

## “SISTEMA HIDRO ELETROMECAÂNICO DE IDENTIFICAÇÃO DE INFESTAÇÃO DE *L. FORTUNEI* (MEXILHÃO DOURADO) NA SUÇÃO DE BOMBAS CENTRIFUGAS”

André Luiz Morais Rennó<sup>1</sup> (IC), Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Bioincrustação. Mexilhão Dourado. Perda de carga. Sistemas hidráulicos.

### Introdução

Este trabalho investiga a infestação do mexilhão dourado (*Limnoperma fortunei*) em sistemas de sucção de bombas hidráulicas, um organismo invasor que gera significativos problemas operacionais em tubulações de captação de água bruta. A globalização tem favorecido a introdução de espécies exóticas, e o *L. fortunei* se destaca por sua capacidade de fixação e proliferação, ocasionando bioincrustações que aumentam a resistência ao fluxo de água e elevam as perdas de carga.

A prevenção da infestação por *L. fortunei* em níveis críticos é fundamental para aprimorar os serviços de captação de água bruta. Segundo Penaforte (2014) [10] além de aumentar a perda de carga, essa infestação contribui para o desgaste de equipamentos e vedações, eleva o número de horas de trabalho necessárias, provoca superaquecimento de máquinas e pode levar a paradas emergenciais nas unidades geradoras. Esses fatores impactam diretamente no processo de geração, na taxa de disponibilidade e na garantia do fornecimento de energia

No Laboratório Thermo-Hydroelectro (LTHE) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), foi desenvolvida pela equipe de alunos de Iniciação Científica, um sistema hidro eletromecânico com o objetivo de identificar a infestação a partir do monitoramento do aumento da perda de carga. Para isso, foi adotado um modelo simplificado de instalação elevatória, representando o fluxo de água desde uma tomada em um reservatório inferior até um reservatório superior com nível de água constante. O método utilizado incluiu a criação de uma bancada de testes equipada com sensores de pressão e medidores de vazão, permitindo a análise da perda de carga sob diferentes condições. Na bancada, revestimentos simulando a bioincrustação foram impressos, possibilitando o monitoramento do impacto dessa infestação no aumento da perda de carga.

Esta pesquisa é parte de uma investigação que resultou na tese de doutorado da Enga. Tamara Rita Costa de Souza, intitulada “Dimensionamento de dispositivo para avaliação de densidade de incrustação provocada por organismos aquáticos”, defendida em abril de 2023.

### Metodologia

Os estudos realizados pelo grupo de Iniciação Científica da UNIFEI em 2023 [12] e [13] mostram que, para implementar um sistema de detecção de *Limnoperma fortunei* em circuitos de adução, é necessário monitorar as perdas de carga iniciais no sistema (sem infestação) e avaliar o aumento dessas perdas ao longo do tempo. Assim, um incremento na perda de carga pode indicar que o sistema está em processo de oclusão devido a incrustações que reduzem seu diâmetro e elevam o fator de perda de carga.

A perda de carga em um sistema hidráulico depende de quatro variáveis: a) diâmetro ( $D_{tub}$ ); b) comprimento da tubulação ( $L_{tub}$ ); c) fator de atrito ( $f$ ); e d) vazão ( $Q$ ). De acordo com Minhoni *et al.* (2020) [8], a perda de carga pode ser determinada pela equação de Darcy-Weisbach (Equação 1), que calcula os valores de perda de carga com base no diâmetro interno, na vazão e no coeficiente de perda de carga.

$$\Delta h = \frac{8 * f * Q^2 * L_{tub}}{\pi^2 * g * D_{tub}^5} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

- Q: vazão em m<sup>3</sup>/s.
- f: fator perda de carga
- l: comprimento (m)
- g: gravidade (m/s)
- D: diâmetro (m)

Costa (2019) [1] recomenda a utilização da equação de Buzzelli para a determinação do fator de perda de carga “f”, um parâmetro adimensional que sofre influência de outros parâmetros, como o número de Reynolds e a rugosidade relativa.

