

CAUSAS E EFEITOS DE BAROTRAUMA EM PEIXES DE ÁGUA DOCE DURANTE A PASSAGEM EM TURBINAS DE USINAS HIDRELÉTRICAS: UMA BREVE REVISÃO

Natália C. B. Marciano¹; Luma S. Dias¹; Bernardo V. Beirão² & Luiz Gustavo M. Silva³

Resumo – O rápido crescimento populacional humano que estamos vivendo na atualidade traz consigo um enorme apetite por recursos para se sustentar. A crescente demanda por energia tem gerado grandes investimentos no setor hidrelétrico. As usinas hidrelétricas podem causar diversos impactos ao meio ambiente, dentre eles, a mortalidade de peixes pela passagem pelas turbinas. As variações de pressão a que esses peixes se submetem ao passar por uma turbina, podem gerar barotraumas (como exoftalmia, eversão do estômago e intestino, embolia, etc.). Foi realizado um levantamento bibliográfico acerca do assunto para melhor compreensão das causas e efeitos. Foi observado que maiores variações sofridas, causam maiores traumas aos peixes. É constatada a baixa quantidade de informação sobre o assunto, principalmente quando se trata do conhecimento relativo à espécies e usinas brasileiras. Está em formação, um grupo multidisciplinar com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o assunto, tendo como foco espécies, rios e usinas nacionais.

Palavras-Chave – Barotrauma, turbinas hidrelétricas, peixes

CAUSES AND EFFECTS OF BAROTRAUMA IN FRESHWATER FISHES AFTER PASSAGE THROUGH HYDROPOWER TURBINES: A BRIEFLY REVIEW

Abstract – The fast human population growth that we are experiencing nowadays, brings in it a huge appetite for resources. Increasing demand on energy has led great investments on the hydroelectric sector. Hydroelectric power plans can cause several environmental impacts, fish mortality through turbine passage is one of them. When passing through a turbine, fish suffer pressure variations which can cause barotraumas (such as exophthalmia, stomach and gut eversion, embolism, etc.). We conducted a literature review on the subject to better understanding of causes and effects. It was observed that when larger variations occurred, fish suffered major traumas. It was found that there is low amount of information on the subject, especially when it comes to the knowledge on Brazilian species and power plans. Due to that, it is being formed a multidisciplinary group with the aim of increasing knowledge about the subject, focusing on domestic species, rivers and power plants.

Keywords – Barotrauma, hydroelectric turbine, fishes.

¹ Acadêmicas do curso de Engenharia Civil/UFSJ - natyy3m@hotmail.com, lumadias_mtpo@hotmail.com

² Mestrando do PPGTDS/UFSJ – bvbeirao@gmail.com

* Autor Correspondente: PPGTDS/CAP/UFSJ – luizsilva@ufsj.edu.br

I - INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com mais de 184 milhões de habitantes, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004) destaca-se como a quinta nação mais populosa do mundo, e apresenta perspectivas macroeconômicas muito positivas. Nessa trajetória de crescimento, a sociedade sente a necessidade de melhorar os padrões sociais e econômicos e superar as desigualdades existentes. Para tanto, é preciso aumentar a produção industrial e a oferta de serviços, exigindo um maior consumo e geração de energia elétrica. (Castro *et al.*, 2012).

Em 2008, cerca de 95% da população tinha acesso à rede elétrica. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), nesse período, o país contava com mais de 61,5 milhões de unidades consumidoras em 99% dos municípios brasileiros. De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG), da ANEEL, nesse mesmo ano o Brasil contava com 1.768 usinas em operação, que correspondiam a uma capacidade instalada de 104.816 MW (megawatts) – número que exclui a participação paraguaia na usina de Itaipu. Do total de usinas, 159 são hidrelétricas, 1.042 térmicas, 320 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), duas nucleares, 227 centrais geradoras hidrelétricas (pequenas usinas hidrelétricas) e uma solar.

