

DETECÇÃO DE INFESTAÇÃO DO MEXILHÃO DOURADO *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) POR AUMENTO DE PERDA DE CARGA SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Stênio Augusto de Souza Coelho¹; Frederico Augusto

Ribeiro², Tâmara Rita Costa de Souza³

& Carlos Barreira Martínez⁴

RESUMO – As perdas de carga em sistemas de geração de energia podem ter diversas causas, como exemplos: aumento da rugosidade, deposição de material e a incrustação de sujidades presentes na água. O período de manifestação dessas causas pode ser longo e provocar uma redução da área útil das tubulações. De acordo com Lima e Martinez (2014), em sistemas com grandes diâmetros isso tem um pequeno impacto, entretanto, quando se trata de circuitos hidráulicos de diâmetros menores (< 400mm), essas incrustações tendem a ser muito impactantes. Atualmente, grande parte das UHE's apresentam incrustação de um molusco, conhecido como mexilhão dourado, causando um aumento da perda de carga nos circuitos de resfriamento dessas instalações gerando prejuízos de geração e de disponibilidade de energia. Este trabalho apresenta um mapeamento das perdas de carga unitárias em circuitos hidráulicos de 1 a 20 polegadas de diâmetro. Sugere-se que o monitoramento da infestação baseado na medição da perda de carga deve ser feito a partir de ramais de diâmetro entre 2 e 4 polegadas de forma a ser possível, a partir da medição da perda de carga, inferir as taxas de infestação do MD fornecendo parâmetros para orientar o momento da intervenção no sistema.

ABSTRACT– The pressure drops in power generation systems can have several causes, such as increased roughness, material deposition, and the fouling of dirt in the water. The period of manifestation of these causes can be long and cause a reduction in the useful area of the pipes. According to Lima and Martinez (2014), in systems with large diameters this has a small impact, however, when it comes to hydraulic circuits of smaller diameters (< 400mm), these incrustations tend to be very impactful. Currently, most of the HPP's present incrustation of a mollusk, known as golden mussel, causing an increase in the load loss in the cooling circuits of these installations, generating losses in the generation and availability of energy. This paper presents a mapping of unit load losses in hydraulic circuits from 1 to 20 inches in diameter. It is suggested that the monitoring of infestation based on the measurement of pressure drop should be done from branches between 2 and 4 inches in diameter so that it is possible, from the measurement of pressure drop, to infer the infestation rates of the MD providing parameters to guide the timing of intervention in the system.

Palavras-Chave – Perda de Carga, Mexilhão Dourado, Sistema de Resfriamento em Usinas Hidrelétricas.

1) Engenheiro mecânico, mestrando profissional em engenharia hídrica - UNIFEI, +55 (31) 9 8892-8641, stenio-augusto@hotmail.com

2) Biólogo, mestre em ecologia e doutorando em engenharia mecânica – UFMG, +55 (31) 9434-1717, fredericomata@hotmail.com.

3) Engenheira mecânica, mestre e doutoranda em engenharia– UFMG, +55 (31) 99553-8667, tamararcosta@hotmail.com.

4) Professor doutor Instituto de engenharia mecânica da UNIFEI, + 55 (35) 9.8877.5275, cmartinez@unifei.edu.br.

INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é composta em sua maior parte por geração Hidráulica, representando 65,2% no ano de 2020 (BEN, 2021). Essa geração se dá pelo aproveitamento da energia potencial gravitacional da água contida em uma represa ou condutos, de modo que essa energia já está presente na natureza nos desníveis do terreno e se baseia na transformação da energia potencial gravitacional para gerar energia elétrica, utilizando equipamentos elétricos, eletrônicos e mecânicos. Nos sistemas de geração tem-se a presença de sistemas de refrigeração que têm função relevante para a manutenção da temperatura de trabalho dentro dos limites operacionais dos equipamentos eletromecânicos removendo o calor gerado nas máquinas rotativas, sistemas elétricos e hidráulicos, geradores elétricos, óleos dos mancais, compressores de ar e transformadores, do tipo óleo/água ou ar/água. Félix (2011) e Rico (2018, apud Colares, *et al.*, 2002) afirmam que o *Limnoperna fortunei* (*L.f.*), por possuir uma facilidade de adesão e dispersão em diferentes estruturas, infesta uma gama diversa de equipamentos em Usinas Hidrelétricas (UHE) incluindo acessórios que compõem o sistema de refrigeração, a exemplo das tubulações, filtros, sistemas de resfriamento, grades e outros tipos de equipamentos. A incrustação de mexilhão nesses sistemas de refrigeração das UHE se dá, pois, a água utilizada é proveniente do reservatório e é captada junto ao conduto forçado sem tratamento (água bruta) e já contaminada pelo molusco invasor. Neste contexto a água captada não recebe nenhum tratamento químico ou físico dado que o volume utilizado diariamente tornaria o processo oneroso e de difícil execução. Segundo Netto (2011), e ao se utilizar diretamente a água bruta para refrigeração permite-se a contaminação desse sistema por *L.f.* que se incrusta nas paredes dos equipamentos, trocadores de calor, tubulações, entre outros. De acordo com o Centro de Bioengenharia de Espécies Invasoras de Hidrelétricas (IBAMA, 2020) até o ano de 2020 existiam registros de mexilhão-dourado em 50 reservatórios que estão localizados nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás e Bahia. O presente trabalho apresenta uma estratégia para detectar o grau de incrustação dos sistemas de resfriamento de UHE's através do aumento da perda de carga.

CARACTERIZAÇÃO DO CIRCUITO DE RESFRIAMENTO

O sistema de resfriamento de unidades geradoras é um dos principais equipamentos de um grupo gerador (Nishida *et al.*, 2019). Nesses sistemas a água é comumente aduzida por uma tomada lateral ou na parte superior do conduto forçado e na sequência é filtrada e utilizada em radiadores e trocadores de calor e as placas ou tubulares, para o resfriamento do ar ou do óleo lubrificante. Esses trocadores de calor se utilizam de água bruta e sem aditivos para seu tratamento e por essa razão

sofrem grande influência da presença de contaminantes e de organismos vivos existentes na mesma (Mattêa *et al.*, 2002; Nishida *et al.*, 2019). Os principais equipamentos atendidos pelo sistema de resfriamento em uma unidade geradora são: mancais de escora, mancais guia e geradores e que no caso de aumento da temperatura nominal nesses equipamentos tem-se problemas operacionais na unidade geradora e consequentemente a possibilidade de sua indisponibilidade para produção de energia. A Figura 1 apresenta-se um modelo de sistema de resfriamento de uma Unidade geradora de UHE utilizado nesse trabalho.

