

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO EM ESCADAS PARA PEIXES COM RANHURA VERTICAL CONSTRUÍDAS NO BRASIL

Rodrigo Soares Morais¹ & Daniela Guzzon Sanagiotto²

RESUMO – Os barramentos em cursos d’água ocasionam diversos impactos na ictiofauna devido à fragmentação dos rios impedindo a transposição de organismos aquáticos. O objetivo deste trabalho é analisar as características hidrodinâmicas de três escadas de peixes de ranhuras verticais, implantadas no Brasil, utilizando ferramentas de fluidodinâmica computacional, e comparar o comportamento do escoamento destas estruturas. As escadas de peixes escolhidas para a pesquisa estão localizadas no estado de Minas Gerais, nos barramentos das Usinas Hidroelétricas de: (1) Igarapava, (2) Aimorés e (3) Baguari. Para os três dispositivos foram realizadas simulações e avaliadas as características do escoamento, considerando velocidade (V), energia cinética da turbulência (k) e potência dissipada por unidade de volume (P_v). Com os resultados das simulações pôde-se observar que a escada para peixes de Baguari possuiu valores superiores para as três variáveis de interesse quando comparada às de Igarapava e Aimorés. Isto era esperado, visto que a declividade e o desnível entre tanques de (3) são maiores do que os outros dois dispositivos.

Palavras-Chave – CFD; ictiofauna; transposição.

1. INTRODUÇÃO

A fragmentação de cursos d’água com a implantação de barragens causa grandes alterações no ambiente. Um dos principais impactos ambientais causados por barramentos é o impedimento da passagem dos organismos aquáticos que necessitam se deslocar para alimentação, reprodução, entre outros motivos (Sanagiotto *et al.*, 2019). Com o intuito de diminuir os danos ambientais que afetam, principalmente, peixes migratórios, podem ser utilizados Mecanismos de Transposição para Peixes (MTP). MTPs são obras hidráulicas construídas junto aos barramentos, quando necessário, tendo como objetivo permitir a transposição de peixes e outras espécies, que migram ao longo do rio para desempenhar determinadas funções biológicas, como, por exemplo, a reprodução. As escadas para peixes são um tipo de MTP, e estas podem ser construídas com orifícios, descarregadores de superfície, ranhuras verticais, entre outros.

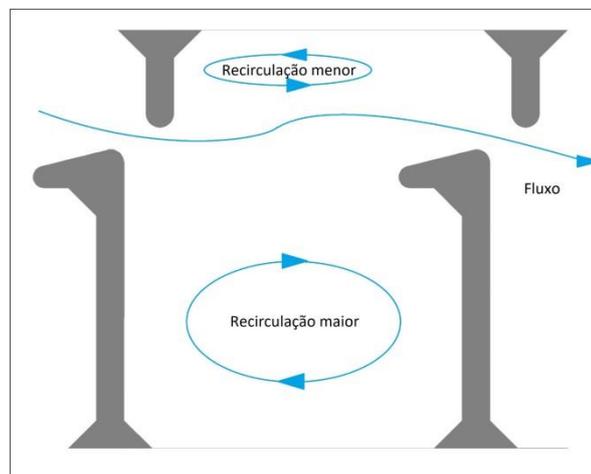
Escadas do tipo ranhura vertical são canais retangulares constituídos por uma série de tanques sucessivos em desníveis, dotados de defletores, os quais dividem os tanques, e ranhuras, conduzindo a água do reservatório gerado pelo barramento para o trecho de rio a jusante, como mostra a Figura 1. A água esco de um tanque a outro passando por ranhuras verticais, o escoamento forma um jato entre ranhuras consecutivas e a energia do jato é dissipada pela mistura da água no tanque (Rajaratnam *et al.*, 1986). Esse tipo de escada é mais adequado para peixes que

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS – soares.morais@ufrgs.br

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS – dsanagiotto@ufrgs.br

nadam na corrente (não saltadores), pois o único caminho pelo qual os peixes podem transpor esta escada é entre as ranhuras. Essas estruturas podem apresentar diferentes tamanhos e disposição das ranhuras, dependendo da capacidade natatória dos peixes que irão utilizá-las.