A Equação (2) de Buzzelli (2008), determina o valor de “f”, através de duas raízes B1 e B2, considerando apenas o número de Reynolds, rugosidade relativa e o diâmetro da tubulação como parâmetros para determinação do fator de perda de carga. Dentro das principais características desta equação, tem-se valor máximo do Re de  $1.10^8$  e  $e/D = 7,5 \times 10^{-2}$ . Através desta

equação é possível chegar a valores de “f”.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = B_1 - \left( \frac{B_1 + 2 \cdot \log_{10} \left( \frac{B_2}{Re} \right)}{1 + \frac{2,18}{B_2}} \right) \quad \text{(Equação 2)}$$

onde:

- $B_1 = \frac{(0,777 \ln(Re) - 1,41)}{1 + 1,32 \sqrt{\frac{e}{D}}}$
- $B_2 = \frac{e}{3,7 D} \cdot Re + 2,51 B_1$
- $Re = N^\circ \text{ de Reynolds}$
- $\sqrt{\frac{e}{D}} = \text{Rugosidade relativa}$

A Tabela 1 também apresentada por Costa (2019) [1] mostra a variação temporal do fator de perda de carga “f” para tubos de 1 a 20 polegadas, considerando uma velocidade de passagem de 1,5 m/s, que é a velocidade típica de escoamento em sistemas de resfriamento de Usinas hidrelétricas.

**Tabela 1** - Variação temporal do fator de perda de carga “f” para tubos de 1” a 20” com velocidade de passagem de 1/5m/s (Buzzelli).

Diâmetro	Tempo de infestação (dias)				
	5	50	100	150	250
1”	0,041	0,274	Ocluído	Ocluído	Ocluído
2”	0,035	0,129	Ocluído	Ocluído	Ocluído
2 ½”	0,033	0,110	0,775	Ocluído	Ocluído
3”	0,032	0,098	0,437	Ocluído	Ocluído
4”	0,030	0,084	0,260	1,221	Ocluído
5”	0,025	0,040	0,064	0,143	0,717
6”	0,018	0,027	0,055	0,114	0,488
8”	0,016	0,024	0,044	0,079	0,256
10”	0,016	0,022	0,037	0,060	0,159
12”	0,015	0,021	0,031	0,047	0,106
15”	0,015	0,019	0,026	0,036	0,066
18”	0,015	0,018	0,023	0,028	0,044
20”	0,015	0,018	0,021	0,025	0,035

Fonte: Adaptado de [1]

A tabela 2 apresentada por Mancilla Rico *et al.* (2018) [14] apresenta os valores calculados do “f”, para a faixa de diâmetros máximo e mínimo, na condição inicial sem incrustação de mexilhão dourado (SI), e com incrustação para cada camada (1C, 2C, 3C, 4C e 5C).