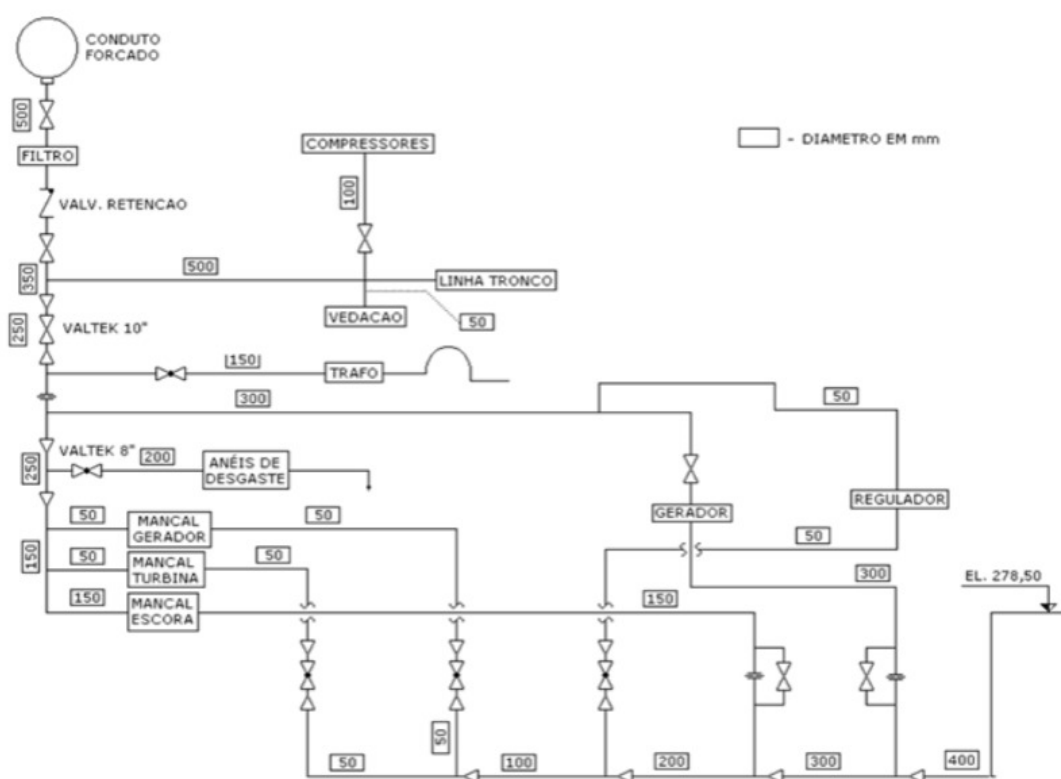


Figura 1 - Fluxograma do sistema de resfriamento de uma unidade da UHE Salto Caxias, detalhe das tubulações não embutidas Copel, 1998.

De acordo com Leite *et al.* (2019), os condutos que apresentam diâmetro de alimentação de água bruta inferior ou igual a 400 mm serão muito impactados pela infestação do MD. Ao se observar a Figura 1, identifica-se que o diâmetro da tomada de água no conduto forçado tem 500 mm. Logo após passar pelo filtro a tubulação passa a ter 350 mm de diâmetros sendo reduzida para 250 mm e finalmente se bifurca em ramais de 200mm, 150 mm, 100 mm e 50 mm. Mata (2011), cita que os sistemas de água bruta em trocadores de calor, que chegavam a ficar em operação por até 30.000 h,

após a infestação de $L.f.$, sofreram redução drástica destes períodos, sendo necessária a intervenção para manutenção a cada 360 h ou seja um aumento na frequência em 83 vezes.

METODOLOGIA

Para se obter um sistema de detecção de $L.f.$ em circuitos de adução sugere-se monitorar as perdas de carga iniciais no sistema (sem infestação) e verificar o aumento dela ao longo do tempo. Assim ao se observar um aumento da perda de carga pode-se inferir que esta, encontra-se em processo de oclusão devido a incrustações que reduzem seu diâmetro e aumentam o fator de perda de carga. Para essa investigação considera-se que haja oclusão do sistema quando a perda de carga unitária for igual ou maior que o diâmetro do tubo da água do sistema de resfriamento. A perda de carga em um sistema hidráulico é função das variáveis; a) diâmetro (D_{tub}); b) comprimento da tubulação (L_{tub}); c) fator de atrito (f) e da vazão (Q) do sistema. E pode ser determinada pela Equação 1 a seguir.

$$\Delta h = \frac{8 * f * Q^2 * L_{tub}}{\pi^2 * g * D_{tub}^5} \quad 5 \times 10^7 \quad (1)$$

Onde Q é a vazão em m^3/s .

Souza (2019) recomenda a utilização da equação de Buzzelli, Equação 2, para a determinação do fator de atrito. Essa equação apresenta um intervalo de erro de $Erro_{\min}=0,007\%$ e o Máximo de $Erro_{\max}=2,156\%$, Reynolds variando entre 4×10^3 a 5×10^7 , e rugosidade relativa com intervalo de 5×10^{-6} a 10^{-6} , e apresenta duas Raízes, B_1 , Equação 3, e B_2 , Equação 4. Para a escolha da equação de cálculo do fator de perda de carga tomou-se como parâmetro a faixa de variação do número de Reynolds encontrado a partir da determinação da rugosidade relativa. A rugosidade superficial da tubulação pode variar rapidamente em função da bioincrustação do mexilhão dourado. Assim, recomenda-se utilizar a Tabela 1 como orientação para determinação da evolução da rugosidade do MD.