Figura 1 - Representação simplificada do padrão de circulação em um tanque de uma escada para peixes com ranhura vertical. Fonte: Própria



No Brasil, existem algumas escadas de ranhura vertical como, por exemplo, nos barramentos das UHEs Igarapava, Aimorés, Baguari e Belo Monte. No entanto, este tipo de escada não é o mais utilizado no país, embora pelas características do escoamento elas têm demonstrado ser uma boa alternativa para peixes presentes nos rios brasileiros. Neste trabalho, busca-se avaliar e comparar características hidrodinâmicas do escoamento em três escadas com ranhura vertical construídas no Brasil. Os resultados buscam fornecer subsídios para definir melhores alternativas, considerando as características do escoamento, velocidade (V), energia cinética da turbulência (k) e potência dissipada por unidade de volume (P_v), mais adequadas para os peixes do Brasil. Com isso, podem-se definir geometrias que são mais adequadas considerando critérios hidráulicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição das estruturas

As estruturas utilizadas para este estudo são de escadas para peixes por tanques sucessivos com ranhuras verticais. As estruturas utilizadas para este estudo são de escadas do tipo ranhura vertical construídas no Brasil, na UHE Igarapava, na UHE Aimorés e na UHE Baguari, alternativas 1, 2 e 3, respectivamente. A alternativa 1, implantada na UHE Igarapava foi avaliada anteriormente em Junho e Tamada (2004), Junho (2008), Viana (2005) e Sanagiotto *et al.*, (2012), enquanto que a alternativa 2, implantada na UHE Aimorés foi avaliada em Junho e Tamada (2004) e Junho (2008). Não é de conhecimento dos autores que tenham sido realizados estudos em modelos físicos relacionados com a estrutura considerada na alternativa 3.

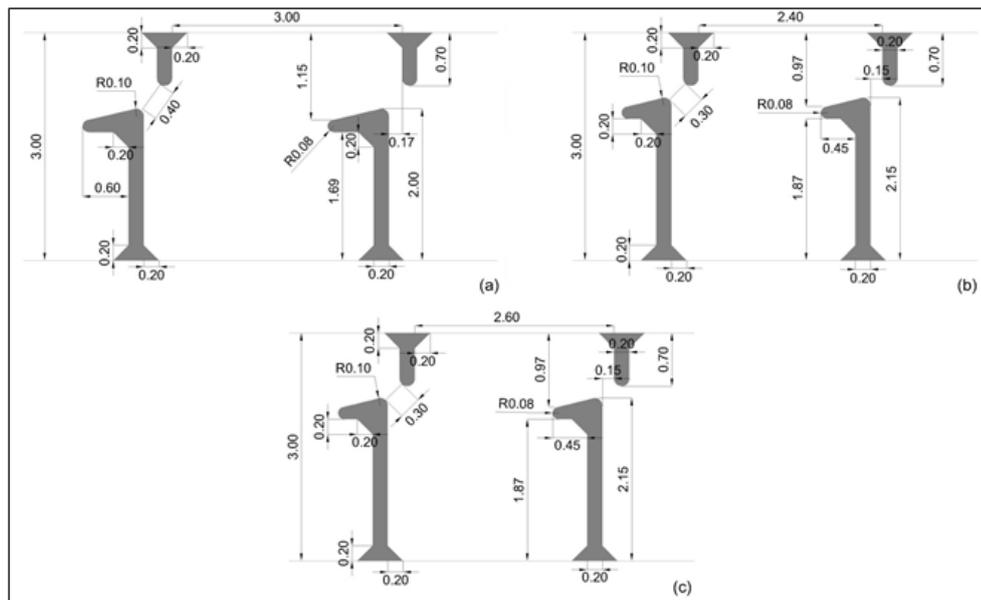
Nas simulações foram utilizados nove tanques em cada escada. As dimensões e declividade das escadas são apresentadas na Tabela 1. Detalhes do tanque representativo de cada alternativa são apresentados na Figura 2, a qual mostra a diferença no comprimento do tanque L nas três alternativas, a diferença na largura da ranhura vertical na alternativa de Igarapava, igual a 0,40 m, em relação às outras duas (0,30 m) e a diferença entre as declividades das escadas, sendo de 6% para Igarapava e 8% para as outras.

