG, integrando fundamentos físicos, modelagem simplificada, implicações ambientais, estratégias de mitigação e potencial didático no ensino de engenharia.

METODOLOGIA

A estratégia metodológica consistiu em uma revisão sistemática e integrativa da literatura técnica e científica no período de 1980 a 2024, utilizando as bases de dados Scopus, Web of Science e o Portal de Periódicos CAPES. A busca foi parametrizada pelos descritores combinados "total dissolved gas", "spillway" e "supersaturation". Após a aplicação de critérios de exclusão por duplicidade e desvio temático, selecionou-se o arcabouço de modelos matemáticos de balanço multifásico e correlações empíricas consolidadas na hidráulica ambiental. O modelo de base empírica foi então estruturado para correlacionar parâmetros fundamentais de projeto do vertedouro (como vazão total e largura útil) com a taxa de solubilidade governada pela Lei de Henry, permitindo a validação da convergência física das equações macroscópicas aplicadas a cenários operativos críticos de vertimento.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fenômeno Físico da Aeração e Supersaturação

A supersaturação de TDG em vertedouros é um clássico problema de transferência de massa multifásica governado pela turbulência. Quando a água escoam sobre a calha de um vertedouro, a camada limite turbulenta atinge a superfície livre, causando instabilidades que rompem a tensão superficial e "engolem" ar atmosférico (processo de aeração maciça). Na bacia de dissipação, o jato mergulhante (plunging jet) arrasta essas bolhas de ar para profundidades significativas (Lu *et al.*, 2019).

Conforme a Lei de Henry, a solubilidade de um gás em um líquido é diretamente proporcional à pressão parcial desse gás. Logo, ao serem submetidas a elevadas pressões hidrostáticas no fundo da bacia, as bolhas de ar (compostas majoritariamente por nitrogênio e oxigênio) dissolvem-se

vigorosamente na água. Quando essa massa de água retorna à superfície no canal de fuga, onde a pressão volta a ser a atmosférica local, ela se encontra supersaturada, pois contém mais gás dissolvido do que o estado de equilíbrio termodinâmico permite (Li *et al.*, 2022).

Doença da bolha de gás (GBD)

Do ponto de vista ecológico, águas supersaturadas tornam-se tóxicas para a vida aquática. Peixes e macroinvertebrados que respiram essa água absorvem os gases em excesso através das brânquias para a sua corrente sanguínea. Como a pressão interna nos tecidos dos peixes é menor que a pressão do gás dissolvido, o gás tende a sair da solução, formando bolhas físicas no sangue e nos tecidos dos animais (Weitkamp; Katz, 1980). Esse quadro patológico é conhecido como Doença das Bolhas de Gás (Gas Bubble Disease - GBD).

A GBD causa bloqueios na circulação sanguínea (embolia), lesões na pele, letargia crônica e, em concentrações de TDG superiores a 115-120%, pode levar a episódios de mortalidade aguda e em massa da ictiofauna (Agostinho *et al.*, 2021; Cao *et al.*, 2016).

Mitigação Estrutural e Operacional

O controle da supersaturação baseia-se em reduzir a pressão hidrostática a qual as bolhas são submetidas ou limitar o volume de ar arrastado. Estruturalmente, isso é feito por meio de defletores de fluxo (flow deflectors) instalados na face do vertedouro, que criam um escoamento superficial (raso), impedindo que o jato mergulhe profundamente na bacia de dissipação (Andriolo, 2023). Operacionalmente, busca-se otimizar a abertura simétrica de comportas para reduzir a vazão específica (vazão por metro de largura), minimizando a penetração do jato e a energia cinética no ponto de impacto (Feng *et al.*, 2018).

Modelagem Física e Equações Governantes do Escoamento Bifásico

A fenomenologia da aeração e da dissolução gasosa descrita na fundamentação é ancorada nas equações diferenciais de conservação para fluidos incompressíveis. A hidrodinâmica tridimensional do escoamento e o campo de velocidades são rigorosamente regidos pelas equações da Continuidade e de Navier-Stokes, expressas em sua notação vetorial clássica:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (2)$$

Onde u representa o vetor velocidade do fluido (m/s), ρ a massa específica da mistura (kg/m^3), p o campo escalar de pressões (Pa), μ a viscosidade dinâmica ($Pa \cdot s$) e g o vetor aceleração gravitacional (m/s^2).