Atualmente o BIG relaciona 130 empreendimentos em construção e mais 469 outorgados, o que permite a inserção de mais 33,8 mil MW na capacidade já instalada no país, maior parte desses empreendimentos provém de usinas hidrelétricas.

A construção de hidrelétricas, de uma forma geral, produz impactos ambientais, sociais e econômicos sobre o meio ambiente natural e humano existentes na área de sua influência, interferindo na biota aquática e terrestre, além de influenciar na riqueza cultural e histórica da região. Mesmo diante de inúmeros impactos ambientais gerados, as hidrelétricas ainda são vistas no cenário brasileiro como a alternativa mais viável, devido a energia gerada ser proveniente de uma fonte renovável e disponível, além do baixo custo de produção (Batista *et al.*, 2012).

Os impactos gerados sobre a biota aquática constitui uma das principais ameaças a manutenção da biodiversidade de ecossistemas aquáticos, podendo ser notados tanto a jusante quanto a montante da barragem. Considerando-se a biota aquática, os peixes podem ser destacados como um dos grupos que mais sofre a influência dessas alterações ambientais (Silva, 2009). A jusante dos barramentos, o controle do regime de cheias afeta a biota aquática através da redução das áreas de planície alagada, retenção de nutrientes e alteração nos habitats. A montante das barragens, os impactos dependem das características do reservatório, desenho da barragem, procedimentos operacionais, descarga, tipos de solo e interação com outras barragens (Agostinho *et al.*, 2005).

Outro importante problema ambiental em usinas hidrelétricas é a lesão e mortandade em peixes que passam pelas turbinas. Existem espécies de peixes que devem passar de rios de água doce para o mar como parte de seu ciclo de vida, e também espécies que fazem migrações de longa distância dentro dos sistemas de água doce e muitas vezes encontram hidrelétricas e turbinas ao longo do caminho. Há uma estimativa em que 5% dos peixes que passam pelas turbinas convencionais morrem, mas a mortalidade também pode estar associada a outros fatores, e pode exceder 30% (Cada, 2001).

Alguns mecanismos em turbinas de hidrelétricas resultam na mortalidade e lesões em peixes, como mudanças rápidas e extremas de pressão, cavitação, tensões de cisalhamento, turbulência, entre outras (Cada, 2001). Apesar de terem sido identificados os fatores de possíveis lesões, até recentemente, pouco se sabe sobre a localização e magnitude desses fenômenos dentro de turbinas (Cada *et al.*, 2006).

No Brasil, ao provocar danos à fauna de peixes, as hidrelétricas estão sujeitas à penalidades previstas em lei, pela legislação federal (Lei de Crimes Ambientais, Lei 9.605 de 13/02/98) e, portanto, sujeitas às penalidades previstas. Com isso, diversos empreendedores vêm buscando, constantemente, medidas que visem mitigar esses impactos, de modo a evitar desastres ambientais.

Dessa forma, a realização de estudos para avaliar os efeitos da descompressão sobre peixes de água doce neotropicais constitui objeto de interesse de todo o setor elétrico. A análise desses efeitos torna possível a compreensão de quais lesões podem ser causadas pela descompressão e quais os limites para que elas não ocorram, contribuindo sobremaneira para o desenho e elaboração de projetos de turbinas menos danosas à ictiofauna.

II- BAROTRAUMA – EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS

A passagem de peixes através de uma turbina pode expô-los a uma variedade de diferentes forças (por exemplo, força de corte, colisão com estruturas), que pode ocasionar em lesões. Quando os mesmos passam entre as pás da turbina sofrem uma queda súbita de pressão, que pode ocorrer em um tempo menor que um segundo antes de regressar a pressão superficial (Brown *et al.*, 2012).