Tabela 1 - Características das escadas estudadas, sendo: B a largura do tanque; L a comprimento do tanque; b_0 largura da ranhura vertical; s a declividade longitudinal

Escada	B (m)	L (m)	b_0 (m)	s (°)
Igarapava	3,00	3,00	0,40	0,06
Aimorés	3,00	2,40	0,30	0,08
Baguari	3,00	2,60	0,30	0,08

Figura 2 - Configurações dos defletores em planta: (a) Igarapava; (b) Aimorés; (c) Baguari (dimensões em metros).

Fonte: Própria



2.2. Vazões adimensionais

Para auxiliar no processo da definição das condições de contorno para as simulações, e fornecer dados para a validação das simulações, foram considerados dados experimentais obtidos por Sanagiotto (2007) e Junho (2008), além da utilização de equações de vazão adimensional. Foram consideradas a vazão adimensional Q_1^* (Equação 1), apresentado em Rajaratnam (1986), a vazão adimensional Q_2^* (Equação 2), apresentado em Puertas (2004), e a vazão adimensional Q_3^* (Equação 3), apresentado em Puertas (2004). Com a utilização dos dados experimentais e as relações adimensionais, pode-se relacionar vazões a profundidades médias do escoamento.

$$Q_1^* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0 b_0^5}} \quad (1)$$

$$Q_2^* = \frac{Q}{\sqrt{g b_0^5}} \quad (2)$$

$$Q_3^* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0 b_0^2 L^3}} \quad (3)$$

Em todas as alternativas, foi utilizada a mesma vazão de entrada de 1,00 m³/s. Na Tabela 3 pode-se observar as profundidades médias nos tanques para as três alternativas.

Tabela 3 - Vazões e profundidades médias das alternativas

Escada	Q (m ³ /s)	y ₀ (m)
Igarapava	1,00	1,47
Aimorés	1,00	1,76
Baguari	1,00	1,53

2.3. Simulação numérica

Primeiramente, utilizou-se o programa AutoCAD para fazer a geometria das 3 escadas cada uma com 9 tanques e uma região de entrada e outra região de saída. Para a simulação numérica tridimensional do escoamento, foi utilizado o programa comercial Ansys-CFX. O modelo utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações do escoamento. A turbulência foi modelada utilizando-se a decomposição de Reynolds, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) em três dimensões. A simulação considerou o escoamento em condição isotérmica, mantendo as propriedades físicas da água constantes. O modelo de turbulência foi o k-ε, o mesmo utilizado por Sanagiotto *et al.* (2019).

Para as alternativas 1, 2 e 3 foram feitas simulações nas quais foi utilizada uma malha não estruturada, tetraédrica com refinamento junto aos defletores. Para a estrutura de Igarapava, a malha foi feita com cerca de 6,6 x 10⁵ nós e 2,5 x 10⁶ elementos, enquanto para as estruturas de Aimorés e Baguari, a malha possuiu 6,4 x 10⁵ nós e 2,3 x 10⁶ elementos no início das simulações.

Condições de contorno foram aplicadas em todas as faces do domínio para as escadas. Na entrada do escoamento foi informada a vazão mássica e uma intensidade turbulenta alta de 10%. Na saída da escada foram testadas algumas pressões até que o padrão de escoamento e a profundidade média no tanque central fossem adequados. No interior da escada, condições de contorno de não deslizamento foram aplicadas em todas as paredes (laje de fundo, paredes laterais e defletores), como utilizado em Rossi e Sanagiotto (2019).