A conexão entre a macro-hidrodinâmica da estrutura e a supersaturação ocorre na interface ar-água. A intensa turbulência, manifestada através das flutuações e taxas de cisalhamento oriundas dos termos convectivo ($u \cdot \nabla u$) e difusivo ($\mu \nabla^2 u$) rompe a tensão superficial do escoamento e promove o aprisionamento do ar atmosférico. O balanço da concentração de gás dissolvido (C) no domínio aerado é descrito pela equação generalizada de transporte de massa interfacial:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C \right) = D \nabla^2 C + K_L a (C_s - C) \quad (3)$$

Na qual D é o coeficiente de difusão molecular, K_L o coeficiente de transferência de massa na camada limite líquida e a a área interfacial específica volumétrica. O termo fonte $K_L a (C_s - C)$ governa a taxa de aeração do oxigênio e nitrogênio, impulsionada pelo gradiente entre a concentração real e a concentração de saturação local (C_s). Em bacias de dissipação de usinas hidrelétricas, conforme contextualizado biologicamente C_s é regida pela Lei de Henry, sendo severamente amplificada pela pressão hidrostática:

$$C_s = K_H \cdot P_{gás} = K_H \cdot X(p_{atm} + \rho g z) \quad (4)$$

Onde K_H é a constante de Henry, X a fração molar do gás na bolha e z a profundidade de imersão do jato na bacia de dissipação. Fica matematicamente provado que velocidades vertiginosas (u) maximizam a área interfacial (a), enquanto o mergulho do jato incrementa o termo de pressão ($\rho g z$), forçando o balanço de massa muito além do equilíbrio atmosférico.

Modelagem simplificada do TDG

Embora a representação completa desse fenômeno exija modelos multifásicos mais elaborados, formulações empíricas simplificadas podem ser úteis para estimativas preliminares e para a comparação entre cenários operacionais. Com essa finalidade, adotou-se a seguinte correlação empírica, adaptada de Feng *et al.* (2018, p. 126):

$$Q_{esp} = \frac{Q}{B} \quad (5)$$

Nesta equação inicial, a intensidade do escoamento é definida por Q_{esp} (m^2/s) em que Q é a vazão total descarregada pela estrutura hidráulica (m^3/s) e B é a largura útil da calha do vertedouro (m). Este parâmetro hidrodinâmico é fundamental, pois determina o quão concentrado, espesso e energético será o jato de água que atinge a bacia de dissipação. Para o incremento de supersaturação de gás total dissolvido, temos:

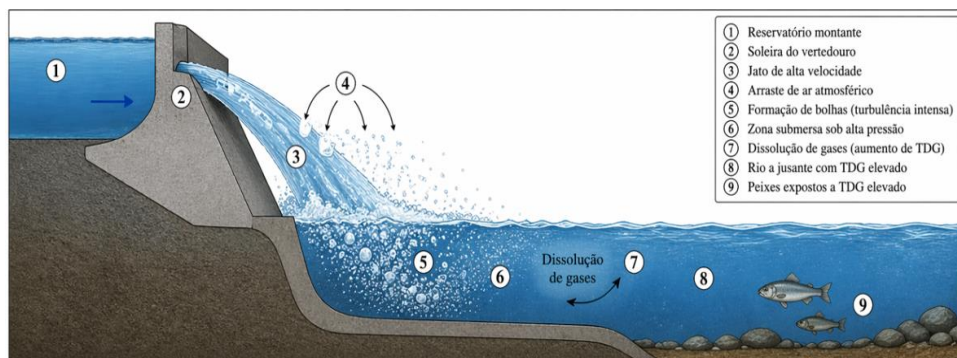
$$\Delta TDG(\%) = 14,094 \cdot e^{0,005 Q_{esp}} \quad (6)$$

Com base no parâmetro hidrodinâmico estabelecido, esta equação empírica projeta o incremento percentual de supersaturação ($\Delta TDG\%$) gerado pela turbulência e pelo mergulho do jato, forçando o gás para o interior da massa líquida. Os valores numéricos (14,094 e 0,005) atuam como coeficientes empíricos de calibração do sistema. A presença da função exponencial (e), é o elemento crítico do fenômeno: evidencia que a dissolução gasosa não cresce de forma linear, mas sofre uma aceleração severa e agressiva à medida que o jato ganha energia e mergulha em maiores profundidades. Então com base nessa equação é possível correlacionar com a saturação total a jusante de acordo com a equação 7:

