

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



TÂMARA RITA COSTA DE SOUZA

VARIAÇÃO TEMPORAL DO FATOR DE PERDA DE CARGA EM SISTEMAS FLUIDO
MECÂNICOS PROVOCADA PELA BIOINCRUSTAÇÃO DO MEXILHÃO DOURADO:
UM ESTUDO DE CASO

BELO HORIZONTE

2023

Tâmara Rita Costa de Souza

VARIAÇÃO TEMPORAL DO FATOR DE PERDA DE CARGA EM SISTEMAS FLUIDO
MECÂNICOS PROVOCADA PELA BIOINCRUSTAÇÃO DO MEXILHÃO DOURADO:
UM ESTUDO DE CASO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador (a): Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

Co-orientador (a): Profa. Dra. Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte

2023

S729v	<p>Souza, Tâmara Rita Costa de.</p> <p>Varição temporal do fator de perda de carga em sistemas fluido mecânicos provocada pela bioincrustação do mexilhão dourado [recurso eletrônico] : um estudo de caso / Tâmara Rita Costa de Souza. – 2023. 1 recurso online (137 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Carlos Barreira Martinez. Coorientadora: Edna Maria de Faria Viana.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 96-137.</p> <p>Bibliografia: f. 85-95. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Mexilhão-dourado - Teses. 3. Custos - Teses. 4. Eficiência energética - Teses. 5. Bombeamento de água - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621(043)</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

*"VARIÇÃO TEMPORAL DO FATOR DE PERDA DE CARGA EM SISTEMAS FLUIDO MECÂNICOS
PROVOCADA PELA BIOINCRUSTAÇÃO DO MEXILHÃO DOURADO: UM ESTUDO DE CASO"*

TÂMARA RITA COSTA DE SOUZA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Carlos Barreira Martinez (Orientador – Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI), Dr^a. Edna Maria de Faria Viana (Coorientadora - Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos/UFMG), Dr^a. Teofania Heloísa Dutra Amorim Vidigal (Departamento de Zoologia/UFMG), Dr. Jorge Luis Zegarra Tarqui (Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos/UFMG), Dr. José Antônio Perrella Balestieri (Universidade Estadual de São Paulo/UNESP), Dr. Luiz Gustavo Martins da Silva (Institute of Environmental Engineering, Zurique, Suíça) e Dr. Frederico Fábio Mauad (Universidade de São Paulo/USP), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutora em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "Energia e Sustentabilidade".

Tese aprovada no dia 5 de abril de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Barreira Martinez, Usuário Externo**, em 10/04/2023, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 11/04/2023, às 07:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Teofania Heloisa Dutra Amorim Vidigal, Professora do Magistério Superior**, em 11/04/2023, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins da Silva, Usuário Externo**, em 11/04/2023, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Antônio Perrella Balestieri, Usuário Externo**, em 11/04/2023, às 20:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Fabio Mauad, Usuário Externo**, em 19/04/2023, às 21:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Membro**, em 19/04/2023, às 22:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2201129** e o código CRC **5BBD5391**.

Para Aquele que me fortalece...

Filipenses 4:13

AGRADECIMENTOS

Essa tese foi desenvolvida no âmbito de projetos de pesquisa do setor elétrico e teve como objetivo levantar um impacto econômico que existem em sistemas fluido mecânicos. No início do terceiro ano da pesquisa enfrentamos a pandemia de COVID-19 e durante esse período ficamos impossibilitados de fazer coletas, dar entrada em laboratório, tivemos dificuldades de financiamento. Enfrentamos episódios de corona vírus em pesquisadores e também e familiares adoecidos, com alguns até mesmo ido a óbito. A medida que as primeiras vacinas foram aplicadas, conseguimos retornar, aos poucos, às coletas, e também ao laboratório e conseguimos reiniciar o processo, tentando recuperar o tempo perdido, porém, sempre entendendo que do ponto de vista biológico as janelas perdidas são difíceis de serem recuperadas. Dessa forma, este trabalho traduz o esforço feito durante o doutorado e o esforço para vencer um processo pandêmico, que foi extremamente doloroso no país e no mundo. Alguns objetivos inicialmente traçados não puderam ser alcançados por absoluta falta de tempo, uma vez que ficamos dois anos praticamente parados, com o laboratório sem injeção de recursos para coleta em campo. Alguns materiais levado a campo, permanecem sem retirada, devido a falta de tempo hábil, porém, ainda serão coletados posteriormente para continuidade do trabalho. Essas dificuldades somente foram superadas porque contei com apoio de diversas pessoas e organizações, às quais cito brevemente a seguir. Antecipadamente me desculpo caso a memória me traia nesse momento, e esqueça de citar alguém que de alguma forma, permitiu que esta tese se concretizasse.

Em primeiro lugar agradeço a Deus por toda bondade e misericórdia para comigo, sem Ele não teria sido possível. Agradeço ao meu amado marido, Palmiere, e aos meus dois lindos e abençoados filhos, Miguel e Theo, pelo suporte incondicional, paciência e força para passar pelos vários momentos de aflição e desgaste, físico e emocional. Agradeço também aos meus pais, José Geraldo e Agnes, pelo conforto e compartilhamento das emoções nessa espera tão grandiosa. Aos meus irmãos, Taís, Gustavo e Carlos Henrique, agradeço pelos momentos de descontração e surpresas, pelas risadas e os momentos de qualidade. Aos meus sogros, cunhados, sobrinhos e afilhados, muito obrigada por terem sido companhia, auxílio e caminho nos momentos difíceis. Agradeço ao meu avô, José Corlaite, por ter aguentado firme até esse dia, e ser combustível a cada vez que o desânimo batia. Se não fosse por mim, seria por ele.

Agradeço também ao Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez, meu querido orientador, por me permitir fazer parte do seu grupo de trabalho, pelo acompanhamento de perto, sempre presente e acessível. Agradeço também à Profa. Dra. Teofania Heloisa Dutra Amorim Vidigal, pelo apoio e incentivo que, de uma forma ou de outra, sempre deram resultados práticos importantes. À Profa. Dra. Edna Maria de Faria Viana, agradeço pelo acompanhamento nesta trajetória. Aos colegas que me acompanharam e foram fonte de incentivo e conhecimento para chegar até aqui, meu muito obrigada.

À toda equipe do Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH), em especial do Laboratório de Estudos de *Limnoperna fortunei* (LELF), agradeço por estarem por perto, sendo facilitadores do processo. Agradeço a coordenação do curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, assim como toda a equipe da secretaria, em especial a Marina, um anjo de Deus aqui na Terra.

Aos professores, Prof. Dr. Frederico Fabio Mauad (USP/SC), Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri (UNESP), Prof. Dr. Luiz Gustavo de Oliveira e Silva (ETHZ - Zurich), Profa. Dra. Teofania Heloisa Dutra Amorim Vidigal (UFMG), Prof. Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano (UFAC), Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros (UFMG) e Prof. Dr. Jorge Luis Zegarra Tarqui (UFMG), que aceitaram fazer parte dessa banca de avaliação, meus sinceros agradecimentos pelo aceite. E por último, mas não menos importante, agradeço a CAPES pela bolsa de estudos ofertada a mim no período do doutorado, e também agradeço à FAPEMIG, CNPq e SEFAC, pelo apoio ao longo do meu trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer, filósofo alemão (1788-1860).

RESUMO

Os sistemas de bombeamento, principalmente os utilizados no setor de abastecimento de água e em instalações industriais e hidrelétricas, são comumente infestados pelo mexilhão dourado. Isso causa um aumento de operações de manutenção (por exemplo, desligamentos do sistema para limpeza) que podem gerar um aumento do custo de energia. A expansão geográfica do mexilhão dourado na América Latina apresenta um risco econômico, não só para o ecossistema em geral, mas também para o setor de energia. A iminência de sua disseminação na Amazônia, uma das principais bacias hidrográficas da América do Sul, preocupa pelos problemas que a bioinvasão desta espécie pode causar. Dada a ausência de estudos sobre a perda de eficiência energética em sistemas de bombeamento impactados pelo mexilhão dourado, este estudo propõe um metodologia para estimar o aumento do consumo de energia e custo de bombeamento, causado pela bioinfestação. Para a padronização dos métodos e desenvolvimento de cálculos (novas equações), foram feitas avaliações da literatura disponível (sobre o crescimento do mexilhão dourado em função do tempo de bioinfestação) e uma análise das dimensões (comprimento e altura) de um amostra de mexilhões disponíveis no laboratório. Também foi analisado, em campo, preferência de fixação (quanto à escolha dos materiais dispostos) e interferência da profundidade de fixação. Esses dados foram usados para calcular a rugosidade, gerada pela bioincrustação de mexilhão na sucção do bombeamento e na tubulação de descarga, necessária para determinar a perda de eficiência energética (perda de carga, consumo de energia e custo de bombeamento). Os métodos foram aplicados a uma estação elevatória representativa da Amazônia brasileira, como estudo de caso. Os resultados mostram um aumento médio nos indicadores econômicos (consumo e custo de bombeamento) após o sistema sofrer bioinfestação. Este aumento total correspondeu a 19% e 44% nos primeiro e segundo anos, respectivamente, atingindo a estabilização do aumento do custo de bombeamento em 46%, nos 30 meses de operação. Nossos resultados demonstram o pioneirismo da proposta, já que estes são os primeiros dados quantitativos sobre a eficiência energética do bombeamento associados à bioinfestação pelo mexilhão dourado e a evolução do fator de perda de carga. Esses resultados também podem ser usados para estimar o aumento de custos causado pela bioinfestação de mexilhão dourado no bombeamento de água bruta sistemas de outras instalações.

Palavras-chave: Bioincrustação. Custo. Eficiência energética. Preferência de fixação. Profundidade. Sistemas de bombeamento

ABSTRACT

Pumping systems, mainly those used in the water supply sector and in industrial and hydroelectric facilities, are commonly infested by the golden mussel. This causes an increase in maintenance operations (for example, system shutdowns for cleaning) which can lead to an increase in energy costs. The geographic expansion of the golden mussel in Latin America presents an economic risk, not only for the ecosystem in general, but also for the energy sector. The imminence of its spread in the Amazon, one of the main river basins in South America, is a matter of concern due to the problems that the bioinvasion of this species can cause. Given the lack of studies on the loss of energy efficiency in pumping systems impacted by the golden mussel, this study proposes a methodology to estimate the increase in energy consumption and pumping cost caused by bioinfestation. For the standardization of methods and development of calculations (new equations), evaluations of the available literature (on the growth of the golden mussel as a function of the time of bioinfestation) and an analysis of the dimensions (length and height) of a sample of available mussels were carried out. in the lab. It was also analyzed, in the field, the fixation preference (in terms of the choice of materials arranged) and the interference of the fixation depth. These data were used to calculate the roughness, generated by mussel biofouling in the pumping suction and discharge piping, necessary to determine the loss of energy efficiency (head loss, energy consumption and pumping cost). The methods were applied to a pumping station representative of the Brazilian Amazon, as a case study. The results show an average increase in economic indicators (consumption and pumping cost) after the system suffers bioinfestation. This total increase corresponded to 19% and 44% in the first and second years, respectively, reaching the stabilization of the pumping cost increase in 46%, in the 30 months of operation. Our results demonstrate the pioneering nature of the proposal, as these are the first quantitative data on the energy efficiency of pumping associated with bioinfestation by the golden mussel and evolution of the load loss factor. These results can also be used to estimate the cost increase caused by golden mussel bioinfestation in the raw water pumping systems of other facilities.

Keywords: Biofouling. Cost. Depth. Energy efficiency. Fixation preference. Pumping systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagens do mexilhão dourado fixado a um pedaço de corda. Fonte: Próprio autor.	21
Figura 2. Ilustração retirada de Barbosa et al. 2018 [9]. Cenários futuros médios gerados por 4000 simulações aleatórias do modelo construído com base nos registros de ocorrência de 2016 para <i>Limnoperna fortunei</i> . A) 2030 e B) 2050. A escala varia de 0 (verde, baixo risco de invasão) a 1 (vermelho, alto risco de invasão). Fonte: [9]	22
Figura 3. A-Matriz energética brasileira e mundial 2021 (ano base 2020), divididas em renováveis e não-renováveis. Fonte: [11].....	29
Figura 4. A-Matriz Elétrica Brasileira e mundial 2021 (ano base 2020), divididas em renováveis e não-renováveis. Fonte: [11].....	29
Figura 5. Exemplos de turbinas hidráulicas: a) Kaplan; b) Francis; c) Pelton. Fonte: [53]	31
Figura 6. Arranjo físico de uma usina, exemplo UHE Itaipu. Fonte:[54].....	33
Figura 7. Esquema dos componentes de uma Usina Termelétrica convencional. Fonte: CBIE [55].	34
Figura 8. Esquema Simplificado de uma Estação de Tratamento de Água. Fonte: CBIE [53].	37
Figura 9. Foto sifão mexilhão dourado. Foto: Jennifer TM Andrade.	45
Figura 10. Ilustração retirada de Santos (2005) [103]. Fases larvais de <i>Limnoperna fortunei</i> . (2) Mórula ciliada, 80 μm ; (3) Larva trocófora fase 1, comprimento 100 μm ; (4) Larva trocófora fase 2 (110 μm), (5) Larva trocófora fase 3 (125 μm), (6) Larva trocófora fase 4, com primórdios de concha (125 μm), (7) Larva “D”, (120 μm), (8) Véliger de charneira reta (150 μm), (9) Larva veliger umbonado (200 μm), (10) Larva pedivéliger (230 μm), (11) Pós-larva. Fonte: Santos et al, 2005 “Fases larvais do mexilhão dourado <i>Limnoperna fortunei</i> (Dunker) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) na Bacia do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil.	46
Figura 11. Modelo de amostra montada e levada a campo para avaliação do crescimento do mexilhão dourado.	50
Figura 12. Determinação da nomenclatura utilizada para montagem das amostras levadas a campo.	51
Figura 13. Elaboração do desenho experimental para montagem dos materiais em conjuntos de três placas (tríades), com separação de profundidade e materiais (por cor). Elaboração: Jennifer TM Andrade.	51

Figura 14. Montagem real de uma das 3 fileiras de amostras com diferentes materiais, distribuídos em conjuntos de três placas (triádes), momentos antes da colocação na água. Foto: Jennifer TM Andrade.....	52
Figura 15. Triádes dos materiais incrustados com mexilhão dourado, deslocados em 90° para realização das fotografias. a-Alumínio; b-Cerâmica com parte lisa para cima; c-Cerâmica com parte lisa para baixo; d-Madeira; e- Pneu; f-Tijolo e g-PVC.	54
Figura 16. Placas dos materiais: a-Alumínio; b-Cerâmica com parte lisa para cima; c-Cerâmica com parte lisa para baixo; d-Madeira; e- Pneu; f-Tijolo e g-PVC.....	55
Figura 17. Separação dos indivíduos incrustados no estrato de PVC para a profundidade de 8 metros. Sendo: a- 0-5 mm; b-5-10 mm; c-10-15 mm; d-15-20 mm e e-20-25 mm.	56
Figura 18. Descrição de como o mexilhão dourado foi medido, dimensões fornecidas em mm.	59
Figura 19. Variação do crescimento dos indivíduos de mexilhão dourado.....	59
Figura 20. Sombra da superfície incrustada pelo mexilhão dourado, traçada a linha média, para medição das rugosidades (e_i).	62
Figura 21. Estação de Tratamento de Água II, Rio Branco, Acre, constituída por um conjunto de bombas verticais do tipo turbina. Nota: 1—Bomba 1; 2 —Bomba 2; e 3 —Bomba 3.	66
Figura 22. Modelo simplificado do sistema de bombeamento da Estação Elevatória Elevatória II, Rio Branco, Acre.	68
Figura 23. Curva de crescimento valvar do mexilhão dourado em função do tempo de infestação, em meses. Curvas baseadas nos dados obtidos de Cataldo et al. [4], Choi e Chim [5], Nakano et al. [110], Boltovskoy e Cataldo [111], e Darrigran e Maroñas [112], e dados obtidos em campo.	70
Figura 24. Desnidade populacional em diferentes materiais mostrando a preferência de fixação do mexilhão dourado nos materiais: ALU – alumínio; CEC – cerâmica com parte lisa pra cima; PVC – cloreto de polivinila; TIJ – tijolo; CEB – cerâmica com parte rugosa pra cima; e MAD – Madeira.....	71
Figura 25. Curva de crescimento valvar do mexilhão dourado em função do tempo de infestação, em meses. Curvas baseadas em dados da literatura e dados obtidos em campo, média e máximo.	72
Figura 26. Curva da rugosidade causada pelo biofouling na tubulação em função do tempo de bioinfestação. Os valores médios e máximos se referem ao período.	73

Figura 27. Espessura da bioincrustação causada pelo mexilhão dourado com diferentes velocidades do fluido, medida através dos indivíduos coletados em Itaípu e em Furnas, sem arrancamento causado pelo arrasto hidrodinâmico.	74
Figura 28. Evolução do fator de perda de carga para tubulações de 400, 600 e 800 mm de diâmetro, em função do tempo.	75
Figura 29. Evolução do fator de perda de carga para tubulações de 1, 2 e 3 m de diâmetro, em função do tempo.	75
Figura 30. Evolução do fator de perda de carga para tubulações de 5, 8 e 10 m de diâmetro, em função do tempo.	76
Figura 31. Evolução do incremento percentual médio do fator de perda de carga - período de 0 a 39 meses.....	77
Figura 32. Aumento do consumo em quilowatts-hora (kWh) para cada bomba do Elevação Elevada Estação (EPS) de Rio Branco, após o início da bioinfestação do mexilhão dourado (MD), com base nos dados das Tabelas 9, 10, 11 e 12, e em função do tempo de operação, dado em meses.	82
Figura 33. Aumento do consumo em quilowatts-hora (kWh/dia) para cada bomba do Elevação Elevada Estação (EPS) de Rio Branco, após o início da bioinfestação do mexilhão dourado (MD), com base nos dados das Tabelas 9, 10, 11 e 12, e em função do tempo de operação, dado em meses.	83
Figura 34. Taxa de consumo total diário do Sistema de Elevação de Rio Branco, considerando bioincrustação.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Enquadramento sistemático do <i>L. fortunei</i>	44
Tabela 2. Idade e comprimento valvar do mexilhão dourado	49
Tabela 3. Identificação dos materiais analisados de acordo com profundidade, substrato e posição.	50
Tabela 4. Datas de colocação e coleta das amostras para análise do crescimento do mexilhão dourado.	52
Tabela 5. Datas de colocação e coleta das amostras para análise da taxa de crescimento do mexilhão dourado.	57
Tabela 6. Medições efetuadas nos indivíduos coletados para determinação das novas equações	60
Tabela 7. Características das tubulações acopladas às 3 bombas representativas adotadas para bombear de do rio até a descida da calha do rio — Rio Branco / Acre [122].	67
Tabela 8. Características das bombas da Estação Elevatória Elevatória II, Rio Branco, Acre [122]:	67
Tabela 9. Densidade de indivíduos fixados nos materiais avaliados para o período de um ano em campo (Furnas), para cada posição de fixação.	69
Tabela 10. Dados para cálculo do f em função da variação de velocidade, mostrando oclusão do sistema.	77
Tabela 11. Progressão dos consumos e custos, face à progressão da bioincrustação do mexilhão dourado para a Bomba 1, com uma vazão de 600 L/s e um diâmetro de 500 mm.	79
Tabela 12. Progressão dos consumos e custos, face à progressão da bioincrustação do mexilhão dourado para a Bomba 2, com uma vazão de 300 L/s e um diâmetro de 400 mm.	80
Tabela 13. Progressão dos consumos e custos, face à progressão da bioincrustação do mexilhão dourado para a Bomba 3, com uma vazão de 200 L/s e um diâmetro de 300 mm.	81
Tabela 14. Resumo do impacto da bioinfestação transgênica na EPS Rio Branco até o período de estabilização.	81

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

B_1	Primeira raiz da equação de Buzzelli
B_2	Segunda raiz da equação de Buzzelli
D_{vd}	Déficit de fluxo diário
H_{total}	Altura total de elevação
P_{bomba}	Potência da bomba
R_a	Rugosidade Média
T_{ab}	Tempo adicional de bombeamento
“D”	Estágio larval de <i>Limnoperna fortunei</i>
ΔH	Perda de carga
$^{\circ}C$	Graus Celcius
A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALU	Alumínio
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanço Energético Nacional
BOD	Biochemical Oxygen Demand
bs	Comprimento valvar
bt	Espessura da bioincrustação
C1	Consumo do sistema de bombeamento
C2	Consumo do sistema de bombeamento
C3	Consumo incremental
C4	Custo incremental
C5	Custo diário
C6	Total do custo por trimestre
C7	Custo do bombeamento
CBEIH	Centro de Bioengenharia de Espécies Invasoras de Hidrelétricas
CEB	Cerâmica parte de baixo Lisa
CEC –	Cerâmica parte de cima Lisa
CI –	Cast iron
CONABIO	Comissão Nacional de Biodiversidade
CW	Colebrook White
D	Diâmetro
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
e	Rugosidade
$Err_{máx}$	Erro Máximo
f	Fator de perda de carga
γ	Viscosidade cinemática da água
g	Gravidade
GW	Giga Whatt
H	Discharge head
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Incr.	Incremento
ind	Indivíduo(s)
Inf	Infestação
JIE	Jornal Itaipú Eletrônico
<i>L. fortunei</i>	<i>Limnoperna fortunei</i>

<i>L.f.</i>	<i>Limnoperna fortunei</i>
LELF	Laboratório de Estudo de <i>Limnoperna fortunei</i>
L	Comprimento
MAD	Madeira
n	Número de constantes
Ø	Diâmetro
Op	Operação
Ph	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Pneu
P	Potência
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Vazão
Re	Número de Reynolds
sh	Altura da concha
sl	Comprimento valvar
TIJ	Tijolo
TWh	Terawatt-hora
UHE	Usina Hidrelétrica
V	Velocidade
w	Seção
γ	Water-specific weight
η	Eficiência
μm	Micrometro
Θ	Ângulo de fixação
<i>k</i>	Coefficiente de perda de carga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Principais instalações impactadas	21
1.2 Justificativa.....	25
1.3 Hipótese.....	25
2 OBJETIVOS	26
2.1 Objetivo Geral	26
2.2 Objetivos Específicos	26
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1 Matriz Energética Brasileira.....	27
3.2 Usinas Hidrelétricas	30
3.3 Centrais Termoelétricas.....	34
3.4 Estações Elevatórias	36
3.5 Revisão geral sobre perda de carga	39
3.5.1 Perda de Carga Localizada	39
3.5.2 Perda de carga distribuída.....	42
3.6 O Mexilhão Dourado.....	44
3.6.1 Características e impactos.....	44
3.6.2 Reprodução e ciclo de vida.....	46
3.6.3 Desenvolvimento de <i>Limnoperna fortunei</i>	47
3.6.4 Controle de <i>Limnoperna fortunei</i>	47
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 Curva de Crescimento Mexilhão Dourado	49
4.2 Ângulo de Fixação (θ).....	58
4.3 Espessura do Biofouling (bt).....	61
4.4 Rugosidade (e).....	61
4.5 Fator de Perda de Carga (f) e Perda de Carga (ΔH)	63
4.6 Eficiência Energética.....	64
4.7 Estudo de caso: Estação Elevatória	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1 Avaliação do Impacto do Mexilhão Dourado em Estações Elevatórias	69
5.2 Curva de Crescimento do Mexilhão Dourado	69

5.3 Ângulo de Bioincrustação	72
5.4 Rugosidade	72
5.5 Espessura do Biofouling.....	74
5.6 Fator de Perda de Carga e Diâmetro Interno	74
5.7 Eficiência Energética do Estudo de Caso.....	78
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	85
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	88
8. ANEXOS	99
ANEXO 01	99
ANEXO 02	120
ANEXO 03	125
ANEXO 04	131

1 INTRODUÇÃO

O uso de recursos hídricos é uma constante na humanidade e tem-se caracterizado como sendo uma das atividades essenciais a existência humana e ao progresso das civilizações. Os recursos hídricos são fundamentais para o abastecimento humano, consumo industrial e para a geração de energia elétrica.

A partir do final do século XIX, foi intensificado o uso de recursos hídricos para a geração de energia elétrica, que se tornou um elemento fundamental para a humanidade, ao ponto de ser inimaginável um mundo sem o uso desse insumo. Assim, investigar possíveis interferências que possam impactar esses setores, é uma tarefa que se reveste de grande importância, uma vez que boa parte das atividades humanas, na atualidade, são extremamente dependentes dos recursos hídricos. Suas ramificações, como distribuição para consumo e a própria geração de energia elétrica, encabeçam essa interminável lista de utilização.

No que tange os sistemas de abastecimento de água, tem-se um conjunto de estratégias de obtenção da água que passa desde a coleta em cursos d'água superficiais, a captação de águas subterrâneas, até por processos de dessalinização. Os sistemas industriais utilizam a água em seus processos tanto para resfriamento, quanto no processo de produção industrial propriamente dito.

Com isso, um problema ambiental atual vem chamando atenção. Se trata da bioinfestação causada por uma Espécie Exótica Invasora (EEI) ou Invasive Alien Species (IAS – sigla em Inglês), conhecida popularmente por mexilhão dourado (MD), *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) [1]. Essa espécie tem recebido considerável destaque como Biofouler (organismos que se fixam à superfície), causando danos aos ecossistemas e instalações industriais feitas pelo homem (por exemplo, hidrelétricas e as do setor de abastecimento de água) [2,3], através do biofouling (bioincrustação). Casos de macrofouling (grandes colônias de bioincrustação) já são observados em larga escala.

É possível observar a forma de fixação e formação das colônias a partir da Figura 1. Essa IAS atinge a fase de fixação ao substrato, pediveliger, entre 15 a 21 dias [4,5]. Também se dispersa facilmente no ambiente, passando pela fase larval, e adere-se a vários tipos de substratos, como plantas, madeiras, pneus ou estruturas metálicas [4]. O MD atinge seu potencial reprodutivo

com um comprimento valvar em torno de 6 mm [6], o que explica seu rápido crescimento em camadas e suas densidades de até 15 ind/cm² [7].



Figura 1. Imagens do mexilhão dourado fixado a um pedaço de corda. Fonte: Próprio autor.

Esse molusco está presente no Brasil desde 1998 [8], e sua distribuição geográfica concentra-se atualmente nas regiões sul e sudeste do Brasil, com perspectivas de expansão da bioinvasão para a região amazônica [9,10], sendo a bacia amazônica um dos maiores centros de potencial hídrico no Brasil [11]. A dispersão do MD pode ocorrer através de larvas planctônicas, transportadas principalmente por barcos ou por espécimes juvenis e adultos, aderido a diversos tipos de substratos [12], o que torna a bacia amazônica uma região com um alto risco de bioinvasão considerando que esta bacia é amplamente navegável e o fluxo de barcos é alto [13].

Sua preferência de fixação é um tema abrangente, visto que, do ponto de vista econômico, alguns materiais tendem a apresentar um alto valor agregado quando expostos à essa bioinfestação. A profundidade de fixação também é um tema importante, pelo fato de ser comprovada a interferência nas estruturas dos sistemas fluido mecânicos em questão.

1.1 Principais instalações impactadas

As Usinas Hidrelétricas (UHE's) vêm se tornando foco de pesquisas que visam o combate às condições externas que interferem na manutenção ou aumento de produção de energia [14]. O cenário energético brasileiro vem passando por alterações, tanto na forma, quanto na capacidade de produção de energia com aumento da participação das Fontes de Energias Renováveis (FER) [15]. Apesar de hoje já existirem usinas eólicas, com um representativo percentual de participação na produção de energia limpa (aumento de 26,7% em 2021), assim como a energia solar (aumento de 55,9% na produção em 2021), as usinas hidrelétricas ainda ocupam o lugar

de maior segmento de produção de energia renovável do Brasil (58,6%) [11]. Uma diversificação da oferta desses serviços vem sendo buscada pelos riscos sistêmicos relacionados à grande dependência de energia hidrelétrica, bem como problemas sociais e ambientais [15,16]. Outro ponto que justifica a diversidade na produção de energia é para que seja mantido o crescimento de produção de energia por fontes renováveis tendo em vista a preocupação com a diminuição das emissões de carbono (conceito global que o Brasil lidera) [11].

Além da UHE's, as *Estações Elevatórias (EE's)* também apresentam impactos negativos causados pela bioinvasão, principalmente pelo fato de que os sistemas de bombeamento estão no centro da maioria das atividades humanas [18] e representam aproximadamente 20% do consumo mundial de energia [19]. As *Centrais Geradoras Termelétricas (UTE's)* vem também se tornando grande setor impactado pelas bioinvasões, por apresentarem ano após ano, um aumento na participação da matriz energética brasileira [11]. Esse impacto é representativo nos sistemas de captação de água e de resfriamento [2]. O risco de bioinvasão do mexilhão dourado nos sistemas hídricos é relatado por Oliveira et al. (2018), conforme observado na Figura 2. Destaca-se a preocupante chegada do mesmo na região norte, em pouco mais de 5 anos, assim como a possibilidade de expansão na região amazônica até 2050 [9].

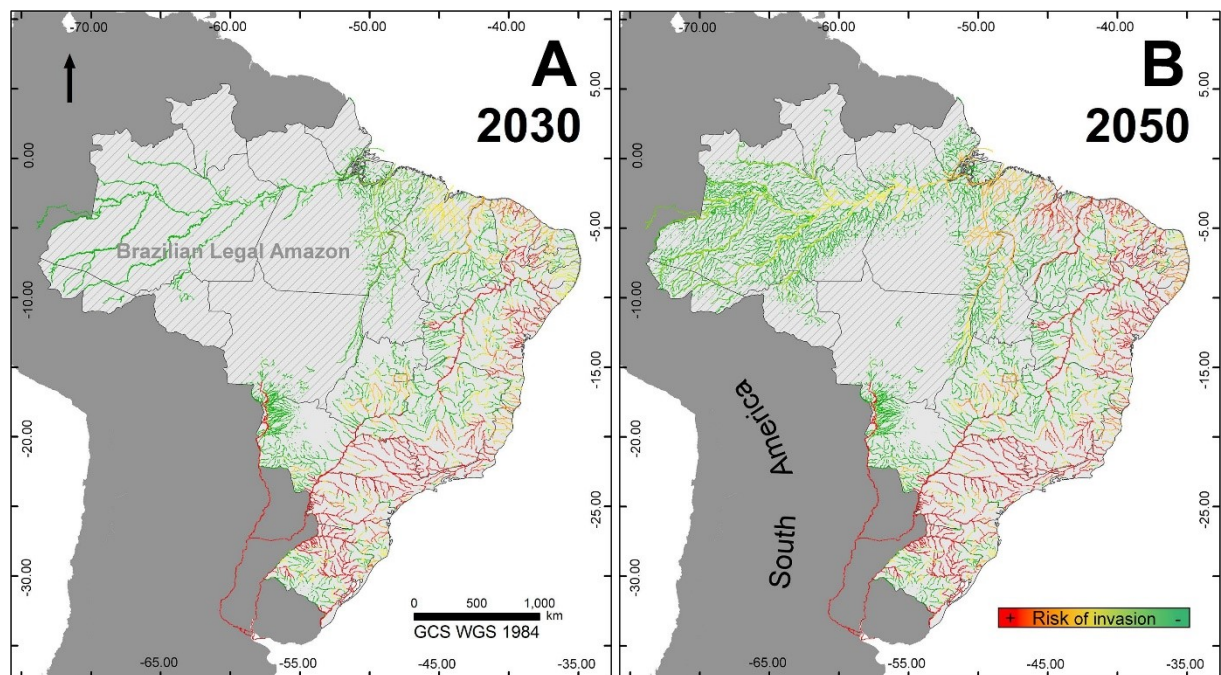


Figura 2. Ilustração retirada de Barbosa et al. 2018 [9]. Cenários futuros médios gerados por 4000 simulações aleatórias do modelo construído com base nos registros de ocorrência de 2016 para *Limnoperna fortunei*. A) 2030 e B) 2050. A escala varia de 0 (verde, baixo risco de invasão) a 1 (vermelho, alto risco de invasão). Fonte: [9]

Tanto as UHE's e UTE's quanto as EE's podem ser construídas com tubulações de diferentes materiais, sendo os mais comuns: cloreto de polivinila (PVC), polietileno de alta densidade, ferro fundido, concreto e aço [20]. Esses materiais podem estar sujeitos à bioincrustação causada por sedimentos precipitados da água [21,22], que levam a uma perda de eficiência energética devido ao aumento da resistência que o fluido encontra [23]. Isso também pode ocorrer através da bioinfestação do MD, que pode aumentar gradualmente a rugosidade da superfície das paredes internas da tubulação, conforme relatado para *Dreissena polymorpha* (o mexilhão zebra) [24]. A preferência de fixação funciona como um termostato para identificação da taxa de crescimento populacional da espécie, visto que, de acordo com Nakano et al. 2014 [2] e Castro et al. 2019 [24], o MD apresenta preferência de fixação por determinados materiais, sendo então, de grande importância a determinação dessa preferência, dentre os materiais mais utilizados nas regiões onde se instalam os sistemas de bombamento.

Alguns problemas causados por esse aumento de rugosidade, como uma diminuição no diâmetro interno e uma elevação do fator de perda de carga (f) foram relatados por Moody (1944) [25]. Esses problemas são agravados com o envelhecimento da tubulação, como resultado do tempo de exposição a diferentes condições ambientais [27,28].

Diferentes materiais, assim como diferentes profundidades podem interferir nas densidades populacionais de MD, visto que para as profundidades maiores, existe uma redução da abundância e distribuição do tamanho do MD [29] relacionado à disponibilidade alimentar e taxa de oxigênio dissolvido. Esses fatores impactam a distribuição populacional e sua densidade, mostrando que o impacto causado pela bioinfestação, tende a sofrer uma variação de acordo com a profundidade da fixação do MD. Essa informação é verificada no corpo do trabalho, uma vez que, ela tende a contribuir para as avaliações da taxa de crescimento, assim como da rugosidade superficial, após o início da bioinfestação. Como já dito, os materiais, aos quais o MD se fixa, possuem composições químicas diferentes, levando a uma variação na preferência de fixação [24]. Essa relação, pode responder questões de impacto aos sistemas fluido mecânicos mais próximos e mais afastados da entrada d'água, onde, visualmente, ocorrem as maiores taxas de fixação.

Além das perdas que a bioinfestação gera para o sistema, o custo de manutenção para limpeza e outros fatores relacionados à entrada do MD nos sistemas fluido mecânicos, impactam financeiramente o funcionamento dos sistemas. Recentemente, os custos econômicos

relacionados às invasões biológicas no Brasil foram, pela primeira vez, estimados por Adelino et al. (2021) [30], utilizando o InvaCost (banco de dados) [31] e dados de diferentes espécies de IAS, incluindo o MD. Das 460 IAS presentes no Brasil, apenas 16 (ecossistemas aquáticos e terrestres) estão registradas no InvaCost, sendo o MD a única espécie de água doce com dados que permitem uma estimativa dos custos econômicos [30]. Observou-se que os tipos de custos associados ao MD estão concentrados nas atividades de controle, prevenção, atividades sociais (por exemplo em UHE's, UTE's e EE's), e reparação de danos. Porém, também foi observado a escassez de indicadores econômicos disponíveis a respeito dos impactos da bioinfestação causada pelo MD. Isso evidencia a necessidade de estudos acerca dos impactos, principalmente financeiros, causados pela bioinfestação do mexilhão dourado. Esses dados, auxiliariam na estimativa dos custos que definiriam ações prioritárias quanto ao controle da espécie [30]. Uma dessas ações poderia ser a determinação da eficiência energética avaliada em função do aumento do custo de bombeamento causado pela bioinfestação, uma vez que fatores econômicos servem como parâmetros para essa definição [32].