**Tabela 2** - Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de L. Fortunei.

Local	Altura de queda	Diâmetro inicial	Fator de perda de carga f					
			SI	1C	2C	3C	4C	5C
Caixa espiral	15m	2,169	0,0309	0,0309	0,031	0,0311	0,0312	0,0313
		0,114	0,0803	0,0861	0,0816	0,0791	0,0843	0,0864
	30m	1,533	0,034	0,0342	0,0343	0,0345	0,0346	0,0347
		0,081	0,0864	0,0861	0,0864	0,0829	0,0843	0,0864
	50m	1,188	0,0368	0,037	0,0372	0,0374	0,0376	0,0379
		0,063	0,0864	0,0848	0,0843	0,0846	0,0851	0,0864
	75m	0,97	0,0393	0,0395	0,0398	0,0401	0,0404	0,0407
		0,051	0,0848	0,0861	0,0854	0,0854	0,0861	0,0873
	100m	0,84	0,0412	0,0415	0,0419	0,0423	0,0426	0,0431
		0,044	0,0864	0,0867	0,0876	0,0876	0,0867	0,0864
	125m	0,751	0,0428	0,0432	0,0436	0,0441	0,0445	0,045
		0,04	0,0873	0,087	0,0864	0,0864	0,087	0,087
	150m	0,686	0,0441	0,0446	0,0451	0,0457	0,0462	0,0468
		0,036	0,0864	0,0873	0,0864	0,0864	0,087	0,0873
200m	0,594	0,0465	0,0471	0,0477	0,0484	0,0491	0,0499	
	0,031	0,0863	0,0873	0,0867	0,0867	0,0873	0,087	
Tubo de sucção	15m	1,35	0,0354	0,0355	0,0357	0,0359	0,0361	0,0362
		2,764	0,0289	0,029	0,029	0,0291	0,0291	0,0292
	30m	0,79	0,042	0,0424	0,0428	0,0432	0,0437	0,0441
		2,087	0,0312	0,0312	0,0313	0,0314	0,0315	0,0316
	50m	0,65	0,045	0,0455	0,0461	0,0467	0,0472	0,0479
		1,718	0,0303	0,033	0,0332	0,0333	0,0334	0,0335
	75m	0,52	0,0488	0,0496	0,0503	0,0512	0,0521	0,0531
		1,368	0,0352	0,0354	0,0356	0,0357	0,0359	0,0361
	100m	0,56	0,0475	0,0482	0,0488	0,0496	0,0504	0,0513
		1,477	0,0344	0,0346	0,0347	0,0349	0,035	0,0352
	125m	0,38	0,0551	0,0564	0,0577	0,0593	0,0609	0,0628
		1,005	0,0398	0,0391	0,0393	0,0396	0,0399	0,0402
	150m	0,38	0,0551	0,0564	0,0577	0,0593	0,0609	0,0628
		1,005	0,0398	0,0391	0,0393	0,0396	0,0399	0,0402
200m	0,38	0,0551	0,0564	0,0577	0,0593	0,0609	0,0628	
	1,005	0,0398	0,0391	0,0393	0,0396	0,0399	0,0402	

Fonte: Adaptado de [14]

Para o experimento, foi adotado um modelo simplificado de uma instalação elevatória, conforme apresentado na Figura 1. Nesse modelo, a tomada d’água está posicionada em um trecho de rio, e a água é bombeada até um reservatório superior. Considerou-se que o nível de água entre a tomada no rio e a entrada na caixa d’água permanece constante durante o processo de bombeamento. A metodologia de cálculo foi a proposta por Mataix (2009)[5].

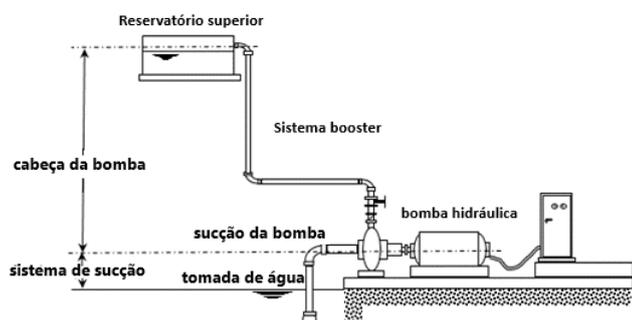


Figura 1 - Modelo simplificado de sistemas de bombeamento.

Tendo em vista que a incrustação de *L. fortunei* ocasiona a redução da seção de escoamento no interior dos dutos e de posse dos resultados obtidos pelos cálculos de “f” (da tabela 1 e 2) foi possível o desenvolvimento da pesquisa que se prosseguiu com projeto e impressão de revestimentos simulando incrustações e adaptação de sensores de pressão nos conectores que contribuíram para o resultado final desse trabalho. A Figura 2 mostra uma colônia de *L. fortunei* sobre um substrato de plástico no reservatório da UHE Furnas.