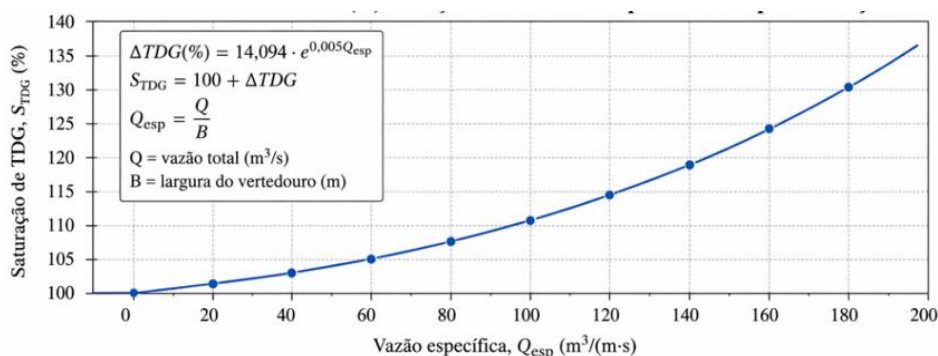
$$S_{TDG} = 100 + \Delta TDG \quad (7)$$

Por fim, o nível de saturação final no trecho do rio a jusante é determinado por esta soma, na qual ΔTDG representa a saturação total do gás dissolvido efetivamente imposta ao ecossistema aquático. O termo constante 100\$ estabelece o patamar base de referência, correspondente ao estado de equilíbrio termodinâmico natural da água sob pressão atmosférica normal (100% de saturação). S_{TDG} = saturação total de gás dissolvido (%);

Essa formulação permite relacionar, de maneira direta, a intensidade da descarga com o potencial de geração de supersaturação. Em termos práticos, ela mostra que grandes vazões concentradas em pequenas larguras tendem a elevar rapidamente o TDG, tornando esse parâmetro particularmente sensível às decisões de projeto e de operação. Desse modo, ainda que simplificada, a correlação adotada constitui uma ferramenta útil para interpretação preliminar do fenômeno e para discussão de seus possíveis efeitos em diferentes condições de vertimento.



(a)



(b)

Faixas de risco ecológico (referência)

$S_{TDG} \geq 125\%$	Alto risco de mortalidade (exposição de horas)
$115\% \leq S_{TDG} < 125\%$	Risco elevado de efeitos graves
$110\% \leq S_{TDG} < 115\%$	Risco moderado (estresse fisiológico)
$S_{TDG} < 110\%$	Risco baixo

Exemplo (B = 100 m):

Q = 5.000 m³/s	→	Q _{esp} = 50	→	S _{TDG} ≈ 112%
Q = 10.000 m³/s	→	Q _{esp} = 100	→	S _{TDG} ≈ 124%
Q = 15.000 m³/s	→	Q _{esp} = 150	→	S _{TDG} ≈ 129%

(c)

Figura 1 – (a) Processo de geração de TDG em vertedouro; (b) Relação entre vazão específica e supersaturação de TDG (adaptado de Feng *et al.*, 2018, p. 126); (c) Faixas de risco ecológico resultado obtido a partir de adaptação de referências da literatura (Weitkamp; Katz, 1980; Agostinho *et al.*, 2021; Colt, 1984; Cao *et al.*, 2016)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem simplificada e análise de cenários

O comportamento descrito pela Equação (6) é conceitualmente compatível com as Equações (1), (2) (3) e (4). As equações da continuidade e de Navier–Stokes mostram que o aumento da vazão específica tende a intensificar as velocidades, a turbulência e a interação entre água e ar no escoamento sobre vertedouros, favorecendo o arraste de bolhas e ampliando a área interfacial disponível para transferência de massa. Ao mesmo tempo, a Lei de Henry oferece a base físico-química para compreender que, quando essas bolhas são conduzidas a regiões submersas sob maior pressão, há maior tendência de dissolução gasosa no líquido. Desse modo, embora a Equação (6) não resulte de uma dedução analítica direta das equações fundamentais, ela se mostra coerente com os mecanismos físicos envolvidos na geração de supersaturação de TDG em vertedouros hidrelétricos.