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

$$B_1 = \frac{(0,777 \ln(Re) - 1,41)}{1 + 1,32 \sqrt{\frac{e}{D}}} \quad (3)$$

$$B_2 = \frac{e}{3,7D} \cdot R_e + 2,51B_1 \quad (4)$$

A Tabela 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 1,5 m/s, calculado através da equação de 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: Expandido de Souza (2019)

RESULTADOS

A partir do monitoramento dos valores de perda de carga no sistema pode-se inferir qual o tempo de infestação e a seriedade do fenômeno sobre os sistemas de resfriamento de UHE's. As vazões utilizadas para simulação das tubulações que sofrem oclusão, foram calculadas de acordo com as velocidades dos sistemas de resfriamento de modo que cada velocidade é calculada considerando que o sistema irá manter as velocidades constantes. Os valores de vazão em função da velocidade de trânsito nas tubulações são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Vazões calculadas com velocidade de trânsito para sistema de resfriamento.

Diâmetro	Q - Vazão para velocidades de trabalho usuais m³/s		
	1,5 m/s	2,0 m/s	2,5 m/s
1"	0,0008	0,0010	0,0013

2"	0,0030	0,0041	0,0051
2 ½"	0,0047	0,0063	0,0079
3"	0,0068	0,0091	0,0114
4"	0,0122	0,0162	0,0203
5"	0,0190	0,0253	0,0317
6"	0,0273	0,0365	0,0456
8"	0,0486	0,0648	0,0810
10"	0,0760	0,1013	0,1266
12"	0,1094	0,1459	0,1823
15"	0,1709	0,2279	0,2849
18"	0,2461	0,3282	0,4102
20"	0,3039	0,4052	0,5065

Fonte: Autores

Aplicando-se as equações 1 e 2, e as taxas de crescimento de $L.f.$ apresentadas na Tabela 1, obtêm-se a perda de carga unitária para diâmetros de tubulação de resfriamento e velocidades de trânsito ao longo do tempo de infestação no sistema. Os resultados dessa simulação para diversas velocidades de trânsito estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Nos resultados obtidos entende-se por oclusão quando a perda de carga unitária for igual ou maior que o diâmetro do tubo.

Tabela 3 - Perda de carga - [mca/m] - velocidade 1,5 m/s

Diâmetro	Δh				
	Tempo de infestação (dias)				
	5	50	100	150	250
1"	Oclusão	Oclusão	Oclusão	Oclusão	Oclusão
2"	0,0049	0,0182	Oclusão	Oclusão	Oclusão
2 ½"	0,0015	0,0051	0,0358	Oclusão	Oclusão
3"	0,0006	0,0018	0,0081	Oclusão	Oclusão
4"	0,0001	0,0004	0,0011	0,0054	Oclusão
5"	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0010
6"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003
8"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autores

Tabela 4 - Perda de carga - [mca/m] - velocidade 2,0 m/s

Δh					
Diâmetro	Tempo de infestação (dias)				
	5	50	100	150	250
1"	Oclusão	Oclusão	Oclusão	Oclusão	Oclusão
2"	0,0087	0,0324	Oclusão	Oclusão	Oclusão
2 ½"	0,0027	0,0091	0,0637	Oclusão	Oclusão
3"	0,0010	0,0032	0,0144	Oclusão	Oclusão
4"	0,0002	0,0007	0,0020	0,0096	Oclusão
5"	0,0001	0,0001	0,0002	0,0004	0,0018
6"	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0005
8"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
10"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autores

Tabela 5 - Perda de carga - [mca/m] - velocidade 2,5 m/s

Δh					
Diâmetro	Tempo de infestação (dias)				
	5	50	100	150	250
1"	Oclusão	Oclusão	Oclusão	Oclusão	Oclusão
2"	0,0137	0,0506	Oclusão	Oclusão	Oclusão
2 ½"	0,0042	0,0142	Oclusão	Oclusão	Oclusão
3"	0,0016	0,0051	Oclusão	Oclusão	Oclusão
4"	0,0004	0,0010	0,0032	0,0149	Oclusão
5"	0,0001	0,0002	0,0003	0,0006	0,0029
6"	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0008
8"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
10"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20"	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autores.

CONCLUSÃO

De acordo com dados de perda de carga apresentados nas tabelas de 4 a 6, sugere-se que o monitoramento do processo de infestação do mexilhão dourado – *Limnoperna fortunei*, seja feito

em tubulações com menos de 4 polegadas que apresentam oclusão de cinco dias a oito meses após o início da infestação. Para diâmetros maiores a evolução da perda de carga se mostra menor devido ao fato do processo de aumento da rugosidade relativa ser menos sensível em dutos de maiores diâmetros. Dessa forma, o fenômeno de bio incrustação será percebido com antecedência em dutos de menor diâmetro dando tempo para a mobilização das equipes de manutenção se prepararem para atuar.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à ANEEL, SEFAC, CEMIG, à ELETROBRÁS FURNAS, a FAPEMIG pelo suporte financeiro para realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

BEN - Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese 2021 - Ano base 2020. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 18 maio 2022.