Essa bioinvasão vem interferindo não só na produção, mas geração e distribuição de água e energia [34], e pode causar: 1) aumento na rugosidade da superfície da tubulação, podendo leva-la à oclusão [2,35]; 2) aumento da perda de carga causada pela redução do diâmetro interno [36]; 3) corrosão e diminuição da resistência de alguns materiais devido ao biofilme formado pela bioincrustação [37]; e abrasão causada pela fricção das cascas no interior de tubulações com alta vazão de água [38]. Esse molusco pode afetar várias partes do sistema, da adução ao resfriamento [2], dependendo da velocidade de escoamento do fluido, que permitirá ou não sua fixação nas superfícies [39,40].

Dessa forma, o interesse no entendimento sobre as questões levantadas pela bioincrustação (preferência de fixação, profundidade de fixação, perda de carga e custo de bombeamento) aumenta dia após dia, até mesmo pelo impacto que a bioinfestação vem causando nas centrais geradoras e consumidoras, através dos custos inespecíficos causados no sistema [30]. Para tanto é necessário primeiramente o entendimento de como o biofouling impacta os sistemas, para que depois possa ser feito um levantamento dos custos causados pela bioinfestação do mexilhão dourado, sabendo-se que de fato ela já ocorre [33].

1.2 Justificativa

O Brasil possui uma vantagem, se comparado em termos mundiais, por dispor de recursos hídricos em abundância. A maior parte da geração elétrica do Brasil é produzida por usinas hidrelétricas e a totalidade da população brasileira se serve de recursos de abastecimento de água oriundos de fontes subterrâneas ou captação em cursos d'água. A captação em curso d'água corresponde à maior parte do abastecimento humano e industrial no Brasil. Dessa forma, a entrada do mexilhão dourado (MD) nesses sistemas, tem o potencial de impactar diretamente milhares de sistemas elevatórios, muitos deles presentes em comunidades que possuem baixa capacidade de investimento e dificuldades para se realizar avaliações acerca dos impactos oriundos das bioinfestações. Assim sendo, optou-se, nesse trabalho, por dar uma maior atenção aos sistemas elevatórios de captação de água, em especial da região amazônica, que possui enorme dificuldade do ponto de vista tecnológico e do ponto de vista de investimento em sistemas de proteção ambiental, além de estar na zona de risco de infestação a curto prazo (Figura 2). Assim, ao final dessa investigação será apresentado o impacto que pode ser causado em uma estação elevatória da região Amazônica. Na sequência, será feita uma extrapolação dos valores obtidos para a área de influência dessa região, de forma que possa ser realizada uma estimativa do custo de bombeamento para a população em termos do aumento do consumo energético após entrada do MD nos sistemas de captação.

1.3 Hipótese

Analisando-se um sistema de bombeamento bioinfestado pelo mexilhão dourado, tem-se o aumento do fator de perda de carga, levando o sistema fluido mecânico à oclusão, assim como diminuição da eficiência energética. Essa bioinfestação pode ser acentuada em função da profundidade e material infestado, gerando variação de densidades populacionais que afetam o escoamento, pelo aumento causado na rugosidade superficial da tubulação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Verificar a influência da bioincrustação do mexilhão dourado no aumento do fator de perda de carga em sistemas fluido mecânicos com relação ao tempo de bioinfestação, com avaliação da perda de eficiência energética causada pelo aumento do custo de bombeamento.

2.2 Objetivos Específicos

- Construir uma curva de crescimento do mexilhão dourado em função do tempo, com dados coletados em campo, comparando-a com a curva obtida com dados da literatura;
- Determinar o ângulo de fixação do mexilhão, correlacionando-o com o tempo de bioincrustação, de forma a estimar a rugosidade que o sistema alcança, analisando o crescimento da espessura da bioincrustação;
- Desenvolvimento de novas equações e aprimoramento de outras, para estimar a rugosidade e dimensões do MD;
- Identificação do substrato que permite a maior fixação de indivíduos;
- Avaliar a alteração do fator de perda de carga causado pela bioinfestação, em função do tempo, assim como variação do diâmetro interno após redução da espessura de camada formada;
- Verificar se a profundidade tem influência na formação das colônias e na taxa de crescimento;
- Apresentação de um estudo de caso representativo sobre o impacto do mexilhão dourado em uma estação elevatória presente na região amazônica e fazer a extrapolação dos resultados para a Amazônia Brasileira.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Matriz Energética Brasileira

A energia, na forma de eletricidade juntamente com os recursos energéticos, impulsionam a prosperidade da economia mundial [41], e demonstra também uma relação com o Produto Interno Bruto (PIB), na qual a demanda por energia implica em um maior crescimento econômico para determinado período [42]. Vê-se então, que dentro de um mesmo contexto, duas realidades se chocam: a primeira é a de uma crescente demanda pela produção de energia, vinculada ao crescimento populacional e expansão industrial; e a segunda, ao aumento do grau de segurança e meios sustentáveis de se produzi-la [43], com foco na redução da emissão de carbono. Este é um fator preponderante no quesito de produção de energia limpa atualmente, visto que sociedade, empresas e instituições públicas vem se engajando cada vez mais na busca de um novo formato de desenvolvimento sustentável, pautado na eficiência econômica, igualdade social e integridade ambiental [44].

No Brasil, o crescimento demográfico, populacional e industrial vem elevando o consumo anual de energia. Espera-se um crescimento de mais 3,4% entre os anos de 2020 a 2030 [45]. Para tanto, é necessário que o abastecimento energético tenha continuidade de geração, fazendo-se necessária a produção de energia através das fontes renováveis, encontradas na natureza com renovabilidade em ciclos, e das não renováveis, em quantidades limitadas, gerando ao mesmo tempo. Mundialmente, há uma variação natural na produção de energia utilizando as fontes renováveis, que por sua vez, necessitam de fontes não renováveis, de rápida resposta, para suprirem essa queda de produção [46]. Exemplos dessas situações são a produção de energia através das usinas eólicas, que pela sazonalidade dos ventos tem uma variação de produção diária. As usinas hidrelétricas (UHE's) tem variações mensais ou semestrais devido a sazonalidade mais ampla que altera os níveis dos reservatórios. Já as usinas solares têm uma sazonalidade próxima as eólicas em função do ciclo solar diário ao longo do ano que provoca uma grande flutuação do número de horas solar ao longo do ano. Nessas situações, faz-se necessária, a utilização de outras fontes para complementação da energia [47], como as usinas termelétricas e nucleares. No caso brasileiro, o uso de fontes não renováveis vem se acentuando nas últimas 2 décadas. Isso causou um acréscimo no custo de geração de energia e levou o Brasil a adotar o sistema de bandeiras tarifárias [47].

Por sua vez, essa segurança no abastecimento tem como pressuposto a confiabilidade do abastecimento, que elimina riscos de cortes súbitos de energia, em grandes regiões, conhecido como apagão. Como comparação, no caso da confiabilidade, os níveis de carga são avaliados para garantir uma produção contínua e no caso de falta de confiabilidade, os prejuízos são imediatos, e imensuráveis, uma vez que atingem parcelas identificadas, mas que não produzem e nem agregam de forma igualitária. Já a falta de segurança, gera prejuízos a longo prazo que podem ser mensurados e cautelosamente identificados através de parâmetros para se contornar a situação, como nos casos de racionamento em regiões onde os níveis dos reservatórios estão críticos [48].

No Brasil, a busca pela energia limpa, vinda da implementação da sustentabilidade junto à produção e distribuição de energia, vem crescendo e ampliando os horizontes quanto à forma de produção de energia. Para isso o Brasil optou pela implantação de usinas eólicas e fotovoltaicas que vem ganhado peso importante para ampliar a geração, preocupando-se principalmente com a diminuição da emissão de carbono. Essa ação foi alavancada através de tratados, como o de Kyoto substituído pelo Acordo de Paris por exemplo, em que os países se comprometem com a redução da emissão de gases de efeito estufa. Essa preocupação do crescimento da produção com utilização de novas fontes se torna ainda mais necessária pelo decréscimo da capacidade de armazenamento de energia [48]. Isso faz com que seja necessário o surgimento de demais fontes capazes de suportar período de baixas afluências de vazão com deplecionamento dos reservatórios das usinas hidrelétricas, que hoje são o meio de produção que supre a maior parte das necessidades do consumo de eletricidade no Brasil. Por outro lado, a produção de energia, oriunda das usinas hidrelétricas, tem uma variação que está diretamente relacionada a sazonalidade hidrológica que implica que as instalações não injetem a sua capacidade máxima no sistema interligado nacional (SIN). A usina de Belo Monte, por exemplo, produz apenas 20% da sua capacidade total [11].

A matriz energética brasileira em 2021, ano base 2020, apresenta a distribuição da produção de energia mostrada na Figura 3. Nesta, são observadas as variações entre fontes renováveis e não renováveis e a divisão da obtenção de energia no mundo, evidenciando a diferença das fontes renováveis e não renováveis. No Brasil, no ano de 2020 observou-se que 48,4% das fontes produtoras de energia são renováveis, quase metade de toda a produção, enquanto a nível mundial, esse montante chega a apenas 15%, somando-se as participações das energias hidráulica e de biomassa [11].

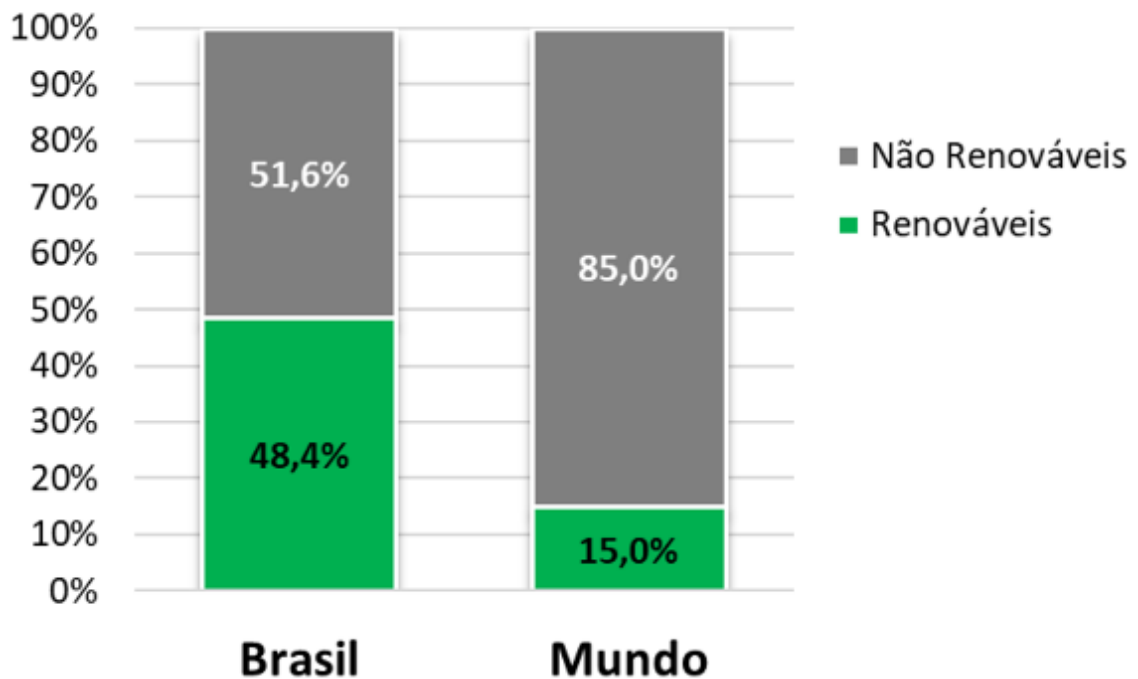


Figura 3. A-Matriz energética brasileira e mundial 2021 (ano base 2020), divididas em renováveis e não-renováveis. Fonte: [11]

A matriz elétrica no Brasil tem um componente maior em fontes renováveis do que a matriz energética, fato derivado da questão de que no Brasil, a maior parte de geração de energia elétrica se dá através das usinas hidrelétricas. Pela Figura 4, pode-se comparar a diferença fontes produtoras de eletricidade (renovável e não renovável) do Brasil em relação ao mundo.

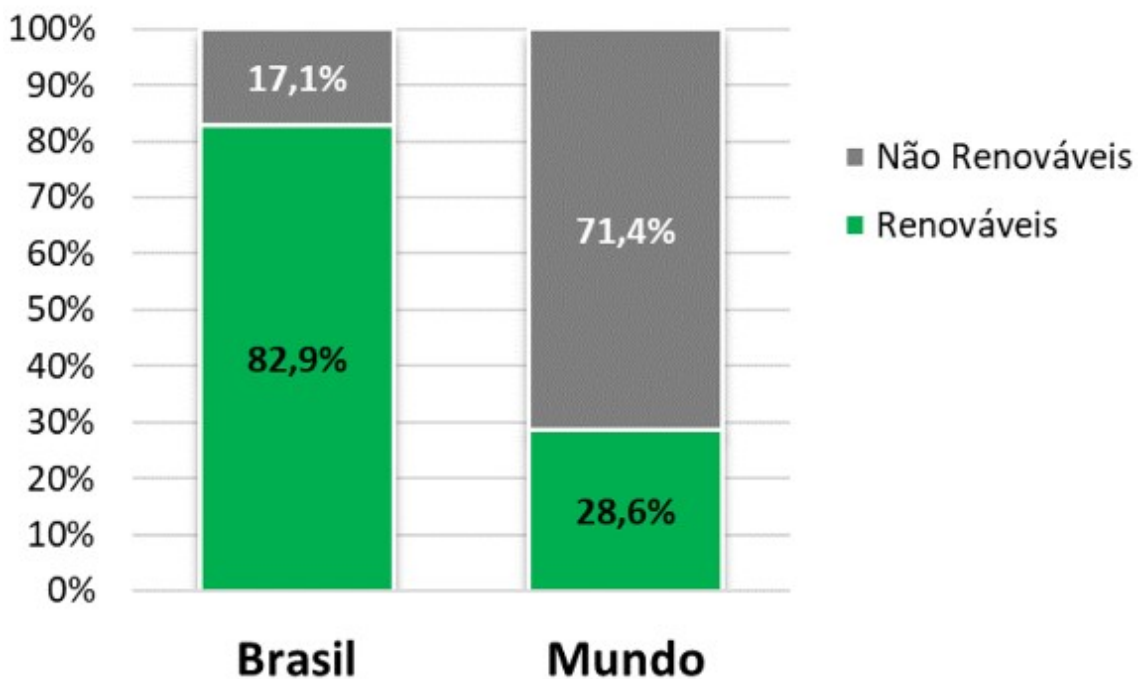


Figura 4. A-Matriz Elétrica Brasileira e mundial 2021 (ano base 2020), divididas em renováveis e não-renováveis. Fonte: [11]

É possível inferir que o Brasil possui menores custos de geração e de operação, uma vez que maior parte das unidades geradoras são de fontes renováveis. Outro ganho se dá com a menor emissão de gases de efeito estufa [11].

3.2 Usinas Hidrelétricas

Até o final de 2022 existiam no Brasil 1.383 empreendimentos de geração de energia no setor hídrico, dividido em Central Geradora Hidrelétrica (CGH) (739 unidades), Pequena Central Hidrelétrica (PCH) (425 unidades) e Usina Hidrelétrica (UHE) (219 unidades), somando um montante de produção que atinge cerca de 106 GW de potência instalada. Existem ainda 35 empreendimentos em construção que irão agregar 935.271 kW de potência instalada aos recursos atuais e mais 109 empreendimentos com construção não iniciada que produzirão 2.106.931 kW de potência [47]. Atualmente a capacidade instalada das usinas hidrelétrica é superior a 150 GW de potência [11].

As hidrelétricas são responsáveis pela produção de 66,6% de toda eletricidade consumida no Brasil, e junto com as demais fontes, como termoeétrica, solar e eólica compõem a matriz elétrica do Brasil, evidenciando sua importância no quadro de geração de energia [48]. Considerando que o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em cerca de 172 GW, têm-se uma expectativa de crescimento para a utilização dos recursos hídricos, principalmente na região amazônica [11], que apresenta um aproveitamento atual de apenas 13,7% do total inventariado [47].

Discutir o emprego de usinas hidrelétricas é trazer à tona a questão da criação das barragens, que poderá assumir três finalidades: i) acúmulo do desnível de um rio para produção de queda; ii) criação de reservatório com capacidade de regularização do escoamento; iii) ou aumento do nível d'água para entrada num canal, túnel ou tubulação de conduto forçado, que leva a água para a casa de força [49]. Na construção de uma barragem, em geral, duas situações se fazem bem distintas, a primeira é a obtenção de um desnível, que conseqüentemente cria um reservatório, e a segunda que cria um desvio do rio para permitir a adução da hidrelétrica [50].

A região amazônica tem atualmente um grande potencial instalado. As maiores UHE's são Tucuruí e Belo Monte no Estado do Pará e Santo Antônio e Jirau em Rondônia. Os rios amazônicos (Madeira, Tocantins, Araguaia, Xingu e Tapajós) respondem por cerca de 63% do

assim chamado “potencial hidrelétrico” não aproveitado no Brasil, ou quase dois terços desse total, estimado em mais de 250 GW [51]. De acordo com Boyle (2012) [52], isso comprova que o território amazônico vai passar por uma pressão do capital internacional, com o intuito de transformar seus rios em larga produção de megawatts.

O aproveitamento nas usinas se dá através do uso de turbinas hidráulicas acopladas a geradores de corrente elétrica. Possuem eficiência de até 90% e são a forma mais eficaz de conversão de energia primária em secundária, podendo ser apresentadas em diferentes formas e tamanhos. Usualmente mais utilizado, o modelo Francis pode trabalhar tanto na posição vertical quanto na horizontal e pode ser adaptado para baixas e altas quedas [53]. Outros modelos também utilizados são as turbinas Kaplan e Pelton que estão representados na Figura 5. Todas essas turbinas aproveitam a energia da água armazenada em um reservatório com a chegada da água até elas através do conduto forçado. Essa água, após passar pelas turbinas é descarregada, via canal de fuga em curso d’água a jusante.

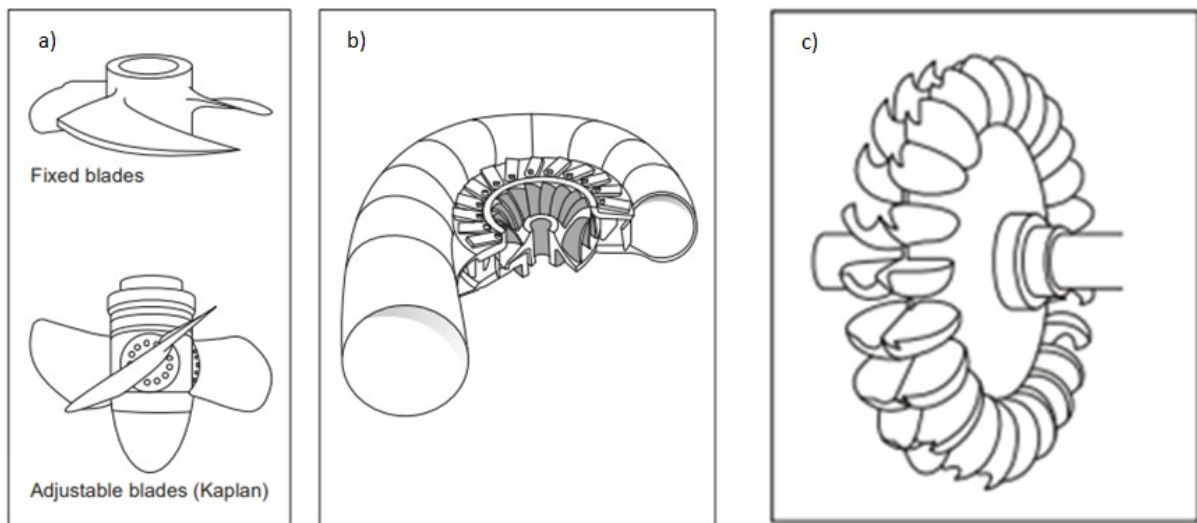


Figura 5. Exemplos de turbinas hidráulicas: a) Kaplan; b) Francis; c) Pelton. Fonte: [53]

Nas turbinas Francis, uma parte da queda de pressão ocorre no distribuidor e o restante na própria turbina. Isso faz com que a água ocupe completamente a cavidade ocupada pelo rotor e ao passar pela turbina, transfira a energia de pressão, assim como a energia cinética às pás do rotor. Como todas as pás da turbina estão envolvidas no processo de transferência de energia, o diâmetro dessa turbina é menor do que na turbina Pelton. Nesta, o rotor é acionado direcionando o fluxo contra as pás através de injetores, retirando a máxima quantidade de movimento da água. Nas turbinas tipo Pelton, a queda total de pressão da água ocorre no injetor,

não havendo queda de pressão quando o jato d'água entra em contato com as pás. Já as turbinas Kaplan, turbinas também de reação com as do tipo Francis, utilizam uma combinação de pressão e velocidade da água para acionar o rotor, no entanto, a velocidade da água empregada é maior do que nas turbinas tipo Francis. Essas turbinas, com pás ajustáveis, possuem alto rendimento sobre diversas alturas de queda e abertura do distribuidor, otimizando a eficiência da turbina sobre uma larga faixa de operação.

Os condutos forçados exercem papel fundamental na produção de energia, visto que é através dos mesmos que a água é transportada até as turbinas. Nesse trajeto há uma perda de carga equivalente a uma redução na altura de queda, que é determinado através de equações clássicas. Outro problema presente nos condutos forçados é o golpe de aríete, que causa uma onda de pressão no conduto, provocando grandes esforços sobre suas paredes. Esse fenômeno pode causar violentas oscilações de pressão que podem interferir na operação da turbina. Esse problema, em tubulações longas, costuma ser resolvido com a utilização de chaminés de equilíbrio, que aliviam o golpe tanto positivo quanto negativo. Para máxima eficiência, as chaminés devem ser instaladas o mais próximo possível das turbinas e sua construção deve obedecer alguns parâmetros como altura mínima e tipo de material.

Os órgãos adutores, responsáveis por transportar a água da entrada da tomada d'água às turbinas, apresentam em sua composição perdas de carga que podem ser causadas pela rugosidade superficial, formato do componente ou variação da inclinação. Essas perdas indicam uma queda na eficiência do sistema e podem ser medidas através de equações em função dos parâmetros de execução do projeto. Cada uma delas apresenta uma particularidade.

As UHE's apresentam um arranjo que pode sofrer variações de acordo com o desnível geográfico e a vazão, características que também influenciam na determinação do número de componentes e máquinas para produção de energia. A Figura 6 apresenta um modelo de arranjo e estrutura básico de usina hidrelétrica.

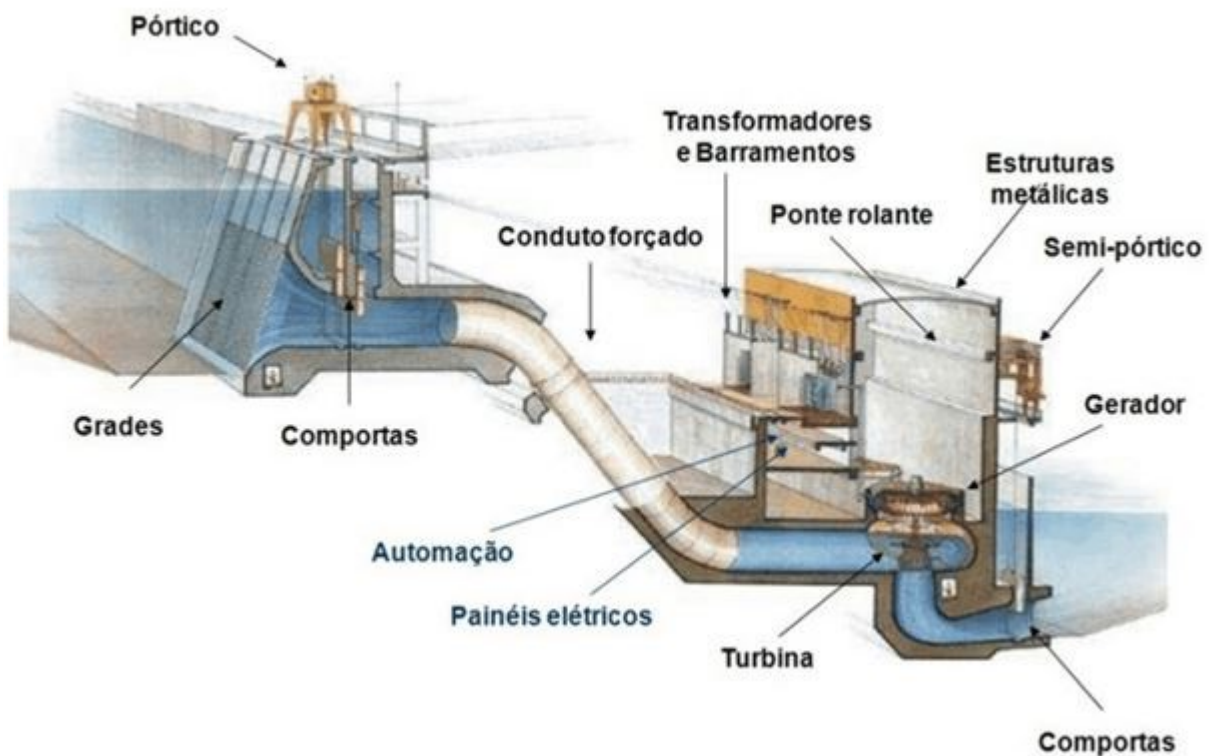


Figura 6. Arranjo físico de uma usina, exemplo UHE Itaipu. Fonte:[54].

A estrutura de uma usina apresenta, dentre outros, os seguintes componentes:

- Vertedor: permitem a regulação das vazões afluentes ao leito natural do rio;
- Grades: presentes da entrada da tomada d'água ou do canal de adução, tem o papel de impedir a passagem de objetos que possam danificar peças da turbina;
- Pórtico: equipamentos com função de movimentar carga, assim como preservação de segurança;
- Comportas: estrutura responsável por fazer o barramento ou liberação da água a jusante da represa, controlando o fluxo do sistema, principalmente em situações de manutenções;
- Conduto forçado: conduto responsável por conduzir água sob pressão às turbinas para produção de energia elétrica;
- Transformadores e barramento: modificadores da intensidade das correntes e tensões;
- Ponte rolante: equipamento de carga e descarga de materiais utilizados na usina, a fim de diminuir o desgaste humano, assim como preservação de segurança;
- Turbina: transformadora de energia cinética/potencial da água em energia mecânica;
- Gerador: transformador de energia mecânica em energia elétrica;

- Canal de fuga: canal de saída da água para o leito natural do rio, após movimentar as turbinas.

As UHE's possuem sistema de resfriamento de mancais que aduzem água com temperaturas baixas do reservatório e que passam por trocadores de calor que mantem os equipamentos em temperaturas compatíveis com o projeto. Estes sistemas tem sido fortemente impactados pelo mexilhão dourado com aumento significativo das paradas de manutenção.

3.3 Centrais Termoelétricas

As Usinas Termelétricas (UTE's) são centrais geradoras de energia elétrica através da queima de combustíveis líquidos, sólidos e gasosos. São consideradas uma fonte não renovável e poluentes emitindo grande quantidade de poluentes na atmosfera através da queima dos combustíveis. No caso Nacional apresentaram, ano após ano, um aumento quanto ao número de unidades em operação, tendo representado 29% do incremento na matriz elétrica brasileira no ano de 2022 [45]. Essas usinas, apesar de impactarem negativamente o meio ambiente, desempenham um papel importante na produção de energia elétrica. A Figura 7 apresenta um esquema da constituição dos componentes de uma UTE em ciclo de vapor.

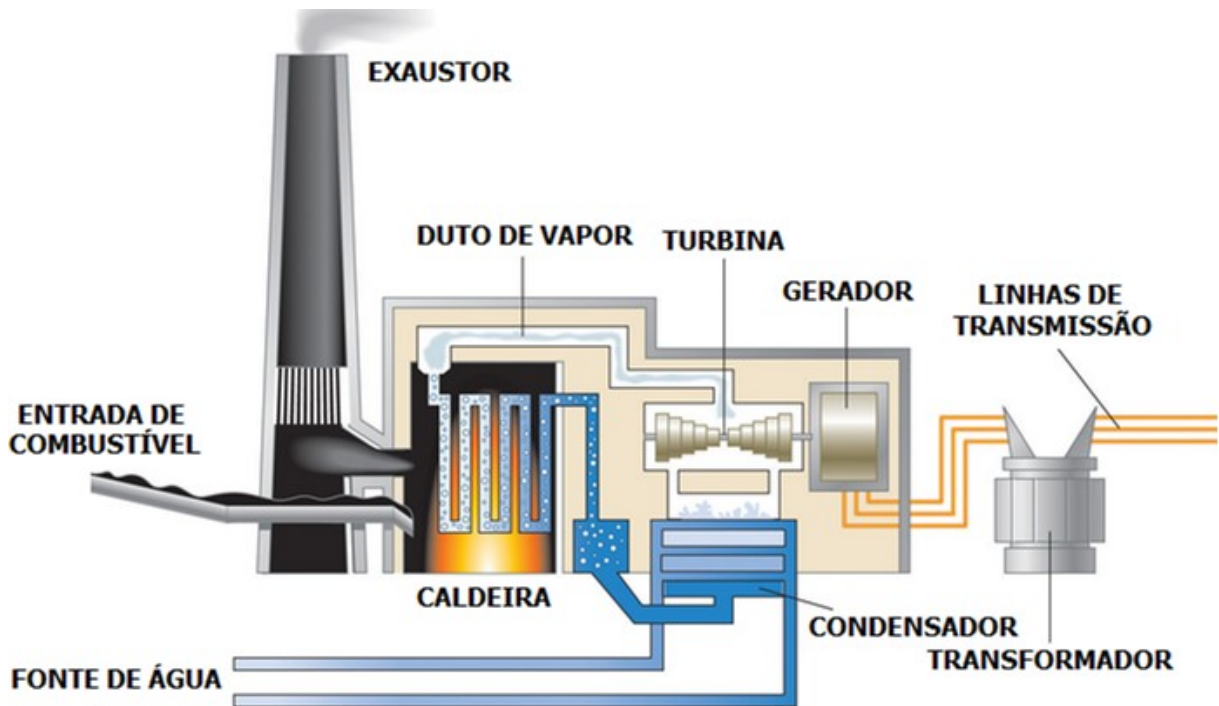


Figura 7. Esquema dos componentes de uma Usina Termelétrica convencional. Fonte: CBIE [55].

A entrada de água para o sistema de resfriamento se dá através de tubulações que utilizam bombas para esse processo. Nesse sistema, em especial, as bombas fazem um importante papel, sendo que uma falha resulta em uma grande redução de capacidade ou desligamento total, dependendo da configuração do sistema [55,56].

Normalmente, as usinas termelétricas são avaliadas aplicando o desempenho energético obtido da primeira lei da Termodinâmica [57]. Outro critério de avaliação do sistema energético é o desempenho exergético que se baseia na segunda lei da Termodinâmica [58]. O desempenho exergético é um método apropriado para projetar, avaliar e otimizar usinas termelétricas [59]. A bioincrustação do MD pode se constituir em um problema uma vez que tem potencial para obstruir o sistema de resfriamento/ condensadores provocando a diminuição/ parada de unidades geradoras.

No ano de 2017 o sistema elétrico brasileiro apresentou perdas sistêmicas na transmissão equivalente à 12% da produção de energia elétrica. Já no ano de 2019, ano base 2018, com o aumento do número de usinas eólicas e solares mais bem distribuídas do ponto de vista geo-elétrico, se teve uma diminuição da participação das térmicas, de 30 para 27%, sendo que as perdas passaram de 12 para 11% [11].

A perda se dá pela extensão do sistema de transmissão, acarretando prejuízos à segurança do suprimento de energia elétrica e à modicidade tarifária [47]. Entretanto, isso é uma característica do SIN e que é devida as grandes distâncias geo-elétricas do País.

As usinas termelétricas do Brasil apresentavam a segunda maior capacidade instalada em 2022, representando 24,96% da produção de energia elétrica. As UTE's a biomassa representaram 904,9 MW e as termelétricas que utilizam combustível fóssil contribuíram com 1.355,7 MW do total de 8.235,1 MW, total de expansão ao final de 2022 [11].

A geração de energia elétrica através das termoelétricas apresentam também a questão do controle de temperatura da água lançadas nos rios, lagoas ou até mesmo o mar. A temperatura da água pós aquecimento está muitas vezes acima dos limites aceitáveis para desembocadura, e mantidas em longos intervalos de tempo pode acarretar mortandade de peixes, plantas e outros seres vivos pertencentes ao ambiente. Por outro lado, o aquecimento da água pode favorecer o surgimento de espécies que se beneficiam do aumento da temperatura, somado às condições de

disponibilidade de alimentos e nutrientes causada pela morte dos peixes. No caso da usina termonuclear em Angra dos Reis, foi relatado um aumento da temperatura na região de descarga de até 8°C acima da temperatura da água ambiente [60]. Também é sabido que o mexilhão dourado tem uma predileção por águas com temperaturas mais elevadas, em torno de 29°C [61], que muitas vezes é alcançado nos sistemas de descargas das centrais térmicas convencionais. Assim, o problema de bioincrustação do MD também existe nas centrais termelétricas agindo fortemente nos sistemas de captação de água para resfriamento provocando paradas para manutenção.

3.4 Estações Elevatórias

As estações elevatórias de água são sistemas de bombeamento utilizados para captação, adução, tratamento e distribuição de água. Caracterizam-se por possuírem um conjunto de bombas, válvulas e acessórios interligando o poço de sucção ao reservatório. Essas estações podem operar com água bruta (ex.: esgoto ou água de rios e lagos) ou água subterrânea (ex.: sistema de abastecimento para consumo). As concessionárias de abastecimento utilizam em larga escala esse tipo de sistema, uma vez que todos os municípios necessitam de captação e distribuição de água, sendo as principais aplicações: a) recalque de água de captação até os reservatórios, como já citado; b) recalque de água dos reservatórios de água bruta até as estações de tratamento de água (ETA); c) recalque da ETA para reservatórios; d) transporte de água entre reservatórios; e e) recalque de água da célula inferior para a superior de um reservatório.

As Estações de Tratamento de Água (ETA's) devem atender ao conceito de potabilidade, implicando no atendimento dos padrões mínimos exigidos para que a água a ser consumida não seja transmissora de doenças aos seres humanos. Para isso, são utilizados processos criteriosos para que a água seja de qualidade e adequada ao consumo, não só para proteção de saúde, como também para questões de desenvolvimento econômico, que envolvem aspectos sanitários. O primeiro cuidado que se deve tomar é a da escolha de mananciais, evitando-se rios e lagos contaminados por esgotos e/ou despejos industriais. É importante também tomar providências para preservar o manancial escolhido.

A qualidade e a quantidade de água a ser utilizada num sistema de abastecimento estão intimamente relacionadas às características do manancial. Após o dimensionamento da capacidade do manancial, é preciso construir uma Estação de Tratamento de Água ETA,

composta principalmente das seguintes etapas: mistura rápida e floculação, decantação ou sedimentação, filtração, cloração, fluoretação e alcalinização (correção de pH). Essa construção deve obedecer a critérios como manutenção do nível do abastecimento [62]. A Figura 8 mostra um esquema simplificado de uma ETA.