A Equação (6) indica ainda que o incremento do TDG varia de forma exponencial com a vazão específica descarregada. Isso é relevante porque mostra que o risco ambiental não cresce de maneira simplesmente proporcional ao aumento da vazão, mas pode se intensificar mais rapidamente à medida que a descarga unitária se eleva. Em termos operacionais, isso significa que pequenos acréscimos de vertimento, em situações já sensíveis, podem produzir aumentos expressivos na supersaturação. Considerando-se uma estrutura hipotética com largura útil de 100 m, uma vazão total de 5.000 m³/s resulta em $Q_{esp} = 50\text{m}^2/\text{s}$, conduzindo a níveis estimados próximos de 112%. Esse valor já se encontra em faixa de atenção para exposições prolongadas. Para 10.000 m³/s, obtém-se, resultando em saturações próximas de 124%, patamar associado a estresse fisiológico severo e elevação do risco ecológico. Em um cenário de 15.000 m³/s, a vazão atinge $Q_{esp} = 150\text{m}^2/\text{s}$, aproximando-se de 129%, condição compatível com mortalidade significativa em períodos relativamente curtos (Agostinho *et al.*, 2021; Cao *et al.*, 2016).

Implicações ambientais e estratégias de mitigação

Esses resultados demonstram que o parâmetro ambiental não deve ser tratado como variável secundária ou apenas corretiva após a entrada em operação do empreendimento. O TDG precisa integrar os critérios de projeto desde as fases preliminares de concepção hidráulica. A largura útil do vertedouro, a divisão de vazão entre comportas, a profundidade da bacia dissipadora, o ângulo de lançamento do jato e o padrão de recirculação a jusante influenciam diretamente a incorporação de ar e a dissolução gasosa (Lu *et al.*, 2019; Politano, Castro e Hadjerioua, 2017). Em outras palavras, decisões geométricas tradicionalmente associadas à segurança hidráulica possuem também consequências ambientais mensuráveis.

Do ponto de vista da mitigação, observa-se que soluções puramente estruturais nem sempre são suficientes. Defletores, alterações no perfil do vertedouro, dissipadores com geometrias otimizadas e mudanças no padrão de impacto do jato podem reduzir a geração de TDG em determinadas condições (Andriolo, 2023). Entretanto, em muitos casos, a estratégia mais eficiente envolve medidas operacionais complementares, como redistribuição temporal de vertimentos, priorização da passagem de água por turbinas, limitação de picos unitários e coordenação entre barragens em cascata (Witt, Stewart e Hadjerioua, 2017; Politano, Castro e Hadjerioua, 2017). Isso demonstra que a solução do problema depende tanto de engenharia física quanto de inteligência operacional.

Em sistemas hidrelétricos em cascata, a discussão torna-se ainda mais complexa. A água supersaturada liberada por um reservatório pode alcançar o empreendimento seguinte sem dissipação

completa, gerando efeitos acumulativos ao longo do rio. Nessa situação, o gerenciamento isolado de cada barragem tende a ser insuficiente. Modelos integrados de bacia hidrográfica, com dados em tempo real e protocolos coordenados de operação, tornam-se mais adequados do que decisões locais desconectadas (Li Ran *et al.*, 2010; Li Yunfeng, Ni Chaohui e Shengqiang Zhang Yan, 2018).

A discussão sobre TDG evidencia a necessidade de abordagens integradas na engenharia contemporânea. A análise desse fenômeno não se limita à descrição hidráulica do escoamento, pois envolve também processos de incorporação de ar, transferência de massa, dissolução gasosa e propagação de efeitos a jusante. Em sistemas hidrelétricos, simulações computacionais, experimentos laboratoriais simplificados, análises comparativas entre cenários de operação e estudos de caso reais contribuem para compreender como decisões estruturais e operacionais influenciam a geração e o transporte da supersaturação (Witt, Stewart e Hadjerioua, 2017; Politano, Castro e Hadjerioua, 2017). De forma mais ampla, a discussão sobre TDG mostra que a infraestrutura não deve ser avaliada apenas em termos de segurança estrutural e eficiência energética, mas também quanto à sua capacidade de operar dentro de limites ambientalmente aceitáveis e socialmente legitimados. Assim, a Mecânica dos Fluidos amplia seu papel clássico e passa a integrar, de forma direta, a análise de sustentabilidade aplicada aos empreendimentos hidráulicos.