Essa rápida diminuição da pressão pode levar a lesões de barotrauma, que habitualmente incluem bexiga natatória rompida, exoftalmia, hemorragia interna, bolhas de gás nas brânquias e barbatanas de peixes (Brown *et al.*, 2009). As lesões relacionadas com o barotrauma podem ocorrer através de duas vias principais, a primeira é regida pela lei de Boyle, em que a injúria ocorre devido à expansão de gás livre dentro do corpo do peixe. A segunda é governada pela lei de Henry, em que o gás deve se separar da solução devido a redução, induzida pela descompressão, na solubilidade resultando em formação de bolhas. A lei de Boyle é representada pela equação:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (1)$$

Em que P_1 e V_1 são a pressão inicial e o volume, respectivamente, e P_2 e V_2 são a resultante da pressão e volume final, quando a temperatura é fixada dentro de um sistema fechado, mostrando que o volume de um gás é inversamente proporcional à pressão absoluta que atua no volume (Brown *et al.*, 2012).

E a lei de Henry é representada pela equação:

$$P = K \cdot X \quad (2)$$

Em que X é a fração molar de equilíbrio do gás em solução (sua solubilidade), P é a pressão parcial na fase gasosa, e K é a constante de proporcionalidade, ou constante da lei de Henry. Essa fórmula mostra que quanto maior a pressão sofrida, maior a quantidade de moles de gás dissolvido no sangue.

O barotrauma, causado pela descompressão, é caracterizado pela expansão do volume de gás de qualquer órgão de suporte, tal como a bexiga natatória, ou do gás livre dentro do corpo de um peixe ou a liberação de gás a partir da solução no sangue. O gás liberado a partir da solução pode interferir na função do órgão. Aumentos na pressão interna do vaso podem causar a ruptura do vaso e hemorragia subsequente. As causas mais comuns de morte imediata são a asfixia (a partir de êmbolos nas brânquias), hemorragia e interrupção do funcionamento do coração (Brown *et al.*, 2009). Quando a tensão de gás livre e em solução no corpo de um peixe está em equilíbrio com a da água circundante, esses podem estar em maior risco de sofrer barotrauma (Brown *et al.*, 2012).

III - FATORES QUE INFLUENCIAM A OCORRÊNCIA DE BAROTRAUMAS DURANTE A PASSAGEM POR TURBINAS

Para se estabelecerem no meio aquático, os peixes apresentam uma série de adaptações fundamentais, como na natação e flutuação. O esforço contínuo através da natação, impedindo que seu corpo afunde, seria altamente custoso energeticamente. Atingir flutuabilidade neutra (capacidade de se estabilizar em determinadas profundidades sem utilizar esforço muscular) permite minimizar os custos energéticos da natação (Cech e Moyle, 2000).

Dentre as formas de atingir flutuabilidade neutra, a principal utilizada por peixes neotropicais de água doce é através da regulação de gás na bexiga natatória. A bexiga natatória é uma vesícula, constituída de tecido de fibras de colágeno entrelaçadas e se localiza entre a cavidade peritoneal e a coluna vertebral, ocupando cerca de 7% do volume corpóreo de teleósteos de água doce (Pough *et al.*, 2008). A flutuabilidade neutra é obtida quando o gás no interior da bexiga natatória faz com que a densidade do peixe iguale a densidade da água circundante (Pflugrath *et al.*, 2012). Ela permite controle preciso da flutuabilidade, pois o gás contido nela pode ser regulado com certa facilidade (Bone e Moore, 2008).

A bexiga natatória possui variações entre formato e conexões com outros órgãos internos (Bone e Moore, 2008). Na ontogenia, a bexiga surge a partir de um divertículo no sistema digestivo (Bone e Moore, 2008). Peixes fisóstomos (a maioria das espécies de água doce) mantêm uma conexão entre o esôfago e a bexiga (chamado ducto pneumático), conseguindo engolir ar da superfície e forçando sua entrada na bexiga, ou liberando-o no sentido inverso (Brown *et al.*, 2012; Stephenson *et al.*, 2010).

