

# COMPARAÇÃO DA DISSIPACÃO DE ENERGIA NA ESCADA DE PEIXES DO TIPO RANHURA VERTICAL COM DUAS FORMAS CONSTRUTIVAS DE TANQUES

*Edna Maria de Faria Viana<sup>1</sup> & Carlos Barreira Martinez<sup>2</sup>*

**RESUMO** --- Os peixes migradores necessitam se deslocar entre regiões distintas para completar seu ciclo de vida. Com a crescente demanda por energia elétrica, abastecimento de água e demais usos tem-se construído em larga escala barramentos nos rios que acabam impedindo o deslocamento desses peixes. Com o intuito de atenuar esse impacto, Mecanismos de Transposição para Peixes (MTP) têm sido construído nos barramentos. Uma preocupação na construção desse tipo de sistema é com a dissipação de energia nos tanques, pois, quando essa é muito elevada pode levar os peixes a stress e desorientação. Diante desse fato, alguns autores limitaram o valor máximo de dissipação de energia para alguns MTP. Esse trabalho busca comparar a dissipação de energia em MTP do tipo ranhura vertical com duas relações comprimento / largura dos tanques distintos, com o intuito de verificar qual das duas formas possui menor dissipação de energia e a velocidade máxima encontrada no tanque.

**ABSTRACT** --- Migrant fishes must move to different places in their cycles of life. However dams have been built to supply the increasing demand of energy, water and others impeding this migration. To reduce this impact, on the cycle of life of the migrant fish, fishways are built in dams. Knowledge about energy dissipations in the pools from fishway is import because it can cause stress and disorientation of the fish when it is high. Thus, the energy dissipation must be limited in these systems. This work compares the energy dissipation and the high velocity in a vertical slot fishway using two pool dimensions.

**Palavras-chave:** Dissipação de energia, mecanismo de transposição para peixes.

---

1) Professora adjunta da UFMG, CPH, Av. Antônio Carlos 6627,31.270-901 Belo Horizonte. E-mail [ednamfv@ufmg.br](mailto:ednamfv@ufmg.br)  
2) Professor adjunto da UFMG, CPH, Av. Antônio Carlos 6627,31.270-901 Belo Horizonte. E-mail [martinez@cce.ufmg.br](mailto:martinez@cce.ufmg.br)

# 1 - INTRODUÇÃO

As populações de peixes são altamente dependentes das características dos seus habitats aquáticos. Isso se torna mais evidente nos casos de peixes que necessitam migrar para completarem seu ciclo de vida. Na migração para reprodução (“piracema”) os peixes encontram diferentes tipos de obstáculos, que podem ser naturais (vales estreitos, corredeiras e cachoeiras) ou artificiais (represas e barragens), impedindo sua subida e descida. Essa restrição a livre circulação que impossibilita a migração no ciclo de vida dos peixes, isola e separa populações e pode diminuir drasticamente o número de espécies encontrado no local (Puertas *et al.*, 2004) é denominada efeito de barreira.

Para atenuar os efeitos negativos ocorridos nos barramentos das usinas hidrelétricas foram promulgadas leis no Brasil. As primeiras leis que obrigava a construção de sistemas que permitam a migração dos peixes no período da piracema surgiram em 1927. No entanto, houve uma preocupação maior nesse sentido a partir da década de noventa, com o surgimento de novos decretos e leis (Viana, 2005).

Os dispositivos de transposição de peixes podem ser agrupados em três categorias gerais: eclusas, elevadores e escadas.

As eclusas são mecanismos constituídos por canais que ligam o reservatório de jusante com o de montante e são controladas por comportas. Os peixes são atraídos, pelo jato de atração, entram na câmara inferior (a jusante do barramento) e a comporta se fecha. Neste momento uma válvula se abre para que toda a câmara se encha até atingir o nível do reservatório superior. Em seguida a comporta da câmara superior se abre (a montante). Quando os peixes terminam de transpor o sistema, a comporta superior se fecha e a inferior se abre e o processo se inicia novamente.

Os elevadores podem ser de dois tipos com caminhão tanque e sem. No caso sem caminhão tanque, os peixes são atraídos até uma câmara com uma comporta que se fecha, os peixes são conduzidos até uma caçamba e por um guindaste são elevados até o reservatório de montante. Com o auxílio de um caminhão tanque uma caçamba é colocada no caminhão, e este a leva até o reservatório de montante onde os peixes são descarregados.