CONCLUSÃO

O presente estudo consolida a avaliação da supersaturação de gás total dissolvido (TDG) em grandes vertedouros não apenas como um fenômeno biológico de impactos severos (Doença das bolhas de gás), mas sobretudo como um problema clássico de mecânica dos fluidos e transferência de massa. A revisão teórica aliada à descrição vetorial das equações governantes comprovou que a fenomenologia da aeração e dissolução excessiva provém do acoplamento termodinâmico entre as flutuações turbulentas do campo de velocidades e o aumento de pressão hidrostática regido pela Lei de Henry no fundo da bacia de dissipação.

A modelagem paramétrica empírica implementada atesta, de forma inegável, a sensibilidade exponencial do risco ecológico: taxas de escoamento unitário (Q_{esp}) elevadas induzem rapidamente níveis de saturação superiores a 120%, configurando ameaça letal à ictiofauna a jusante. Conclui-se, portanto, que a engenharia de recursos hídricos contemporânea não deve tratar as consequências da aeração como passivos secundários. O dimensionamento de bacias de dissipação, o uso de defletores e os algoritmos de operação de comportas devem incorporar a mitigação do TDG aos requisitos primários de projeto, harmonizando a segurança de barragens com a preservação sistêmica e ecológica dos rios.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Engenharia Hídrica e Engenharia Mecânica da UNIFEI, ao Instituto de Recursos Naturais, ao Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, à SINOP, ao Laboratório Thermo-Hydroelectro (LTHE/UNIFEI), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao CNPq (Processo nº 305059/2022-0) e aos demais órgãos e colaboradores que apoiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, A. A.; ALVES, D. C.; GOMES, L. C.; DIAS, R. M.; PETRERE JR., M.; PELICICE, F. M. *Fish die-off in river and reservoir: a review on anoxia and gas supersaturation. Neotropical Ichthyology*, v. 19, n. 3, 2021. DOI: 10.1590/1982-0224-2021-0037.

- ANDRIOLO, M. V. *Installation of deflector in Colider Dam to minimize the percentual of total dissolved gases*. Brazilian Journal of Water Resources, v. 28, 2023.
- CAO, L.; LI, K.; LIANG, R.; CHEN, S.; JIANG, W.; LI, R. *The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation*. Aquaculture Research, v. 47, n. 9, p. 2804-2813, set. 2016. DOI: 10.1111/are.12730.
- COLT, J. *Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity, and pressure*. Bethesda: American Fisheries Society, 1984.
- FENG, J.; WANG, L.; LI, R.; LI, K.; PU, X.; LI, Y. *Operational regulation of a hydropower cascade based on the mitigation of the total dissolved gas supersaturation*. Ecological Indicators, v. 92, p. 124-132, set. 2018. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.015.
- LI, P.; ZHU, D. Z.; LI, R.; WANG, Y.; CROSSMAN, J. A.; KUHN, W. L. *Production of total dissolved gas supersaturation at hydropower facilities and its transport: a review*. Water Research, v. 223, p. 119012, set. 2022. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119012.
- LI, RAN et al. *Dispositivo para o estudo da geração supersaturada de gás dissolvido total na água e seu impacto nos peixes*. CN201479739U, 2010.
- LI, YUNFENG; NI, CHAOHUI; ZHANG YAN, SHENGQIANG. *Dispositivo de geração de água supersaturada*. CN206863597U, 1 set. 2018.
- LU, J. et al. *Energy dissipation efficiency as a new variable in the empirical correlation of total dissolved gas*. Scientific Reports, v. 11, n. 1, p. 7414, abr. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-86144-y.
- LU, J. et al. *Model for total dissolved gas supersaturation from plunging jets in high dams*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 145, n. 1, jan. 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001550.
- POLITANO, M.; CASTRO, A.; HADJERIOUA, B. *Modeling total dissolved gas for optimal operation of multireservoir systems*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 143, n. 6, jun. 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001287.
- WEITKAMP, D. E.; KATZ, M. *A review of dissolved gas supersaturation literature*. Transactions of the American Fisheries Society, v. 109, n. 6, p. 659-702, nov. 1980. DOI: 10.1577/1548-8659(1980)109<659:ARODGS>2.0.CO;2.
- WITT, A.; STEWART, K.; HADJERIOUA, B. *Predicting total dissolved gas travel time in hydropower reservoirs*. Journal of Environmental Engineering, v. 143, n. 12, dez. 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001281.