2.4. Análise de dados

Com os resultados das simulações foi possível elaborar campos de escoamento e a frequência acumulada no tanque para as variáveis de interesse: velocidade (V), energia cinética da turbulência (k) e potência dissipada por unidade de volume (P_v). A partir destes resultados foi possível comparar os valores máximos dessas grandezas no plano a meia profundidade paralelo ao fundo. A validação do modelo não será apresentada neste artigo. Ela já foi apresentada em trabalhos anteriores como Sanagiotto *et al.* (2019) e Rossi e Sanagiotto (2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com as simulações do escoamento são apresentados para o tanque central para as alternativas 1, 2 e 3, Igarapava, Aimorés e Baguari, respectivamente. Em todas as alternativas se obteve um padrão do escoamento com a formação de duas zonas de recirculação e entre elas o surgimento de um fluxo de água passando por entre os defletores ao longo de toda escada, apresentado na Figura 3.

3.1. Velocidade

Observou-se que nos campos de velocidade, os valores máximos de velocidade, apresentados na Tabela 4, nas três alternativas foram registrados logo após as ranhuras verticais próximo aos defletores. Verificou-se também que os valores de V nas zonas de recirculação são menores que 0,74 m/s, em todas as alternativas, mostrando que mesmo com velocidades altas no jato a grande parte dos tanques possuem valores baixos de velocidade, que podem ser vistos no gráfico da Figura 3. Na figura 4 pode-se visualizar a distribuição de frequência das velocidades para as três geometrias.

Figura 3 – Campos de velocidades das alternativas (1) Igarapava, (2) Aimorés e (3) Baguari

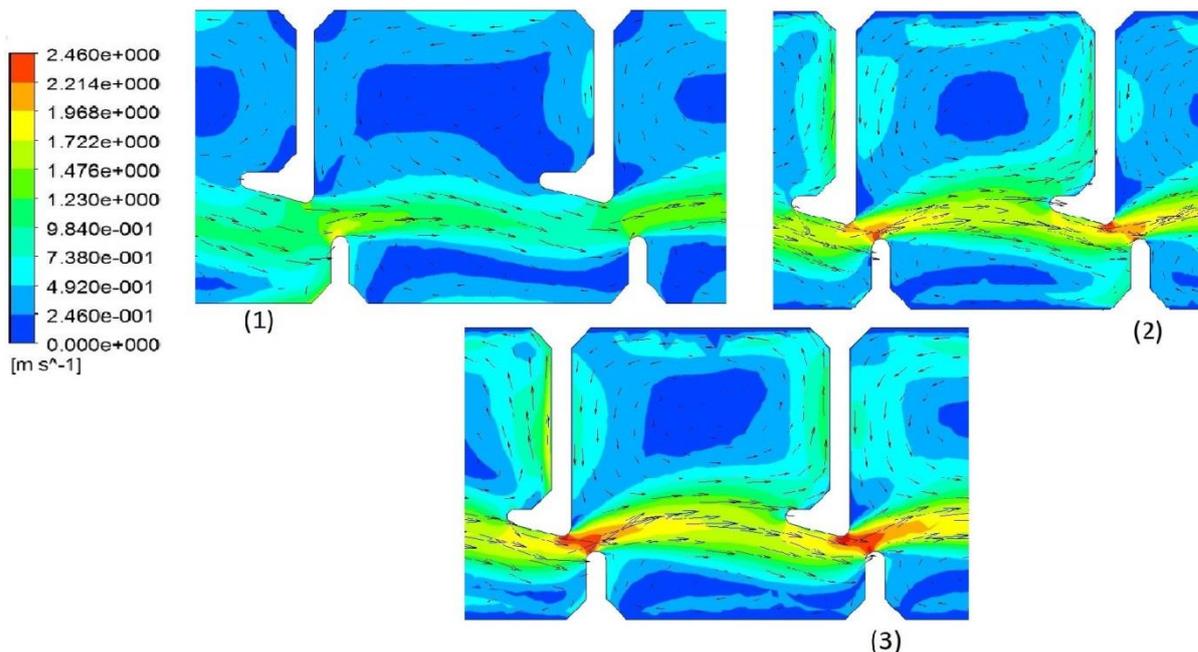
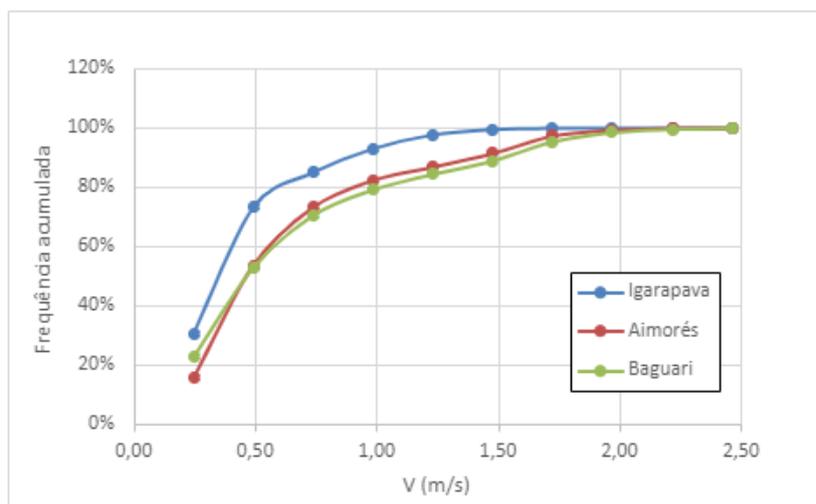