BOLTOVSKOY, D.; CORREA, N.; CATALDO, D.; SYLVESTER, F. (2006). “*Dispersion and ecological impact of the invasive freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* in the Río de la Plata watershed and beyond*”. Biological Invasions 8(4), pp. 947-963. <https://doi.org/10.1007/s10530-005-5107-z>

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Plano nacional de prevenção, controle e monitoramento no Brasil – mexilhão dourado- *Limnoperna fortunei*. 2020. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/biodiversidade/mexilhao-dourado/2020/2020-11-10-Plano_Mexilhao_Dourado.pdf). Acesso em: 18 de maio de 2022.

CHOI, S.S.; KIM, J.S. (1985). “*Studies on the metamorphosis and the growth of larva in *Limnoperna fortunei**”. Korean J. Malacological 1(1), pp. 13–18.

SOUZA, T.R.C.; ANDRADE, J.T.M.; VIDIGAL, T.A.D.; MARTINEZ, C.B. (2019). “*Temporal impact of *Limnoperna fortunei* in the increase of load-loss factor in mechanical fluid systems*”. In Anais the 13th Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission, Santiago, Out. 2019, 1, pp. 1-4.

DARRIGRAN, G.; MAROÑAS, M.E. (2002). “*Crecimiento valvar de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) de una localidad de clima templado de la región neotropical*”. In Anais the V Congreso Latinoamericano de Malacología, São Paulo, Jun./Jul. 2002, pp.

FÉLIX, E. P. Tratamento químico da água dos sistemas abertos de resfriamento das unidades geradoras de hidroeletricidade. 2011. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

LEITE, C.R.; BASTOS, A.S.; MARTINEZ, C.B.; PEREIRA, A.B.S. (2019). “*The influence of the pipelines’ surface roughness and diameter temporal evolution on micro hydroelectric power plants*,”

generation capacity: a case study of the roncador MHP". In Anais the 13th Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission, Santiago, Out. 2019, 1, pp. 1-5.

Lima, A.A.; Martinez, C.B. (2014) "*Evolução da perda de carga em tubulações forçadas de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)*" in Anais do XXV Congresso Latinoamericano de Hidráulica Santiago, Ago. 2014, 1, pp. 1-9.

NISHIDA, K.; PIMENTA, T.C.; MARTINEZ, C.B. (2019). "*Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) infestation mitigation strategies in water cooling systems in hydroelectric power plants". In Anais the 13th Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission, Santiago, Out. 2019, 1, pp. 1-9.

MATA, F.A.R. Abundância e distribuição temporal de *Limnoperna fortunei* Dunker, 1857 (Mollusca, Bivalvia) nos reservatórios de Itaipu (PR) e Jupia (SP). 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

MATTÊA, D.W.C.; SANTOS, H.A.; CAMPOS, A.J.L. (2002). "*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).

NAKANO D.; BABA T.; ENDO N.; NAGAYAMA S.; FUJINAGA A.; UCHIDA A.; SHIRAGANE A.; URABE M.; KOBAYASHI T. (2015). "Invasion, dispersion, population persistence and ecological impacts of a freshwater mussel (*Limnoperna fortunei*) in the Honshu Island of Japan". Org. por Boltovskoy, D., ed. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 743-759.

Netto O.M.S. Controle da incrustação de organismos invasores em materiais de sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

RICO, E.A.M. Influência da taxa de infestação de *limnoperna fortunei* no aumento da perda de carga em sistemas hidráulicos. 2018. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. Projeto executivo mecânico dimensionamento dos elementos de controle do sistema de água de resfriamento. 1998.

SANTOS, C.P.; WÜRDIG, N.L; MANSUR, E.M.C.D. (2005). "*Fases larvais do mexilhão dourado Limnoperna fortunei* (Dunker)(Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) na bacia do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil". Rev. Bras. Zool., 22(3), pp. 702–708.