As escadas são geralmente constituídas de uma série de tanques em desníveis que conduzem água do reservatório para o canal de fuga. Os tanques são separados por defletores que têm como objetivo dissipar a energia do escoamento, de modo a permitir o deslocamento dos peixes, de jusante para montante, nadando ou saltando de um tanque para outro, de acordo com a construção dos mesmos (Martinez *et al.*, 2000). As escadas mais comuns atualmente são do tipo Denil, tanque com vertedor, canais naturais e ranhuras verticais. A escada Denil é composta por vários tanques separados por anteparos inclinados em 45° e com uma abertura na região central. Este mecanismo

possui declividade geralmente superior a 20% e, assim, elevadas velocidades no sistema. O tipo tanque com vertedor (pool and weir) é composto por tanques separados por vertedores, que podem ter aberturas superiores e inferiores e/ou orifícios. A água passa acima dos vertedores, pelas aberturas e/ou orifícios, tendo velocidades elevadas. O tipo canal natural é composto por um canal natural separados por anteparos geralmente de pedras e terra. Este tipo de mecanismo requer uma grande área para sua instalação. A escada do tipo ranhura vertical (vertical slot) é composta por tanques separados por anteparos, de diferentes formas, dispostos nas duas paredes laterais do canal. O fato de se ter uma abertura para a passagem do peixe em diferentes alturas e velocidades, torna este sistema não seletivo quando comparado como as escadas do tipo Denil e tanque com vertedor.

A utilização de escadas pode ser considerada prática usual em desníveis inferiores a 10 m. Na faixa de 10 a 20 m, escadas, eclusas e elevadores podem ser utilizados. As eclusas são utilizadas geralmente para a transposição de desníveis não superiores a 40 m (Pavlov, 1989). Os elevadores possibilitam a transposição em qualquer faixa de desnível. O que define a construção de cada um destes é o custo do empreendimento.

Além dos fatores hidrodinâmicos, a eficiência das passagens para peixes depende das características físicas e biológicas típicas das espécies de peixes migratórios consideradas. Assim as velocidades do fluido nos orifícios e anteparos devem ser menores que a velocidade de explosão do peixe (do inglês “burst”: velocidade na qual o peixe pode se manter por um período curto, equivalente a um esforço não sustentável), e a velocidade da água, no tanque, deve ser menor que a velocidade de cruzeiro (do inglês “cruising”: velocidade na qual o peixe pode se manter por um longo período - horas) (Martinez *et al.*, 2000). Outra característica a ser levada em consideração na construção das escadas é a dissipação de energia nos tanques, pois caso os valores de dissipação sejam muito elevados os peixes podem sofrer stress e se desorientarem. Assim, alguns autores limitaram o valor de dissipação de energia em alguns tipos de MTP.

Na escada de peixes, do tipo Denil, existe uma corrente helicoidal secundária a qual é extremamente eficiente na dissipação de energia do escoamento devido a transferência de quantidade de movimento (Larinier, 2001). Essa corrente é formada devido à configuração complexa dos anteparos

Para mecanismos do tipo tanque com vertedor o volume do tanque é determinado pela dissipação de energia por volume do tanque, o máximo valor é 200 W/m<sup>3</sup> para salmões, e entre 100 W/m<sup>3</sup> e 150 W/m<sup>3</sup> para outras espécies. Esta dissipação de energia dá uma idéia da turbulência média e aeração do tanque (Larinier, 1998).

A dissipação de energia nos tanques, da escada do tipo ranhura vertical, não pode ser muito elevada para não desorientar os peixes, sendo limitada ao valor inferior a 191 kW/m<sup>3</sup> (Bell, 1973).

Para a determinação da dissipação de energia utiliza-se a equação 1.

$$k = \frac{Q\gamma\Delta h}{BLy_0} \quad (1)$$

Em que:  $\gamma$  é peso específico da água ( $\text{N/m}^3$ ),  $B$  a largura do tanque (m),  $L$  o comprimento do tanque,  $\Delta h$  perda de carga (m) e  $y_0$  a altura média da lamina d'água (m).

Esse trabalho busca correlacionar a dissipação de energia e a máxima velocidade no tanque da escada do tipo ranhura vertical, com tanques construídos na relação comprimento / largura igual a 1 (quadrado), construído na UHE de Igarapava, e na relação igual a 1,25, dimensões definidas por Rajaratnam *et al.* (1992).