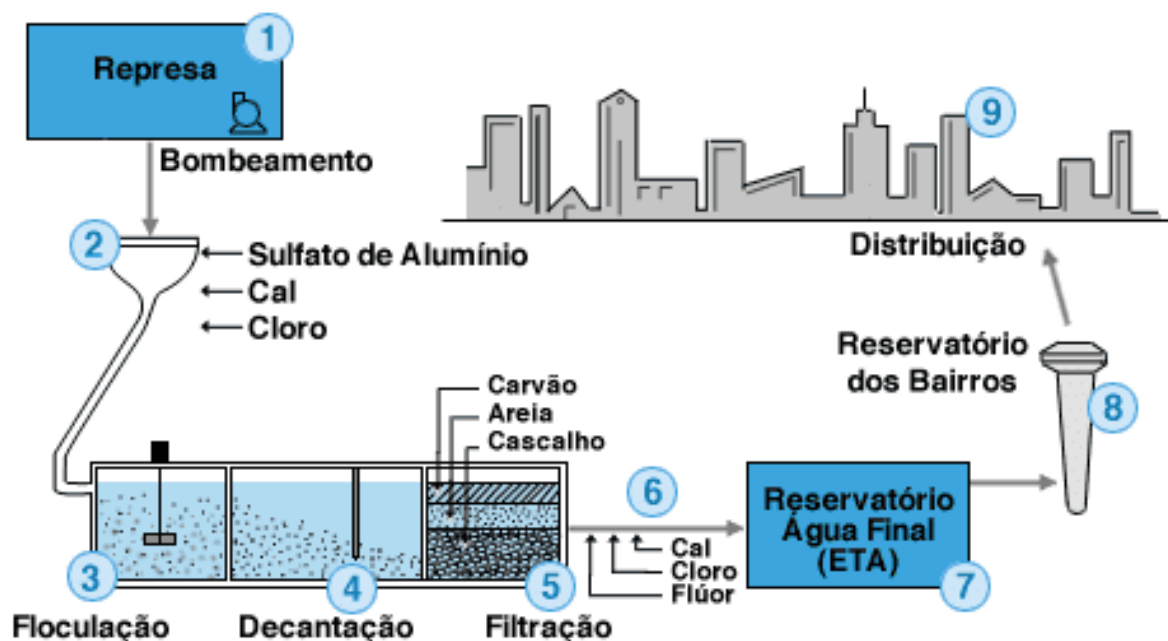


Figura 8. Esquema Simplificado de uma Estação de Tratamento de Água. Fonte: CBIE [53].

Ainda dentro das ETA's, pode-se ter Estações Abertas, e implantadas para potabilizar ou industrializar águas oriundas de córregos, rios e outros mananciais similares e, que apresentam mudanças rápidas e significativas em seus parâmetros devido às variações climáticas; e as Estações Pressurizadas, que são aplicadas principalmente no tratamento de águas com características físico-químicas constantes, como por exemplo aquelas oriundas de poços, lagos, represas e mananciais similares.

O consumo de energia das estações elevatórias representa um dos maiores custos energéticos individualizados para a matriz brasileira, visto não só pelo número de estações presentes no Brasil (catalogadas), mas pela funcionalidade dos sistemas, que em sua maioria funcionam 24 horas por dia. Com o aumento do número de sistemas de bombeamento, há também a necessidade de maior produção de energia, colaborando para o aumento dos gases de efeito estufa, assim como perdas envolvidas nos processos. Em todo o setor da água, o consumo de energia associado aos sistemas de bombeamento representa a maior parcela [63] em alguns casos ultrapassando 90% [64]. Sabe-se que mais de 50% dos custos anuais das empresas de

saneamento são com energia elétrica, nos quais 95% do orçamento de energia elétrica pode ser associado com os custos de bombeamento [65].

O desempenho dos sistemas de bombeamento é medido pela confiabilidade [66]. Esse desempenho depende de condições ideais viabilizadas por fatores como: a) interação entre o sistema de transporte, conservação da capacidade de armazenamento, conservação da capacidade de distribuição, sistema de segurança como funcionamento adequado das válvulas reguladoras e bombas. b) confiabilidade dos componentes individuais do sistema: e c) variação espacial e temporal da demanda. A confiabilidade pode ser descrita considerando-se dois tipos de falhas: mecânicas e hidráulicas. Falhas mecânicas são do tipo: rompimento de tubulação, falhas no bombeamento, falhas no controle de válvulas, perda de potência, entre outras. Considera-se como falhas hidráulicas, as ocorrências de vazões e pressões inadequadas, para um ou mais pontos de demanda do sistema. Essa perda de pressão pode ser mensurada através do fator de perda de carga.

As características fluviais dos córregos e rios são importantes para desenvolvimento do processo de construção tanto das Estações elevatórias quanto das ETA's, portanto, a geomorfologia e características físicas também se fazem necessárias para a identificação do melhor tipo de bomba. Com relação a região Amazônica pode-se citar como exemplo a dinâmica geomorfológica do Rio Acre, que está ligada ao deslizamento das margens do rio, em função das variações da cota do rio ao longo do ano hidrológico. Por se tratar de uma bacia sedimentar, o rio transporta grandes quantidades de material sólido em suspensão, oriundos de processos erosivos, intensificados na estação chuvosa, de outubro a abril [67]. Já no período de estiagem, seca, compreendido entre os meses de maio a setembro, o nível da água abaixa [68] e decorrente da mobilidade do leito sedimentar, pode acarretar o aterramento de dutos de captação, quando instalados próximos ao leito do rio.

A possibilidade da bioinfestação do MD na região Amazônica tem um potencial de causar enormes complicações uma vez que esse organismo pode colonizar os dutos de adução e de recalque aumentando consideravelmente as perdas de carga e diminuindo a eficiência energética do sistema.

3.5 Revisão geral sobre perda de carga

A perda de carga é um termo muito abordado na engenharia, pois, representa a energia perdida pela unidade de peso do fluido em escoamento, ocorrendo em tubulações com rugosidade superficial [69,70,71], que no caso deste trabalho é aumentada pela incrustação do mexilhão dourado sob a superfície interna da tubulação.

A perda de carga pode ser avaliada como contínua ou localizada, sendo a contínua presente ao longo das tubulações. As perdas localizadas serão determinadas em função das singularidades presentes a partir da tomada d'água, nos componentes que apresentam possibilidade de incrustação do molusco *L.fortunei* [72] (Anexo 02).

3.5.1 Perda de Carga Localizada

A perda de carga localizada pode ser caracterizada como a perda de energia do fluido, causado pelo aumento de atrito nas superfícies em contato com o fluido, dificultando seu escoamento [73], e é conhecida por localizada, pois, é calculada nas entradas, singularidades, válvulas e saídas do sistema. Cada componente do arranjo hidráulico apresenta uma equação para determinação dessa perda de carga. De acordo com [71], as equações dos componentes que apresentam perda de carga localizada podem ser descritas da seguinte forma:

- Perda de carga nas grades de tomada d'água

A perda de carga em grades ocorre pela redução do vão de entrada da passagem de água, causando um atrito na superfície das barras [73]. Alguns fatores como velocidade do fluido, formato da barra e ângulo de colocação podem interferir no valor da perda de carga. Para tanto, a equação de Kirschmer [74], Equação 1, leva em consideração o coeficiente de perda de carga, Equação 2, calculados:

$$\Delta h = k_g \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$k_g = \beta \cdot \left(\frac{e}{a}\right)^{1,33} \cdot \text{sen } \alpha \quad (2)$$

Sendo:

Δh – Perda de carga nas grades de tomada d'água, em m;

k_g – Coeficiente de perda de carga na grade;

v – Velocidade do fluido sem a grade, em m/s;

β – Coeficiente adimensional dependente da espessura da barra;

a – Distância entre as barras, em m;

e – Espessura da barra, em m;

α – Inclinação das grades, em graus;

- Perda de carga na aproximação da tomada d'água

A perda de carga da aproximação da tomada d'água leva em consideração as perdas de mudança do comportamento do fluido. De acordo com [75], o cálculo da perda de carga pode ser feito considerando a existência ou não do canal de adução, portanto, as Equações 3 e 4, descrevem a perda da aproximação da tomada d'água.

→ Sem túnel de adução:

$$\Delta h_e = 0,20 \cdot \frac{v_b^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

→ Com túnel de adução:

$$\Delta h_e = 0,20 \cdot \frac{v_{ab}^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

Δh_e – Perda de carga na aproximação da tomada d'água, em m;

v_b – Velocidade média de escoamento no conduto forçado, em m/s;

g – Aceleração da gravidade, em m/s²;

v_{ab} – Velocidade média do escoamento no túnel de adução, em m/s.

- Perda de carga na entrada

Levando em consideração a variação das velocidades da entrada e da tomada d'água, a perda de carga na entrada pode ser calculada de acordo com Equação 5.

$$\Delta h_e = k_e \cdot \frac{(v_t^2 - v_a^2)}{2 \cdot g} \quad (5)$$

Δh_e – Perda de carga causada na entrada da tomada d'água, em m;

k_e – Coeficiente de perda de carga na entrada;

$k_e = 0,01$ – Forma hidrodinâmica (parabólica);

$k_e = 0,04$ – Forma arredondada;

$k_e = 0,1$ – Transição brusca;

v_t – Velocidade na tomada d'água, em m/s;

v_a – Velocidade na aproximação da tomada d'água, em m/s.

- Perda de carga nas comportas (nichos)

Segundo a Equação 6 a perda de carga nas comportas se dá pela redução da passagem do fluido causado pela colocação de nichos para recebimento dos stop logs.

$$\Delta h_n = 0,02 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Δh_n – Perda de carga nos nichos das comportas, em m;

v – Velocidade média da seção dos nichos, em m/s.

- Perda de carga nas curvas

De acordo com [76], as singularidades podem ser calculadas de acordo com Equação 7, em função das equações de variação do coeficiente de perda de carga, Equações 8 e 9.

$$\Delta h_o = k_o \cdot \frac{v_b^2}{2g} \quad (7)$$

Para $\left(\frac{r_i}{D_b}\right) < 5$

$$k_o = 0,2147 \left(\frac{r_i}{D_b}\right)^{-0,5718} \cdot (0,0746\theta^3 - 0,4698\theta^2 + 1,1928 \cdot \theta) \quad (8)$$

Para $\left(\frac{r_i}{D_b}\right) \geq 5$

$$k_o = \left(0,08 - 0,002 \cdot \left(\frac{r_i}{D_b} - 5\right)\right) \cdot (0,0746\theta^3 - 0,4698\theta^2 + 1,1928 \cdot \theta) \quad (9)$$

Δh_o – Perda de carga nas curvas, em m;

k_o – Coeficiente de perda de carga em curva;

r_i – Raio de curvatura do trecho, em m;

D_b – Diâmetro interno do conduto forçado, em m;

θ – Deflexão do eixo do túnel, em radianos.

3.5.2 Perda de carga distribuída

De acordo com Encinas (1975) [75], o atrito interno entre as partículas em movimento geram a perda de carga, porém, por ocorrer ao longo de tubulações é proporcional ao seu comprimento quando possui diâmetros constantes.

A equação de Darcy Weisbach [77], Equação 10, permite calcular os valores para perda de carga em função do diâmetro interno, vazão e coeficiente de fator de perda de carga, coeficiente variável de acordo com a rugosidade superficial interna da tubulação que altera o diâmetro interno. Segundo Kaya et al. (2021) [78], a estimativa da perda de carga em condutos pressurizados é um problema significativo em estudos de otimização, análise hidráulica de dutos e sistemas de distribuição de água.

$$J = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad (10)$$

Sendo:

J – Perda de carga unitária, em m/m;

f – Fator de perda de carga;

Q – Vazão, em m³/s;

D – Diâmetro interno da tubulação, em m.

Como meio de determinação do coeficiente do fator de perda de carga, a equação de Colebrook-White (1937) [27], Equação 11, foi considerada a mais precisa para determinação deste fator de perda de carga (f), utiliza para determinação o número de Reynolds e a rugosidade relativa da tubulação (e/D) [79,80]. Porém, esta equação possui duas incógnitas, uma de cada lado da igualdade, o que requer um processo iterativo para a solução [81,82].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \cdot \frac{e/D}{3,7} \cdot \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \quad (11)$$

e – Rugosidade, em m;

D – Diâmetro interno, em m.

Assefa e Kaushal (2015) [83] vem buscando alternativas para substituir a equação de Colebrook-White (CW) de forma a garantir os resultados obtidos, pois, aproximações explícitas fornecem uma previsão boa do fator de perda de carga e podem reproduzir precisamente equação de CW e o diagrama de Moody (1944), [84]. Çoban (2012) [85] afirma que as equações derivativas da de CW podem ser utilizadas diretamente, pois, os erros que apresentam são muito pequenos.

Segundo Souza (2016) [86], a melhor equação para os cálculos do fator de perda de carga em tubulações infestadas pelo mexilhão dourado é a de Buzzelli (2008) [87], Equação 12. De acordo com Pimenta et al. (2018) [88], a equação adotada apresenta resultados com índices de desempenho e padrão mais elevados do que os encontrados nas aproximações utilizado a equação de Colebrook-White, possuindo duas raízes, B₁ Equação 13 e B₂ Equação 14.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = B_1 - \left(\frac{B_1 + 2 \cdot \log_{10} \cdot B_2 / \text{Re}}{1 + 2,18 / B_2} \right) \quad (12)$$

$$B_1 = \frac{(0,777 \cdot \ln \cdot \text{Re}) - 1,41}{1 + 1,32 \cdot \sqrt{e/D}} \quad (13)$$

$$B_2 = \frac{8}{3,7 \cdot D} \cdot \text{Re} + 2,51 \cdot B_1 \quad (14)$$

A equação de Buzzelli (2008) apresenta um valor máximo de $\text{Err}_{\text{máx}} = -0,1345\%$, Reynolds variando até 1×10^8 , e a rugosidade relativa com intervalo $e/D = 7,5 \times 10^{-2}$ [89].

3.6 O Mexilhão Dourado

3.6.1 Características e impactos

Genericamente conhecido por mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* é uma espécie que apresenta o seguinte enquadramento sistemático, Tabela 1.

Tabela 1. Enquadramento sistemático de *L. fortunei*

Categorias Taxonômicas	Classificação
Reino:	Animalia
Filo:	Mollusca
Classe:	Mytiloidea Ferrusac, 1758
Ordem:	Bivalvia Linné, 1822
Família:	Mytilidae Rafinesque, 1815
Gênero:	<i>Limnoperna</i> Rochebrune, 1882
Espécie:	<i>Limnoperna fortunei</i> (Dunker, 1857)

Fonte: Adaptado de PNP-CMB (2020) [76].

Mesmo não sendo nativo das águas da América Latina, sua dispersão é algo que assusta os biólogos e agentes envolvidos no controle da espécie, pois, tem-se visto taxas de dispersão de 240 km/ano [90], com densidades que ultrapassam 150.000 ind./m² [7]. Tal evolução só é possível pelo fato da espécie possuir características como reprodução quase contínua devido a variação de temperatura da região, que atende às necessidades reprodutivas da espécie, facilitando e impulsionando sua reprodução [34], tolerância a largas faixas de pH [91], tolerância à falta de cálcio [92], dessecação [93], variações de taxa de oxigenação e salinidade

[94] e resistência em alguns pontos do trato digestivo dos peixes que se alimentam dessa espécie [95]. Esse molusco se alimenta pela filtração da água, retirando dela todo material em suspensão, como organismos fitoplanctônicos, zooplanctônicos, bactérias e sólidos suspensos [96].

O MD pode apresentar comprimentos variáveis de 2,5 a 6 cm [97] dependendo da região e condições climáticas. Boltovskoy et al. (2015) [34] avaliam que pH, salinidade, oxigênio dissolvido, sólidos em suspensão, clorofila *a* (presente em cianobactérias e em todos os eucariontes capazes de realizar fotossíntese), e inundação-seca possam desencadear ciclos reprodutivos, o que gera aumento da reprodução, conseqüente aumento das densidades. Através do sifão, como mostrado na Figura 9, os mexilhões adultos fazem a filtração da água, acarretando problemas de nutrientes para a fauna local, além de causarem uma complexidade estrutural e prejudicar a qualidade de vida nesses habitats devido à grande liberação de material orgânico através das pseudofeces [98,99].



Figura 9. Foto sifão mexilhão dourado. Foto: Jennifer TM Andrade.

Essa espécie não seleciona habitats, porém, apresenta certa restrição a regiões com salinidade elevada [100]. Na fase larval pode ocupar a coluna d'água que integra o plâncton, atingindo 30.000 ind/m³ [91]. Fixam-se em qualquer tipo de substrato duro, sendo como substrato todo tipo de componente presente em usinas e linhas de abastecimento como grades, turbinas, estacas, sistemas de resfriamento, escada de peixe, barragem, reservatórios, píeres, paredões de concreto, barcos e motos aquáticas [97,101].

De acordo com Castro (2013) [39], o desprendimento por completo do mexilhão se dá em velocidade acima de 4,1 m/s para amostras de aço, madeira e corda. Para Simeão (2011) [36], a velocidade inicial de desprendimento dos mexilhões, se deu de forma isolada, para uma única amostra de aço carbono, na velocidade de 2,87 m/s. De acordo com Xu et al. (2012) [40], a

velocidade ideal para que ocorra o início do arrancamento do mexilhão dourado é de 2,2 m/s, mostrando uma pequena variação nos testes abordados.

3.6.2 Reprodução e ciclo de vida

Na fase reprodutiva é visto que os indivíduos de MD começam a se reproduzir quando atingem de 5 mm a 6 mm de comprimento, o que de acordo com Darrigran et al. (1999) [102], ocorre entre 3 e 4 meses de vida. Porém, o mexilhão dourado só atinge essa fase de reprodução se a fixação da larva ocorrer no máximo de 15 a 20 dias, esse é o tempo máximo que a larva tem para se fixar e continuar seu desenvolvimento [76]. Caso não haja a fixação a larva morre e o indivíduo não atinge a longevidade e 2 a 3 anos descrita por Mansur et al. (2012) [97].

Todo o ciclo de vida de *L. fortunei* é conhecido e descrito por alguns autores, Figura 10. Dentre eles Santos (2005) [103] descrevem todas as etapas do ciclo de desenvolvimento do mexilhão dourado desde o ovo até a fase Pós-larva. Darrigran e Maroñas (2002) [93] descreveram o comportamento do crescimento nas fases juvenil e adulta.

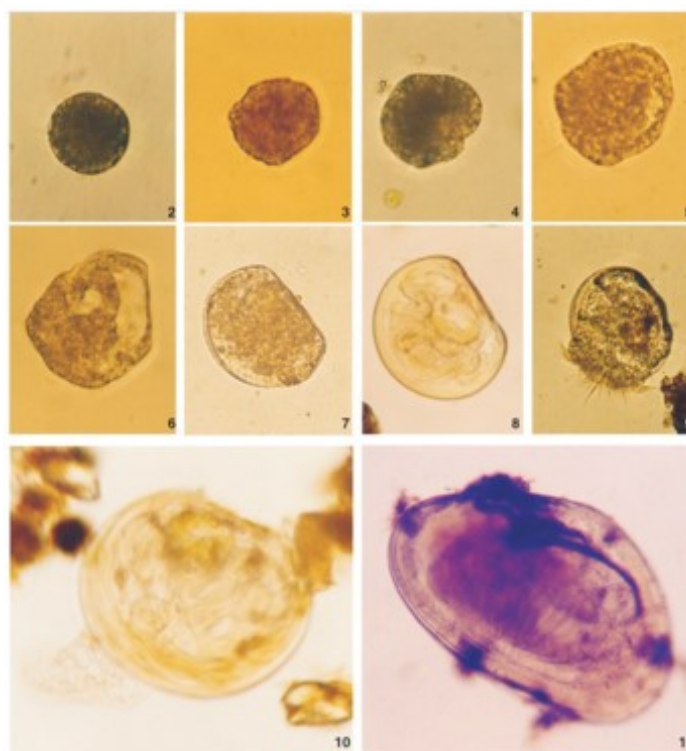


Figura 10. Ilustração retirada de Santos (2005) [103]. Fases larvais de *Limnoperna fortunei*. (2) Mórula ciliada, 80 μm ; (3) Larva trocófora fase 1, comprimento 100 μm ; (4) Larva trocófora fase 2 (110 μm), (5) Larva trocófora fase 3 (125 μm), (6) Larva trocófora fase 4, com primórdios de concha (125 μm), (7) Larva "D", (120 μm), (8) Véliger de charneira reta (150 μm), (9) Larva véliger umbonado (200 μm), (10) Larva pedivéliger (230 μm), (11) Pós-larva. Fonte: Santos et al, 2005 "Fases larvais do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) na Baía do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil.

No estágio de pós larva, ou plantígrada, o molusco costuma rastejar ativamente o pé, fixando-se ao substrato com o auxílio do bisso. Já na fase juvenil a concha passa gradativamente de uma forma mitilóide alongada, porém, com os umbos direcionados para frente. Por fim, na fase adulta a região anterior é tão diminuta que reduz ao limite anterior dos umbos [97].

A população de mexilhão dourado, quando da invasão de um ambiente, segue uma distribuição dividida em três fases segundo Hicks (2004) [104], distinguidas por uma duração indeterminada de população, que se encontra dentro de um limite de carga disponível pelo meio, seguida por um crescimento excessivamente rápido, pelo fato da expansão da espécie expandir o limite de carga do ambiente invadido, considerado como período de pânico, e por fim um decréscimo exponencial, onde é criado um freio no crescimento da população até que ela entre em equilíbrio.

3.6.3 Desenvolvimento de *Limnoperna fortunei*

De acordo com Nichols e Black (1994) [105], é possível fazer a identificação de cada fase e estágio de desenvolvimento do mexilhão dourado, levando em consideração as principais características observadas em sua concha, como altura, comprimento, largura da base e aparecimento ou não de marcas (estrias). Essas características somadas permitiram o desenvolvimento de um plano de crescimento da espécie. É possível analisar com clareza a forma do mexilhão em cada estágio de desenvolvimento, sendo eles Larva “D”, Veliger Charneira Reta, Veliger Umbonado, Pediveliger e Pós-larva, Figura 11.

Xu et al. (2015) [106], através do acompanhamento da fixação do mexilhão dourado, avaliaram positivamente sua força de fixação, correlacionando-a com seu comprimento valvar. De acordo com Mansur et al. (2012) [97], depois de mais ou menos 5 meses, é possível observar larvas que se desenvolveram em indivíduos juvenis, como aproximadamente 2 mm de comprimento valvar.

3.6.4 Controle de *Limnoperna fortunei*

Com a tomada de infestação do mexilhão dourado por toda região estuarina seguindo para os rios afluentes das embarcações, viu-se a necessidade de barrar a crescente distribuição das incrustações. As medidas de segurança assim como de controle vêm se desenvolvendo conforme município, estado, governo, região e indústria entendem o risco de aglomerações

formadas próximo às redes de abastecimento de água, principalmente por se tratarem de tubulações com diâmetros menores e afetar drasticamente o sistema, causando oclusão não só na entrada e saída das mesmas, mas também por todo seu comprimento, o que acarretaria em danos ambientais e econômicos para toda a população [107].

Dessa forma, e com diversos estudos em andamento, viu-se a necessidade de estratégias para contenção da espécie, uma vez que, por inúmeros motivos, mas o principal deles não ter predador natural, são necessárias ações que ajudem no controle e combate sem agredir o meio que o rodeia [97,108]. Alguns fatores físicos e químicos do ambiente facilitam a entrada e desenvolvimento da espécie, e assim fazem da necessidade da atuação de outros agentes de combate.

Os controles mais abordados e estudados na atualidade encontram-se o químico através da amônia e cloro por exemplo: choque térmico através da descarga em regiões afetadas pelo mexilhão; privação de oxigênio uma vez que o mesmo necessita desse gás para a sua sobrevivência e reprodução; filtração da água como meio de retirar as partículas de nutrientes que são alimentos para o molusco; luz ultravioleta com a ação da radiação; corrente elétrica; acústica; e velocidade da água. Este último item chama a atenção, pois, na maioria das vezes as velocidades descritas nas entradas das tomadas d'água são baixas para interromper a infestação do *L. forntunei*.

Controles como ultrassom e radiação ultravioleta, ecotoxicologia e turbulência vem ganhando espaço entre os controles com obtenção de êxito nos testes [76]. Alguns processos apresentam mais vantagens que outros, porém, não são possíveis de serem utilizados em qualquer ambiente, fazendo necessário a adição de novos meios de controle por se adequarem melhor, porém as desvantagens dos métodos em análise como alto custo, baixa operacionalidade e poluição ambiental, limitam suas aplicações [109].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Curva de Crescimento Mexilhão Dourado

A literatura disponibiliza dados sobre o crescimento valvar do mexilhão dourado (MD), porém, os dados são variados e coletados em diferentes regiões, Tabela 2, portanto, para determinação da curva de crescimento real do mexilhão dourado (MD) foi escolhida uma região de teste a fim de identificar o crescimento valvar em todas as fases, para um mesmo local e um mesmo material de fixação, tendo como base comparativa os valores obtidos a partir da literatura. A região escolhida para avaliação temporal do desenvolvimento do MD foi o Rio Grande, na Represa da Usina de Furnas, 1500 metros a jusante da barragem, especificamente no Clube Náutico Engenheiro Mauro Ferraz, São João Batista da Glória - MG (20°39'24.8"S 46°18'06.6"W). Essa foi a localização das análises, visto que anteriormente já havia sido reportado a presença do mexilhão dourado com colônias já definidas.

Tabela 2. Idade e comprimento valvar do mexilhão dourado

Fase	Comprimento (mm)	Referência	Idade (dias)
Ovo	0,080		
Morula ciliada	0,080		
Trocófora fase 1	0,090		
Trocófora fase 2	0,110		
Trocófora fase 3	0,125	[5,110]	5
Trocófora fase 4	0,125		
Larva D	0,145		
Véliger de charneira reta	0,163		
Véliger Umbonado	0,207		
Pediveliger	0,239	[4,110]	16
Pós larva	0,320		
	20	[110]	365
Juvenil - Adulto	30	[110]	730
	35	[111]	1.095
	36	[112]	1.277

Fonte: Adaptado de Cataldo et al. [4], Choi e Chim [5], Nakano et al. [110], Boltovskoy e Cataldo [111], e Darrigran e Maroñas [112].

Para construção da curva de crescimento, foram selecionados materiais a serem utilizados para avaliação da incrustação e posteriormente a escolha do que apresentou maior taxa de fixação.

Essa escolha dos materiais a serem avaliados ocorreu com base nos materiais que são utilizados na construção de sistemas fluido mecânicos encontrados nas usinas hidrelétricas, termoelétricas, instalações elevatórias, seus reservatórios e arredores, sendo eles: cerâmica,

PVC, tijolo, madeira, pneu e alumínio. Essa avaliação visa fazer a constatação, dentre os materiais selecionados, do que apresentará maior taxa de incrustação.

Com os materiais determinados as amostras foram montadas conforme Figura 11 e levadas a campo para exposição na região escolhida.

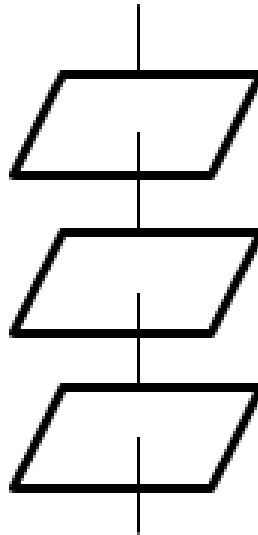


Figura 11. Modelo de amostra montada e levada a campo para avaliação do crescimento do mexilhão dourado.

Foram montadas 3 amostras de cada material e cada amostra composta por três placas dimensionadas em 10 x 10 cm, presas entre si por uma barra roscada zincada w-5/16” de 26,5 cm de 1/2”, fixadas nas extremidades com duas porcas zincadas w-5/16”, duas arruelas zincadas furo 5/16”, e separadas por dois suportes cilíndricos de PVC Ø 26 mm e 8 cm de comprimento. A Tabela 3 apresenta a nomenclatura utilizada para discernir as amostras e a Figura 12 mostra como foi feita a distribuição da nomenclatura

Tabela 3. Identificação dos materiais analisados de acordo com profundidade, substrato e posição.

PVC	Tijolo	Madeira	Pneu	Alumínio	Cerâmica (PCL)	Cerâmica (PCR)
PVC2S1	TIJ2S1	MAD2S1	PNE2S1	ALU2S1	CEC2S1	CEB2S1
PVC2I1	TIJ2I1	MAD2I1	PNE2I1	ALU2I1	CEC2I1	CEB2I1
PVC2S2	TIJ2S2	MAD2S2	PNE2S2	ALU2S2	CEC2S2	CEB2S2
PVC2I2	TIJ2I2	MAD2I2	PNE2I2	ALU2I2	CEC2I2	CEB2I2
PVC2S3	TIJ2S3	MAD2S3	PNE2S3	ALU2S3	CEC2S3	CEB2S3
PVC2I3	TIJ2I3	MAD2I3	PNE2I3	ALU2I3	CEC2I3	CEB2I3

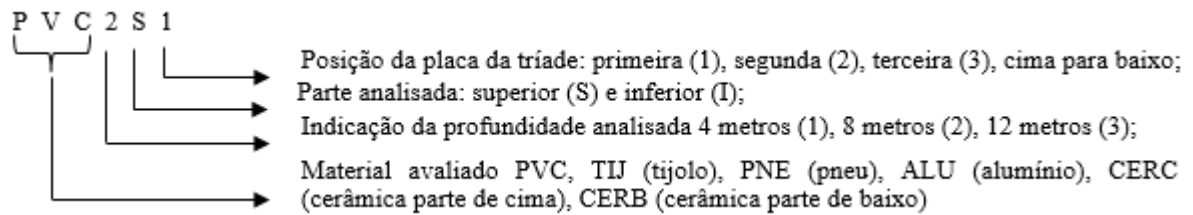


Figura 12. Determinação da nomenclatura utilizada para montagem das amostras levadas a campo.

No dia 21/02/2018, a equipe do LELF (Laboratório de Estudos de *Limnoperna fortunei*), instalou as amostras no local definido anteriormente, conforme Figura 13, sendo nove placas de cada material, distribuídas em três profundidades diferentes: 4 metros (epilímio -); 8 metros (metalímio -); e 12 metros (hipolímio -). A Figura 14 apresenta a montagem real dos materiais.

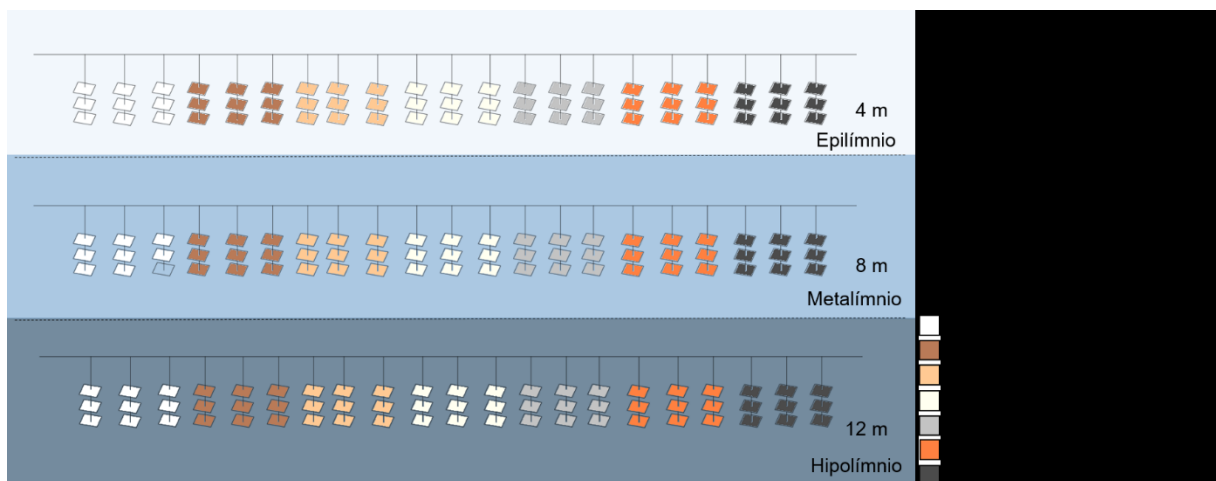


Figura 13. Elaboração do desenho experimental para montagem dos materiais em conjuntos de três placas (tríades), com separação de profundidade e materiais (por cor). Elaboração: Jennifer TM Andrade.



Figura 14. Montagem real de uma das 3 fileiras de amostras com diferentes materiais, distribuídos em conjuntos de três placas (triades), momentos antes da colocação na água. Foto: Jennifer TM Andrade.

A estrutura foi presa em troncos de árvore com linhas de nylon 0,90 mm até a margem. Os materiais ficaram dispostos um ao lado do outro, com uma distância de 50 cm entre eles. A última placa da última triade de cada material ficou a uma distância de 80 cm do fundo do rio, na localidade onde foram colocados os materiais. A Tabela 4 apresenta as datas de colocação e coleta das amostras, baseada nos estudos de Boltovskoy e Cataldo (1999); Darrigran e Maroñas (2002); e Nakano et al. (2015), que apresentam a faixa de crescimento anual, para verificação dos indivíduos incrustados na superfície, assim como característica físico-químicas da água.

Tabela 4. Datas de colocação e coleta das amostras para análise do crescimento do mexilhão dourado.

Data	Horário	Atividade	Tempo de bioinfestação (Dias)
21/02/2018	11:00	Colocação	-----
14/03/2019	14:00	Coleta	386
13/03/2020	10:00	Coleta	750
24/02/2021	10:00	Coleta	1.098

O material foi coletado pelo mergulhador e trazido até a superfície através de um saco de linho trançado para que os indivíduos fixados fossem preservados. Os materiais foram separados e mantidos em sacos plásticos com alta gramatura, a fim de suportarem o transporte do ponto de vista físico, até o LELF.

O transporte, realizado em torno de cinco horas, não necessita de colocação de compressor a ar para manter a oxigenação no interior das caixas de transporte. Assim que as placas chegaram ao laboratório foram mantidas refrigeradas em incubadoras do tipo BOD, em temperatura de -4°C.

As amostras (tríades), foram desmontadas com cuidado, para que os mexilhões fixados mais à superfície, sem tanta área de contato, não fossem desmembrados. Retiradas uma a uma, as placas passaram pelo seguinte processo: primeiro foram lavadas a água corrente, sem pressão, para que fosse possível retirar excesso de material agregado, como lama e resíduos do rio em seguida cada placa foi fotografada a fim de se registrar a forma de fixação do mexilhão. A Figura 15 mostra uma vista de cada material coletado, ainda montado, e a Figura 16 uma vista da placa de cada material após separação com vista da segunda placa do lado inferior.



Figura 15. Tríades dos materiais incrustados com mexilhão dourado, deslocados em 90° para realização das fotografias. a-Alumínio; b-Cerâmica com parte lisa para cima; c-Cerâmica com parte lisa para baixo; d-Madeira; e- Pneu; f-Tijolo e g-PVC.



Figura 16. Placas dos materiais: a-Alumínio; b-Cerâmica com parte lisa para cima; c-Cerâmica com parte lisa para baixo; d-Madeira; e- Pneu; f-Tijolo e g-PVC.

Após a separação do material, os indivíduos de mexilhão dourado foram retirados de forma que não comprometessem o formato da concha e fosse possível realizar a medição do seu comprimento valvar, como mostrado na Figura 17. Foram colocados em saquinhos ziplock identificados conforme Tabela 3 e voltaram para a BOD aguardando contagem.