Peixes fisóclistos realizam essa troca de gases através de duas glândulas, uma que permite a absorção de gás O₂ (principalmente) da circulação sanguínea para a bexiga e outra que realiza a secreção do O₂ para o sangue (Bone e Moore, 2008; Pough *et al.*, 2008). Essa forma de troca de gás costuma ser mais eficaz, pois o peixe retira o O₂ dissolvido na água, não precisando engolir ar da superfície (Cech e Moyle, 2000).

Os peixes realizam migrações verticais durante diferentes períodos do dia. Quando um peixe desce, a bexiga natatória é comprimida, e quando ele sobe, a bexiga natatória se expande. Os peixes compensam essas variações absorvendo ou expulsando gás da bexiga natatória, e quando passam por uma situação de descompressão rápida podem sofrer lesões atribuídas pela expansão excessiva da bexiga natatória. A ruptura de bexiga natatória ocorre quando as pressões decrescentes expandem rapidamente o gás, em um volume maior do que pode conter dentro da bexiga (Pflugrath *et al.*, 2012).

Quanto maior a profundidade maior o aumento de pressão sobre o peixe, que faz com que o volume da bexiga natatória diminua proporcionalmente. Quando o peixe se encontra na flutuabilidade positiva sua cabeça orienta-se para baixo, quando se encontra na flutuabilidade negativa sua cabeça orienta-se para cima e na flutuabilidade neutra o peixe tende a permanecer horizontalmente, conforme ilustrado na figura 1 (Pflugrath *et al.*, 2012).

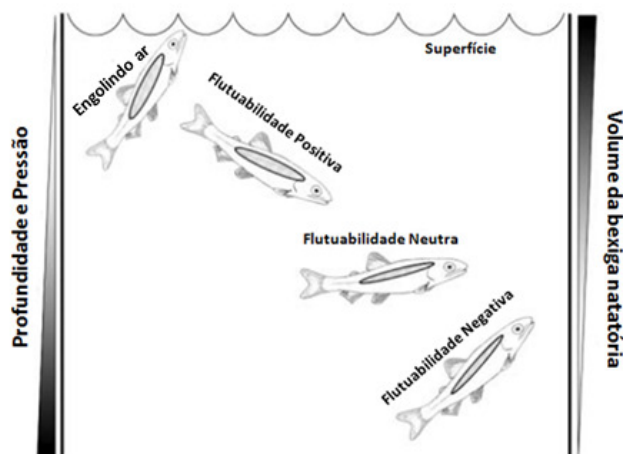


Figura 1 – Variação da condição da flutuabilidade em razão do volume da bexiga natatória e da profundidade.
(Adaptado de Pflugrath *et al.*, 2012).

A gravidade da decompressão durante a passagem dos peixes pela turbina depende do funcionamento, da concepção do corredor e da submersão da câmara da turbina, também é influenciada pela carga total do projeto e da direção do fluxo da água. As pressões são geralmente mais elevadas próximo à seção frontal da lâmina da turbina, lado a montante, e inferior próximo à entrada do tubo de sucção, lado a jusante (Brown *et al.*, 2012).

Stephenson *et al.* (2010) realizaram uma simulação de passagem de peixes por turbinas. Essa simulação utilizou salmões jovens vivos em um aparato experimental que produz as mesmas variações de pressão de uma turbina. Os resultados foram comparados com um teste realizado por Deng *et al.* (2007, *apud* Stephenson *et al.*, 2010) utilizando um sensor de pressão, com as características biométricas do salmão (denominado “sensor fish”), enviado por turbinas tipo Kaplan em uma usina hidrelétrica. A figura 2 apresenta a comparação realizada por Stephenson *et al.* (2010), sendo a linha pontilhada os dados captados pelo sensor fish, a linha contínua os dados obtidos através dos testes com peixes, e a linha tracejada representa o trajeto simulado nos dois testes. É importante conhecer o valor de menor pressão que um peixe é submetido na passagem pela turbina, que pode ser considerada como pressão limite, referente ao tempo de aproximadamente 25 segundos no eixo horizontal conforme a figura a seguir (Stephenson *et al.*, 2010).