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os mecanismos de transposição do tipo ranhura vertical possuem geralmente comprimento e largura dos tanques correspondentes a  $8 b_0$  e  $10 b_0$  (relação comprimento / largura igual a 1,25), respectivamente (onde  $b_0$  é a abertura entre os anteparos). Esses valores são considerados como os que promovem melhor eficiência no sistema, segundo estudos de Rajaratnam *et al.* (1992). Entretanto, o mecanismo de transposição, construído na UHE de Igarapava não respeita essas dimensões, tendo  $7,5 b_0$  de largura e  $7,5 b_0$  de comprimento cada tanque do mecanismo (relação comprimento / largura igual a 1,00).

Assim, realizou-se um estudo que mostra a variação da dissipação de energia no tanque da escada de peixes, com as dimensões da UHE de Igarapava e com as dimensões estipuladas como ideais por Rajaratnam *et al.* (1992).

Os teste foram realizados em um modelo reduzido, escada 1:20, da escada da UHE de Igarapava, mostrado na figura 1.

Esse sistema é composto por um tanque superior que representa o reservatório superior da UHE, possui o corpo da escada em acrílico, e o reservatório inferior correspondente a calha do rio onde se localiza a entrada da escada de peixes.

Realizou-se testes no modelo com diferentes vazões, como pode ser observado no Quadro 1. Em cada uma delas foi determinada a altura da lâmina d'água no centro do tanque ( $y_0$ ) e a diferença de altura da lamina entre os tanques, correspondente a perda de carga no tanque ( $\Delta h$ ).

Após esse levantamento, os dados foram convertidos utilizando similaridade de Froude para vazões e alturas correspondentes no protótipo. A partir daí determinou-se a correlação da altura da lâmina d'água com a abertura da ranhura ( $y_0/b_0$ ) e a dissipação de energia nos tanques dessa escada

( $k$ ), equação 1. A vazão adimensional ( $Q_*$ ), utilizada no projeto mecanismo de transposição de peixes do tipo ranhura vertical, foi obtida pela equação 2.



Figura 1 – modelo reduzido, escala 1:20, do MTP da UHE de Igarapava

Quadro 1 – Vazões de teste

Q (l/s)									
0,28	0,35	0,42	0,48	0,56	0,63	0,70	0,77	0,84	0,91

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0b_0^5}} \quad (2)$$

Em que:  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $S_0$  é a declividade do tanque ( $m/m$ ),  $b_0$  é a abertura da ranhura ( $m$ ).

Em seguida realizaram-se os mesmos cálculos, utilizando as dimensões do tanque na relação comprimento / largura de 1,25, descritas por Rajaratnam *et al.* (1992).

Para os dois casos foram realizados novos testes para a verificação da inclinação máxima possível para que a dissipação de energia não supere o valor considerado como limite ( $0,191 \text{ kW}/m^3$ ) para esse tipo de mecanismo.

Outro parâmetro importante de ser medido é a velocidade máxima admitida no tanque, pois, tem uma relação direta com a capacidade de nado dos peixes. Wu *et al.* (1999) realizaram um

estudo para a verificação das estruturas do escoamento em escada com ranhuras verticais, observando que a máxima velocidade aproximada nas ranhuras ( $V_{max}$ ) pode ser encontrada pela equação 3. Assim, levantou-se a velocidade máxima que seria encontrada para as diferentes inclinações e parâmetros construtivos da escada.

$$V_{max} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (3)$$

Em que:  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) e  $\Delta h$  é a diferença de altura da lâmina d'água entre os tanques (m)

#### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Rajaratnam *et al.*(1986) se a altura da lamina d'água nos tanques permanecer constante, o escoamento pode ser considerado uniforme. As alturas da lamina d'água nos tanque com relação comprimento / largura igual a 1,00 (tanque quadrado) estão apresentadas na figura 2.