Tabela 4 – Valores máximos de V para as três alternativas

Escadas	$V_{\text{máx}}$ (m/s)
Igarapava	1,99
Aimorés	2,62
Baguari	2,72

Figura 4 – Frequência acumulada dos valores de V das alternativas 1, 2 e 3



3.2. Energia cinética da turbulência - k

Para os valores de k, observou-se que os valores máximos para as três alternativas são registrados logo após a ranhura vertical junto aos defletores menores, apresentados nas Figura 5 e Tabela 5. Avaliando os campos de k na Figura 5 criou-se um gráfico da frequência acumulada de cada valor para a variável, mostrando que em todas as alternativas no tanque central pelo menos 57% dos valores de k foram menores que 0,05 m²/s², apresentado na Figura 6. Segundo Tan *et al.* (2018), em escadas tipo ranhura vertical, os peixes preferem nadar em áreas com k entre 0,02 m²/s² e 0,035 m²/s².

Figura 5 – Campos de k das alternativas 1, 2 e 3

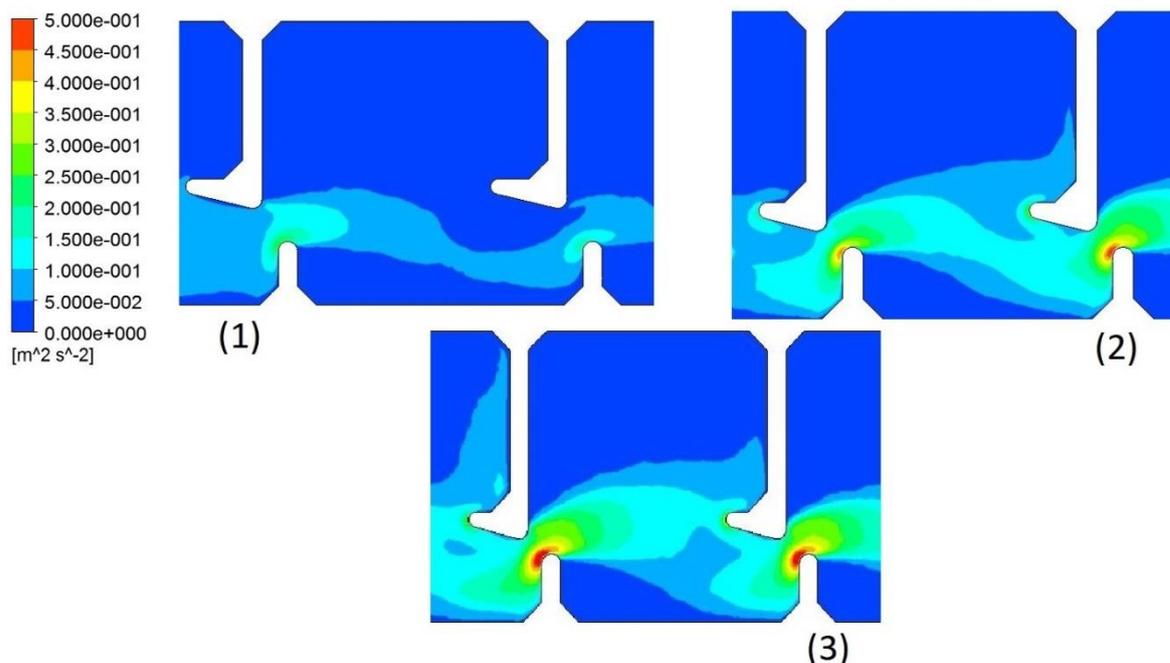


Tabela 5 –Valores máximos de k para as três alternativas

Escadas	k _{máx} (m ² /s ²)
Igarapava	0,25
Aimorés	0,50
Baguari	0,57

3.3. Potência dissipada por unidade de volume – P_v

Com relação a variável P_v, observou-se que os valores máximos foram registrados logo após a ranhura vertical junto ao defletor menor e são apresentados nas Figura 7 e Tabela 6. Avaliando os campos de P_v na Figura 7 criou-se um gráfico da frequência acumulada de cada valor para a variável. O gráfico, apresentado na Figura 8, mostrou que em todas as alternativas no tanque central pelo menos 77% dos valores de P_v foram menores que 112 W/m³. Segundo Bell (1990), o valor máximo de P_v tolerado pelos peixes salmonídeos é de 191 W/m³, enquanto para peixes ciprinídeos e mais fracos, de acordo com Fao (2002); Larinier (2002), o valor máximo é de 150 W/m³.