Figura 17. Separação dos indivíduos incrustados no estrato de PVC para a profundidade de 8 metros. Sendo: a- 0-5 mm; b-5-10 mm; c-10-15 mm; d-15-20 mm e e-20-25 mm.

As medições e contagem foram realizadas em bancada do Laboratório de Estudo de *Limnoperna fortunei* (LELF), com revestimento de borracha, o que possibilitou um menor atrito entre os materiais.

Após a retirada da BOD, os saquinhos foram separados de acordo com os posição e número da amostra e as medições sempre se iniciaram pela primeira placa, seguida da segunda e finalizando com a terceira, ordem criada de acordo com a posição de fixação em campo, sendo a primeira placa a mais próxima da linha de nylon. Os indivíduos foram retirados, separados e então, com o auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,1 mm, medidos, sempre duas vezes, a fim de minimizar o erro de paralaxe, e separados de acordo com o tamanho nas seguintes classes: 0-5 mm, 5-10 mm, 10-15 mm, 15-20 mm, 20-25 mm, 25-30mm, para ao final ser realizada a contagem.

Por se tratar de uma região em campo, com adventos naturais, como secas e cheias, havia possibilidade de mudanças de níveis, já antecipadas. Portanto, com a alteração da posição das amostras, assim como arrancamento de algumas outras devido a enchentes e correntezas, provenientes de chuvas, apenas as amostras colocadas na profundidade de 8 metros resistiram aos impactos naturais e se mantiveram fixadas, possibilitando a continuação da avaliação.

Com a validação do processo de colocação e retirada das placas para os diversos materiais selecionados, obtendo êxito no quesito incrustação e crescimento do mexilhão, foram iniciadas as medições dos indivíduos encontrados. Todos os indivíduos coletados foram medidos conforme descrito por Mackie e Claudi (2010) [113] e Froés et al. (2012) [114].

Com a primeira coleta realizada após 386 dias - referente a um ano aproximadamente de exposição em campo - e feita a verificação da infestação em larga escala, foram colocadas mais quatro amostras (tríades) de PVC. O PVC foi o material escolhido por ter apresentado no primeiro ano, a maior aderência dos indivíduos (densidade populacional), tornando possível a avaliação do crescimento valvar para períodos de infestação menores: 10, 15, 30, 90 e 120 dias de exposição. Esses períodos foram determinados em função do observado por Choi e Chim (1985); Cataldo et al. (2015); e Nakano et al. (2015). O processo de colocação e retirada das placas colocadas posteriormente seguiu o mesmo procedimento das amostras coletadas anteriormente. As datas de colocação e retirada estão disponíveis na Tabela 5.

Tabela 5. Datas de colocação e coleta das amostras para análise da taxa de crescimento do mexilhão dourado.

Data	Horário	Atividade	Tempo de bioinfestação (Dias)
01/05/2019	09:00	Colocação	-----
17/05/2019	12:30	Coleta	16
08/06/2019	10:00	Coleta	38
21/07/2019	08:00	Coleta	80
31/08/2019	09:00	Coleta	122

Os períodos pré-determinados inicialmente para fixação do mexilhão sofreram pequenas alterações em função de acertos de datas para coleta, ficando então a troca de períodos de 15 para 16 dias; de 30 para 38 dias; e de 120 para 122 dias. Os períodos de 10 e 80 dias foram mantidos. Dessa forma, após 16 dias da colocação das placas de PVC a 8 metros de profundidade, foi retirada a primeira tríade para análise e verificação da incrustação do mexilhão dourado, na sua primeira fase de desenvolvimento.

Conforme descrito por Mansur et al. 2012 [97], para determinação dos indivíduos menores, pôde ser observado e comparado, como na Figura 5, fixação em uma das superfícies através de uma lupa, modelo Hotviwer S02 and S07, com zoom variando de 50 a 1000x, sendo possível a medição dos indivíduos encontrados. Para validação dos estágios larvais do mexilhão dourado foi utilizado o método de comparação com o estudo mencionado. Cada imagem foi separada dentro do estágio pré-definido e comparada à imagem cedida pelos autores pesquisados. Mediante comparação foi possível determinar se o indivíduo encontrado incrustado no material tratava-se de um mexilhão dourado ou outra espécie não identificada.

As demais coletas para validação dos dados de crescimento do mexilhão, ocorreram respectivamente 38, 80 e 122 dias após a colocação das placas. Em todas as coletas o procedimento de retirada, transporte, separação, contagem e medição seguiram os métodos descrita anteriormente. Em todas as placas de PVC coletadas, com tempo de exposição de 16, 38 e 80 dias, não foi possível a visualização do molusco a olho nú, apenas por meio microscópico. Nas placas coletas após período de exposição de 10 dias não foi possível observação de nenhum indivíduo.

Todas as medições dos indivíduos coletados em campo (Rio Grande) possibilitaram a determinação de uma nova curva de crescimento valvar do mexilhão dourado, podendo a mesma ser comparada à determinada a partir dos dados da literatura (Tabela 1).

4.2 Ângulo de Fixação (θ)

Uma amostra de MD foi coletado na Usina Hidrelétrica (UHE) de Itaipu, que está localizada no Brasil e no Paraguai, 25°24'28"S, 54°35'24"W. Pelo fato de os indivíduos se quebrarem facilmente depois de retirados da água, optou-se por trabalhar com suas conchas secas e esterilizadas. Os parâmetros medidos, assim como a forma de fixação na superfície foram descritos por Mackie e Claudi (2010) [113] e Froés et al. (2012) [114], com modificações. Essa amostra de conchas secas continha 1.000 espécimes de MD, tendo sido separados pelo método de quarteamento, de acordo com as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10007 [115]. Esta amostra foi subdividida em 7 grupos, separados de acordo com o comprimento valvar, como segue: 0-5mm, 5-10mm, 10-15mm, 15-20mm, 20-25mm, 25-30mm e >30mm. Três subamostras, contendo 5 indivíduos em cada foram separadas para realização das medições. Após a medição dos indivíduos, conforme Figura 18, foi determinado o ângulo de fixação, como se pode observar na Figura 19. Então, as demais cascas foram fixadas artificialmente a superfícies com cola (aço ASTM-A36), mesmo material utilizado por Simeão (2011) [36].

Essas fixações artificiais foram baseadas nos ângulos de fixação como ocorrem em campo [116] (Anexo 03). Essas superfícies de aço ASTM-A36, cujas conchas foram fixadas artificialmente, foram fotografadas para análise posterior.

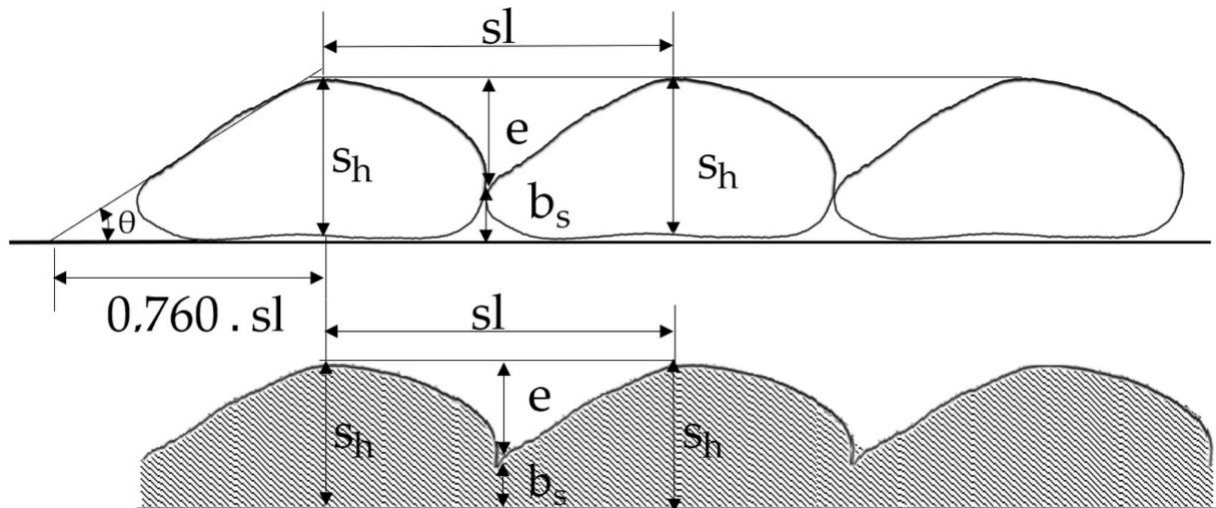


Figura 18. Descrição de como o mexilhão dourado foi medido, dimensões fornecidas em mm.

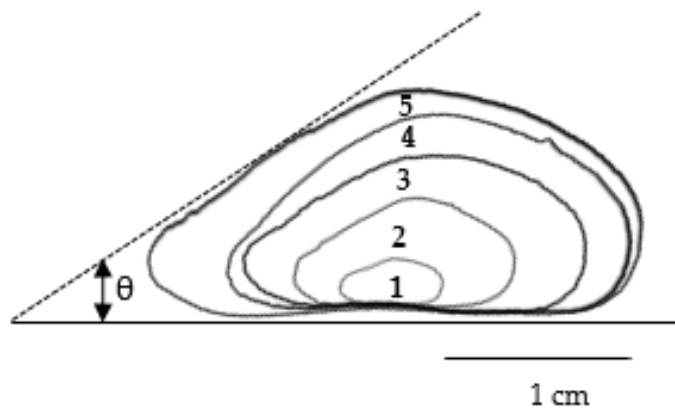


Figura 19. Variação do crescimento dos indivíduos de mexilhão dourado.

As três subamostras previamente separadas foram medidas e suas dimensões (comprimento valvar (sl), base da concha (bs), altura da concha (sh) e o ângulo de fixação (θ)) estão apresentadas na Tabela 6. Assim, foi possível desenvolver as Equações 15, 16, 17 e 18 (novas equações). A partir desses dados, usando a planilha excel, obteve-se uma curva que relaciona o ângulo " θ " com o " sl " e então ajustou-se a Equação (15) que teve um coeficiente $R^2 = 0,9935$.

Foi observado, medindo-se os indivíduos de MD, que a dimensão formada entre o vértice do triângulo e o topo da concha apresenta uma proporção constante de " $0,76 \cdot sl$ " (Figura 4). Assim, foi obtida a partir de trigonometria básica a Equação (16) que fornece a dimensão " sh ". Dimensão " bs ", também obtida medindo os indivíduos de MD, corresponde a 38% do comprimento valvar " sh " e pode ser calculado pela Equação (17). O " e " corresponde a 62% da dimensão " sh " e pode ser calculado pela Equação (18).

Tabela 6. Medições efetuadas nos indivíduos coletados para determinação das novas equações

Classes	1ª Amostra						2ª Amostra						3ª Amostra					
	Medido				Calculado		Medido				Calculado		Medido				Calculado	
	sl	\bar{sl}	θ	$\bar{\theta}$	θ	Erro	sl	\bar{sl}	θ	$\bar{\theta}$	θ	Erro	sl	\bar{sl}	θ	$\bar{\theta}$	Erro	\bar{sl}
0-5 mm	3,2	4,21	33	34,6	33,37	1%	3,8	4,18	33	34,4	33,92	3%	3,1	3,92	33	34,14	33,27	1%
	3,7		34		33,83	0%	2,8		34		32,95	3%	2,8		33		32,95	0%
	4,6		35		34,54	1%	4,8		35		34,68	1%	3,9		34		34,00	0%
	4,7		35		34,61	1%	4,7		35		34,61	1%	4,8		36		34,68	4%
	4,8		36		34,68	4%	4,8		35		34,68	1%	5,0		36		34,81	3%
5-10 mm	6,5	8,32	36	36,6	35,69	1%	5,3	7,82	35	36,0	35,01	0%	5,4	6,96	35	35,8	35,07	0%
	7,4		36		36,14	0%	6,5		35		35,69	2%	5,8		35		35,31	1%
	8,7		37		36,70	1%	8,6		36		36,66	2%	6,8		36		35,85	0%
	9,3		37		36,93	0%	8,7		37		36,70	1%	7,8		36		36,32	1%
	9,7		37		37,08	0%	10,0		37		37,19	1%	9,0		37		36,82	0%
10-15 mm	10,2	13,14	36	37,6	37,26	3%	11,3	12,34	37	38,2	37,62	2%	10,7	12,84	38	38,6	37,43	2%
	13,1		37		38,15	3%	11,6		38		37,71	1%	12,0		38		37,84	0%
	13,5		38		38,26	1%	11,9		38		37,81	1%	12,0		39		37,84	3%
	14,3		38		38,47	1%	12,7		39		38,04	2%	14,7		39		38,57	1%
	14,6		39		38,55	1%	14,2		39		38,45	1%	14,8		39		38,60	1%
15-20 mm	15,9	17,18	39	39,6	38,86	0%	16,2	18,42	39	39,4	38,93	0%	15,8	17,20	38	39,6	38,84	2%
	16,0		39		38,89	0%	17,8		39		39,28	1%	17,4		39		39,20	1%
	15,8		40		38,84	3%	18,4		39		39,41	1%	17,0		39		39,11	0%
	18,3		40		39,39	2%	19,7		40		39,66	1%	16,2		41		38,93	5%
	19,9		40		39,70	1%	20,0		40		39,72	1%	19,6		41		39,64	3%
20-25 mm	21,6	23,02	40	40,4	40,01	0%	21,7	22,88	40	40,2	40,03	0%	20,7	21,44	40	40,4	39,85	0%
	22,6		40		40,18	0%	22,4		40		40,15	0%	20,7		40		39,85	0%
	23,7		40		40,37	1%	22,8		40		40,22	1%	21,2		40		39,94	0%
	22,3		41		40,13	2%	23,1		40		40,27	1%	21,4		41		39,98	2%
	24,9		41		40,56	1%	24,4		41		40,48	1%	23,2		41		40,28	2%
25-30 mm	25,3	25,54	41	41,0	40,62	1%	27,3	25,72	41	41,0	40,91	0%	27,5	25,98	41	41,0	40,94	0%
	25,3		41		40,62	1%	25,7		41		40,68	1%	25,4		41		40,63	1%
	25,1		41		40,59	1%	25,1		41		40,59	1%	26,4		41		40,78	1%
	25,0		41		40,57	1%	25,1		41		40,59	1%	25,3		41		40,62	1%
	27,0		41		40,87	0%	25,4		41		40,63	1%	25,3		41		40,62	1%
>30 mm	30,9	30,76	41	41,4	41,40	1%	31,0	31,76	40	41,4	41,41	4%	30,9	31,76	41	41,8	41,40	1%
	31,6		41		41,49	1%	31,0		41		41,41	1%	30,5		42		41,35	1%
	30,5		41		41,35	1%	32,1		42		41,62	1%	32,5		42		41,60	1%
	30,7		42		41,37	1%	32,1		42		41,55	1%	32,8		42		41,63	1%
	30,1		42		41,29	2%	32,0		42		41,54	1%	32,1		42		41,55	1%

Os significados dos símbolos são: sl – comprimento valvar (mm); \bar{sl} - média do comprimento valvar (mm); θ – ângulo de fixação (graus); $\bar{\theta}$ – média do Ângulo de fixação.

$$\theta = 29.9893 \cdot sl^{0,0951} \quad (15)$$

$$sh = 0.760 \cdot sl \cdot \tan\theta \quad (16)$$

$$bs = 0.288 \cdot sl \cdot \tan\theta \quad (17)$$

$$e = 0.472 \cdot sl \cdot \tan\theta \quad (18)$$

4.3 Espessura do Biofouling (bt)

Com a determinação da altura da concha pela Equação (16), foi possível calcular a espessura da bioincrustação, de acordo com o arrancamento causado pelo arrasto hidrodinâmico. No entanto, é importante considerar a interferência da velocidade do fluido na progressão de bioincrustação no interior das tubulações. Com base nos estudos de Castro (2013) [39], assume-se que o efeito da velocidade aumentou gradativamente o arrancamento dos mexilhões. Um arrancamento de 20% da espessura da bioincrustação foi observada entre as faixas de velocidade de 2,0 m/s a 2,5 m/s. A partir daí, um arrancamento de 40% foi encontrado entre 3,0 m/s a 3,5 m/s, avançando para 60% entre 3,5 m/s a 4,0 m/s, e até 80% em velocidades acima de 4,0 m/s. Quando a velocidade atinge 4,5 m/s, todos os novos indivíduos são arrancados. Com base nas informações acima, a espessura da bioincrustação foi calculada em relação ao percentual de desprendimento, após o início da formação da segunda camada do MD (Equação 5).

$$bt = sh + sh \cdot (1 - \%arrancamento)_{1^{\text{a}} \text{ camada}} + sh \cdot (1 - \%arrancamento)_{2^{\text{a}} \text{ camada}} + \dots + sh \cdot (1 - \%arrancamento)_{n^{\text{a}} \text{ camada}} \quad (19)$$

bt: espessura da bioincrustação;

%descolamento: percentual de desprendimento do MD.

Assumiu-se que, uma vez que o valor da espessura da bioincrustação supera o valor da rugosidade média da superfície, a segunda camada de bioincrustação começa a se formar. Isso cria um padrão para o crescimento das camadas e permite estimar a espessura da bioincrustação para qualquer período de infestação. Deve ser considerado que o crescimento de MD não é uniforme e que as colônias possuem espécimes de vários tamanhos.

4.4 Rugosidade (e)

O valor de e foi fundamental para a obtenção do fator de perda de carga (f). Para determinar esse fator, uma superfície plana (ASTM A-36) foi infestada artificialmente com mexilhões dourados e traçada uma linha média (da base de fixação do mexilhão), através da qual foram feitas as medições entre picos e vales, conforme descrito em Han et al. (2019) [117], Figura 20.

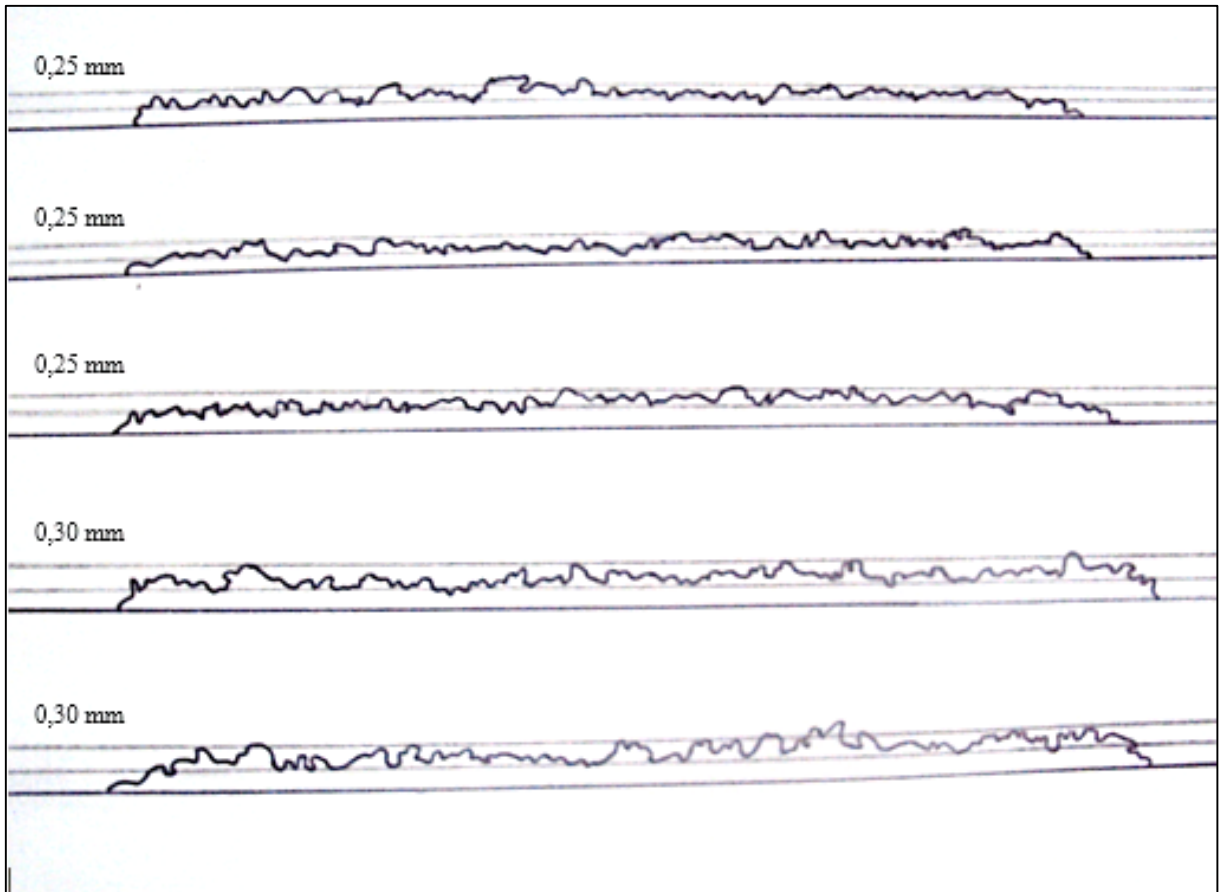


Figura 20. Sombra da superfície incrustada pelo mexilhão dourado, traçada a linha média, para medição das rugosidades (e_i).

Os dados obtidos foram utilizados para determinação da rugosidade média da superfície (R_a), Equação 20, parâmetro aplicado na maioria dos processos de engenharia [117,118,119].

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \text{ (mm)} \quad (20)$$

Uma vez que o valor da espessura da bioincrustação (medida de acordo com a forma como os mexilhões são fixados e em camadas) supera o valor da rugosidade média da superfície, a segunda camada de bioincrustação começa a se formar. Isso cria um padrão para o crescimento das camadas e permite estimar a espessura da bioincrustação para qualquer período de infestação. Deve-se considerar que o crescimento do MD não é uniforme e que as colônias possuem espécimes de tamanhos variados. Isso faz com que a rugosidade média seja afetada pela diversidade desses indivíduos.

4.5 Fator de Perda de Carga (f) e Perda de Carga (ΔH)

Como a bioincrustação ocorreu em toda a superfície interna do tubo, o diâmetro interno (D) do tubo foi diminuído pelo valor de duas vezes a medida da espessura da bioincrustação. Portanto a avaliação do fator de perda de carga é feita com base nessa informação.

Para calcular o fator de perda de carga (f), foi definida uma função, utilizando a Equação (12), Equação de Buzzelli [87]. Esta equação contém duas raízes: B_1 , Equação (13), e B_2 , Equação (14), ambas obtidas em função de R_a (rugosidade média), Equação (20), D (diâmetro interno) e o número de Reynolds (Re), que foi obtido através da Equação (21) [120].

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (21)$$

f : fator de perda de carga;

B_1 : raiz 1;

B_2 : raiz 2;

Re : Número de Reynolds;

D : diâmetro interno (m);

ν : viscosidade cinemática da água, 10^{-6} (m²/s).

Com os valores acima obtidos, a perda de carga foi calculada usando a equação de Darcy-Weisbach, Equação 10 [78]. Para determinar a altura total da elevação ou a perda total de carga do sistema de bombeamento, a Equação 22 foi usada [78].

$$H_{\text{total}} = H_{\text{gh}} + \Delta H \quad (22)$$

H_{total} : altura total da elevação (mca);

H_{gh} : gradiente geométrico médio a ser compensado (mca);

ΔH : somatório das perdas de carga na sucção e na tubulação de recalque (mca).

A perda de carga devido à sucção e recalque foi calculada usando a Equação 23 [78].

$$\Delta H = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L_{\text{recalque}}}{\pi^2 \cdot g \cdot (D_{\text{recalque}})^5} + \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L_{\text{sucção}}}{\pi^2 \cdot g \cdot (D_{\text{sucção}})^5} \quad (23)$$

Os métodos aqui utilizados, para calcular a perda de carga também foram descritos por Mataix (2009) [120].

4.6 Eficiência Energética

A potência de bombeamento precisa ser determinada para o cálculo do custo econômico de bombeamento. A Equação 24 [78], disponível, considera o rendimento das bombas conforme descrito de Mataix (2009) [120] e o fluido hidráulico à pressão atmosférica.

$$P_{kw} = \frac{(\gamma \cdot Q \cdot H_{total})}{\eta \cdot 1000} \quad (24)$$

P: potência de bombeamento (kW);

γ : peso específico da água (kgf/m³);

η : eficiência.

O consumo do sistema de bombeamento sem bioinfestação, tendo em conta a potência obtida para o referido sistema foi obtido usando a Equação 25 [120].

$$C_{sem\ inf} = P_{sem\ inf} \cdot \sum_1^n t_{op.} \quad (25)$$

$C_{sem\ inf}$: consumo do sistema de bombeamento sem bioinfestação (kWh);

$P_{sem\ inf}$: potência calculada para o sistema de bombeamento sem bioinfestação (kW);

$t_{op.}$: número de horas de operação do sistema de bombeamento em horas, dias ou anos.

O consumo do sistema de bombeamento com bioinfestação, foi obtido através da utilização da Equação 26, [120].

$$C_{inf} = P_{inf} \cdot \sum_1^n t_{op.} \quad (26)$$

C_{inf} : consumo do sistema de bombeamento com bioinfestação (kWh);

P_{inf} : potência calculada para o sistema de bombeamento com bioinfestação.

O aumento do consumo de energia por hora é o valor da diferença de potência entre os sistemas com e sem bioincrustação, multiplicado pela tempo de operação do bombeamento. Este cálculo é dado como Equação 27 [120].

$$\text{Incr.} = (P_{\text{inf}} - P_{\text{sem inf}}) \cdot \sum_1^n t_{\text{op.}} \quad (27)$$

Os custos do sistema de bombeamento por metro cúbico sem bioinfestação foram obtidos via Equação 28 [120], tendo em vista o consumo do sistema de bombeamento e do o volume que foi bombeado.

$$C_{\text{bomb. sem inf.}} = \frac{C_{\text{sem inf.}}}{V_{\text{bomb.}}} \cdot \text{Preço} \quad (28)$$

$C_{\text{bomb. sem inf.}}$: Custo de bombeamento por metro cúbico antes da infestação (USD/m³);

$V_{\text{bomb.}}$: Volume bombeado (m³);

Preço: Preço por kWh (USD/kwh).

O custo do sistema de bombeamento por metro cúbico com bioinfestação foi obtido por usando a Equação 29 [120], tendo em vista o consumo do sistema de bombeamento com bioinfestação e do volume que foi bombeado.

$$C_{\text{bomb com inf.}} = \frac{C_{\text{inf.}}}{V_{\text{bomb.}}} \cdot \text{Preço} \quad (29)$$

$C_{\text{bomb. com inf.}}$: custo de bombeamento por metro cúbico após bioinfestação (USD/m³).

4.7 Estudo de caso: Estação Elevatória

Para calcular os impactos da bioincrustação nos sistemas de bombeamento de água bruta, utilizou-se como exemplo representativo a Estação de Tratamento de Água (ETA) II Rio Branco, Acre, Brasil [121]. As coordenadas do local são 10° 0'35.95"S/ 67°50'38.08"W. Uma visão do sistema de bombeamento de a estação de bombeamento é mostrada na Figura 21.



Figura 21. Estação de Tratamento de Água II, Rio Branco, Acre, constituída por um conjunto de bombas verticais do tipo turbina. Nota: 1—Bomba 1; 2 —Bomba 2; e 3 —Bomba 3.

Este sistema de bombeamento é composto por 3 bombas centrífugas verticais tipo Francis (rotor radial) que operam 12 horas por dia, com vazão média de 1.100 L/s. Tem a capacidade de mobilidade vertical por meio de flutuação para poder ajustar-se às variações dos níveis de água do rio. As características da estação consideradas foram vazão (Q), rendimento (η), potência (P), diâmetro interno (D), comprimento da tubulação de sucção e recalque (L), velocidade (V) e altura (H) (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7. Características das tubulações acopladas às 3 bombas representativas adotadas para bombear de do rio até a descida da calha do rio — Rio Branco / Acre [121].

	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
Q (L/s)	600	300	200
η (%)	78,3	70,7	77,4
P (CV)	250	150	125
D (mm)	500	400	300
L (mm)	71,5	73,0	72,0
V (m/s)	3,06	2,39	2,83

Os significados dos símbolos são os seguintes: Q, fluxo; η , eficiência; P, potência instalada; L, comprimento de tubo de sucção + tubo de descarga; D diâmetro interno e V, velocidade.

Tabela 8. Características das bombas da Estação Elevatória Elevatória II, Rio Branco, Acre [121]:

	Q (L/s)	H (mca)	η (%)		Q (L/s)	H (mca)	η (%)		Q (L/s)	H (mca)	η (%)
	100	35,0	58		50	35,0	48		50	35,0	48
	200	33,0	64		100	33,0	63		100	33,0	63
	300	30,0	69		150	30,0	69		150	30,0	69
Bomba 1	400	25,0	74	Bomba 2	200	25,0	74	Bomba 3	200	25,0	74
	500	20,5	76		250	20,5	75		250	20,5	75
	600	14,5	79		300	14,5	75		300	14,5	75
	700	9,0	74		350	9,0	70		350	9,0	70

Os significados dos símbolos são os seguintes: Q, fluxo; H, altura; e η , eficiência.

A ETA estudada segue o modelo simplificado de um sistema de bombeamento de água (Figura 22). Neste estudo, os cálculos foram realizados considerando a média ponderada de citações de elevação do rio. Isso resultou em uma média de 122,85 metros e em desnível médio de 13,25 metros.

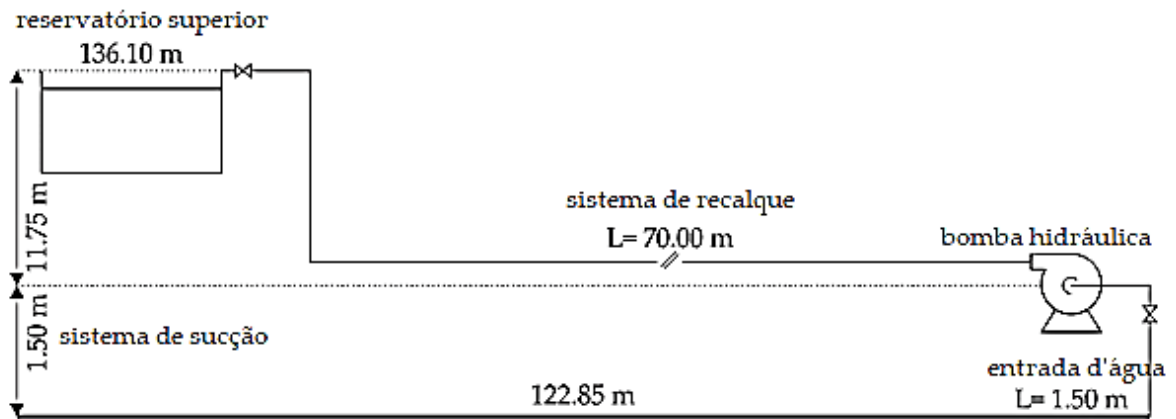


Figura 22. Modelo simplificado do sistema de bombeamento da Estação Elevatória Elevatória II, Rio Branco, Acre.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação Do Impacto Do Mexilhão Dourado Em Estações Elevatórias

Este estudo inclui uma avaliação da perda de eficiência energética em uma estação de bombeamento conhecida sob a hipótese de bioincrustação do mexilhão dourado (MD). Algumas informações biológicas do MD, dados construtivos da estação alvo e alguns parâmetros de engenharia foram usados, os quais influenciam o desempenho do sistema de bombeamento. Este conjunto de informações foi necessário para a construção de novas equações, bem como o aprimoramento das equações existentes e obtenção dos resultados sobre os indicadores econômicos que validam a perda de eficiência energética.

5.2 Curva de Crescimento do Mexilhão Dourado

Um dos principais desafios do presente trabalho foi obter as curvas de crescimento valvar do mexilhão dourado para verificação da influência da profundidade sobre as densidades populacionais. Essas curvas, obtidas com base nos dados apresentados na Tabela 1 (Choi e Chim, 1985; Boltovskoy e Cataldo 1999; Darrigran e Maroñas 2002; Cataldo et al. 2015; e Nakano et al. 2015) e através dos dados coletados em campo (Furnas), foram comparadas a fim de se obter uma relação capaz de validar o processo de obtenção dos dados, assim como da própria verificação a cerca da taxa de crescimento para duas situações distintas. Como detalhado na seção 4.1, dos materiais dispostos em campo (PVC, alumínio, madeira, tijolo, cerâmica e pneu) o que obteve maior taxa de fixação ao longo do primeiro ano foi o PVC, Tabela 9, portanto, foi o material escolhido para obtenção dos dados que compuseram a curva de crescimento valvar comparativa à gerada em função dos dados da literatura, mostradas na Figura 23. A escolha desse material foi feita em função da densidade populacional, pois, para determinação dos dados para menores períodos de bioinfestação, foi necessário garantir que haveria fixação passível de medição.

Tabela 9. Densidade de indivíduos fixados nos materiais avaliados para o período de um ano em campo (Furnas), para cada posição de fixação. S- superior; I – inferior; 1, 2, 3 – ordem das placas de cima para baixo, com relação ao leito do rio.

	MAD	ALU	TIJ	CEB	PNE	CEC	PVC
S1	0	0	2	7	1	0	5
I1	133	61	113	72	22	138	97
S2	0	8	0	5	7	3	3
I2	34	92	77	107	196	105	103
S3	0	4	1	1	8	3	3
I3	22	27	30	41	27	49	117
Total	189	192	223	233	261	298	328

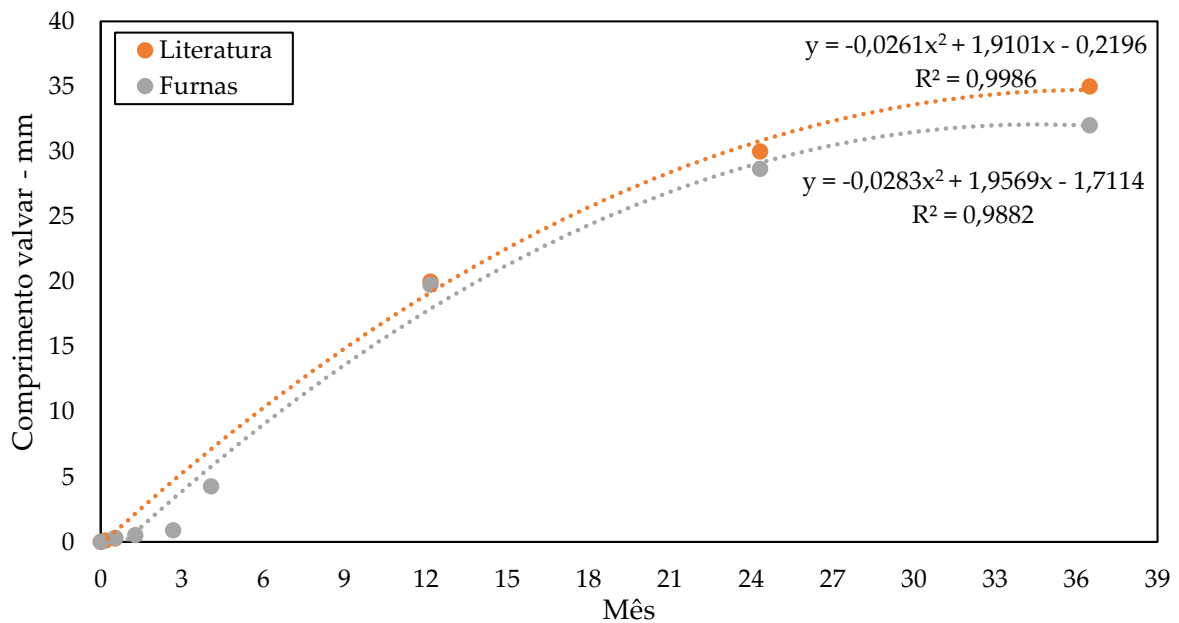


Figura 23. Curva de crescimento valvar do mexilhão dourado em função do tempo de infestação, em meses. Curvas baseadas nos dados obtidos de Cataldo et al. [4], Choi e Chim [5], Nakano et al. [110], Boltovskoy e Cataldo [111], e Darrigran e Maroñas [112], e dados obtidos em campo.