Figura 2 – Colônia de *L. fortunei* em substrato de plástico.

Essas colônias foram reproduzidas em impressoras 3D e usadas como elemento inserido dentro de tubulações que posteriormente foram ensaiadas conforme demonstra a Figura 3. Com os dados obtidos foi possível idealizar um sistema que mede a evolução da perda de carga causada pelo mexilhão e correlacionar essa perda ao tempo de infestação. Isso resultou em um pedido no Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI - que se encontra em período de sigilo.

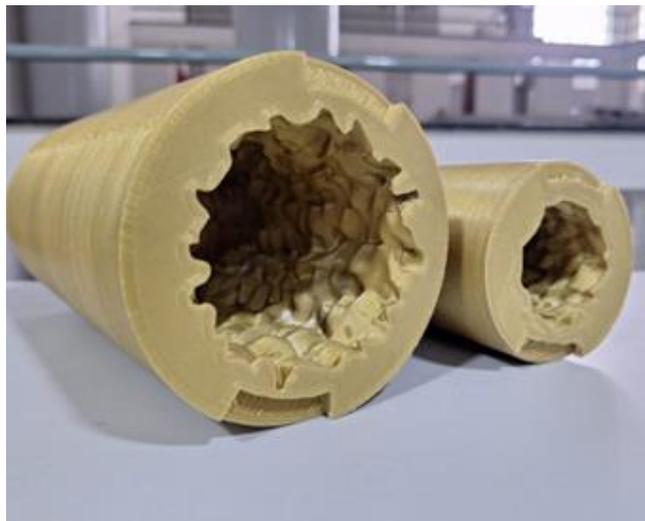


Figura 3 – Incrustação de *L. fortunei* impressa em 3D.

### Resultados e discussão

Os resultados obtidos reforçam a capacidade do sistema proposto na detecção de infestações, alinhando-se ao objetivo de desenvolver uma solução eficaz para o controle do mexilhão dourado em sistemas hidráulicos.

A partir da implementação do sistema hidro eletromecânico de identificação de infestação, foi possível verificar o aumento da perda de carga associado à redução da área útil de bombeamento na sucção da bomba em virtude da infestação do mexilhão dourado.

Além disso, a utilização do dispositivo durante os ensaios revelou a viabilidade de se programar paradas periódicas no sistema, permitindo a realização de desobstruções e manutenções nas máquinas.

Tendo em vista o objetivo de se desenvolver um sistema hidro eletromecânico para identificar a infestação do mexilhão dourado e monitorar suas consequências. Assim considera-se que os resultados alcançados contribuem para a melhoria da eficiência operacional e redução dos custos associados à manutenção do Sistema.

### Conclusões

Pode se concluir que o sistema desenvolvido, além do monitoramento, também propõe soluções práticas para os problemas causados pela infestação, pela possibilidade de se programar paradas do sistema de maneira estratégica.

Além disso, o trabalho resultou em um pedido de patente, depositado pela UNIFEI, BR 10 2024 007075 5, em 11 de abril de 2024. Para preservar o sigilo do pedido, detalhes técnicos da invenção não foram divulgados em seminários, congressos ou periódicos pois isso se constitui em uma exigência do Instituto Nacional de Propriedade Industrial – INPI.

### Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez pela orientação e aos meus colegas de pesquisa, Luis Eduardo Siqueira Viamonte e Pedro Henrique Gualberto dos Santos pela colaboração continua.

Ao M.Sc. Dieimys Santos Ribeiro que me auxiliou na confecção deste trabalho. Também agradeço à Dra. Tâmara Rita Costa de Souza e M.Sc. Afonso Gabriel Ferreira Junior (ambos doutorandos do PPGMEC/UFMG) pelo apoio e material fornecido.

Agradeço à UNIFEI e aos órgãos financiadores CNPq, FAPEMIG e CAPES pelo incentivo à pesquisa científica.