Figura 6 – Frequência acumulada dos valores de k das alternativas 1, 2 e 3

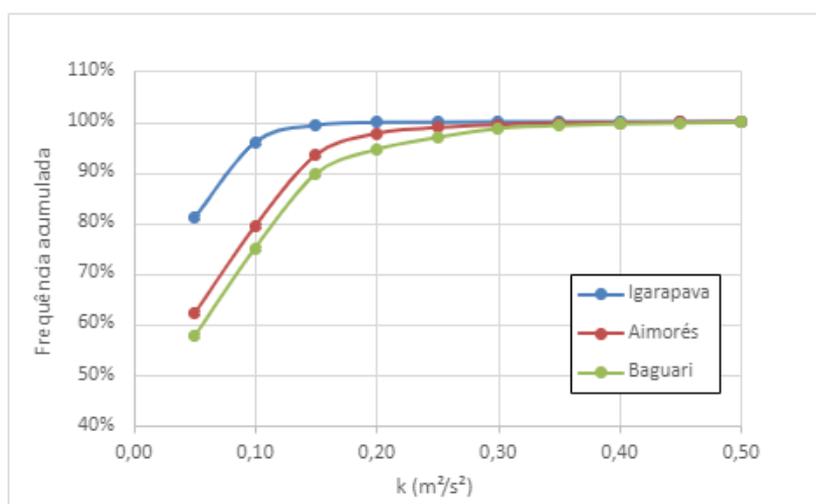