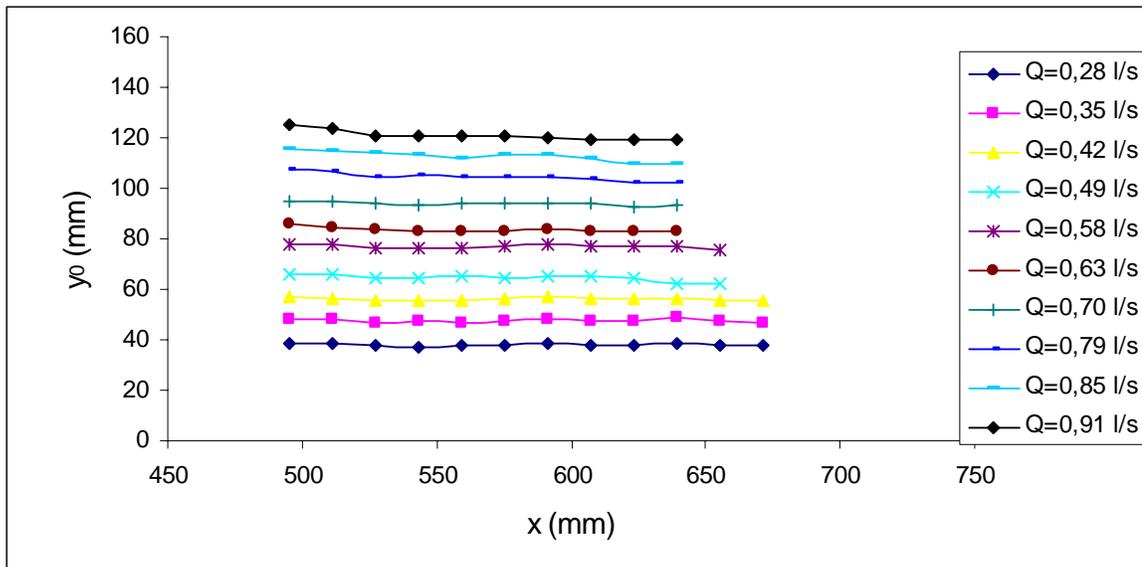


Figura 2 – Correlação da altura da lamina de água nos diferentes tanques

Pela figura 2 pode-se observar que o escoamento pode ser considerado uniforme, assim, a equação 2 pode ser utilizada para a determinação da vazão adimensional. Em seguida determinaram-se outros parâmetros, tais como dissipação da energia e relação altura da lamina d'água / abertura da ranhura ( $y_0/b_0$ ), como pode ser observado no Quadro 2.

Os parâmetros construtivos utilizados para os cálculos foram da escada de peixes da UHE de Igarapava, quais sejam: declividade de 6%, abertura da ranhura  $b_0 = 0,4$  m, largura de  $7,5 b_0 = 3$  m e comprimento de  $7,5 b_0 = 3$  m (relação comprimento / largura do tanque igual a 1,00).

Quadro 2 – Parâmetros para a escada de peixes relação comprimento / largura igual a 1,00

Q (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	Q·	y <sub>0</sub> /b <sub>0</sub>	Δh (m)	k (W/m <sup>3</sup> )
0,50	0,77	6,45	1,92	0,18	128,03
0,63	0,97	8,06	2,43	0,18	126,38
0,75	1,14	9,68	2,84	0,18	129,50
0,88	1,31	11,29	3,28	0,18	131,01
1,04	1,56	13,36	3,90	0,18	130,22
1,13	1,68	14,52	4,20	0,18	131,35
1,25	1,90	16,13	4,74	0,18	129,31
1,41	2,08	18,20	5,21	0,18	132,90
1,52	2,27	19,59	5,67	0,18	131,39
1,63	2,40	20,97	6,00	0,18	132,81

Na condição construtiva, mostrada pela tabela 2, a diferença de nível entre as escadas seria de 0,18 m, assim utilizando a equação 3 chegou-se a velocidade máxima de 1,9 m/s no tanque.

Para se determinar os parâmetros de uma escada de peixes com tanques com relação comprimento / largura igual a 1,25 (8 b<sub>0</sub> = 3,2 m de largura e 10 b<sub>0</sub> = 4 m de comprimento), mantendo a declividade de 6%, a abertura da ranhura b<sub>0</sub> = 0,40 m, foram determinadas as vazões adimensionais, as alturas das lamina d'água, e as dissipações de energia, que podem ser observados no quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros para a escada de peixes relação comprimento / largura igual a 1,25