### Referências

- [1] COSTA, T. R.; ANDRADE, J. T. M.; VIDIGAL, T. A. D.; MARTINEZ, C. B. **Temporal impact of *Limnoperna fortunei* in the increase of load-loss factor in mechanical fluid systems.** Santiago do Chile, 2019.
- [2] COSTA, T. R.; BASTOS, A. S.; RIBEIRO, D. S.; MARTINEZ, C. B. **Análise da variação do fator de perda de carga em dutos causada pela bioinfestação do mexilhão dourado.** In: XXV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju - Sergipe, 2023.
- [3] DE SOUZA, T.; ANDRADE, J.; SERRANO, R.; VIDIGAL, T.; VIANA, E.; BASTOS, A.; MARTINEZ, C. **Energy efficiency analysis of pumping systems impacted by the golden mussel: a case study in the Brazilian Amazon.** Energies, 2023.
- [4] DRAKE, J. A.; MOONEY, H. A.; DI CASTRI, F.; GROVES, R. H.; KRUGER, F. J.; REIMANEK, M. **Biological invasions: global perspective.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1989. p. 1-525.
- [14] MANCILLA RICO, Edwin Andres; COSTA SOUZA, Tâmara Rita da; PILZ DE CASTRO, Ana Letícia; MARTINEZ, Carlos Barreira; DINIZ, Denise de Almeida Maciel. **Perda de rendimento em turbo bombas por ação do *Limnoperna fortunei*.** In: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 2018, Buenos Aires, Argentina. Anais... Buenos Aires: [s.n.], 2018.
- [7] MARTINEZ, C.; VIANA, E.; VIDIGAL, T.; COSTA DE SOUZA, T.; BASTOS, A.; RIBEIRO, D.; FERREIRA JUNIOR, G. V. L.; SANTOS, P.; RENNO, A. L. M. **Sistema hidro eletromecânico de identificação da taxa de infestação de *L. fortunei* (mexilhão dourado) na sucção de bombas hidráulicas.** Brasil. Patente BR 10 2024 007075 5, 11 abr. 2024.
- [5] MATAIX, C. **Hydraulic Turbochargers.** Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2009. p. 1-1720.
- [6] MATTÊA, D. W. C.; SANTOS, H. A.; CAMPOS, A. J. L. **Tratamento químico da água dos sistemas abertos de resfriamento das unidades geradoras de hidroeletricidade.** In: 3º Simpósio de Especialistas em Operação de Centrais Hidrelétricas – SEPOCH, 2002.
- [8] MINHONI, R. T. A.; PEREIRA, F. F. S.; SILVA, T. B. G.; CASTRO, E. R.; SAAD, J. C. C. **The performance of explicit formula for determining the Darcy-Weisbach friction factor.** Engenharia Agrícola, v. 40, n. 2, 2020.
- [9] NISHIDA, K.; PIMENTA, T. C.; MARTINEZ, C. B. ***Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) infestation mitigation strategies in water cooling systems in hydroelectric power plants.** In: The 13th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission. Santiago do Chile, 2019.
- [10] PENAFORTE, Leonardo Ruas. **Invasão do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857): impactos, métodos de controle e estratégias de gestão adotadas.** 2014. Monografia (Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- [13] SANTOS, P. H. G. D. **Dimensionamento de dispositivo para avaliação de densidade de incrustação provocada por organismos aquáticos.** Itajubá, MG: UNIFEI, 2023.
- [11] SEEBENS, H.; BACHER, S.; BLACKBURN, T. M.; CAPINHA, C.; DAWSON, W.; DULLINGER, S.; PIER, G.; HULME, P. E.; KLEUNEN, M. V.; KÜHN, I.; JESCHKE, J. M. **Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050.** Global Change Biology, 2021. p. 970-982.
- [12] VIAMONTE, L. E. S. **Sistema hidro eletromecânico de identificação de infestação de *L. fortunei* (mexilhão dourado) em bombas centrífugas.** Itajubá: UNIFEI, 2023.