Figura 7 – Campos de P_v das alternativas 1, 2 e 3

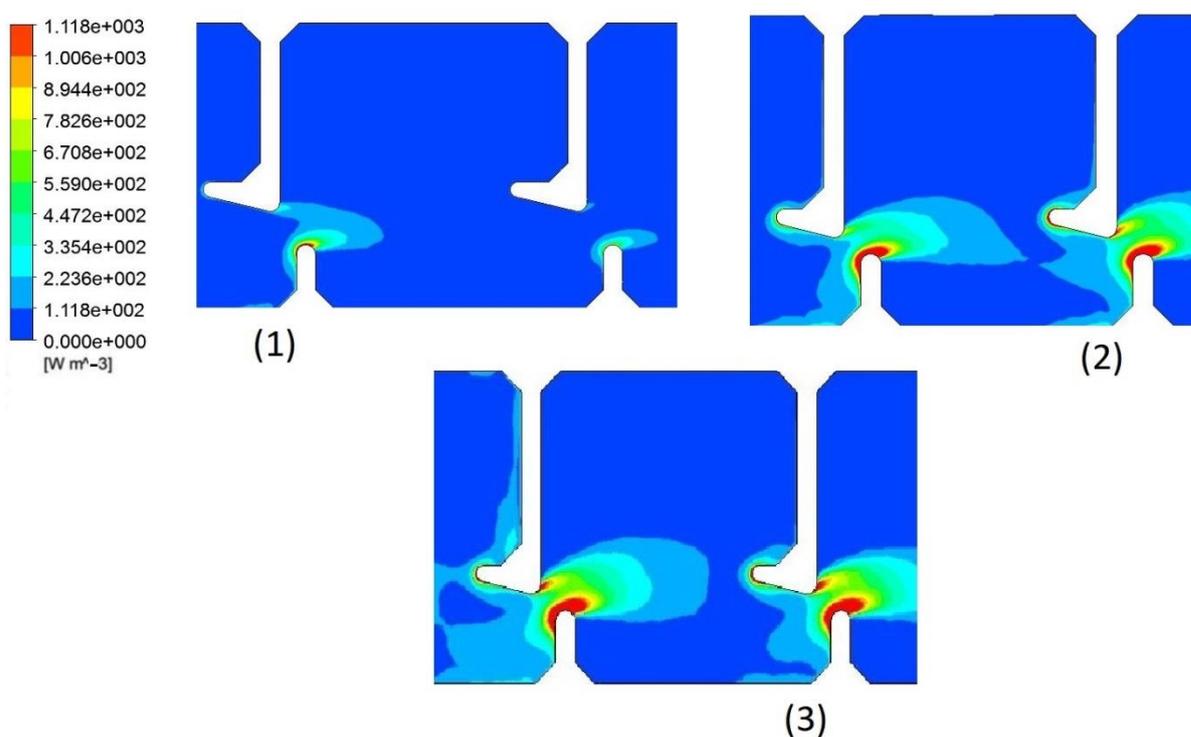
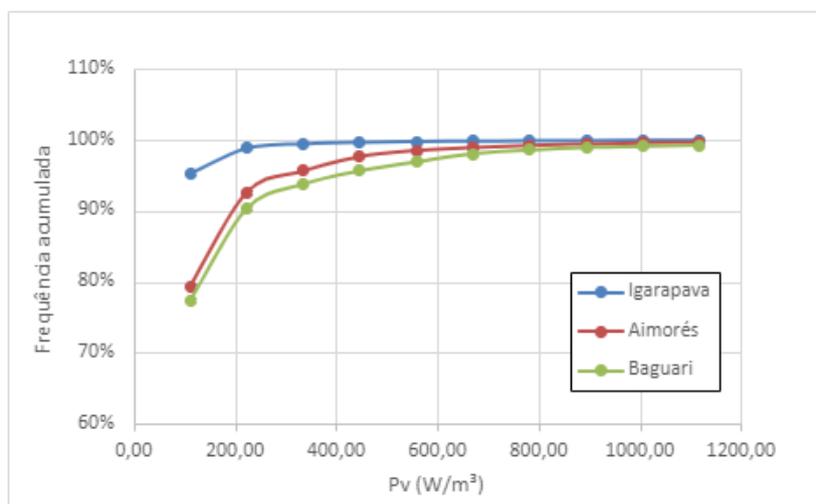