Q (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	Q·	y <sub>0</sub> /b <sub>0</sub>	Δh (m)	k (W/m <sup>3</sup> )
0,50	0,80	6,45	2,01	0,24	114,60
0,63	0,97	8,06	2,43	0,24	118,06
0,75	1,14	9,68	2,86	0,24	120,49
0,88	1,32	11,29	3,29	0,24	122,29
1,04	1,54	13,36	3,84	0,24	124,01
1,13	1,66	14,52	4,14	0,24	124,77
1,25	1,83	16,13	4,57	0,24	125,67
1,41	2,05	18,20	5,12	0,24	126,60
1,52	2,20	19,59	5,49	0,24	127,11
1,63	2,34	20,97	5,86	0,24	127,56

Determinou-se a velocidade máxima encontrada no tanque, equação 3, para os parâmetros construtivos mostrados na tabela 3, e chegou-se ao valor de 2,2 m/s.

A correlação da vazão com a altura no centro do tanque ( $y_0$ ), e a correlação da vazão pela dissipação de energia, para as duas relações comprimento / largura, podem ser observadas nas figuras 3 e 4 respectivamente.

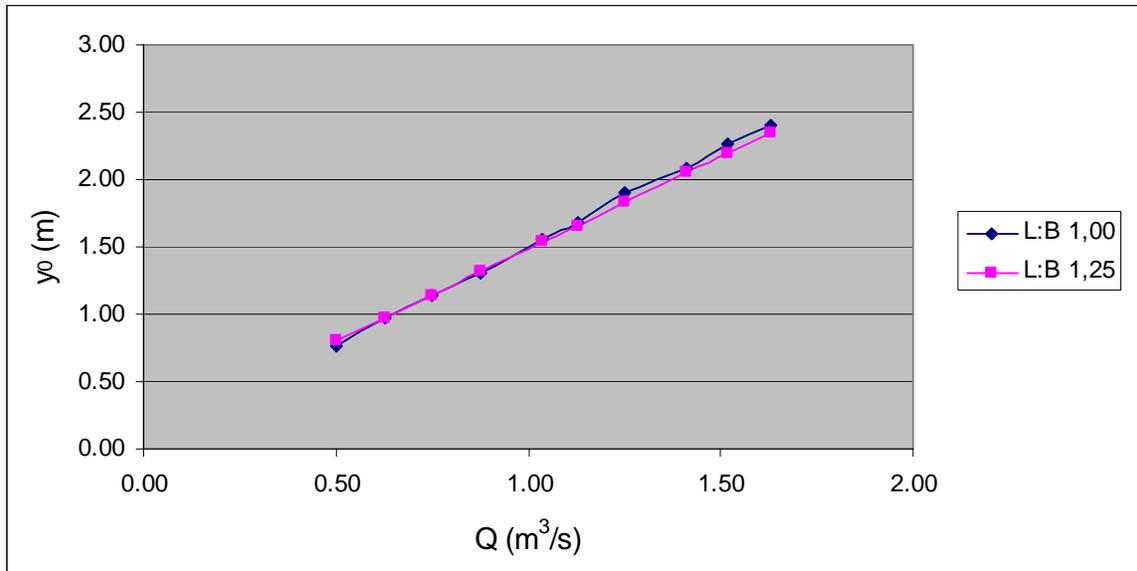


Figura 3 – Correlação da vazão com  $y_0$

Como pode ser observado a altura da lamina d'água no centro do tanque ( $y_0$ ), para as diferentes vazões, são bem próximas para as duas dimensões do tanque. As diferenças aparecem somente na primeira vazão, mas não supera 5 %, e nas quatro últimas vazões, no entanto, são inferiores a 4 %.