A Figura 5 mostra que no primeiro ano de bioinfestação (0 – 12 meses), o comprimento valvar atingiu 20mm (Literatura) e 19,8mm (Furnas), apresentando esse período, um crescimento exponencial. No segundo ano de bioinfestação (12 – 24 meses), o MD cresceu apenas 10 mm (Literatura) e 9 mm (Furnas – máxima), mostrando que houve uma redução de 50% e 45%, respectivamente, no crescimento quando comparado ao primeiro ano. Esse comportamento também foi verificado no terceiro ano de bioinfestação (24 – 36 meses), onde foi observado um crescimento do comprimento valvar de 5 mm (Literatura) e 3,5 mm (Furnas) para este período, que também apresentou uma redução de 50% e 40%, respectivamente, na taxa de crescimento quando comparado ao ano anterior. Essa dinâmica de crescimento, mostrada no gráfico elaborado a partir da Tabela 1 e dados coletados em campo, mostrou que há uma tendência de estabilização no crescimento à medida que o MD se aproxima do seu tamanho máximo (35 - 40mm). Esses dados estão de acordo com os de Darrigran e Maroñas (2002) [112], que mostram uma tendência de estabilização após um período de 3 anos, quando o comprimento valvar atinge seu máximo. Há também uma relação próxima de crescimento entre os dados comparados, visto uma diferença de 5% e 10% para a redução de crescimento nos segundo e terceiro ano de avaliação, demonstrando confiabilidade no processo, assim como um apontamento para as diferenças encontradas, que provavelmente ocorrem por uma questão alimentar ou variação de temperatura, fatores observados como característicos para o desenvolvimento do MD.

Com as demais coletas realizadas (2 e 3 anos após a colocação das amostras em campo - Furnas), foi possível verificar a densidade populacional do MD na contagem dos indivíduos fixados nos materiais que suportaram o impacto das enchentes e a própria degradação do tempo. Nessa contagem de dois anos não foi possível quantificar os indivíduos fixados nas placas de pneu, devido à degradação do material que o fixava. Para a coleta realizada no período de 3 anos, as amostras entraram em processo de decomposição, e para placas de madeira e tijolo não foi possível a quantificação precisa de indivíduos fixados. As placas de materiais de alumínio, cerâmica e PVC puderam ser quantificados, com relação à densidade fixada em suas superfícies para o período de 3 anos, porém, muitos indivíduos novos estava fixados de forma que a contagem, assim como a medição se tornaram impossibilitadas. A relação da quantidade de indivíduos contados nos materiais levados a campo, de forma a quantificar a densidade populacional do MD, está apresentada na Figura 24.

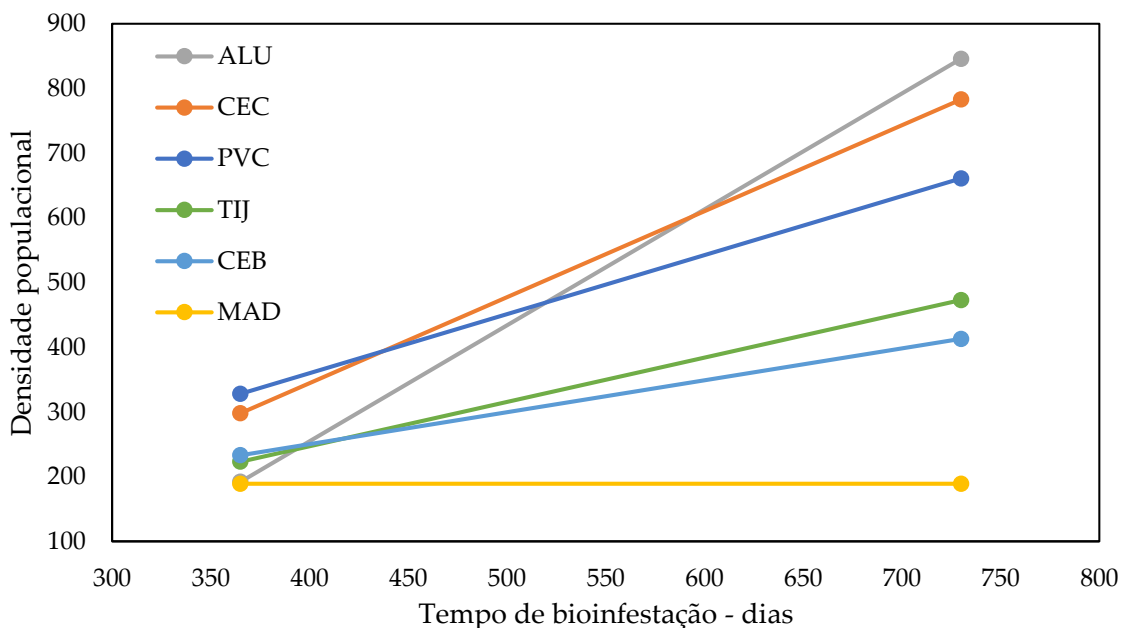


Figura 24. Densidade populacional em diferentes materiais mostrando a preferência de fixação do mexilhão dourado nos materiais: ALU – alumínio; CEC – cerâmica com parte lisa pra cima; PVC – cloreto de polivinila; TIJ – tijolo; CEB – cerâmica com parte rugosa pra cima; e MAD – Madeira.

É possível dizer que as densidades cresceram em média 55% do primeiro para o segundo ano de bioinfestação, mostrando que em um ano apenas, as colônias dobram de volume. Como visto em Nakano et al. [2], é possível observar a preferência de fixação dentre os materiais que foram dispostos e expostos ao mesmo ambiente.

5.3 Ângulo de Bioincrustação

As medições realizadas nos indivíduos de MD coletados, conforme Figura 18, permitiram a construção de uma nova equação para cálculo do ângulo de fixação (θ), Equação 15, Figura 25. Como descrito nos materiais e métodos, essa e as Equações 16, 17 e 18, foram obtidas a partir de uma relação de proporcionalidade entre as medições realizadas.

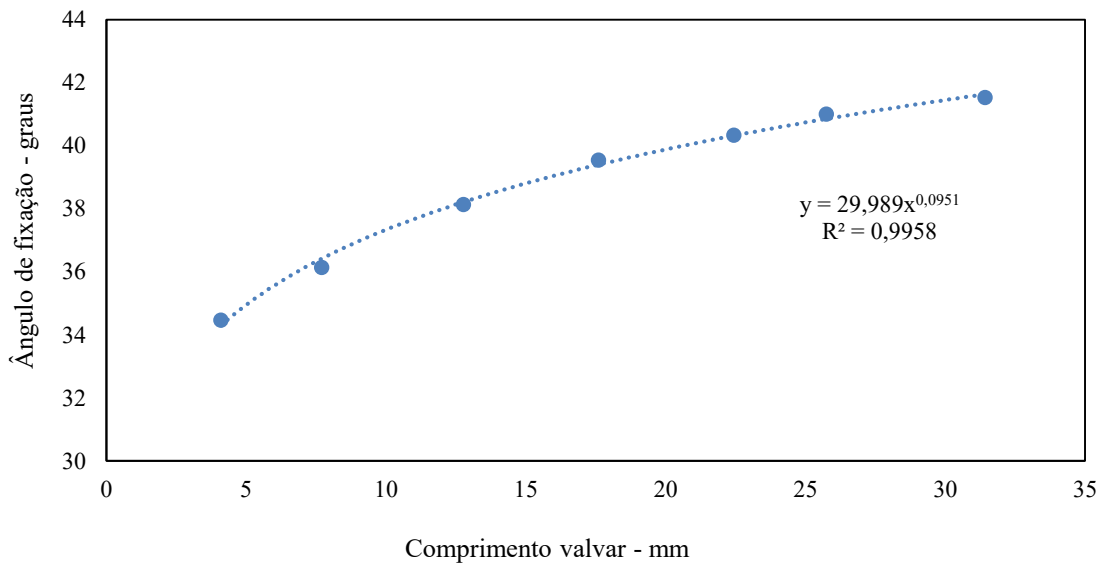


Figura 25. Curva de crescimento valvar do mexilhão dourado em função do tempo de infestação, em meses. Curvas baseadas em dados da literatura e dados obtidos em campo, média e máximo.

Sendo um novo fator determinado, o ângulo de fixação, após aplicado, pode ser comparado entre colônias reais e coladas artificialmente. Essa comparação visa a verificação dos dados obtidos a partir da rugosidade superficial calculada em ambas as situações pelo métodos determinado anteriormente. A rugosidade determinada a forma de fixação, uma vez que ao longo do tempo, tende a se estabilizar.

5.4 Rugosidade

A rugosidade superficial, foi determinada a partir da Equação 4, em função do comprimento valvar (sl) e do ângulo de fixação (θ), a partir das medições dos indivíduos coletados em Furnas e calculada através das fotografias em alta resolução, das placas incrustadas artificialmente com o MD. Ambas estão representadas na Figura 26.

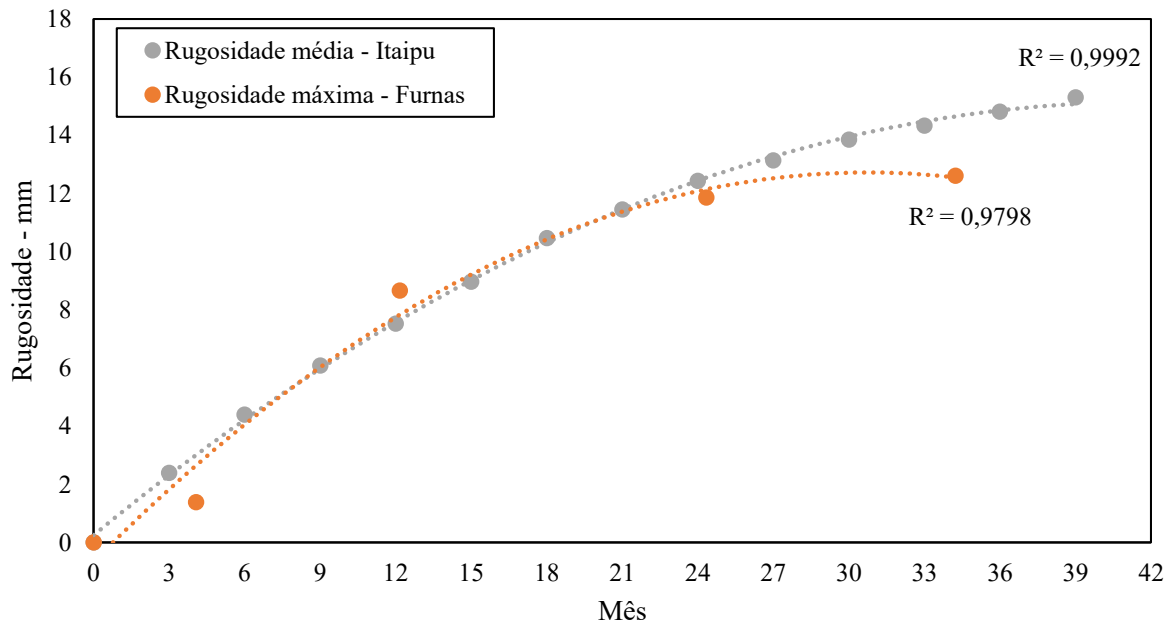


Figura 26. Curva da rugosidade causada pelo biofouling na tubulação em função do tempo de bioinfestação. Os valores médios e máximos se referem ao período.

As curvas de rugosidade característica, Figura 20, mostraram uma taxa média de crescimento mensal de aproximadamente 6% e 5% para o período de 0 a 18 meses de bioinfestação, coincidindo com o valor médio da rugosidade da superfície calculado por meio da Equação 6 (consulte a Seção 2.5), que foi de $Ra = 10,25 \text{ mm}$ [122] (Anexo 04). Essa rugosidade foi usada para determinação do início da formação da segunda camada de bioincrustação e para calcular a perda de carga. Após este período (18 – 33 meses), a taxa média de crescimento caiu para 5% e 1%, demonstrando que o aumento do comprimento valvar não influencia diretamente no aumento da rugosidade. Depois dos 33 meses de bioinfestação, constatou-se que a curva tende a se estabilizar.

Segundo Burlakova et al. (2022) [1], *Dreissena spp.* (mexilhão zebra) e *Limnoperna fortunei* (MD) têm histórias de vida semelhantes e compartilham características ecológicas funcionais, além de possuírem um bisco que permite sua fixação a vários substratos. Sabe-se também que o mexilhão zebra causa um aumento na rugosidade da superfície após o início da bioinfestação, e que densidades de 32 ind/cm^2 já foram detectados [24]. Portanto, essas características servem de alerta quanto à questão de aumento da densidade populacional do MD, o que contribuiria para o aumento da rugosidade.

5.5 Espessura da Bioincrustação

A espessura da bioincrustação foi determinada através das medições dos indivíduos coletados em Itaípu e em Furnas, com velocidades de entrada de 2,5 a 4,5 m/s, variando em 0,5 m/s, mantendo-as constante ao longo do tempo, com variação de vazão. A Figura 27 apresenta a comparação das espessuras de bioincrustação causada no interior das tubulações.

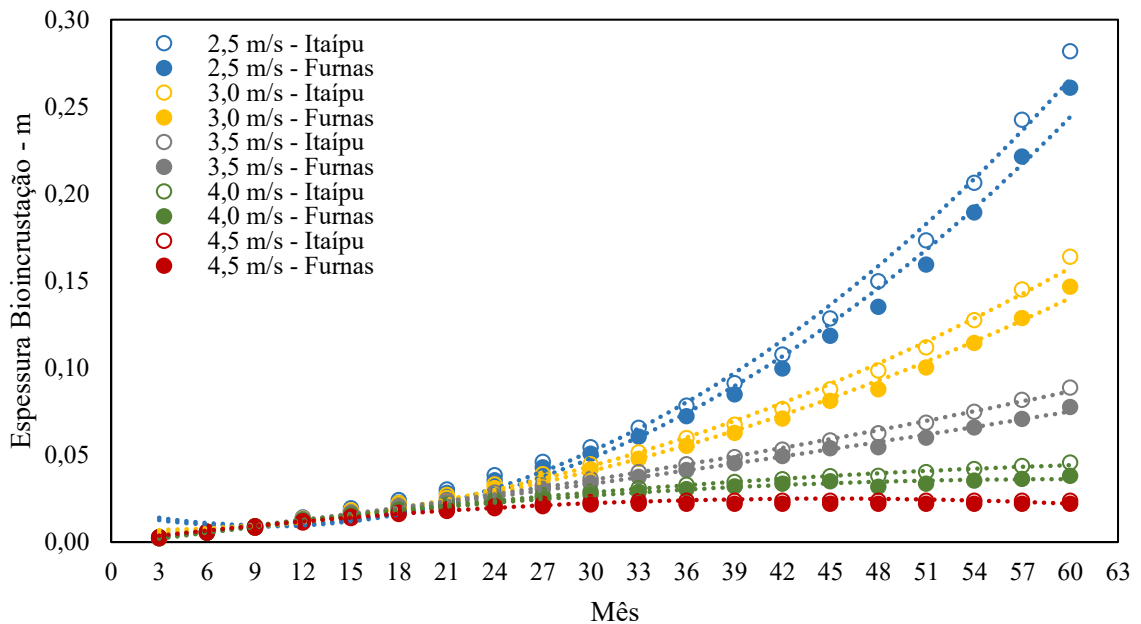


Figura 27. Espessura da bioincrustação causada pelo mexilhão dourado com diferentes velocidades do fluido, medida através dos indivíduos coletados em Itaípu e em Furnas, sem arrancamento causado pelo arrasto hidrodinâmico.

É possível observar que até 12 meses, todas as curvas apresentam a mesma característica de crescimento. Isso se deve ao fato de que até esse período a velocidade não interfere na taxa de crescimento da espessura da bioincrustação, mostrando que o arrasto hidrodinâmico não interfere no processo de fixação. Após esse período, no intervalo de 12 a 21 meses, a taxa de crescimento apresenta variação de forma igual para as velocidades diferentes. É também visível que para menores velocidades, o impacto da bioincrustação é maior, uma vez que, com menores velocidades o arrancamento dos novos indivíduos fixados também é menor.

5.6 Fator de Perda de Carga e Diâmetro Interno

Depois de determinar a espessura da camada, é possível determinar o diâmetro interno levando em consideração sua redução causada pelo aumento da espessura da bioincrustação. Os valores de f foram calculados para diferentes diâmetros comerciais (400, 600 e 800 mm – 1, 2, 3, 5, 8

e 10 m) em função do tempo de bioincrustação. As Figuras 28, 29 e 30 mostram as curvas da progressão de f ao longo do tempo com a redução dos diâmetros avaliados. As figuras foram separadas para melhor visualização dos resultados.

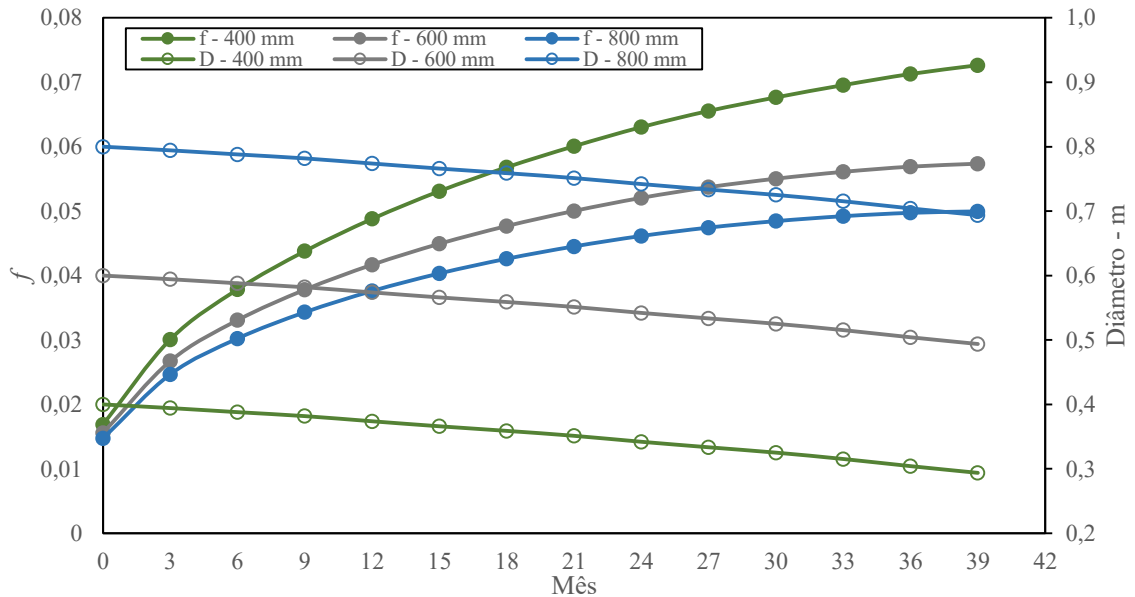


Figura 28. Evolução do fator de perda de carga para tubulações de 400, 600 e 800 mm de diâmetro, em função do tempo.

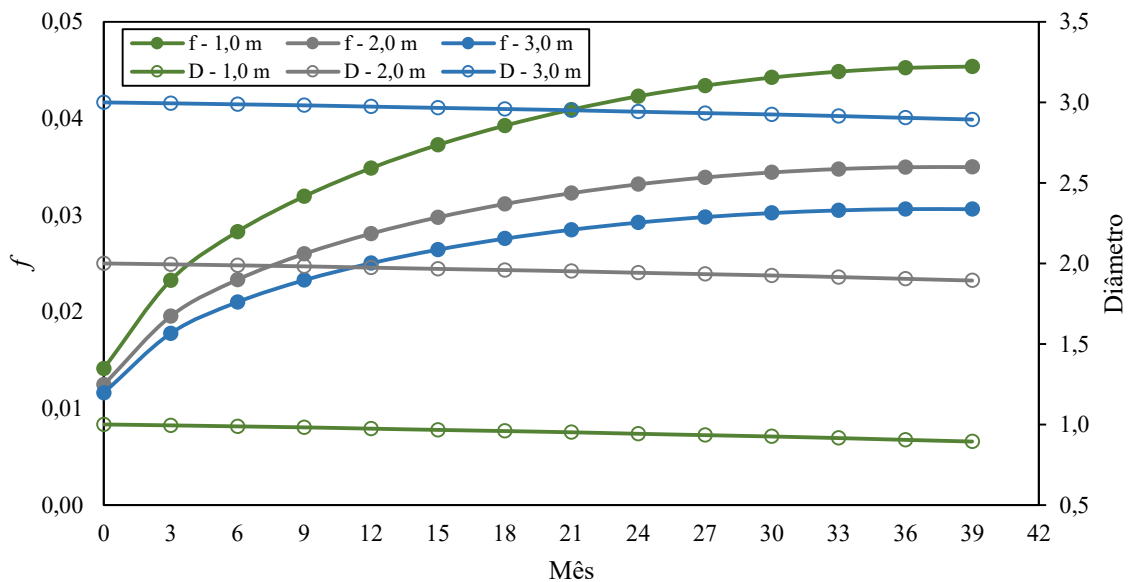


Figura 29. Evolução do fator de perda de carga para tubulações de 1, 2 e 3 m de diâmetro, em função do tempo.

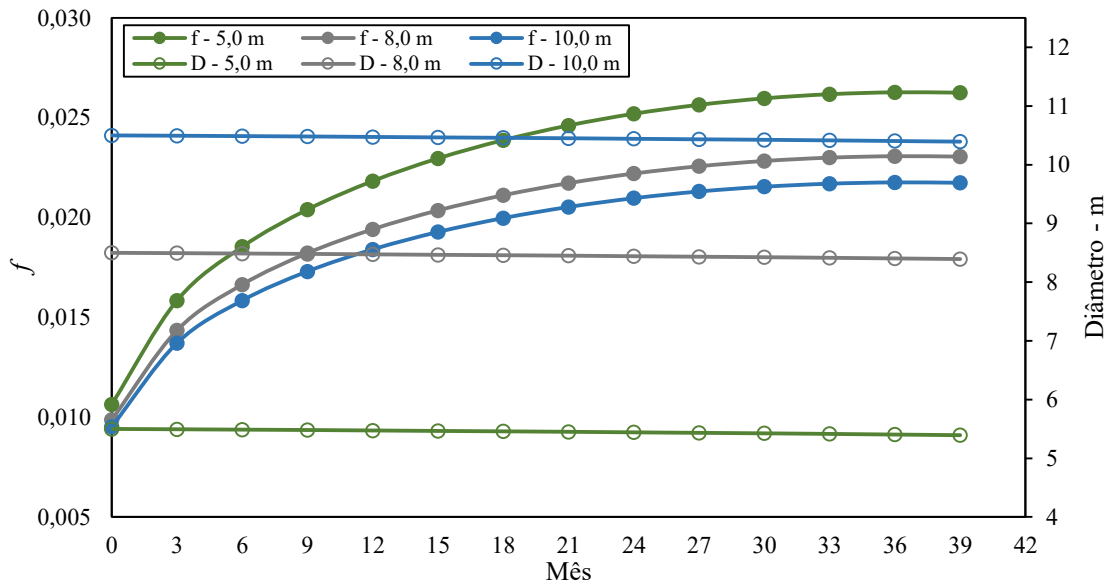


Figura 30. Evolução do fator de perda de carga para tubulações de 5, 8 e 10 m de diâmetro, em função do tempo.

Para construção dessas curvas, foi necessário calcular os fatores de perda de carga (f), utilizando as Equações 21, 22, 23 e 24. Os valores de f foram calculados sem levar em consideração a rugosidade inicial (rugosidade do material utilizando). A construção das curvas de f levou em consideração como primeiro valor o fator de perda de carga do sistema de bombeamento sem bioincrustação e a partir daí os cálculos foram feitos levando-se em consideração a diminuição do diâmetro interno, causada pelo aumento da espessura da bioincrustação, conforme mostrado na Figura 18. As curvas de f para as tubulações de 5, 8 e 10 m apresentaram um aumento médio ao longo de 3 anos (0 – 36 meses) de 125%, em comparação com o valor f para a tubulação sem bioincrustação. Pode-se observar que esse valor é maior para as tubulações de 1, 2 e 3 m, para o mesmo período avaliado, passando para 182% de aumento do fator de perda de carga, se comparado ao sistema sem bioincrustação. Para as tubulações menores de 1 metro avaliadas, no caso: 400, 600 e 800 mm, os valores de f apresentam valores ainda maiores do que os citados anteriormente, alcançando um aumento médio para os três diâmetros de 260%. Isso comprova a relação do aumento de f maior para tubulações menores.

A Figura 31 mostra o incremento percentual de aumento do f em função do diâmetro utilizado. É possível observar que foram incluídos os diâmetros de 50, 100 e 200 mm, porém, os mesmos sofrem aumentos excessivos de perda de carga, levando o sistema à oclusão. A Tabela 10 apresenta a variação média do f em função dos parâmetros que sofrem interferência após o início da bioincrustação, calculado no intervalo de 2,5 a 4,5 m/s.

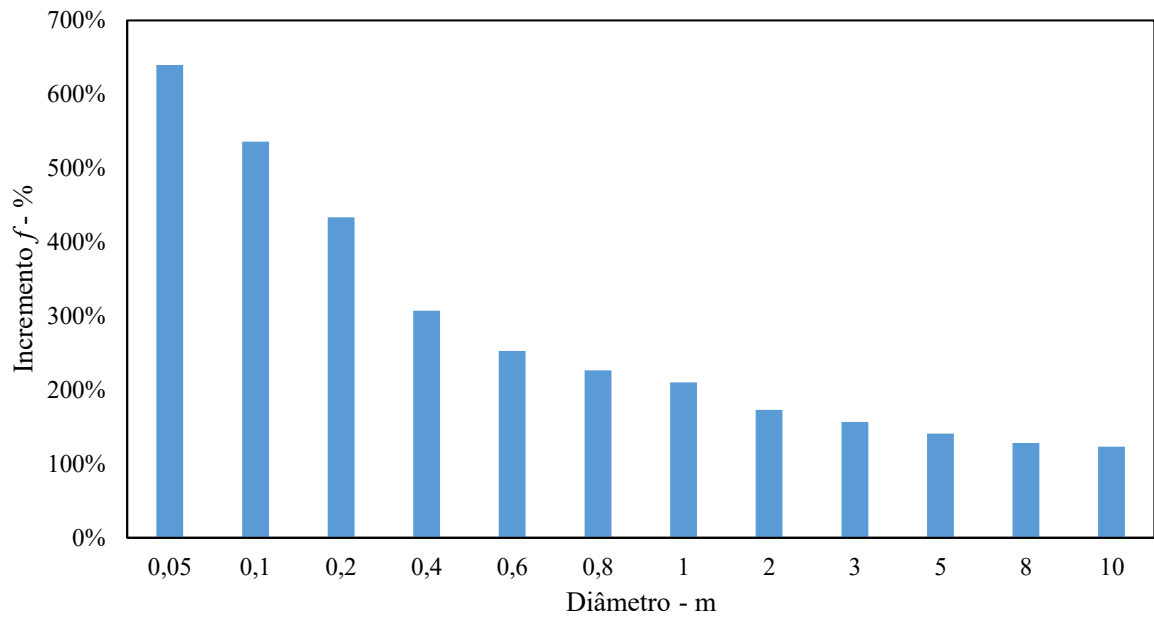


Figura 31. Evolução do incremento percentual médio do fator de perda de carga - período de 0 a 39 meses.

Tabela 10. Dados para cálculo do f em função da variação de velocidade, mostrando oclusão do sistema.

Mês	f	Re	B1	B2	Sl - mm	θ (graus)	Rugosidade - mm	bt - mm	D - mm
Diâmetro: 50 mm - 2,5 a 4,5 m/s									
0	0,027	17.500	6,2	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	50
3	0,057	16.092	5,0	130,8	3,9	34,1	1,0	2,0	46
6	0,092	13.892	4,4	313,7	9,0	37,0	3,0	5,0	40
9	0,131	11.754	3,9	492,0	13,6	38,4	5,0	8,0	34
Diâmetro: 100 mm - 2,5 a 4,5 m/s									
0	0,023	35.000	6,7	16,8	0,0	0,0	0,000	0,000	0,100
3	0,043	33.592	5,8	132,7	3,9	34,1	0,001	0,002	0,096
6	0,062	31.392	5,3	316,1	9,0	37,0	0,003	0,005	0,090
9	0,079	29.254	5,0	494,7	13,6	38,4	0,005	0,008	0,084
12	0,098	26.137	4,6	660,9	17,7	39,4	0,007	0,011	0,078
15	0,119	22.580	4,3	810,9	21,3	40,1	0,008	0,014	0,073
Diâmetro: 200 mm - 2,5 a 4,5 m/s									
0	0,019	70.000	7,2	18,2	0,0	0,0	0,000	0,000	0,200
3	0,034	68.592	6,5	134,6	3,9	34,1	0,001	0,002	0,196
6	0,046	66.392	6,1	318,2	9,0	37,0	0,003	0,005	0,190
9	0,056	64.254	5,9	497,0	13,6	38,4	0,005	0,008	0,184
12	0,064	61.781	5,7	663,5	17,7	39,4	0,007	0,012	0,176
15	0,072	59.229	5,5	813,9	21,3	40,1	0,008	0,016	0,169
18	0,079	56.919	5,3	945,9	24,3	40,6	0,010	0,019	0,162
21	0,086	54.626	5,2	1.057,8	26,9	41,0	0,011	0,023	0,155
24	0,092	52.015	5,1	1.148,5	29,0	41,3	0,012	0,019	0,161
27	0,098	49.481	5,0	1.217,3	30,5	41,5	0,013	0,021	0,159
30	0,104	47.173	4,9	1.263,5	31,5	41,6	0,013	0,021	0,157

Observou-se que a tubulação com 50 mm de diâmetro alcança condição de oclusão após 6 meses do início da bioinfestação, seguida da tubulação de 100 mm que entra em oclusão após 12 meses e a de 200 mm após 27 meses de operação com bioinfestação.

5.7 Eficiência Energética do Estudo de Caso

Embora a perda de eficiência energética seja um tema amplo, apenas alguns parâmetros foram selecionados para este estudo, como consumo de energia e custo de bombeamento, que permitiram a análise da perda de eficiência energética/sistema de bombeamento e MD. Essa questão é admitida na análise de setores industriais, mas não tem sido analisado cientificamente ou publicados de forma robusta e confiável. Aqui, para determinar o custo de bombeamento por m³ e a eficiência do sistema de bombeamento, foi necessário calcular o consumo de energia usando as Equações 21, 22 e 23. Para esses cálculos foram considerados cenários do sistema de bombeamento alvo: com e sem bioincrustação.

Os resultados das Equações 24-27 apontaram para a maior perda de carga, potência e consumo de energia de sistemas com bioincrustação (Tabelas 11, 12, 13 e 14). Os valores de consumo de energia dos dutos acoplados às Bombas 1, 2 e 3 (no cenário sem bioincrustação foram determinados como 110 kWh, 60 kWh e 39 kWh respectivamente para o cenário com bioincrustação também são fornecidos nas tabelas citadas, a Figura 32 mostra o aumento do consumo de energia em kWh para os dois sistemas avaliados, calculados para cada tubo acoplado às Bombas 1, 2 e 3, após um período de 3 anos, quando o comprimento do invólucro atinge seu máximo.

Tabela 11. Progressão dos consumos e custos, face à progressão da bioincrustação do mexilhão dourado para a Bomba 1, com uma vazão de 600 L/s e um diâmetro de 500 mm.

Mês	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	η	D_{vd}	P_{bomba}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.
0	0.0	500.0	600.0	0.0171	1.2	14.6	78.3	0.0	109.9	0.0	1,318	118,663	-	0.00	171.40	15,426.00	0.0066	-
3	3.9	496.9	596.0	0.0278	1.9	15.4	78.3	173.0	114.9	0.1	1,388	124,887	6,224	809.10	180.39	16,235.00	0.0070	5%
6	7.1	491.2	595.0	0.0333	2.4	15.9	78.3	216.0	118.4	0.1	1,433	128,985	10,321	1,341.78	186.31	16,768.00	0.0072	9%
9	9.8	483.4	593.0	0.0373	2.9	16.4	78.3	302.0	121.8	0.1	1,479	133,101	14,438	1,876.97	192.26	17,303.00	0.0074	12%
12	16.0	470.6	592.0	0.0408	3.7	17.1	78.3	346.0	126.9	0.2	1,544	138,938	20,274	2,635.68	200.69	18,062.00	0.0077	17%
15	17.4	463.6	591.0	0.0435	4.2	17.6	78.3	389.0	130.7	0.2	1,592	143,294	24,631	3,201.98	206.98	18,628.00	0.0080	21%
18	18.7	456.2	589.0	0.0459	4.8	18.2	78.3	475.0	134.5	0.2	1,644	147,933	29,269	3,805.02	213.68	19,231.00	0.0082	25%
21	19.9	448.2	587.0	0.0479	5.4	18.8	78.2	562.0	138.7	0.3	1,701	153,097	34,434	4,476.39	221.14	19,903.00	0.0085	29%
24	21.2	439.7	584.0	0.0497	6.1	19.5	78.2	691.0	143.0	0.3	1,762	158,617	39,954	5,194.05	229.11	20,620.00	0.0088	34%
27	21.8	439.7	584.0	0.0509	6.2	19.7	78.2	691.0	144.1	0.3	1,777	159,918	41,255	5,363.12	230.99	20,789.00	0.0089	35%
30	22.4	439.7	584.0	0.0517	6.3	19.8	78.2	691.0	144.9	0.3	1,786	160,769	42,105	5,473.71	232.22	20,900.00	0.0090	35%
33	22.4	439.7	584.0	0.0523	6.4	19.9	78.2	691.0	145.4	0.3	1,793	161,353	42,690	5,549.70	233.07	20,976.00	0.0090	36%
36	22.4	439.7	584.0	0.0526	6.4	19.9	78.2	691.0	145.7	0.3	1,796	161,681	43,018	5,592.29	233.54	21,018.00	0.0090	36%
39	22.4	439.7	584.0	0.0527	6.5	19.9	78.2	691.0	145.8	0.3	1,797	161,756	43,093	5,602.10	233.65	21,028.00	0.0090	36%

Os significados dos símbolos são os seguintes: s_h , espessura da bioincrustação - mm; D, diâmetro interno - mm; Q, vazão - "L/s" ; f , fator de perda de carga; " ΔH ", perda de carga - mca; " H " _ "total" , altura total de elevação - mca; η , eficiência - %; " D_{vd} " , déficit de fluxo diário - "m³" ; " P " _ "bomba" , potência da bomba - kW; " T " _ "ab" , tempo de bombeamento adicional - h/dia; C1, consumo do sistema de bombeamento - kWh/dia; C2, consumo do sistema de bombeamento - kWh/trimestre; C3, consumo incremental - kWh/trimestre; C4, custos incrementais - US\$/trimestre; C5, custos diários - USD/dia; C6, custo total por trimestre - USD; C7, custo de bombeamento - m³); e Inc"." , aumento do consumo.

Tabela 12. Progressão dos consumos e custos, face à progressão da bioincrustação do mexilhão dourado para a Bomba 2, com uma vazão de 300 L/s e um diâmetro de 400 mm.