Tabela 6 – Valores máximos de P_v para as três alternativas

Escadas	$P_{v\text{máx}}$ (W/m³)
Igarapava	2520
Aimorés	2740
Baguari	2930

Figura 8 – Frequência acumulada dos valores de P_v das alternativas 1, 2 e 3



4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar padrões do escoamento de três dispositivos construídos em barramentos no Brasil. A partir dos dados apresentados para as três alternativas pode-se concluir que Baguari obteve valores máximos maiores para todas as variáveis estudadas (V , k , P_v) em relação às alternativas. Isto ocorre devido a alternativa 3 possuir maior declividade s que o dispositivo de Igarapava e comprimento do tanque L maior que o dispositivo de Aimorés, resultando em um maior desnível entre tanques consecutivos. Conclui-se então, quanto maior a velocidade V no tanque de uma escada, maior serão a energia cinética da turbulência k e a potência dissipada por unidade de volume P_v . Os resultados obtidos também permitem relacionar informações das características hidráulicas do escoamento com valores tolerados pelas espécies de peixes que utilizam tais estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PROPESQ pelo auxílio concedido ao projeto e à UFGRS pela concessão da bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- BELL, M. (1990). *Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria*. 3rd ed. Portland: Corps of Engineers, North Pacific Division, 1990.
- FAO (2002). *Food and agriculture organization of the united nations*. DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Fish passes: design, dimensions and monitoring. Rome, 2002.
- JUNHO, R.A.C.; TAMADA, K. (2004). “Estudos hidráulicos em modelo reduzido de escadas de peixes tipo vertical slot”. XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulico, São Paulo, Outubro, 2004.
- JUNHO, R.A.C. (2008). “Migrações ascendentes de peixes neotropicais e hidrelétricas: proteção a jusante de turbinas e vertedouros e sistemas de transposição”. Tese de doutorado, Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 216 p; doi:10.11606/T.3.2008.tde-09022009-183724.

LARINIER, M. (2001). “*Environmental Issues, Dams and Fish Migration*”, in Dams, Fish and Fisheries – Opportunities, Challenges and Conflict Resolution FAO, Roma, p. 45-90.

LARINIER, M. (2002). “*Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels*”, in Bulletin Francais de la Pêche et de la Pisciculture, v. 364, p. 54-82, 2002. <http://dx.doi.org/10.1051/kmae/2002108>.

MARTINS, S.L. (2005). “*Sistemas para a Transposição de Peixes Neotropicais Potamódromos*”. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP.

RAJARATNAM, N.; VAN DER VINNE, G.; KATOPODIS, C. (1986). “*Hydraulics of vertical slot fishways*”. Journal of Hydraulic Engineering, v. 112, n. 10, p. 909-927, 1986. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:10\(909\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:10(909)).

ROSSI, J.B.; SANAGIOTTO, D.G. (2019). “*Uso de elementos cilíndricos em escadas para peixes de ranhuras verticais para obtenção de parâmetros do escoamento mais favoráveis*” in Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, 2019,

SANAGIOTTO, D.G. (2007). “*Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas*”. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.

SANAGIOTTO, D.G.; PINHEIRO, A.N.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M.G. (2011). “*Estudo experimental das características do escoamento em escadas para peixes do tipo ranhura vertical: turbulência do escoamento*”. RBRH v. 16, n. 4, p. 195-205, 2011. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p195-205>.

SANAGIOTTO, D.G.; PINHEIRO, A.N.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M.G. (2012). “*Estudo Experimental das Características do Escoamento em Escadas para Peixes do Tipo Ranhura Vertical — Padrões Gerais do Escoamento*”. RBRH vol.17 n.1, p. 135-148. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n1.p135-148>.

SANAGIOTTO, D.G.; ROSSI, J.B.; BRAVO, J.M. (2019). “*Applications of Computational Fluid Dynamics in The Design and Rehabilitation of Nonstandard Vertical Slot Fishways*”. Water 2019, 11, 199; doi:10.3390/w11020199.

SANAGIOTTO, D.G.; ROSSI, J.B.; LAUFFER, L.L.; BRAVO, J.M. (2019). “*Three-dimensional numerical simulation of flow in vertical slot fishways: validation of the model and characterization of the flow*”. RBRH vol.24, Porto Alegre, Epub, Apr 11; doi.org/10.1590/2318-0331.241920180174.

SANTO, M. (2005). “*Aspectos a ter em conta na concepção de um dispositivo de passagem para peixes – desenho e dimensionamento*”, in Dispositivos de passagens para peixes em Portugal – DGRF, Lisboa, p. 17-38.

SILVA, L.G.M.; NOGUEIRA, L.B.; MAIA, B.P.; RESENDE, L.B. (2012). “*Fish passage post-construction issues: analysis of distribution, attraction and passage efficiency metrics at the Baguari Dam fish ladder to approach the problem*”, in Neotropical Ichthyology, 10(4):751-762, 2012.

VIANA, E.M.F. (2005). “*Mapeamento do campo de velocidades em mecanismos de transposição de peixes do tipo slot vertical em diferentes escalas*”. Tese Doutorado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.