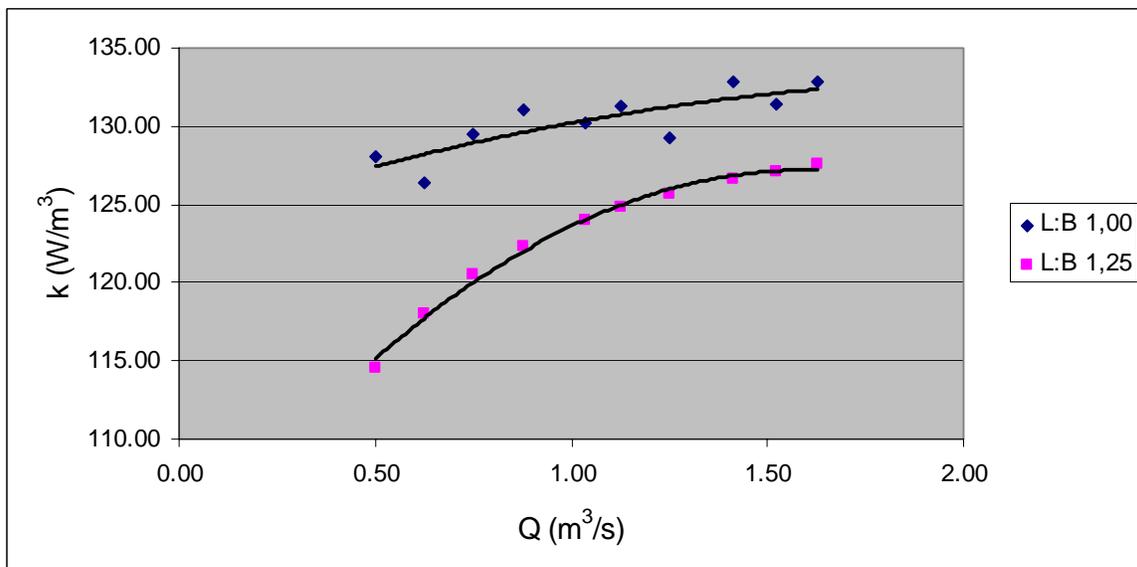


Figura 4 – correlação da vazão com a dissipação de energia no tanque

Como pode ser observado, na figura 4, a dissipação de energia nos tanques com relação comprimento / largura igual a 1,00 são superiores aos valores encontrados para os tanques com relação igual a 1,25 em até 11 %. No entanto, em nenhum dos casos o limite de 191 kW/m<sup>3</sup> é superado.

Em seguida determinou-se qual a maior inclinação podem admitidas para o MTP com as duas relações comprimento / largura do tanque (1,25 e 1,00) sem que se atinja o limite de 191 W/m<sup>3</sup> de dissipação de energia. Assim chegou-se aos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Máxima declividade para a escada com relação comprimento / largura igual a 1,00

Q (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	Q·	y <sub>0</sub> /b <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	Δh (m)	k (W/m <sup>3</sup> )
0,50	0,77	6,45	1,92	0,08	0,24	170,71
0,63	0,97	8,06	2,43	0,08	0,24	168,51
0,75	1,14	9,68	2,84	0,08	0,24	172,66
0,88	1,31	11,29	3,28	0,08	0,24	174,68
1,04	1,56	13,36	3,90	0,08	0,24	173,63
1,13	1,68	14,52	4,20	0,08	0,24	175,13
1,25	1,90	16,13	4,74	0,08	0,24	172,42
1,41	2,08	18,20	5,21	0,08	0,24	177,20
1,52	2,27	19,59	5,67	0,08	0,24	175,18
1,63	2,40	20,97	6,00	0,08	0,24	177,07

Quadro 5 – Máxima declividade para a escada com relação comprimento / largura igual a 1,25

Q (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	Q·	y <sub>0</sub> /b <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	Δh (m)	k (W/m <sup>3</sup> )
0.50	0.80	6.45	2.01	0.09	0.36	171.90
0.63	0.97	8.06	2.43	0.09	0.36	177.10
0.75	1.14	9.68	2.86	0.09	0.36	180.74
0.88	1.32	11.29	3.29	0.09	0.36	183.44
1.04	1.54	13.36	3.84	0.09	0.36	186.02
1.13	1.66	14.52	4.14	0.09	0.36	187.16
1.25	1.83	16.13	4.57	0.09	0.36	188.50
1.41	2.05	18.20	5.12	0.09	0.36	189.89
1.52	2.20	19.59	5.49	0.09	0.36	190.67
1.63	2.34	20.97	5.86	0.09	0.36	191.34

Como pode ser observado no quadro 4 caso se construa os tanques, com relação comprimento / largura igual a 1,00, correspondentes as dimensões da escada da UHE de Igarapava, a máxima declividade que pode ser inserida no mecanismo é de 8%. Assim a mesma teria um comprimento

reduzido em 64 metros ficando com 192 metros. E a velocidade máxima encontrada nesse caso seria de 2,2 m/s.

Caso se utilize a relação comprimento / largura igual a 1,25, quadro 5, a declividade máxima que pode ser inserida no mecanismo será de 9% para que não se ultrapasse o limite de dissipação de energia. Desta maneira, a escada possuiria o comprimento reduzido em 86 m, ficando com 170 metros. E a velocidade máxima no tanque seria de 2,7 m/s.