Mês	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	η	D_{vd}	P_{bomba}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.
0	0.0	400	300.0	0.0187	1.0	14.4	70.7	0.0	60.1	0.0	721	64,927	0	0.00	93.78	8,440.00	0.0072	-
3	3.9	394	293.5	0.0300	1.7	15.2	71.3	280.8	61.3	0.3	752	67,669	2,743	356.53	97.74	8,797.00	0.0075	4%
6	7.1	388	288.5	0.0360	2.2	15.7	71.6	496,8	61.9	0.5	773	69,528	4,601	598.09	100.43	9,039.00	0.0077	7%
9	9.8	384	285.0	0.0405	2.6	16.1	71.9	648.0	62.5	0.6	790	71,080	6,153	799.93	102.67	9,240.00	0.0079	9%
12	16.0	378	282.0	0.0442	3.1	16.6	72.1	777.6	63.6	0.8	812	73,051	8,124	1,056.10	105.52	9,497.00	0.0081	13%
15	17.4	371	279.0	0.0474	3.7	17.1	72,3	907.2	64.8	0.9	836	75,282	10,355	1,346.15	108.74	9,787.00	0.0084	16%
18	18.7	363	277.0	0.0501	4.3	17.7	72.4	993.6	66.6	1.0	866	77,920	12,993	1,689.09	112.55	10,130.00	0.0087	20%
21	19.9	355	276.0	0.0525	5.0	18.5	72.4	1,036.8	69.1	1.0	901	81,084	16,158	2,100.48	117.12	10,541.00	0.0090	25%
24	21.2	347	270.0	0.0547	5.9	19.4	72.7	1,296.0	70.5	1.3	940	84,571	19,644	2,553.75	122.16	10,994.00	0.0094	30%
27	21.8	347	269.0	0.0560	6.0	19.5	72.8	1,339.2	70.7	1.4	946	85,571	20,208	2,626.98	122.97	11,067.00	0.0095	31%
30	22.4	347	269.0	0.0570	6.2	19.6	72.8	1,339.2	71.1	1.4	951	85,598	20,671	2,687.29	123.64	11,128.00	0.0095	32%
33	22.4	347	269.0	0.0577	6.2	19.7	72.8	1,339.2	71.3	1.4	955	85,917	20,991	2,728.78	124.10	11,169.00	0.0096	32%
36	22.4	347	269.0	0.0580	6.3	19.7	72.8	1,339.2	71.5	1.4	957	86,096	21,170	2,752.04	124.36	11,193.00	0.0096	33%
39	22.4	347	269.0	0.0581	6.3	19.7	72.8	1,339.2	71.5	1.4	957	86,138	21,211	2,757.40	124.42	11,198.00	0.0096	33%

Os significados dos símbolos são os seguintes: s_h , espessura da bioincrustação - mm; D, diâmetro interno - mm; Q, vazão - "L/s" ; f , fator de perda de carga; " ΔH ", perda de carga - mca; " H " _"total" , altura total de elevação - mca; " η ", eficiência - %; " D_{vd} " , déficit de fluxo diário - "m³" ; " P " _"bomba" , potência da bomba - kW; " T " _"ab" , tempo de bombeamento adicional - h/dia; C1, consumo do sistema de bombeamento - kWh/dia; C2, consumo do sistema de bombeamento - kWh/trimestre; C3, consumo incremental - kWh/trimestre; C4, custos incrementais - US\$/trimestre; C5, custos diários - USD/dia; C6, custo total por trimestre - USD; C7, custo de bombeamento - m³); e Inc"." , aumento do consumo.

Tabela 13. Progressão dos consumos e custos, face à progressão da bioincrustação do mexilhão dourado para a Bomba 3, com uma vazão de 200 L/s e um diâmetro de 300 mm.

Mês	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	η	D_{vd}	P_{bomba}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.
0	0.0	300	200.0	0.0193	1.9	15.3	77.4	0.0	38.9	0.0	466.9	42,017	0	0	60.69	5,462.21	0.0070	0
3	3.9	295	199.0	0.0325	3.4	16.9	77.5	43.2	42.6	0.1	513.5	46,215	4,198	545,69	66.75	6,007.90	0.0077	10%
6	7.1	287	197.0	0.0397	4.9	18.3	77.6	129.6	45.6	0.2	555.5	49,998	7,981	1,037.57	72.22	6,499.78	0.0084	19%
9	9.8	283	195.0	0.0450	5.9	19.4	77.8	216.0	47.6	0.3	586.2	52,756	10,739	1,396.08	76.20	6,858.29	0.0088	26%
12	16.0	277	193.0	0.0496	7.3	20.7	77.9	302.4	50.4	0.4	627.0	56,429	14,412	1,873.62	81.51	7,335.83	0.0094	34%
15	17.4	270	191.0	0.0535	8.9	22.4	78.0	388.8	53.8	0.6	676.0	60,844	18,827	2,447.49	87.89	7,909.70	0.0102	45%
18	18.7	262	189.0	0.0570	11.0	24.4	78.1	475.2	58.0	0.7	736.4	66,277	24,260	3,153.82	95.73	8,616.02	0.0111	58%
21	19.9	254	188.0	0.0602	13.5	27.0	78.1	518.4	63.7	0.8	812.8	73,152	31,135	4,047.55	105.66	9,509.76	0.0122	74%
24	21.2	246	180.0	0.0631	16.8	30.2	78.2	864.0	68.3	1.3	910.3	81,923	39,906	5,187.80	118.33	10,650.01	0.0137	95%
27	21.8	246	179.0	0.0648	17.2	30.7	78.2	907.2	68.9	1.4	923.5	83,111	41,094	5,342.23	120.05	10,804.43	0.0139	98%
30	22.4	246	179.0	0.0660	17.5	31.0	78.2	907.2	69.6	1.4	933.3	83,998	41,981	5,457.54	121.33	10,919.75	0.0140	100%
33	22.4	246	179.0	0.0668	17.8	31.2	78.2	907.2	70.1	1.4	940.1	84,609	42,592	5,536.99	122.21	10,999.19	0.0141	101%
36	22.4	246	179.0	0.0673	17.9	31.3	78.2	907.2	70.4	1.4	943.9	84,952	42,935	5,581.58	122.71	11,043.79	0.0142	102%

Os significados dos símbolos são os seguintes: s_h , espessura da bioincrustação - mm; D, diâmetro interno - mm; Q, vazão - "L/s" ; f, fator de perda de carga; " ΔH " , perda de carga - mca; "H" _"total" , altura total de elevação - mca; η , eficiência - %; " D_{vd} " , déficit de fluxo diário - "m³" ; "P" _"bomba" , potência da bomba - kW; "T" _"ab" , tempo de bombeamento adicional - h/dia; C1, consumo do sistema de bombeamento - kWh/dia; C2, consumo do sistema de bombeamento - kWh/trimestre; C3, consumo incremental - kWh/trimestre; C4, custos incrementais - US\$/trimestre; C5, custos diários - USD/dia; C6, custo total por trimestre - USD; C7, custo de bombeamento - m³); e Inc"." , aumento do consumo.

Tabela 14. Resumo do impacto da bioinfestação transgênica na EPS Rio Branco até o período de estabilização.

	Consumo diário (kWh/dia)	Custo diário (USD/dia)	Incremento (USD/ddia)	Custo por unidade (USD-m ³)	Incremento (USD/m ³)	Incremento do consumo (%)
Ano 0	2.506.7	325.88	--	0.00686	--	--
1 ano	2,982.4	387.71	61.84	0.00816	0.00130	19
2 anos	3,612.5	469.62	143.74	0.00988	0.00302	44
2.5 anos	3.670.7	447.19	151.32	0.01004	0.00318	46

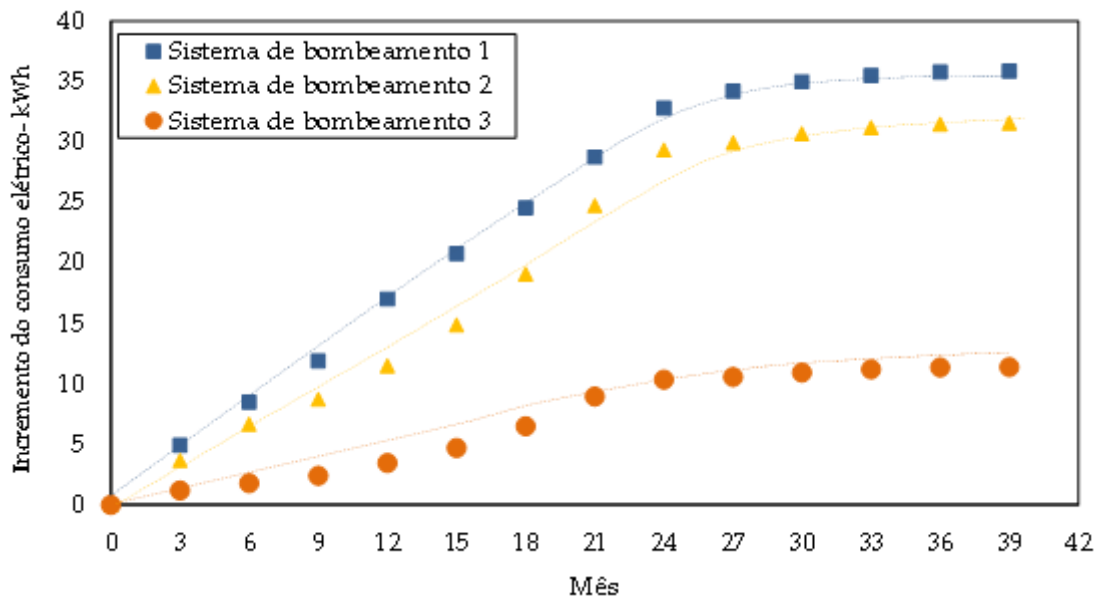


Figura 32. Aumento do consumo em quilowatts-hora (kWh) para cada bomba do Elevação Elevada Estação (EPS) de Rio Branco, após o início da bioinfestação do mexilhão dourado (MD), com base nos dados das Tabelas 9, 10, 11 e 12, e em função do tempo de operação, dado em meses.

À medida que o sistema de bombeamento passa pelo início da bioinfestação, ocorre um aumento no consumo de energia necessário para manter a vazão no mesmo nível do sistema sem bioincrustação. Essa demanda causa um aumento no consumo de bombeamento, conforme apresentado pelas curvas, para cada sistema acoplado às Bombas 1, 2 e 3 (Figura 26). Ao final de dois anos (0 – 24 meses) de bioinfestação, houve aumentos na de 34%, 30% e 95% para as Bombas 1, 2 e 3, respectivamente. Após este período (24 – 39 meses), o consumo tende a entrar em estabilidade, atingindo aumento de 36%, 32% e 102% até o final do período para os sistemas acoplados das Bombas 1, 2 e 3, respectivamente. Com base nessas informações, verificou-se que a taxa de crescimento do consumo é maior nos primeiros 24 meses, comprovando a relação com o aumento do fator de perda de carga. A Figura 33 mostra a curva de consumo diário total do sistema com bioincrustação, considerando operação por 12 horas.

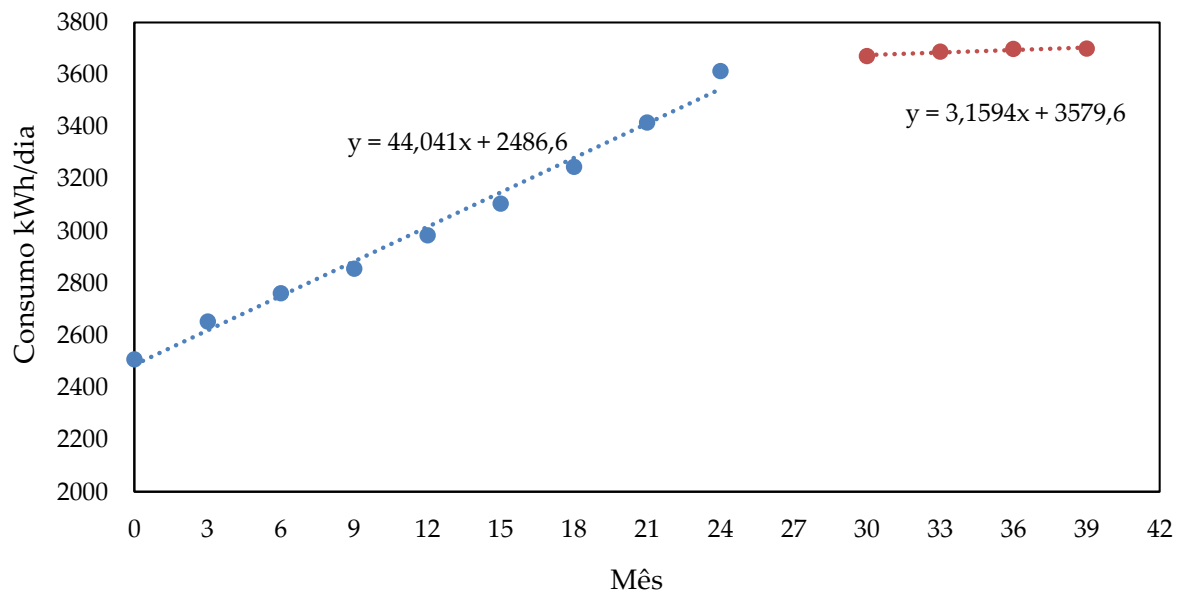


Figura 33. Aumento do consumo em quilowatts-hora (kWh/dia) para cada bomba do Elevação Elevada Estação (EPS) de Rio Branco, após o início da bioinfestação do mexilhão dourado (MD), com base nos dados das Tabelas 9, 10, 11 e 12, e em função do tempo de operação, dado em meses.

Ao analisar a taxa de crescimento da bioinfestação segregada em dois períodos (0-24 e 27-30 meses), é possível concluir que a taxa de crescimento de consumo é constante durante os primeiros 24 meses. Após esse período, a saturação do crescimento ocorre e, a taxa de perda é aumentada pela taxa de arrancamento dos indivíduos, o que leva a um segundo período de equilíbrio (30-39 meses). A taxa de progressão caiu para perto de 10% do valor inicial (Figura 27).

Depois de determinar o consumo, é possível determinar o custo de bombeamento por m^3 , sabendo-se que o preço do kWh na região do Acre é de US\$ 0,13 [123,124]. Usando Equações 28 e 29, podemos calcular o custo de bombeamento para o sistema sem com bioincrustação e com bioincrustação, respectivamente. A Figura 34 apresenta a relação entre consumo de energia e custo de bombeamento, avaliando os dois cenários tratados neste trabalho.

Observa-se que os custos vão além do que é mensurado em Adelino et al. [30], levando em consideração os parâmetros avaliados pelos autores. Os dados obtidos podem ser armazenados no banco de dados InvaCost [31] para próximas pesquisas, partindo desse contexto.

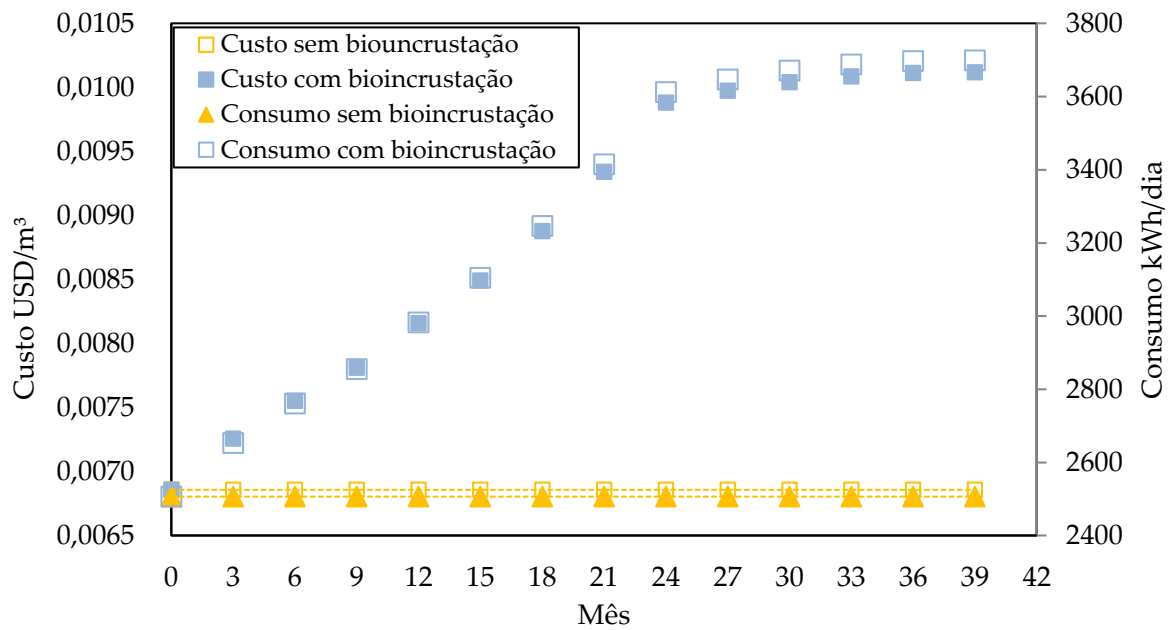


Figura 34. Taxa de consumo total diário do Sistema de Elevação de Rio Branco, considerando bioincrustação.

Após 24 meses de bioinfestação, o consumo diário do sistema elevatório estabiliza-se no valor de 3.612 kWh/dia, por oposição ao consumo de um sistema elevatório não infestado (sem bioincrustação), que se estabiliza nos 2.506 kWh/dia. Da mesma forma, o custo de bombeamento por m^3 apresenta um aumento acentuado nos primeiros 24 meses de operação, apresentando um aumento de até 0,0030 USD/ m^3 após a colonização por MD, o que equivale a um aumento de 44% nos custos. Os resultados apresentam, pela primeira vez, os prejuízos causados pelo MD no que diz respeito à eficiência energética. Até o momento, não há dados sobre outros mexilhões bioincrustantes, especialmente o mexilhão zebra (um mexilhão invasor na América do Norte), que possam ajudar na discussão de nossos dados.

No entanto, é perceptível a diminuição da eficiência energética dos sistemas de bombeamento causada pela bioincrustação do MD, com aumento de custo de quase 46%, após 30 meses de infestação. Os dados aqui obtidos também podem subsidiar o banco de dados Ivancost, auxiliando na obtenção de conclusões mais assertivas sobre os custos ecossistêmicos relacionados ao MD. No primeiro relatório sobre o custo das invasões no Brasil, eles apontam os escassos dados econômicos relatados para espécies invasoras. Tanto Adelino et al. (2021) [29] quanto Burlokova et al. [1] apontam para o aumento dos custos causados pela bioinfestação afetando também os serviços ecossistêmicos.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Os métodos utilizados foram adequados para a análise da variação temporal do fator de perda de carga (f) relacionada à presença de mexilhão dourado (MD) em tubulações de água.

Os materiais e métodos, incluindo o uso de equações clássicas e a construção de novas, permitiram que todos os objetivos deste trabalho fossem alcançados, mesmo sem a análise de todas as variáveis comumente utilizadas no cálculo de perda de carga.

O crescimento valvar obtido através dos dados da literatura, aumenta no primeiro ano, e após esse período sofre reduções na taxa de crescimento de 50% ao ano, estabilizando após o terceiro ano de vida. Esta taxa de crescimento foi comparada com a curva obtida através das análises feitas em indivíduos coletados em campo (Furnas), que também revelaram a preferência de fixação, no primeiro ano de bioinfestação para o material de PVC, mostrando também que há um crescimento de 55% da densidade populacional no primeiro ano de colonização.

O método de análise dos indivíduos de MD validou as relações proporcionais entre as medidas realizadas nos indivíduos avaliados. Este foi o ponto de partida para a construção de novas equações (cinco novas equações: 15, 16, 17, 18 e 19), que permitiram a construção de curvas de rugosidade e espessura para bioincrustação, provando pela primeira vez a relação entre os três elementos (crescimento valvar, rugosidade e espessura da bioincrustação). A interferência do arrasto hidrodinâmico (velocidade do fluxo) foi fundamental para a conclusão acima, pois causa o arrancamento de indivíduos, interferindo na progressão da fixação do MD (espessura da bioincrustação). De fato, a espessura da bioincrustação sofre interferência de velocidade, e isso também foi apontado na literatura.

O tamanho dos indivíduos não interferiram diretamente no aumento da rugosidade, mas sim na formação de colônias (aumento da densidade, número de indivíduos/cm²). Este foi especialmente o caso de tubos de menor diâmetro, onde o aumento da densidade de incrustação representou um grande aumento no fator de perda de carga, comprovando que a bioinfestação (aumento espessura de bioincrustação) causa uma redução na eficiência dos sistemas com a diminuição do diâmetro interno, levando-o, em alguns casos, à oclusão. Esta redução de diâmetro provoca um aumento no consumo de energia para que o mesmo fluxo seja mantido.

Aventa-se que o custo da bioincrustação para sistemas de plantas industriais, por exemplo, pode ser muito maior do que aqui apresentados (quase 46% para 30 meses de infestação). Entretanto esses cálculos foram feitos para apenas uma estação de tratamento de água, com sistemas de fluidos mecânicos simples (quando comparado com uma UHE e UTE, por exemplo) e sem levar em conta perdas localizadas, que causariam um aumento ainda maior nos custos de bombeamento. Uma alternativa sugerida como primeira opção ao problema apresentado, seria a realização de paradas durante a operação do sistema de bombeamento para manutenção corretiva, evitando o aumento dos custos operacionais. Outra opção poderia ser a adoção de critérios seletivos de bombeamento, que priorizam bombas e sistemas com diâmetros maiores, pois estes são menos afetados pela bioincrustação do MD. A aplicação desta estratégia no presente estudo de caso poderia significar uma redução no tempo de operação da Bomba 3, pois esta bomba está conectada a uma tubulação com um diâmetro menor (300 mm) do que as outras duas bombas estudadas. Para compensar, as Bombas 1 ou 2 poderiam ficar acionadas por mais tempo. Desta forma, a bomba mais afetada pela bioinfestação, Bomba 3, pode servir como reserva. Medidas como inspeções regulares do sistema de bombeamento reduzem o avanço da bioinfestação MD, evitando o aumento dos custos operacionais. Considerando que este estudo enfoca o abastecimento de água no setor de distribuição da região amazônica, chama-se a atenção para a impactos negativos da bioinfestação e fornecem maneiras possíveis para lidar com esta situação.

De acordo com o IBGE (2022) [125], a população da Amazônia legal é de 16.020.248 Habitantes. Dessa forma ao se fazer uma extrapolação simples com base em um consumo de água médio de 140 L/dia/habitante, ter-se-á um consumo de água de 2.245 mil m³/dia. O aumento de consumo energético representa um custo de 0,0030 USD/m³ o que representa um aumento de consumo anual de energia de 2,5 milhões de dólares Americanos ou 13 milhões de reais, de custo anual com a bioinvasão. Assim vê-se que a bioinvasão do mexilhão dourado seria muito prejudicial para a Região Amazônica.

Finalmente sugere-se que os estudos sobre instalações elevatórias sejam estendidos para as demais regiões do Brasil de forma a se incorporar as peculiaridades das estações típicas de cada área. Além disso, suger-se estender essa investigação para os sistema de resfriamento de UHE e UTE de modo a se poder ter um mapeamento do aumento do custo operacional nessas usinas provocados pelo MD.

Perspectivas de continuação de pesquisas futuras:

- a) Estender a pesquisa sobre a redução de vida útil dos sistemas, pois a fixação do MD promove uma perda de massa superficial;
- b) Através da correlação da taxa de oxigênio com as densidades populacionais obtidas, fazer uma verificação sobre a formação de colônias em regiões distantes da tomada d'água de sistemas fluido mecânicos
- c) Estender esses estudos para sistemas hidromecânicos em UHE's;

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BURLAKOVA, L.E.; KARATAYEV, A.Y.; BOLTOVSKOY, D.; CORREA, N.M. **Ecosystem services provided by the exotic bivalves *Dreissena polymorpha*, *D. rostriformis bugensis*, and *Limnoperna fortunei*.** Hydrobiology, 2022. [\[doi\]](#).
- 2 NAKANO, D.; STRAYER, D. **Biofouling animals in fresh water: biology, impacts, and ecosystem engineering.** Frontiers in ecology and the environment, 12, 167-175, 2014. [\[doi\]](#)
- 3 XU, M.; DARRIGRAN, G.; WANG, Z.; ZHAO, N.; LIN, C.C.; PAN., B. **Experimental study on control of *Limnoperna fortunei* biofouling in water transfer tunnels.** Journal of Hydro-environment Research, 9 (2): 248–258, 2015. [\[doi\]](#)
- 4 CATALDO, D. **Larval development of *Limnoperna Fortunei*.** In: Boltovskoy, D. (eds) *Limnoperna Fortunei*. Invading Nature - Springer Series in Ecology of Invasions, vol 10. Springer, Cham, 2015. [\[doi\]](#)
- 5 CHOI, S.S.; CHIN, C.N. **Study on the early development and larvae of *Limnoperna fortunei*.** Korean Journal of Malacology, 1, 5-12, 1985.
- 6 BOLTOVSKOY, D.; MORTON, B; CATALDO D.; DAMBORENEA C.; PENCHASZADEH P.E; SYLVESTER F. **Reproductive output and seasonality of *Limnoperna fortunei*.** In: In *Limnoperna fortunei*. Invading Nature, Boltovskoy, D., Eds.; Springer (Cham), Vol.10, ISBN 978-3-319-13494-9, 2015. [\[doi\]](#)
- 7 DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, M.C. **Ecosystem Engineering Impact of *Limnoperna fortunei* in South America.** Zoological Science, 28, 1–7, 2011.
- 8 DARRIGRAN, G.; AGUDO-PADRÓN, I.; BAEZ, P. et al. **Non-native mollusks throughout South America: emerging patterns in na understudied continent.** Biol Invasions, 22, 853–871, 2020. [\[doi\]](#)
- 9 BARBOSA, N.P.U.; FERREIRA, J.A.; NASCIMENTO, C.A.R.; SILVA, F.A.; CARVALHO, V.A.; XAVIER, E.R.S.; RAMON, L.; ALMEIDA, A.C.; CARVALHO, M.D.; CARDOSO, A.V. **Prediction of future risk of invasion by *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) in Brazil with cellular automatata.** Ecological Indicators, 92, 30-39, 2018. [\[doi\]](#)
- 10 CAMPOS, M.C.S.; de ANDRADE, A.F.A.; KUNZMANN, B.; GALVÃO, D.D.; SILVA, F.A.; CARDOSO, A.V.; CARVALHO, M.D.; MOTA, H.R. **Modelling of the potential distribution of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) on a global scale.** Aquatic Invasions, 9, 253-265, 2014. [\[doi\]](#)
- 11 Balanço Energético Nacional 2022. Disponível em: [\[link\]](#). (Acessado: 10 de agosto de 2022).

- 12 BOLTOVSKOY, D.; CORREA, N.; CATALDO, D.; SYLVESTER, F. **Dispersion and ecological impact of the invasive freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* in the Rio de La Plata watershed and beyond.** *Biological Invasions*, 8, 947-963, 2006. [\[doi\]](#)
- 13 OLIVEIRA, M., CAMPOS, M., PAOLUCCI, E., MANSUR, M., HAMILTON, S. **Colonization and dissemination of *Limnoperna fortunei* in South America.** In: Boltovskoy, D. (eds) *Limnoperna Fortunei. Invading Nature - Springer Series in Ecology of Invasions*, vol 10. Springer, Cham, 2015. [\[doi\]](#)
- 14 KUMAR, K.; SAINI, R.P. **A review on operation and maintenance of hydropower plants.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101704, 2022. [\[doi\]](#)
- 15 BOTELHO, D.F.; OLIVEIRA, L.W.; DIAS, B.H.; SOARES, T.A.; MORAES, C.A. **Prosumer Integration into the Brazilian energy sector: An overview of innovative business models and regulatory challenges.** *Energy Policy*, 161, 112735, 2022. [\[doi\]](#)
- 16 GIMENES, T.K.; SILVA, M.P.C.; LEDESMA, J.J.G.; ANDO Jr., O.H. **Impact of distributed energy resources on power quality: Brazilian scenario analysis.** *Electric Power Systems Research*, 211, 108249, 2022. [\[doi\]](#)
- 17 OIKONOMOU, K.; PARVANIA, M.; KHATAMI, R. **Optimal Demand Response Scheduling for Water Distribution Systems.** *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 14, 5112–5122, 2018. [\[doi\]](#)
- 18 DADAR, S.; ĐURIN, B.; ALAMATIAN, E.; PLANTAK, L. **Impact of the Pumping Regime on Electricity Cost Savings in Urban Water Supply System.** *Water*, 13, 1141, 2021. [\[doi\]](#)
- 19 MARTIN-CANDILEJO, M.A.; SANTILLAN, D.; IGLESIAS, A.; GARROTE, L. **Optimization of the design of water distribution systems for variable pumping flow rates.** *Water*, 12, 359, 2020. [\[doi\]](#)
- 20 HAJIBABAEI, M.; NAZIF, S.; SERESHGI, F.T. **Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact.** *Sustainable Cities and Society*, 43, 538-549, 2018. [\[doi\]](#)
- 21 HU, J.; DONG, H.; XU, Q.; LING, W.; QU, J.; QIANG, Z. **Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy.** *Water*, 129, 428–435, 2018. [\[doi\]](#)
- 22 SHANKAR, A.R.; ANANDKUMAR, B.; THINAHARAN, C.; GEORGE, R.P.; ROOBY, J.; PHILIP, J.; KAMACHI, U.M. **Corrosion Evaluation of Buried Cast Iron Pipes Exposed to Fire Water System for 30 years.** *Trans. Indian Inst. Met.*, 73, 9-21, 2020. [\[doi\]](#)
- 23 MAHATO, A.C.; GHOSHAL, S.K. **Energy-saving strategies on power hydraulic system: An overview.** *Journal of Systems and control engineering*, 235, 147-169, 2021. [\[doi\]](#)

- 24 MORALEZ-HERNÁNDEZ, M.; PLAYAN, E.; LATORRE, B.; MONTOYA, F.; MADURGA, C.; RIVERA, A.S.; ZAPATA, N. **Normalized pressure: a key variable to assess zebra mussel infestation in pressurized irrigation networks.** *Agricultural water management*, 260, 107300, 2022. [\[doi\]](#)
- 25 CASTRO, A.L.P.; MARTINEZ, C.B.; VIANA, E.M.F.; RICO, E.A.M.; VIDIGAL, T.H.D.A.; SAMPAIO, M.C. **Análise da fixação do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* (bivalvia: mytilidae) em laboratório submerso em diferentes substratos com densidades variadas.** XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, agosto 2014.
- 26 MOODY, L.F. **Friction factors for pipe flow.** *Trans. AMSE*, 66, 671–684, 1944.
- 27 COLEBROOK, C.F.; WHITE, C.M. **The reduction of carrying capacity of pipes with age.** *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 1, 99-118, 1937. [\[doi\]](#)
- 28 MOHEBBI, H., LI, C.Q. **Experimental investigation on corrosion of cast iron pipes.** *International Journal of Corrosion*, 1, 1- 17, 2011. [\[doi\]](#)
- 29 NAKANO, D., KOBAYASHI, T.; SAKAGUCHI, I. **Predation and depth effects on abundance and size distribution of an invasive bivalve, the golden mussel *Limnoperna fortunei*, in a dam reservoir.** *Limnology*, 11, 259–266, 2010. [\[doi\]](#)
- 30 ADELINO, J.R.P.; HERINGER, G.; DIAGNE, C.; COURCHAMP, F.; FARIA, L.D.B.; ZENNI, R.D. **The economic costs of biological invasions in Brazil: a first assessment.** *Neobiota*, 67, 349-374, 2021. [\[doi\]](#)
- 31 DIAGNE, C.; LEROY, B.; GOZLAN, R.E.; VAISSIERE, A.C.; ASSAILLY, C.; NUNINGER, L.; ROIZ, D.; JOURDAIN, F.; JARIC, I.; COURCHAMP, F. **IvanCost: a public database of the economic costs of biological invasions worldwide.** *Scientific Data*, 7, 277, 2020. [\[doi\]](#)
- 32 PATTERSON, M.G. **What is energy efficiency: Concepts, indicators and methodological issues.** *Energy Policy*, 24, 377-390, 1996. [\[doi\]](#)
- 33 IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Diagnóstico sobre a invasão do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) no Brasil.** 2017. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 25 set. 2019.
- 34 BOLTOVSKOY, D.; XU, M.; NAKANO, D. **Impacts of *Limnoperna fortunei* on Man-Made Structures and Control Strategies: General Overview.** In *Limnoperna fortunei*. *Invading Nature*, Boltovskoy, D., Eds.; Springer (Cham), Vol. 10, ISBN 978-3-319-13494-9, 2015.
- 35 GPS (Pipeline Study Group) **Biology of golden mussel (*Limnoperna fortunei*). Animal's use and prevention.** Institute of Aquatic Organisms of the Chinese Academy of Sciences, 33–36, 1973.

- 36 SIMEÃO, C.M.G.; RESENDE, M.F.; MARTINEZ, C.B. **Variation of hydraulic characteristics in penstocks operating under conditions of infestation by *Limnoperna fortunei***. Brazilian Journal of Water Resources, 16, 13-24, 2011. [\[doi\]](#)
- 37 USHER, K.M.; KAKSONEN, A.H.; COLE, I.; MARNEY, D. **Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbonsteel pipes**. International Biodeterioration Biodegradation, 93, 84–106, 2014. [\[doi\]](#)
- 38 CASTRO, A.L.P.; SERRANO, R.O.P.; PINTO, M.A.; SILVA, G.H.T.A; RIBEIRO, A.L.; VIANA, E.M.F.; MARTINEZ, C.B. **Case study: Abrasive capacity of *Limnoperna fortunei* (golden mussel) shells on the wear of 3 different steel types**. Wear, 12, 438-439, 2019. [\[doi\]](#)
- 39 CASTRO, A.L.P. Estudo das velocidades e número de Reynolds para o destacamento do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*). Tese defendida na Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2013.
- 40 XU, M.; CAO, X.W.; WANG, Z.Y.; WANG, X.Z. **Attachment characteristics of golden mussels (*Limnoperna fortunei*) in water transport projects** (In Chinese). J Tsinghua Univ [Qinghua Daxue Xuebao], 52, 170-176, 2012.
- 41 QUITZOW, R. Transições Energéticas e Mudanças Sociais. Berliner Strasse, Alemanha: Instituto de Estudos Avançados em Sustentabilidade. Disponível: [\[link\]](#). Acesso em 20 de novembro de 2021.
- 42 NETO, A.B.F.; CORRÊA, W.L.R.; PEROBELLI, F.S. **Consumo de Energia e Crescimento Econômico: uma Análise do Brasil no período 1970-2009**. Análise Econômica, 34(65), 2016.
- 43 CHEN, H.; SHI, Y.; ZHAO, X. **Investment in renewable energy resources, sustainable financial inclusion and energy efficiency: A case of US economy**. Resources Policy, 77, 102680, 2022. [\[doi\]](#)
- 44 BURSZTYN, M. A difícil sustentabilidade: política energética e conflitos ambientais. [S.l.]: Garamond, 2018. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 20/09/21.
- 45 TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva**. Novos estudos, CEBRAP, 79, 47-69, 2007. [\[doi\]](#)
- 46 SILVA, P.J. Usinas Hidrelétricas do século 21: empreendimentos com restrições à hidroeletricidade. Brasil Engenharia, 2014, 84-91. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 23/02/23
- 47 ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 18/02/2023.
- 48 PINTO, L. (2018). A Matriz Energética Brasileira Um Olhar Para O Futuro. Revista Modal, Engenho. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 15/07/21.
- 49 SILVA, K.B.O.; ROGÉRIO JR., L.; ALVES, G.H.; DIAS, M.C.; SILVA, A.M.B. **Uma análise da geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas no Brasil**. Desvendando a

Engenharia: sua abrangência e multidisciplinaridade, Vol. 4, 83-104, ISBN 978-65-5360-151-2, Editora científica digital, 2022.