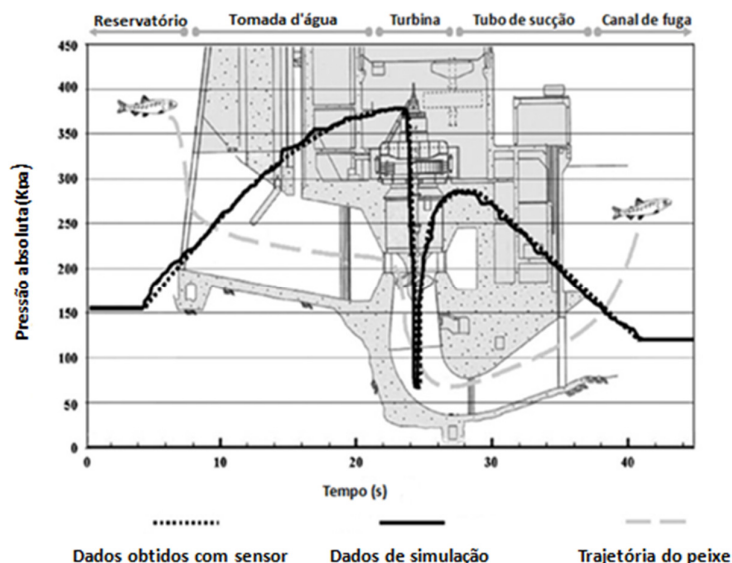


Figura 2 – Simulação da passagem do peixe por uma turbina.
(Adaptado de Stephenson *et al.*, 2010)

IV – CONCLUSÕES

Diante do cenário atual em que usinas hidrelétricas são de suma importância para a economia e geração de energia no país, e devido a altas taxas de mortalidade e injúrias em peixes que passam pelas turbinas, faz-se necessário o estudo das causas e efeitos de barotrauma através de testes em laboratório. Os testes consistem na simulação da decompressão sofrida por peixes de água doce ao passarem pelas turbinas. Após os testes, observa-se o comportamento dos peixes, a análise das injúrias (quando presentes) e a possível *causa mortis*.

O barotrauma é caracterizado pela expansão do volume de gás de qualquer órgão de suporte (tal como a bexiga natatória), do gás livre dentro do corpo ou a dissolução de gás no sangue. Existem diferentes morfologias da bexiga natatória. Essas variações influenciam na forma como o gás é eliminado durante a decompressão. Peixes fisóstomos tem maior facilidade de expelir o gás em expansão na bexiga, em relação aos fisóclistos. Essa facilidade pode minimizar os possíveis barotraumas, tais como o rompimento da bexiga natatória. A rápida decompressão pode causar outras lesões, como exoftalmia, eversão do estômago e intestino, embolia, hemorragia interna, entre outras.

Conclui-se que a gravidade da decompressão durante a passagem dos peixes pela turbina é fator preponderante para a mortalidade dos mesmos e tem relação direta com projeto e operação de cada turbina. Abre-se, portanto, um vasto campo de pesquisa, para o desenvolvimento de projetos de turbinas menos danosas a ictiofauna.

A partir do cenário encontrado, decidiu-se pela formação de um grupo técnico multidisciplinar, a fim de se realizar estudos utilizando como foco principal a situação que ocorre no Brasil. Os testes serão realizados com espécies nativas, com histórico de mortalidade por passagem por turbinas. Serão consideradas, também, as características dos rios, das usinas e, principalmente, dos projetos e procedimentos operacionais das turbinas já instaladas e futuras.

V – REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A.A.; THOMAZ, S.M.; GOMES, L.C. (2005). Conservação da biodiversidade em águas continentais do Brasil. In: Megadiversidade: desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade no Brasil. Conservation International, v.1, n.1, pp.1-216.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2008). Atlas da energia elétrica no Brasil. Brasília, 3Ed, 236p.
- BATISTA, B. M. F.; SÁNCHEZ, D. C. M.; SILVA, J. V.; MARTINEZ, D. T.; PASA, M. C. (2012). Revisão dos impactos ambientais gerados na fase de instalação das hidrelétricas: Uma análise da sub-bacia do Alto Juruena- MT. Biodiversidade - V.11, N1, pp. 69 – 85.
- BONE, Q.; MOORE, R.H. (2008) Biology of Fishes. Taylor & Francis Group. 3a ed. 478p.
- BROWN, R.S.; CARLSON, T.J.; GINGERICH, A.J.; STEPHENSON, J.R.; PFLUGRATH, B.D.; WELCH, A.E.; LANGESLAY, M.J.; AHMANN, M.L.; JOHNSON, R.L.; SKALSKI, J.R.; SEABURG, A.G.; TOWNSEND, R.L. (2012): Quantifying Mortal Injury of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage. Transactions of the American Fisheries Society, 141:1, pp.147-157.
- BROWN, R.S.; PFLUGRATH, B.D.; COLOTELO, A.H.; BRAUNER, C.J.; CARLSON, T.J.; DENG, Z.D.; SEABURG, A.G. (2012). Pathways of barotrauma in juvenile salmonids exposed to simulated hydroturbine passage: Boyle's law vs. Henry's law. Fisheries Research, 121-122. pp.43-50.
- BROWN, R.S.; CARLSON, T.J.; WELCH, A.E.; STEPHENSON, J.R.; ABERNETHY, C.S.; EBBERTS, B.D.; LANGESLAY, M.J.; AHMANN, M.L.; FEIL, D.H.; SKALSKI, J.R.; TOWNSEND, R.L. (2009). Assessment of barotrauma from rapid decompression of depth-acclimated juvenile Chinook salmon bearing radiotelemetry transmitters. Transactions of the American Fisheries Society. 138, pp.1285-1301.
- CADA, G. F. (2001). The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. Fisheries. 26:14–23.
- CADA, G.; LOAR, J.; GARRISON, L.; FISHER Jr., R.; NEITZEL, D. (2006). Efforts to reduce mortality to hydroelectric turbine-passed fish: Locating and quantifying damaging shear stresses. Environmental Management, vol.37, No. 6, pp.898-906
- CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A.; LEITE, A. S. (2012). A real questão de Belo Monte: ter ou não ter. Jornal Valor Econômico, Caderno A. Opinião, p. A8.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2004). Censo Demográfico: Resultados preliminares – São Paulo, Rio de Janeiro.
- MOYLE, P.B.; CECH, Jr., J.J. (2000) Fishes: An introduction to ichthyology. Prentice Hall. 4a ed. 612p.
- PFLUGRATH, B.D.; BROWN, R.S.; CARLSON, T.J. (2012). Maximum neutral buoyancy depth of juvenile Chinook salmon: Implications for survival during hydroturbine passage. Transactions of the American Fisheries Society, 141:2, 520-525.
- POUGH, F.H.; HEISER, J.B.; JANIS, C.M. (2008). A vida dos vertebrados. 4. ed. São Paulo: Atheneu. 699p.

SILVA, L. G. M. (2010). Estudo de sistemas para repulsão de peixes como alternativas de mitigação de impacto ambiental em usinas hidrelétricas e canais para abastecimento de água. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, 178p.

STEPHENSON, J.R.; GINGERICH, A.J.; BROWN, R.S.; PFLUGRATH, B.D.; DENG, Z.; CARLSON, T.J.; LANGESLAY, M.J.; AHMANN, M.L.; JOHNSON, R.L.; SEABURG, A.G. (2010). Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory. Fisheries Research, 106. pp.271-278.