## 5 – CONCLUSÕES

Nesse trabalho observou-se que caso se construa a escada de peixes do tipo ranhura vertical com declividade igual a 6%, com a dimensão dos tanques na relação comprimento / largura igual a 1,00, a dissipação de energia é maior do que no caso da construção do tanque com a relação igual a 1,25. No entanto, em nenhum dos casos a dissipação de energia supera o limite estabelecido de 191 kW/m<sup>3</sup>. Houve, também, diferença na velocidade máxima encontrada no tanque onde chegou-se ao valor de 1,9 m/s e 2,2 m/s para a primeira e a segunda relação respectivamente.

Ao se determinar a máxima declividade, possível de ser inserida no canal para as duas configurações de tanque sem que se supere o limite de dissipação de energia, encontrou-se 8% para a configuração com a dimensão dos tanques na relação comprimento / largura igual a 1,00, e 9% com a dimensão dos tanques na relação comprimento / largura igual a 1,25, possibilitando nos dois casos a redução do comprimento do canal da escada. No entanto, nos dois casos houve aumento da velocidade que passaram para 2,2 m/s e 2,7 m/s, respectivamente. Diante desse fato, observa-se cada vez mais a necessidade de se conhecer a capacidade de nado dos peixes brasileiros, pois, com esses dados podem-se reduzir os custos da construção desse tipo de mecanismo de transposição.

## BIBLIOGRAFIA

- BELL, M. C. (1973). *“Fisheries Handbook of Engineering Requeriments and Biological Criteria”*, Corps of Engrs., North Pacific Div., Portland, Oreg., 490 p.
- LARINIER, M. (1998). *“Upstream and Downstream Fish Passage Experience in France”*, Fish Migration and Fish Bypasses, pp. 127-145.
- LARINIER, M. (2001). *“Environmental Issues, Dams and Fish Migration”*, Dams, Fish and Fisheries – Opportunities, Challenges and Conflict Resolution, FAO, pp. 45-90.
- MARTINEZ, C. B., JUNHO, R. A. C., GODINHO, A. L., MACEDO, A. A. (2000). *“Mecanismo de Transposição de Peixes”*, in Anais do II Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Canela, Rio Grande do Sul.

PAVLOV, D.S. (1989). “*Structures assisting the migrations of non-salmonid fish*”: USSR. FAO Fisheries Technical Paper, 308:97p.

PUERTAS, J.; PENA, L.; TEIJEIRO, T. (2004). “*Experimental approach the hydraulics of vertical slot fishways*”. Journal of Hydraulic Engineering, pp. 1-14.

RAJARATNAM, N., VINNE, V.D., KATOPODIS, C. (1986). “*Hydraulics of Vertical Slot Fishways*”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, n. 10, pp. 909-927.

RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C. e SALANKI, S. (1992). “*New Designs for Vertical Slot Fishways*”, Canadian Journal of Civil Engineering, n. 19, pp. 402-414.

VIANA, E.M.F. (2005). “*Mapeamento do campo de velocidades em mecanismo de transposição de peixes do tipo ranhura vertical em diferentes escalas*” Tese de doutorado. SMARH/UFMG Belo Horizonte - MG, 251 p.

WU, S., RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C. (1999) “*Structure of Flow in Vertical Slot Fishway*”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, n. 4.

Quadro 6 – Símbolos utilizados.

Símbolo	Significado	Dimensão
B	Largura do tanque da escada para peixes	[L]
$b_0$	Largura da abertura da ranhura do MTP do tipo ranhura vertical	[L]
g	Aceleração da gravidade	[L.T <sup>-2</sup> ]
K	Dissipação de energia	[F.L <sup>2</sup> .T <sup>-1</sup> ]
L	Comprimento do tanque da escada para peixes	[L <sup>3</sup> .T <sup>-1</sup> ]
Q	Vazão	[L]
Q*	Vazão adimensional	[1]
S <sub>0</sub>	Declividade	[L.L <sup>-1</sup> ]
x	Distância no sentido longitudinal do canal	[L]
y <sub>0</sub>	Altura da lâmina d'água no centro do tanque	[L]
Δh	Perda de carga entre os tanques	[L]
γ	Peso específico do fluido	[F.L <sup>-3</sup> ]