- 50 SCHREIBER, G.P. **Usinas hidrelétricas**. São Paulo. Edgard Blücher, Rio de Janeiro, ENGEVIX. 1977.
- 51 SIPOT/ELB. Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro/Eletróbrás , 2010. Disponível em [\[link\]](#). Acesso: 21/05/21.
- 52 BOYLE, G. **Renewable Energy, Power for a Sustainable Future**. Oxford University Press (UK); 3rd ed., 183-226, ISBN-13: 978-0199545339, 2012.
- 53 CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura e Energia. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 23/02/23.
- 54 CIOCARI, E.; FRIZZO, S.; LEITE, J. **Desafios na Operação das usinas hidrelétricas da bacia do Rio Uruguai**. 2016. Marcos Jesus (Editor), ISBN: 9788563749529.
- 55 FAUSING OLESEN, J.; SHAKER, H.R. Predictive Maintenance for Pump Systems and Thermal Power Plants: State-of-the-Art Review, Trends and Challenges. *Sensors* **2020**, *20*, 2425, [\[doi\]](#).
- 56 SADATSAKKAK S.A.; AHMADI, M.H.; AHMADI, M.A. **Optimization performance and thermodynamic analysis of na irreversible nano scale Brayton cycle operating with Maxwell-Boltzmann gas**. *Ernergy Convers Manag*, 101, 592-605, 2015. [\[doi\]](#)
- 57 KUMAR, R. **A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants**. *JESTECH*, 20(1), 283-292, 2017. [\[doi\]](#)
- 58 NASERI, A.; BIDI, M.; AHMADI, M.H. **Thermodynamic and exergy analysis of a dydrogen and permeate water production preces by a solar-driven transcritical CO2 power cycle with liquefied natural gas heat sink**. *Renew Energy*, 113, 1215-1228, 2017. [\[doi\]](#)
- 59 GUERREIRO, L. Etapas do tratamento de ETA's e ETE's – BRT, Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2021. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 23/02/23.
- 60 BANDEIRA, J.V.; MOREIRA, R.C.; LORENZZELLI, J.A.; CASTRO, R. Uso de sensor hiperespectral aerotransportado no monitoramento da pluma termal oceânica decorrente da descarga de refrigeração da Central Nuclear de Angra dos Reis. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia – GO. Abril de 2015. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 23/02/23.
- 61 LIU, W., XU, M., ZHANG, J. et al. **Survival and attachment of biofouling freshwater mussel (*Limnoperna fortunei*) to environmental conditions: potential implications in its invasion, infection and biofouling control**. *Limnology*, 21, 245–255, 2020. [\[doi\]](#)
- 62 SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo. Disponível em: [\[link\]](#)
- 63 LAM, K.L.; KENWAY, S.; LANT, P. **Energy use for water provision in cities**. *J. Clean. Prod.*, 143, 699–709, 2017. [\[doi\]](#)

- 64 KARASSIK, I.J.; MESSINA, J.P.; COOPER, P.; HEALD, C.C. **Pump Handbook**. McGraw-Hill: New York, NY, USA, ISBN: 9780071460446, 2001. [\[link\]](#)
- 65 CLINGENPEEL, W.H. **Optimizing Pump Operating Cost**. Journal of American Water Works Association, 75(10), 502-509, 1963.
- 66 BAO, Y.; MAYS, L.W. **Model for Water Distribution System Reliability**. Journal of Hydraulic Engineering, 116(9), 1119-1137, 1990. [\[doi\]](#)
- 67 LUCIO F.S.; XAVIER G.B.; MESQUITA A.A.; MOREIRA J.G.V.; SANTOS W.L.; SERRANO R.O.P. **Variação granulométrica e morfológica dos sedimentos de fundo do rio Acre: contribuições iniciais para o estudo hidrossedimentológico de um canal fluvial no sudoeste da Amazônia**. UÁQUIR, 2 (2), 80-98, 2020. [\[doi\]](#)
- 68 OLIVEIRA A.V.; SERRANO R.O.P.; MESQUITA A.A.; MOREIRA J.G.V. **Temporal Trend and Estimation of the Hydrological Risk of Maximum Rainfall and Flow Extremes in the City of Rio Branco, Acre, Brazil**. Rev. bras. Meteorol, 36(4), 749-758, 2021. [\[doi\]](#)
- 69 BEAR, J. 1972. **Dynamics of Fluids in Porous Media**, Dover. ISBN 0-486-65675-6.
- 70 BIRD, R. B.; WARREN E. STEWART; EDWIN N. Lightfoot; *Fenômenos de Transporte*; Editora LTC; 2004; ISBN 8521613938
- 71 FILHO, W.B. **Fenômenos de Transporte Para Engenharia**. Editora LTC; 2006; ISBN 8521614721
- 72 SOUZA, T.R.C.S.; DINIZ, D.M.D.A.; CASTRO, A.L.P.; RICO, E.A.M.; TARQUI, J.L.Z.; MARTINEZ, C.B. **Avaliação da perda de carga em grades de tomada d'água com infestação de *Limnoperna fortunei***. In: The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, Argentina, Novembro de 2017.
- 73 IDEL'CIK, I.E. (1979). **Mémento des pertes de charge – Coefficients de pertes de charge singulières et pertes de charge par frottement**. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité De France, Paris. [\[link\]](#)
- 74 KIRSCHMER, O. **Untersuchungen über den Gefällsverlust an Rechen**. In *Mitteilungen des Hydraul*; Instituts der TH München: Munich, Germany, 1926. [\[link\]](#)
- 75 ENCINAS, M.P. **Turbomáquinas hidráulicas**. Edit. Limusa México 1975.
- 76 PNP – CMB: Plano Nacional de Prevenção, Controle e Monitoramento no Brasil – Mexilhão Dourado (*Limnoperna fortunei*) - IBAMA. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 20 de janeiro de 2023.
- 77 MINHONI, R.T.A.; PEREIRA, F.F.S.; SILVA, T.B.G.; CASTRO, E.R.; SAAD, J.C.C. **The performance of explicit formular for determining the Darcy-Weisbach friction factor**. Eng. Agríc, 40(2), 2020. [\[doi\]](#)

- 78 KAYA, D., ÇANKA KILIÇ, F., ÖZTÜRK, H.H. **Energy Efficiency in Pumps. In: Energy Management and Energy Efficiency in Industry.** Green Energy and Technology. Springer, Cham., 2021. [\[doi\]](#)
- 79 HEYDARI, A.; NARIMANI, E.; PAKNIYA, F. **Explicit Determinations of the Colebrook Equation for the Flow Friction Factor by Statistical Analysis.** Chemical Engineering & Technology, 38(8), 1387-1396, 2015. [\[doi\]](#)
- 80 BRKIĆ, D.; ČOJBAĹIĆ, Ź. **Intelligent Flow Friction Estimation.** Computational Intelligence And Neuroscienc, 2016,1-10, 2016. [\[doi\]](#)
- 81 BRKIĆ, D. **A note on explicit approximations to Colebrook's friction factor in rough pipes under highly turbulent cases.** International Journal Of Heat And Mass Transfer, 93, 513-515, 2016. [\[doi\]](#)
- 82 BRKIĆ, D.; ČOJBAĹIĆ, Ź. **Evolutionary Optimization of Colebrook's Turbulent Flow Friction Approximations.** Fluids, 2(2), 15-15, 2017. [\[doi\]](#)
- 83 ASSEFA, K.M.; KAUSHAL, D.R. **A comparative study of friction factor correlations for high concentrate slurry flow in smooth pipes.** Journal Of Hydrology And Hydromechanics, 63(1), 13-20, 2015. [\[doi\]](#)
- 84 MOODY, L.F. **Friction factors for pipe flow.** Trans. AMSE, 66, 671–684, 1944.
- 85 ÇOBAN, M.T. **Error Analysis of Non-Iterative Friction Formulas Relative to Colebrook-White Equation for the Calculation of Pressure Drop in Pipes.** Journal of Naval Sciences and Engineering, 8(1), 1-13, 2012. [\[link\]](#)
- 86 SOUZA, T.R.C. **Determinação da variação do fator de perda de carga em sistemas fluido mecânicos por ação de bio incrustantes, o caso de Limnoperna fortunei: uma correlação com o tempo de operação desses sistemas.** Dissertação apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- 87 BUZZELLI, D. **Calculando o atrito em um passo.** Design de Máquina, v.80, p.54-55, 2008.
- 88 PIMENTA, B.D. et al. **Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22(5), 301-307, 2018. [\[doi\]](#)
- 89 BRKIĆ, DEJAN. **Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction.** Journal Of Petroleum Science And Engineering, 77(1), 34-48, 2011. [\[doi\]](#)
- 90 DARRIGRAN, G., DAMBORENEA, C., GRECO, N. **Freshwater invasive bivalves in anmade environments: a case study of larvae biology of Limnoperna fortunei in a hydroelectric power plant in South America.** AMBIO 36 (7), 575–579, 2007.

- 91 PEREIRA, D. Assembleias de Bivalves Límnicos em Regiões Hidrográficas e Ecorregiões da América do Sul e subsídios para o controle de *Limnoperna fortunei* Dunker, 1857. 2014. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- 92 OLIVEIRA, M.; HAMILTON, S.; JACOBI, C. **Forecasting the expansion of the invasive golden mussel *Limnoperna fortunei* in Brazilian and North American rivers based on its occurrence in the Paraguay River and Pantanal wetland of Brazil.** *Aquatic Invasions*, 5(1), 59-73, 2010. [\[doi\]](#)
- 93 DARRIGRAN, G.A.; MAROÑAS, M.E.; COLAUTTI, D.C. **Air Exposure as a Control Mechanism for the Golden Mussel, *Limnoperna fortunei*, (Bivalvia: Mytilidae).** *Journal Of Freshwater Ecology*, 19(3), 461-464, 2004. [\[doi\]](#)
- 94 DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C. **Introdução da Biologia das Invasões: O mexilhão dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle.** São Carlos, Sp: Cubo, 2009. 244 p.
- 95 BELZ, C.E. Análise de risco de bioinvasão por *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) : um modelo para a bacia do Rio Iguaçu, Paraná. 2006. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Biológicas e Zoologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 24 set. 2019.
- 96 SYLVESTER, F.; BOLTOVSKOY, D.; CATALDO, D. **Tasas de Clareado: Ritmos E Impacto.** In: Darrigran, G.; Damborenea, C. *Bio-invasion del mejillon dorado en el continente americano.* La Plata: Edulp, 2006. p. 129-140. Disponível em: [\[Link\]](#).
- 97 MANSUR, M.C.D. et al. **Moluscos Límnicos Invasores no Brasil: Biologia, Prevenção, Controle.** Redes Editora, Porto Alegre: 95–110, ISBN: 978-85-61638-46-7.
- 98 UHDE V.; MASSOLI EV J.R.; CALLIL, C.T. **Efeito do macrofouling sobre a comunidade de invertebrados aquáticos.** In: Mansur MCD, Santos CP, Pereira D, Padula PIC, Leite Zurita ML, Raya RMT, Vilar NM, Aydos BPE (eds) *Moluscos límnicos invasores no Brasil.* Biologia, prevenção, controle, Redes Editora, Porto Alegre, pp 235–241, 2012.
- 99 KARATAYEV, A.Y. et al. **Parallels and Contrasts Between *Limnoperna fortunei* and Species of *Dreissena*.** In: Boltovskoy, Demetrio. *Limnoperna Fortunei: Book Subtitle The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel.* Cham: Springer, 2015. p. 261-297.
- 100 RICCIARDI, A. **Global range expansion of the Asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): Another fouling threat to freshwater systems.** *Biofouling*, 13(2), 97-106, 1988. [\[doi\]](#)

- 101CORREA, N. et al. **Limnoperna Fortunei Colonies: Structure, Distribution and Dynamics.** In: Boltovskoy, D. *Limnoperna fortunei*: Book Subtitle The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel. Cham: Springer, 2015. p.119-143.
- 102DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, M.C. **The reproductive cycle of Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) (Mytilidae) from a neotropical temperate locality.** Journal Of Shellfish Research. Argentina, p. 361-365. maio 1999. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso em: 24 set. 2019.
- 103SANTOS, C.P. (2005). Avaliação da Densidade e Crescimento Populacional do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) em suas diferentes fases de vida no Lago Guaíba, Município de Porto Alegre, RS, como subsídios ao controle do Bivalve invasor. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- 104HICKS,G. **Turning the tide: Is aquatic bioinvaders research heading in the right direction?** Aquatic Invaders, vol. 16, p. 1-7, 2004.
- 105NICHOLS, S.J.; BLACK, M.G. **Identification of larvae: the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*), quagga mussel (*Dreissena rostriformis bugensis*), and Asian clam (*Corbicula fluminea*).** Canadian Journal of Zoology, 72, 406-416, 1994. [\[doi\]](#)
- 106XU, M. **Distribution and spread of Limnoperna fortunei in China.** In: Boltovskoy, D. *Limnoperna fortunei*: The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel. Cham: Springer, 2015. p. 312-320.
- 107BOLTOVSKOY, D., XU, M., & NAKANO, D. **Impacts of Limnoperna fortunei on man-made structures and control strategies: general overview.** In *Limnoperna fortunei - The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel*, Boltovskoy, D., Eds; Springer: Cham, Switzerland, 2015,10, pp. 375-394. [\[doi\]](#)
- 108BOLTOVSKOY, D. **Distribution and colonization of Limnoperna fortunei: special traits of na odd mussel.** In *Limnoperna fortunei - The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel*; Boltovskoy, D., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2015; Volume 10, pp. 301-311. [\[doi\]](#)
- 109 MCENNULTY, F.R., BAX, N.J., SCHAFFELKE, B., CAMPBELL, M.L. **A Review of Rapid Response Options for the Control of ABWMAC Listed Introduced Marine Pest Species and Related Taxa in Australian Waters.** Technical Report No. 23. Centre for Research on Introduced Marine Pests, CSIRO Marine Research, Hobart, 2001.
- 110 NAKANO, D.; KOBAYASHI, T.; SAKAGUCHI, I. **Population dynamics and growth of Limnoperna fortunei. In: In Limnoperna fortunei.** Invading Nature, Boltovskoy, D., Eds.; Springer (Cham), 2015; Volume 10, ISBN 978-3-319-13494-9, [\[doi\]](#).

- 111 BOLTOVSKOY, D.; CATALDO, D.H. **Population dynamics of *Limnoperna fortunei*, an invasive fouling mollusc, in the lower Paraná river (Argentina)**. *Biofouling*, 14, 255-263, 1999. [\[doi\]](#)
- 112 DARRIGRAN, G.; MAROÑAS, M. **Crecimiento valvar de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) de una localidad de clima templado de la región neotropical**. In: Darrigran, G.; Bonel, N.; Colautti, D.; Cazzaniga, N.J. *An Alternative Method to Assess Individual Growth of the Golden Mussel (*Limnoperna fortunei*)*. *The Wild Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 26, 527-535, [\[doi\]](#).
- 113 MACKIE, G.L.; CLAUDI, R. **Monitoring and Control of Macrofouling Mollusks in Freshwater Systems**. CRC Press: New York, NY, USA, 2010, ISBN 978-04-2914-964-1. Brazilian.
- 114 FROÉS, C.; DUARTE, M.; BRANCO, J. **Morphological study of the structures involved in the adhesion mechanism of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)**. *Agrogeoambiental*, 4, 1-10, 2012. [\[doi\]](#)
- 115 Association of Technical Standards: Sampling of solid waste. ABNT NBR 10007: 2004: 1-21, Home page. Disponível online: [\[link\]](#). Acesso: 23/04/22.
- 116 DINIZ, D.M.A.; SERRANO, R.O.P.; SOUZA, T.R.C.; SALIBA, A.P.M.; MARTINEZ, C.B.; COELHO, S.A. **Metodologia para fixação de carcaças de mexilhão dourado na confecção de modelos físicos**. In: The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE, 2017, Mar Del Plata. CLAGTEE 2017, 2017. v. 1.
- 117 HAN, X.; KANG, Y.; LI, D.; ZHAO, W. **Effects of surface roughness on self-excited cavitating water jet intensity in the organ-pipe nozzle: Numerical simulations and experimental results**. *Modern Physics Letters B.*, 33, 39, 2019. [\[doi\]](#)
- 118 ROBERTSON, R.; EMÖDI, B. **Rugosity of granular solids**. *Nature*, 152, 539-540, 1943. [\[doi\]](#)
- 119 ADAMS, T.; GRANT, C.; WATSON, H. **A simple algorithm to report measured roughness to equivalent sand-grain roughness**. *IJMEM*, 1, 66-71, 2012. [\[doi\]](#)
- 120 MATAIX, C. **Hydraulic Turbochargers**. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2009, ISBN 978-84-8468-252-3.
- 121 ECA Report, DEPASA Home Page. Disponível online: [\[link\]](#). Acesso: 03/03/22.
- 122 SANTOS, L.P.; SOUZA, T.R.C.; SOARES, F.L.A.; TARQUI, J.L.Z.; VIANA, E.M.F.; COELHO, S.A. **Uso de scanner 3d na determinação da rugosidade superficial de uma placa cerâmica infestada com mexilhão dourado**. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019, Foz do Iguaçu. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019.
- 123 ANEEL: Residual Tariffs Home Page. Available online: [\[link\]](#)[accessed on 09 June 2022].

124BCB: Quotes and newsletters Home Page. Available online: [\[link\]](#)[accessed on 09 June 2022].

125IBGE: Estimativa de população. Disponível em: [\[link\]](#). Acesso: 25 de fevereiro de 2023.

8. ANEXOS

ANEXO 01

Energy Efficiency Analysis of Pumping Systems Impacted by
the Golden Mussel: A Case Study in the Brazilian Amazon - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041858>



Article

Energy Efficiency Analysis of Pumping Systems Impacted by the Golden Mussel: A Case Study in the Brazilian Amazon

Tâmara Rita Costa de Souza ^{1,*} , Jennifer Thayane Melo de Andrade ² , Rodrigo Otávio Peréa Serrano ³ , Teofânia Heloísa Dutra Amorim Vidigal ^{1,4}, Edna Maria de Faria Viana ^{1,5}, Adriano Silva Bastos ⁶ and Carlos Barreira Martinez ^{1,6}

- ¹ Graduate Program in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte 31270-901, Brazil
 - ² Postgraduate Program in Zoology, Department of Zoology, Institute of Biological Sciences, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte 31270-901, Brazil
 - ³ Postgraduate Program in Science, Innovation and Technology for the Amazon and Postgraduate Program in Geography, Federal University of Acre, Rio Branco 69920-900, Brazil
 - ⁴ CPH (Centro de Pesquisas Hidráulicas), Laboratory of Malacology, Department of Zoology, Institute of Biological Science and LELF (Laboratory studies of the *Limnoperna fortunei*), Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte 31270-901, Brazil
 - ⁵ Department of Hydraulic Engineering and Water Resources, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte 31270-901, Brazil
 - ⁶ Thermo-Hydroelectro Laboratory, Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá, Itajubá 35903-087, Brazil
- * Correspondence: tamararcosta@hotmail.com; Tel.: +55-31-9-9553-8667



Citation: Souza, T.R.C.d.; Andrade, J.T.M.d.; Serrano, R.O.P.; Vidigal, T.H.D.A.; Viana, E.M.d.F.; Bastos, A.S.; Martinez, C.B. Energy Efficiency Analysis of Pumping Systems Impacted by the Golden Mussel: A Case Study in the Brazilian Amazon. *Energies* **2023**, *16*, 1858. <https://doi.org/10.3390/en16041858>

Academic Editors: Marian Banaś, Krzysztof Kołodziejczyk and Tadeusz Pająk

Received: 18 January 2023
Revised: 5 February 2023
Accepted: 10 February 2023
Published: 13 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Pumping systems, especially those used in the water supply sector and in industrial and hydroelectric facilities, are commonly infested by the golden mussel. This causes an increase in maintenance operations (e.g., system shutdowns for cleaning) that can generate an increased energy cost. The geographical expansion of the golden mussel in Latin America presents an economic risk, not only to the ecosystem in general, but also to the energy sector. The imminence of its spread in the Amazon region, one of the main river basins in South America, is cause for concern with regard to the problems that bioinvasion of this species can cause. Given the absence of studies on the loss of energy efficiency in pumping systems impacted by the golden mussel, this study proposes a methodology to estimate the increase in energy consumption and costs of pumping under such bioinfestation. For the standardization of the methodology and development of mathematical calculations (both novel and improved equations), data from the literature (the growth of the golden mussel as a function of infestation time) and an analysis of the dimensions (length and height) of a sample of mussels available in the laboratory were considered. These data were used to calculate the roughness generated by the mussel infestation in the pumping suction and discharger pipe, which was necessary to determine the loss of energy efficiency (load loss, power consumption, and cost of pumping) resulting from the increase in energy consumption for pumping. This methodology was applied to a pumping station representative of the Brazilian Amazon as a case study. The results show an average increase in economic indicators (consumption and cost of pumping) after the system undergoes bioinfestation. This total increase corresponded to 19% and 44% in the first and second years, respectively, achieving a stabilization of the increase in the cost of pumping at 46%, in the 30 months of operation. Our results demonstrate the pioneering nature of the proposal, since these are the first quantitative data on the energy efficiency of pumping systems associated with bioinfestation by the golden mussel. These results can also be used to estimate the increase in costs caused by golden mussel bioinfestation in the raw water pumping systems of other facilities.

Keywords: biofouling; bioinfestation; bioinvasion; energy consumption of pumping; cost of pumping; energy efficiency; golden mussel; load loss; pumping systems

1. Introduction

Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) (Mytilidae), the golden mussel (GM), has gained considerable prominence as a biofouler (fouling organism of underwater surfaces), causing severe damage to ecosystems and human-made industrial facilities (e.g., hydroelectric plants and those in the water supply sector) [1,2]. This invasive alien species (IAS) reaches the phase of attachment to the substrate, pediveliger, between 15 and 21 days [3,4]. It also easily disperses in the environment, through the larval stage, and attaches itself to various types of substrates such as plants, wood, tires, or metal structures [3]. The GM reaches its reproductive potential with a shell length of 6 mm [5], which explains their rapid growth in layers and their densities of up to 15 ind/cm² [6].

Present in Brazil since 1998 [7], the geographical distribution of the GM is currently concentrated in the south and southeast regions of Brazil, with prospects of expanding its bioinvasion to the Amazon region [8,9]. The Amazon basin consists of one of the largest centers of hydric potential in Brazil [10]. The dispersion of the GM can occur through planktonic larvae, mainly transported by boats or by juvenile and adult specimens attached to various types of substrates [11], which makes the Amazon basin a region with a high risk of bioinvasion, considering that this basin is widely navigable and the flow of boats is high [12].

Through bioinfestation, the golden mussel has negatively impacted the operation of fluid–mechanical systems, particularly in the water supply sector and hydroelectric power plants, which may cause increased maintenance costs [1,13]. Some of the main problems caused by GM bioinfestation in industrial systems include: (1) clogged pipelines, which compromises the transport of water, including that in the supply and energy sectors [1,14]; (2) increased load loss caused by the reduction in the free flow diameter in pumping systems [15]; (3) the corrosion and decreased strength of various materials where mussels encrust, caused by the formation of a biofilm [16]; and (4) abrasion caused by the friction of the shells inside pipelines with high water flow [17].

Considering the recognized categorization of ecosystem services (services related to the “benefits that people can obtain from the ecosystem”), from the above, the GM comprises two categories of these services: provisioning services (e.g., the provision of energy or water) and regulating and maintenance services (e.g., water purification) affecting both human well-being and the economy [18].

Recently, the economic costs related to biological invasions in Brazil were, for the first time, estimated by Adelino et al. (2021) [19], using the InvaCost (database) [20] and data from different IAS species, including the GM. Of the 460 invasive alien species present in Brazil, only 16 (aquatic and terrestrial ecosystems) are registered in the InvaCost system, with the GM being the only freshwater species with data that allow an estimation of the economic costs [18]. It was observed that the types of costs associated with the GM are concentrated in the activities of control, prevention, social activities (e.g., hydropower generation), and damage repair. The scarcity of economic indicators available for both the GM and other IAS was considered a factor that hindered the more assertive estimation of economic costs. Estimating these costs can help detect areas that may be more economically impacted and help define priority actions [19].

To fill the existing gaps on the impact of the GM on ecosystem services and their monetization, the aim of this study was to estimate the increase in energy consumption with the consequent loss of energy efficiency of a pumping system, based on a case study of a raw water lifting station.

For a general understanding of this work, it is important to mention that:

(1) The assessment of the loss of energy efficiency due to increased energy consumption is an extensive topic and has been applied to fluid–mechanical systems in general [21]. According to Patterson (1996) [22], one way to evaluate the energy efficiency of a system is to use economic indicators that may be more interesting when it is difficult to obtain reliable technical indicators. Thus, we adopt economic indicators (consumption and cost of pumping) as a way of evaluating the energy efficiency of the infested system, since

consumption and cost are inversely proportional to energy efficiency. (2) Pumping systems are at the center of most human activities [23,24] and represent approximately 20% of world energy consumption [25]. (3) Pumping systems can be built with pipes of different materials, the most common being polyvinyl chloride (PVC), high-density polyethylene (HDPE), cast iron (CI), concrete and steel [26]. (4) These materials may be subject to fouling caused by precipitated sediments from water [27,28], which can cause a loss of energy efficiency due to the increased resistance that fluid encounters [29]. (5) Biofouling also can gradually increase, causing an increase in the roughness of the surface of the internal walls of the pipe, as reported for *Dreissena polymorpha* (the zebra mussel) [30]. Several issues such as a decrease in the free flow diameter and an elevation of the load loss coefficient, which consequently cause the occlusion of the pipe, were reported by Moody (1944) [31]. These problems are aggravated with the aging of the pipe, as a result of time and exposure to different environmental conditions [32,33].

Despite the importance of assessing the loss of energy efficiency of pumping systems, its relationship with the GM (which encrusts in the pumping system) has not yet been studied. In this case study, an installation in the Acre River was selected, which belongs to the Amazon basin and presents a geomorphology related to the sliding of river banks due to variations in their quota throughout the hydrological year [34]. The raw water pumping system uses pumps positioned on rafts anchored to the riverbanks [35]. In the case of the Acre River, the variation in its quota shows an average amplitude of 8.4 m, which can exceed 14 m as a result of flooding [36].

To evaluate the losses in energy efficiency of the pumping systems affected by the GM, we considered two scenarios: the biofouling-free pumping system and the pumping system under the hypothesis of biofouling in the pipes. The aims of this study were as follows: (1) to elaborate a growth curve of the GM to support pumping system obstruction calculations; (2) to analyze the growth of the specimens, and by correlating the angle of attachment with the time of biofouling (new equations), to estimate the roughness that the pumping system achieves by analyzing the growth of biofouling and determining the thickness of the biofouling (bt); (3) to calculate the load loss factor (f) and load loss (ΔH) and the progression of the process to reduce the free flow diameter (improved equations); and 4) to determine the energy consumption and costs of the pumping of a representative elevated pumping station (EPS).

2. Materials and Methods

2.1. Overview

This study includes an assessment of the loss of energy efficiency in a pumping system of a known pumping station under the golden mussel (GM) biofouling hypothesis. Some biological information from the GM, constructive data from the target station, and some mathematical engineering parameters were used, all of which influence the performance of the pumping system (e.g., load loss). This set of information was necessary for the construction of new equations, as well as for the improvement of existing equations and to obtain results on the economic indicators that validate the loss of energy efficiency. An overview of the methodology is presented in Figure 1, and details of the procedures are reported throughout this section.

2.2. Local Characterization

To calculate the impacts of biofouling on raw water pumping systems, the Elevated Pumping Station (EPS) II Rio Branco, Acre, Brazil [36], was used as an example. The extant coordinates of the site are $10^{\circ} 0'35.95''$ S / $67^{\circ} 50'38.08''$ W. A view of the pumping system of the pumping station is shown in Figure 2. This pumping system is composed of 3 vertical Francis-type centrifugal pumps and a radial rotor that operates 12 h per day, with an average flow rate of 1100 L/s. It has the capacity of vertical mobility by means of floating surfaces, to be able to adjust to the variations in the water levels of the river. The station

characteristics considered were flow rate (Q), efficiency (η), power (P), free flow diameter (D), length suction and discharge pipe (L), velocity (V), and height (H) (Tables 1 and 2).

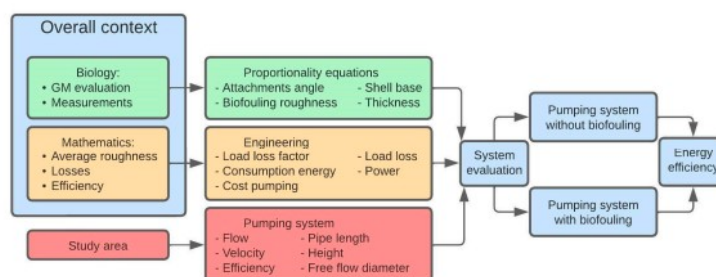


Figure 1. Schematic representation of the activities developed in this work.



Figure 2. Elevated Pumping Station II, Rio Branco, Acre, consisting of a set of vertical turbine-type pumps. Note: 1—Pump 1; 2—Pump 2; and 3—Pump 3.

Table 1. Characteristics of the pipes coupled to the 3 representative pumps adopted to pump from the river to the desander of the river channel—Rio Branco/Acre [36].

	Pump 1	Pump 2	Pump 3
Q (L/s)	600	300	200
η (%)	78.3	70.7	77.4
P (CV)	250	150	125
D (mm)	500	400	300
L (mm)	71.5	73.0	72.0
V (m/s)	3.06	2.39	2.83

The meanings of the symbols are as follows: Q, flow; η , efficiency; P, installed power; L, length of the suction pipe + discharge pipe; D free flow diameter and V, velocity.

Table 2. Characteristics of the pumps at the Elevated Pumping Station II, Rio Branco, Acre [36].

	Q (L/s)	H (mca)	η (%)		Q (L/s)	H (mca)	η (%)		Q (L/s)	H (mca)	η (%)
Pump 1	100	35.0	58	Pump 2	50	35.0	48	Pump 3	50	35.0	48
	200	33.0	64		100	33.0	63		100	33.0	63
	300	30.0	69		150	30.0	69		150	30.0	69
	400	25.0	74		200	25.0	74		200	25.0	74
	500	20.5	76		250	20.5	75		250	20.5	75
	600	14.5	79		300	14.5	75		300	14.5	75
	700	9.0	74		350	9.0	70		350	9.0	70

The meanings of the symbols are as follows: Q, flow; H, height; and η , efficiency.

The EPS that was studied follows the simplified model of a water pumping system (Figure 3). In this study, calculations were performed considering the weighted average of the river's elevation quotes. This resulted in a weighted average of 122.85 m and an average gradient of 13.25 m.

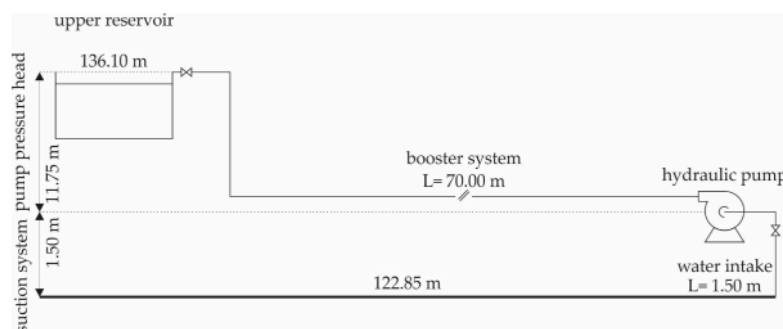


Figure 3. Simplified model of the pumping system of the Elevated Pumping Station II, Rio Branco, Acre.

2.3. Growth Curve of the Golden Mussel

The growth curve as a function of time and the GM was obtained through data from the literature (Table 3). It was taken into account that the geometric shape and the location of the attachment in the environment did not have a significant effect on the shell growth of the mussel [37].

Table 3. Age and shell length of golden mussel.

Phase	Length (mm)	Reference	Age (Days)
Egg	0.080		
Ciliated larvae	0.080		
Trochophore Phase 1	0.090		
Trochophore Phase 2	0.110		
Trochophore Phase 3	0.125	[4,38]	5
Trochophore Phase 4	0.125		
Larvae D	0.145		
Straight hinge Veliger	0.163		
Unboned veliger	0.207		
Pediveliger	0.239	[4,38]	16
Post larvae	0.320		
	20	[38]	365
Post larvae	30	[38]	730
	35	[39]	1095
	36	[40]	1277

Source: Adapted from Cataldo et al. [3], Choi and Chim [4], Nakano et al. [38], Boltovskoy and Cataldo [39], and Darrigran and Maroñas [40].

2.4. Determination of the Angle of Attachment and the Proportional Relation between Golden Mussel Individuals

Golden mussels (GMs) were collected in the Itaipu hydroelectric power plant (HPP), which is located in Brazil and Paraguay, 25°24'28" S, 54°35'24" W. The GM decomposes rapidly after being removed from the water; accordingly, it was decided to work with dried and sterilized shells. The measured parameters and the angle of attachment were as described by Mackie and Claudi (2010) [41] and Froés et al. (2012) [42], with modifications.

The sample of dried shells containing 1000 specimens of GM went through quartering separation, according to the recommendations of the Brazilian Technical Standard ABNT NBR 10007 [43]. This sample was subdivided into 7 classes, separated according to the shell length of the bivalve, as follows: 0–5 mm, 5–10 mm, 10–15 mm, 15–20 mm, 20–25 mm, 25–30 mm, and >30 mm. Three subsamples, containing 5 individuals in each class, were separated to take the measurements, as shown in Figure 4. After measuring the individuals, the angle of attachment was determined (Figure 4). Then, the rest of the dry shells were artificially attached to surfaces with glue (ASTM-A36 steel), with different materials used in different parts of the HPPs, as reported and used by Simeão (2011) [44]. These artificial attachments were based on the angles of attachment, reproducing the GM attachments that occur in the field. The ASTM-A36 steel surfaces to which shells were artificially attached were photographed for further analysis (see below).

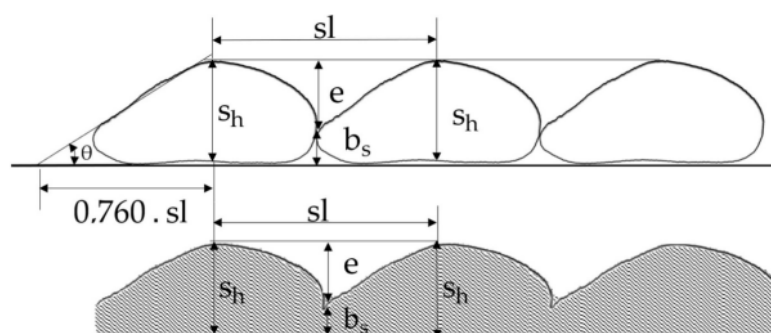


Figure 4. Description of how the golden mussel was measured, dimensions provided in mm.

The three previously separated subsamples were examined and their dimensions were surveyed and composed a database containing the dimensions shell length (sl), base shell (bs), shell height (sh) and the angle detachment (θ) for each individual. Thus, it was possible to develop Equations (1)–(4) (new equations). From these data, using the Excel spreadsheet, we obtained a curve that relates the angle “ θ ” with the “sl” and then adjusted Equation (1), which had a coefficient $R^2 = 0.9935$. It was observed by measuring GM husks that the dimension formed between the vertex of the triangle and the top of the bark has a constant ratio of “ $0.76 \cdot sl$ ” (Figure 4). Thus, it was obtained from trigonometric relation Equation (2), which provides the dimension “sh”. Dimension “bs,” also obtained by measuring GM shells, corresponds to 38% of shell length “sh” and can be calculated by Equation (3). The “e” corresponds to 62% of the dimension “sh” and can be calculated by Equation (4).

$$\theta = 29.989 \cdot sl^{0.0951} \quad (1)$$

$$sh = 0.760 \cdot sl \cdot \tan \theta \quad (2)$$

$$bs = 0.288 \cdot sl \cdot \tan \theta \quad (3)$$

$$e = 0.472 \cdot sl \cdot \tan \theta \quad (4)$$

sl: shell length (mm);

θ : attachment angle (degree);

sh: shell height (mm)

bs: shell base (mm);

e: roughness (mm).

The criteria to determine the thickness of the biofouling were created based on the roughness (Equation (4)) of the surface and calculated without considering the hydrodynamic drag detachment of specimens from the pumping system. This detachment, in turn, was derived from the decrease in the free flow diameter, which was caused by the thickness

of the biofouling and the elevation in the velocity flow in the pipe. Thus, using Equation (4), it was possible to determine a characteristic roughness curve as a function of bioinfestation time, allowing for the evaluation of the new flow-free diameters.

2.5. Mathematical Analysis: Calculation of the Thickness of the Biofouling in Pipelines of Average Roughness

With the determination of the shell height using Equation (2), it was possible to calculate the thickness of the biofouling, according to the hydrodynamic drag detachment. However, it is important to consider the interference of flow velocity in the progression of biofouling in pipelines. Based on the studies of Castro (2013) [45], it is assumed that the velocity effect gradually increased the detachment of the mussels. A detachment of 20% of the thickness of the biofouling is seen between the speed ranges 2.0 m/s and 2.5 m/s. Thereafter, a detachment of 40% is found between 3.0 m/s and 3.5 m/s, advancing to 60% between 3.5 m/s and 4.0 m/s, and to up to 80% at velocities above 4.0 m/s. When the velocity reaches 4.5 m/s, all new specimens become detached.

Based on the information above, the thickness of the biofouling was calculated related to percentage of detachment, after the beginning of the formation of the second layer of the GM (Equation (5)).

$$bt = sh + sh * (1 - \%_{\text{detachment}})_{1^{\text{st}}\text{layer}} + sh * (1 - \%_{\text{detachment}})_{2^{\text{nd}}\text{layer}} + \dots + sh * (1 - \%_{\text{detachment}})_{n^{\text{th}}\text{layer}} \quad (5)$$

bt: thickness of the biofouling;

$\%_{\text{detachment}}$: percentage of detachment of the GM.

We assume that, once the value of the thickness of the biofouling exceeds the value of the average roughness of the surface, the second layer of biofouling starts to form.

This creates a pattern for the growth of the layers and makes it possible to estimate the thickness of the biofouling for any time period of infestation. It should be considered that the growth of the GM is not uniform and that the colonies have specimens of various sizes. This leads the average roughness to be affected by the diversity of these specimens.

The parameter chosen to obtain the roughness caused by biofouling was the average roughness (R_a), which is a parameter applied in most engineering processes [46,47]. To determine the R_a using Equation (6), photographs of the surfaces (ASTM-A36 steel) with artificially attached dried shells were used (see Section 2.4). On each surface (nine), a midline was drawn (from the mussel fixation base), through which measurements were made between peaks and valleys, as described in Han et al. (2019) [48].

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (\text{mm}) \quad (6)$$

R_a : average roughness (mm);

n: number of measurements taken;

2.6. Load Loss

Since biofouling occurred on the entire inner surface of the pipe, the free flow diameter (D) in the pipe was decreased by twice the value of the thickness of the biofouling.

The velocity flow inside the pipes was obtained from the data of the EPS studied [36]. The reduction of the diameter was based on the thickness of the biofouling and was calculated by using the equation of continuity, Equation (7) [49].

$$V = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

Q: flow rate (m^3/s);

A: area of the pipeline (m^2).

In order to calculate the load loss factor (f), a function was defined, using Equation (8), Buzzelli's Equation [50]. This equation contains two roots: B_1 obtained using Equation (9),

and B_2 Equation (10), obtained as a function of R_a (average roughness), D (free flow diameter), and the Reynolds number (Re), which was obtained from Equation (11) [49]. All calculations were carried out considering two scenarios: a pumping system without biofouling and a pumping system with biofouling. The value of the roughness of the pipe surface (ASTM-A36 steel), was considered as $e = 0.045\text{mm}$ [17], which was the value considered for the system without biofouling.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = B_1 - \left(\frac{B_1 + 2 \cdot \log_{10} \left(\frac{B_2}{Re} \right)}{1 + \frac{2.18}{B_2}} \right) \quad (8)$$

$$B_1 = \frac{(0.777 \cdot \ln \cdot (Re)) - 1.41}{1 + 1.32 \sqrt{\frac{R_a}{D}}} \quad (9)$$

$$B_2 = \frac{R_a}{3.7 \cdot D} \cdot Re + 2.51 \cdot B_1 \quad (10)$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

f : load loss factor;

B_1 : root 1;

B_2 : root 2;

Re : Reynolds number;

D : free flow diameter (m);

ν : kinematic viscosity of water, 10^{-6} (m^2/s).

With the values obtained above, the load loss was calculated using the Darcy–Weisbach equation, Equation (12) [51].

$$\Delta H = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad (12)$$

ΔH : load loss (mca);

L : pipe length (m);

g : gravity acceleration $—9.81$ (m/s^2).

To determine the total height of the elevation, or the total load loss of the pumping system, Equation (13) was used [51].

$$H_{\text{total}} = H_{\text{gh}} + \Delta H_{\text{head}} \quad (13)$$

H_{total} : total height of the elevation (mca);

H_{gh} : the average geometric gradient to be compensated for (mca);

ΔH_{head} : sum of the load loss due to suction and the discharge pipe (mca).

The load loss due to suction and the discharge pipe was calculated using Equation (14) [51].

$$\Delta H_{\text{head}} = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L_{\text{discharge}}}{\pi^2 \cdot g \cdot (D_{\text{discharge}})^5} + \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L_{\text{suction}}}{\pi^2 \cdot g \cdot (D_{\text{suction}})^5} \quad (14)$$

The methodology used here to calculate the load loss was also described by Mataix (2009) [49].

2.7. Energy Efficiency

The pumping power needs to be known for the calculation of the economic cost of pumping. Equation (15) [51], shown below, considers the yield of the pumps as described by Mataix (2009) [49] and the water working fluid at atmospheric pressure.

$$P_{\text{kW}} = \frac{(\gamma \cdot Q \cdot H_{\text{total}})}{\eta \cdot 1000} \quad (15)$$

P: pumping power (kW);
 γ : water-specific weight (kgf/m³);
 η : efficiency.

The consumption, of the pumping system without bioinfestation, taking into account the potency obtained for said system was obtained using Equation (16) [49].

$$C_{\text{without inf}} = P_{\text{without inf}} \cdot \sum_1^n t_{\text{op}}. \quad (16)$$

$C_{\text{without inf}}$: consumption of the pumping system without bioinfestation (kWh);
 $P_{\text{without inf}}$: power calculated for the pumping system without bioinfestation (kW);
 t_{op} : number of operating hours of the pumping system in hours, days, or years.

The consumption of the pumping system with bioinfestation, taking into account the potency obtained for said system, was obtained using Equation (17), [49].

$$C_{\text{inf}} = P_{\text{inf}} \cdot \sum_1^n t_{\text{op}}. \quad (17)$$

C_{inf} : consumption of the pumping system with bioinfestation (kWh);
 P_{inf} : power calculated for the pumping system with bioinfestation.

The increase in energy consumption by hour is the value of the difference in power between the systems with and without biofouling, multiplied by the pumping operation time. This calculation is given as Equation (18) (improved equation) [49].

$$C_{\text{inf}} = (P_{\text{inf}} - P_{\text{without inf}}) \cdot \sum_1^n t_{\text{op}}. \quad (18)$$

The costs of the pumping system per cubic meter without bioinfestation were obtained via Equation (19) [49], in view of the consumption of the pumping system and of the volume that was pumped.

$$C_{\text{pumping without inf}} = \frac{C_{\text{without inf}}}{V_{\text{pumping}}} \cdot \text{Price} \quad (19)$$

$C_{\text{pumping without inf}}$: cost of pumping per cubic meter before infestation (USD/m³);
 V_{pumping} : volume that was pumped (m³);
Price: price per kWh (USD/kWh).

The cost of the pumping system per cubic meter with bioinfestation was obtained by using Equation (20) [49], in view of the consumption of the pumping system with bioinfestation and of the volume that was pumped.

$$C_{\text{pumping inf}} = \frac{C_{\text{inf}}}{V_{\text{pumping}}} \cdot \text{Price} \quad (20)$$

$C_{\text{pumping inf}}$: cost of pumping per cubic meter after bioinfestation (USD/m³).

3. Results and Discussion

3.1. Shell Growth, Thickness of Biofouling and Roughness of the Surface

One of the main challenges of the present work when linked to the loss of energetic efficiency, pumping system, and the golden mussel (GM) was to obtain the growth curve based on the data presented in Table 3. The results allow, through this biological information, the construction of new equations and the improvement of others, allowing for an analysis of the loss of energy efficiency.

The measurements (see Figure 4) and the proportionality relationship among the measured individuals obtained using Equations (1) and (4) allow the determination of

the temporal curve of surface roughness. The calculation of the biofouling thickness was conducted using Equations (2), (3) and (5). The analysis of the three parameters (GM growth curve, temporal curve of roughness, and biofouling thickness) is shown in Figure 5.

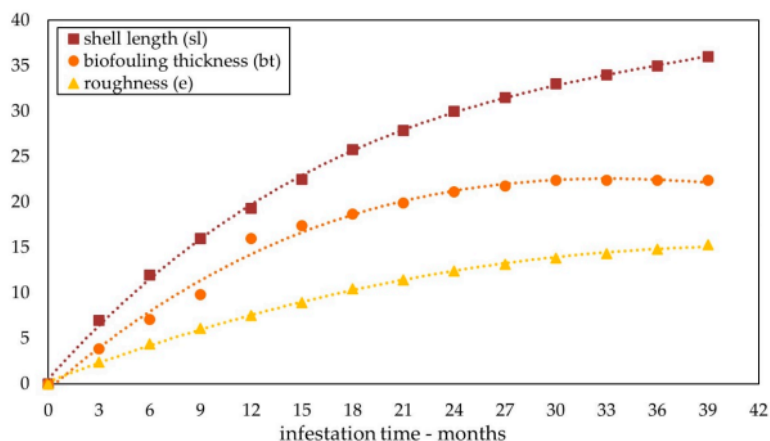


Figure 5. Golden mussel growth curve based on shell length (sl), average thickness of biofouling (bt), and surface roughness (e). All data are related to time and were obtained from Table 3.

Figure 5 shows that in the first year of bioinfestation (0–12 months), the shell length reached 20 mm, showing exponential growth. In the second year of bioinfestation (12–24 months), the GM grew only 10 mm, showing that there was a 50% reduction in the growth rate when compared with the first year. This behavior is also verified in the third year of bioinfestation (24–36 months), where a shell length growth of 5 mm was observed for this period, which also showed a 50% reduction in the growth rate when compared with the previous year. This growth dynamic, shown in the graph prepared from literature data (Table 3), showed that there is a stabilization trend in growth as the GM approaches its maximum size (35–40 mm). These data are in agreement with those of Darrigran and Maroñas (2002) [40], who show a trend towards stabilization after a period of 3 years, when the shell length reaches its maximum.

The characteristic roughness curve (Figure 5) shows an average growth rate of approximately 65% for the period from 0 to 18 months of bioinfestation, coinciding with the average value of surface roughness calculated through Equation (6) (see Section 2.5), which was $R_a = 10.25$ mm. This roughness was used to determine the beginning of the formation of the second biofouling layer and to calculate the load loss. After this period (18–33 months), the average growth rate fell approximately 25%, demonstrating that the increase in shell length does not directly influence the increase in roughness. After 33 months of bioinfestation, it was found that the curve tends to stabilize.

According to Burlakova et al. (2022) [18], *Dreissena* spp. (zebra mussel) and *Limnoperna fortunei* (GM) have similar life histories and share functional ecological characteristics, in addition to having a byssus that allows attachment to various substrates. It is also known that the zebra mussel causes an increase in surface roughness after the beginning of bioinfestation, and that densities of 32 ind/cm² have already been detected [30]. Therefore, these characteristics provide a warning with regard to the issue of increasing GM population density, which would contribute to an increase in roughness.

After 15 months of bioinfestation (Figure 5), the layer thickness presented a value of approximately 17 mm, corresponding to an average growth rate of 1.1 mm/month. For the subsequent period (15–27 months), the average growth progression of the biofouling thickness fell to 0.3 mm/month. This reduction was due to the increase in the hydrody-

dynamic drag detachment, which varies depending on the speed, calculated by Equation (7), inhibiting the progression of the colonies because of the detachment of new specimens, as also observed by Simeão (2011) [44], Castro (2013) [45], and Xu et al. (2012) [52].

The importance of pumping systems in energy production, and indeed, the whole issue of biofouling and its interference, especially in terms of roughness, is well-known, being able to affect the efficiency of the system. In addition, it is also known from records in the literature that the GM can affect ecosystem services related to human well-being and is associated with ecosystem disservices (e.g., biofouling, toxic cyanobacterial bloom, and transfer of contaminants) [18].

3.2. Load Loss Factor and Free Flow Diameter

After determining the layer thickness, it is possible to determine the free flow diameter (see Section 2.6), taking into account its reduction caused by the increase in the thickness of the biofouling. The values of f were calculated for the pumping system analysed in our case study and two situations were considered: the system without biofouling and with biofouling. Figure 6 shows the curves of the progression of f along with the reduction in the diameters of the pipes coupled to pumps 1, 2, and 3, at the Rio Branco EPS.

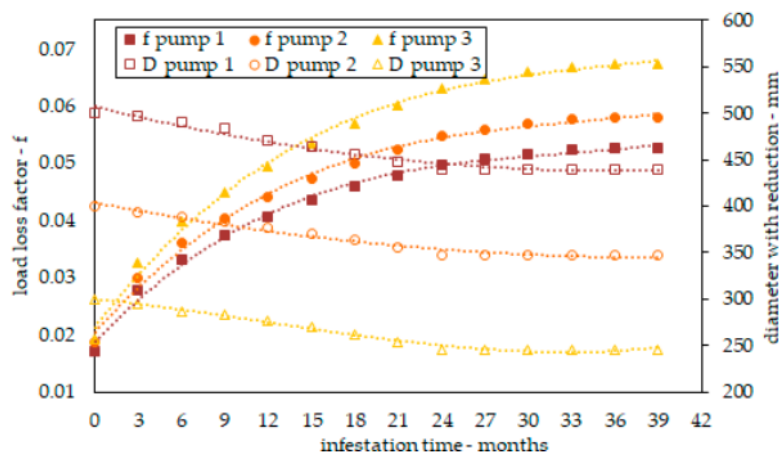


Figure 6. Temporal progression of the load loss factor (f) of the pumping system, calculated using Equation (8) and the reduction in the free flow diameter (D) due to biofouling, for the pumping systems coupled to pumps 1 (B1), 2 (B2) and 3 (B3). Data are presented in Table 1.

To construct these curves, it was necessary to calculate the load loss factors (f), using Equations (8)–(11). All of these equations were used in the two systems evaluated: with and without biofouling. The values of f for the pipes attached to the pumps without the occurrence of bioinfestation were as follows: Pump 1: $f = 0.01710$; Pump 2: $f = 0.01874$; and Pump 3: $f = 0.01933$.

The construction of the f curve took into account as the first value the load loss factor of the pumping system without biofouling and from that point on, the calculations were made by taking into account the decrease in free flow diameter, caused by the increase in the thickness of the biofouling, as shown in Figure 5. The f curve for Pump 1 presents an average increase over 3 years (0–36 months) of 207%, compared with the f value for the system without biofouling. It can be seen that this value is even more pronounced for Pumps 2 and 3, with average increases for the same period of 209% and 248%, respectively. This proves the theory that the efficiency of the system decreases as the load loss factor increases [29].

The curves have the same characteristic of entering stability close to 24 months of bioinfestation, decreasing the growth rate of f . This may be caused by several factors, including: (i) variation in the shell growth and drag force on the GM; (ii) the death of specimens that subsequently detach from the surface; and (iii) the detachment of parts of the colony as a result of the degradation of the dead specimens that are inserted in the first layers of encrustation. It is important to note that the initial velocity flows in these pipes are not equal, and only equalize after the stabilization of the biofouling.

As the velocity flow increases, an increase in the detachment rate follows, causing a decrease in the thickness of the biofouling. It is known that the longer the shell length, the greater the attachment force, making it more difficult to remove shells in terms of the velocity factor [52], although it is already proven that the increase in velocity inside the pipe causes the pullout of individuals, especially in steel [45]. Until the beginning of the formation of the second layer, the thickness of the biofouling for both the pumping system with and without bioinfestation is considered equal. After one year of bioinfestation, with the layer thickness having reached the value of average roughness and including the effect of increased velocity, hydrodynamic drag detachment was considered. It is assumed that the lower layers will not progress after a subsequent layer begins to form, as they will not have access to filtration, and will become substrates for future specimens. This can be seen in Figure 6.

The effect of the detachment of the specimens after bioinfestation is stabilized has the potential to damage the pumps as it can increase the wear of the impeller, the sealing systems, and the seals, as a result of friction from the GM shell [35].

3.3. Energy Consumption Costs of Pumping System with Biofouling

Although the loss of energy efficiency is a broad topic, only a few parameters were selected for this study, such as energy consumption and cost of pumping, which allowed for the analysis of the loss of energy efficiency/pumping system due to the GM. This issue is admitted in the analysis of industrial sectors, but has not been scientifically analyzed or published in a robust and reliable way.

Here, to determine the cost of pumping per m^3 , which, together with energy consumption, determined the efficiency of the pumping system, it was necessary to calculate the energy consumption using Equations (12)–(17). For these calculations, the two scenarios of the target pumping system were considered: with biofouling and without biofouling. The results of Equations (12)–(17) pointed to the greater load loss, power, and energy consumption of systems with biofouling (Tables 4–7).

The energy consumption values of the pipelines coupled to Pumps 1, 2, and 3 (in the scenario without biofouling; Equation (16)) were determined as 110 kWh, 60 kWh, and 39 kWh, respectively, for the scenario with biofouling, and are also given in the tables cited. Figure 7 shows the increase in energy consumption in kWh for the two systems evaluated, calculated using Equation (18) for each pipe coupled to Pumps 1, 2, and 3.

As the pumping system undergoes the beginning of bioinfestation, there is an increase in the energy consumption required to maintain the flow at the same level as in the system without biofouling. This demand causes an increase in the pumping consumption, as presented through the curves, for each system coupled to Pumps 1, 2, and 3 (Figure 7).

At the end of two years (0–24 months) of bioinfestation, there were increases in the consumption of 34%, 30%, and 95% for Pumps 1, 2, and 3, respectively. After this period (24–39), consumption tends to enter stability, reaching an increase of 36%, 32%, and 102% by the end of the period for the coupled systems of Pumps 1, 2, and 3, respectively. With this information, it was found that the growth rate of consumption is higher in the first 24 months, proving the relationship with the increase in the load loss factor (Figure 6).

Table 4. Progression of consumption and costs, in view of the progression of GM bioinfestation for Pump 1, with a flow rate of 600 L/s and a diameter of 500 mm.

Month	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	D_{vd}	P_{pump}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.	
0	0.0	500.0	600.0	0.0171	1.2	14.6	78.3	0.0	109.9	0.0	1318	118,663	-	0.00	171.40	15,426.00	0.0066	-
3	3.9	496.9	596.0	0.0278	1.9	15.4	78.3	173.0	114.9	0.1	1388	124,887	6224	809.10	180.39	16,235.00	0.0070	5%
6	7.1	491.2	595.0	0.0333	2.4	15.9	78.3	216.0	118.4	0.1	1433	128,985	10,321	1341.78	186.31	16,768.00	0.0072	9%
9	9.8	483.4	593.0	0.0373	2.9	16.4	78.3	302.0	121.8	0.1	1479	133,101	14,438	1876.97	192.26	17,303.00	0.0074	12%
12	16.0	470.6	592.0	0.0408	3.7	17.1	78.3	346.0	126.9	0.2	1544	138,938	20,274	2635.68	200.69	18,062.00	0.0077	17%
15	17.4	463.6	591.0	0.0435	4.2	17.6	78.3	389.0	130.7	0.2	1592	143,294	24,631	3201.98	206.98	18,628.00	0.0080	21%
18	18.7	456.2	589.0	0.0459	4.8	18.2	78.3	475.0	134.5	0.2	1644	147,933	29,269	3805.02	213.68	19,231.00	0.0082	25%
21	19.9	448.2	587.0	0.0479	5.4	18.8	78.2	562.0	138.7	0.3	1701	153,097	34,434	4476.39	221.14	19,903.00	0.0085	29%
24	21.2	439.7	584.0	0.0497	6.1	19.5	78.2	691.0	143.0	0.3	1762	158,617	39,954	5194.05	229.11	20,620.00	0.0088	34%
27	21.8	439.7	584.0	0.0509	6.2	19.7	78.2	691.0	144.1	0.3	1777	159,918	41,255	5363.12	230.99	20,789.00	0.0089	35%
30	22.4	439.7	584.0	0.0517	6.3	19.8	78.2	691.0	144.9	0.3	1786	160,769	42,105	5473.71	232.22	20,900.00	0.0090	35%
33	22.4	439.7	584.0	0.0523	6.4	19.9	78.2	691.0	145.4	0.3	1793	161,353	42,690	5549.70	233.07	20,976.00	0.0090	36%
36	22.4	439.7	584.0	0.0526	6.4	19.9	78.2	691.0	145.7	0.3	1796	161,681	43,018	5592.29	233.54	21,018.00	0.0090	36%
39	22.4	439.7	584.0	0.0527	6.5	19.9	78.2	691.0	145.8	0.3	1797	161,756	43,093	5602.10	233.65	21,028.00	0.0090	36%

The meanings of the symbols are as follows: s_h , thickness of the biofouling—mm; D, effective diameter—mm; Q, flow—L/s; f , load loss factor; ΔH , load loss—mca; H_{total} , total height of elevation—mca; η , efficiency—%; D_{vd} , daily flow deficit—m³; P_{pump} , power of the pump—kW; T_{ab} , additional pumping time—h/day; C1, pumping system consumption—kWh/day; C2, pumping system consumption—kWh/trimester; C3, incremental consumption—kWh/trimester; C4, incremental costs—US\$/trimester; C5, daily costs—USD/day; C6, total cost per trimester—USD; C7, pumping cost—m³; and Incr., increased consumption.

Table 5. Progression of consumption and costs, in view of the progression of GM bioinfestation for Pump 2, with a flow rate of 300 L/s and a diameter of 400 mm.

Month	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	D_{vd}	P_{pump}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.	
0	0.0	400	300.0	0.0187	1.0	14.4	70.7	0.0	60.1	0.0	721	64,927	0	0.00	93.78	8440.00	0.0072	-
3	3.9	394	293.5	0.0300	1.7	15.2	71.3	280.8	61.3	0.3	752	67,669	2743	356.53	97.74	8797.00	0.0075	4%
6	7.1	388	288.5	0.0360	2.2	15.7	71.6	496.8	61.9	0.5	773	69,528	4601	598.09	100.43	9039.00	0.0077	7%
9	9.8	384	285.0	0.0405	2.6	16.1	71.9	648.0	62.5	0.6	790	71,080	6153	799.93	102.67	9240.00	0.0079	9%
12	16.0	378	282.0	0.0442	3.1	16.6	72.1	777.6	63.6	0.8	812	73,051	8124	1056.10	105.52	9497.00	0.0081	13%

Table 5. Cont.

Month	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	D_{vd}	P_{pump}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.	
15	17.4	371	279.0	0.0474	3.7	17.1	72.3	907.2	64.8	0.9	836	75,282	10,355	1346.15	108.74	9787.00	0.0084	16%
18	18.7	363	277.0	0.0501	4.3	17.7	72.4	993.6	66.6	1.0	866	77,920	12,993	1689.09	112.55	10,130.00	0.0087	20%
21	19.9	355	276.0	0.0525	5.0	18.5	72.4	1036.8	69.1	1.0	901	81,084	16,158	2100.48	117.12	10,541.00	0.0090	25%
24	21.2	347	270.0	0.0547	5.9	19.4	72.7	1296.0	70.5	1.3	940	84,571	19,644	2553.75	122.16	10,994.00	0.0094	30%
27	21.8	347	269.0	0.0560	6.0	19.5	72.8	1339.2	70.7	1.4	946	85,571	20,208	2626.98	122.97	11,067.00	0.0095	31%
30	22.4	347	269.0	0.0570	6.2	19.6	72.8	1339.2	71.1	1.4	951	85,598	20,671	2687.29	123.64	11,128.00	0.0095	32%
33	22.4	347	269.0	0.0577	6.2	19.7	72.8	1339.2	71.3	1.4	955	85,917	20,991	2728.78	124.10	11,169.00	0.0096	32%
36	22.4	347	269.0	0.0580	6.3	19.7	72.8	1339.2	71.5	1.4	957	86,096	21,170	2752.04	124.36	11,193.00	0.0096	33%
39	22.4	347	269.0	0.0581	6.3	19.7	72.8	1339.2	71.5	1.4	957	86,138	21,211	2757.40	124.42	11,198.00	0.0096	33%

The meanings of the symbols are as follows: s_h , thickness of the biofouling—mm; D, effective diameter—mm; Q, flow—L/s; f , load loss factor; ΔH , load loss—mca; H_{total} , total height of elevation—mca; η , efficiency—%; D_{vd} , daily flow deficit—m³; P_{pump} , power of the pump—kW; T_{ab} , additional pumping time—h/day; C1, pumping system consumption—kWh/day; C2, pumping system consumption—kWh/trimester; C3, incremental consumption—kWh/trimester; C4, incremental costs—USD/trimester; C5, daily costs—USD/day; C6, total cost per trimester—USD; C7, pumping cost—m³; and Incr., increased consumption.

Table 6. Progression of consumption and costs, in view of the progression of GM bioinfestation for Pump 3, with a flow rate of 200 L/s and a diameter of 300 mm.

Month	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}	D_{vd}	P_{pump}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.	
0	0.0	300	200.0	0.0193	1.9	15.3	77.4	0.0	38.9	0.0	466.9	42,017	0	0	60.69	5462.21	0.0070	0
3	3.9	295	199.0	0.0325	3.4	16.9	77.5	43.2	42.6	0.1	513.5	46,215	4198	545.69	66.75	6007.90	0.0077	10%
6	7.1	287	197.0	0.0397	4.9	18.3	77.6	129.6	45.6	0.2	555.5	49,998	7981	1037.57	72.22	6499.78	0.0084	19%
9	9.8	283	195.0	0.0450	5.9	19.4	77.8	216.0	47.6	0.3	586.2	52,756	10,739	1396.08	76.20	6858.29	0.0088	26%
12	16.0	277	193.0	0.0496	7.3	20.7	77.9	302.4	50.4	0.4	627.0	56,429	14,412	1873.62	81.51	7335.83	0.0094	34%
15	17.4	270	191.0	0.0535	8.9	22.4	78.0	388.8	53.8	0.6	676.0	60,844	18,827	2447.49	87.89	7909.70	0.0102	45%
18	18.7	262	189.0	0.0570	11.0	24.4	78.1	475.2	58.0	0.7	736.4	66,277	24,260	3153.82	95.73	8616.02	0.0111	58%
21	19.9	254	188.0	0.0602	13.5	27.0	78.1	518.4	63.7	0.8	812.8	73,152	31,135	4047.55	105.66	9509.76	0.0122	74%
24	21.2	246	180.0	0.0631	16.8	30.2	78.2	864.0	68.3	1.3	910.3	81,923	39,906	5187.80	118.33	10,650.01	0.0137	95%
27	21.8	246	179.0	0.0648	17.2	30.7	78.2	907.2	68.9	1.4	923.5	83,111	41,094	5342.23	120.05	10,804.43	0.0139	98%

Table 6. Cont.

Month	s_h	D	Q	f	ΔH	H_{total}		D_{vd}	P_{pump}	T_{ab}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Incr.
30	22.4	246	179.0	0.0660	17.5	31.0	78.2	907.2	69.6	1.4	933.3	83,998	41,981	5457.54	121.33	10,919.75	0.0140	100%
33	22.4	246	179.0	0.0668	17.8	31.2	78.2	907.2	70.1	1.4	940.1	84,609	42,592	5536.99	122.21	10,999.19	0.0141	101%
36	22.4	246	179.0	0.0673	17.9	31.3	78.2	907.2	70.4	1.4	943.9	84,952	42,935	5581.58	122.71	11,043.79	0.0142	102%
39	22.4	246	179.0	0.0674	17.9	31.4	78.2	907.2	70.5	1.4	944.8	85,031	43,014	5591.87	122.82	11,054.07	0.0142	102%

The meanings of the symbols are as follows: s_h , thickness of the biofouling—mm; D, effective diameter—mm; Q, flow—L/s; f , load loss factor; ΔH , load loss—mca; H_{total} , total height of elevation—mca; η , efficiency—%; D_{vd} , daily flow deficit—m³; P_{pump} , power of the pump—kW; T_{ab} , additional pumping time—h/day; C1, pumping system consumption—kWh/day; C2, pumping system consumption—kWh/trimester; C3, incremental consumption—kWh/trimester; C4, incremental costs—USD/trimester; C5, daily costs—USD/day; C6, total cost per trimester—USD; C7, pumping cost—m³; and Incr., increased consumption.

Table 7. Summary of the impact of GM bioinfestation at Rio Branco EPS until the period of stabilization.

	Daily Consumption (kWh/Day)	Daily Cost (USD/Day)	Increase (USD/Day)	Cost Per Unit (USD·M ³)	Increase (USD/M ³)	Increase in Consumption (%)
year	2.506.7	325.88	-	0.00686	-	-
1 year	2982.4	387.71	61.84	0.00816	0.00130	19
2 years	3612.5	469.62	143.74	0.00988	0.00302	44
2.5 years	3.670.7	447.19	151.32	0.01004	0.00318	46

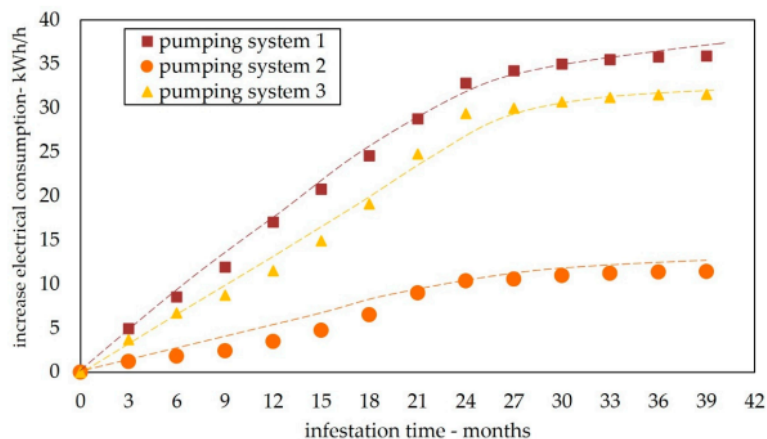


Figure 7. Increase in consumption in kilowatt hours (kWh) for each pump of the Elevated Pumping Station (EPS) of Rio Branco, after the beginning of the golden mussel (GM) bioinfestation, based on the data from Tables 4–6, and in view of the operating time, given in months.

Figure 8 shows the curve for the total daily consumption of the system with biofouling, considering operation for 12 h.

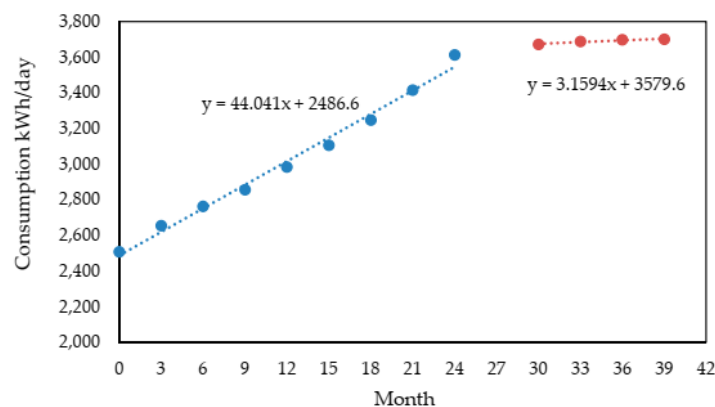


Figure 8. Total daily consumption rate of the Elevated Pumping System of Rio Branco, considering biofouling.

When analyzing the growth rate of the segregated bioinfestation in two different periods (0–24 and 27–30 months), it is possible to conclude that the growth rate of consumption is constant for the first 24 months. After this period, saturation of growth occurs and, the rate of loss is enhanced by the rate of detachment, which leads to a second period of equilibrium (30–39 months). The progression rate is noted to drop to close to 10% of the initial value (Figure 8).

After determining the consumption, it is possible to determine the cost of pumping per m^3 , knowing the price per kWh in the Acre State region to be USD 0.13 [53,54]. Using Equations (19) and (20), we can calculate the cost of pumping for the system without biofouling and with biofouling, respectively. Figure 9 shows the relationship between

energy consumption and cost of pumping, evaluating the two scenarios dealt with in this work.

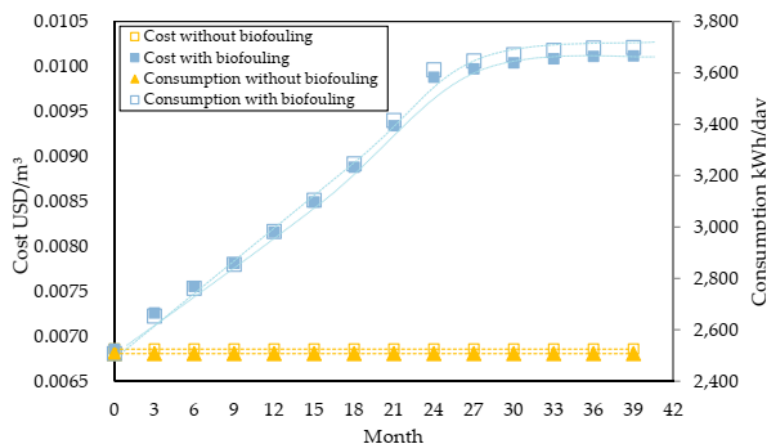


Figure 9. Daily consumption, in kilowatt hours per day (kWh/day), and cost of pumping, in dollars per cubic meter (USD/m³), for the Elevated Pumping Station of Rio Branco, including both a pumping system with and without golden mussel bioinfestation.

After 24 months of bioinfestation, the daily consumption of the pumping system stabilizes at a value of 3612 kWh/day, as opposed to the consumption of an uninfested (without biofouling) pumping system, which stabilizes at 2506 kWh/day. Similarly, the cost of pumping per m³ presents a steep increase in the first 24 months of operation, showing an increase of up to 0.0030 USD/m³ after colonization by the GM, which is equivalent to a 44% increase in costs.

The results show, for the first time, the damage caused by the GM with regard to energy efficiency. To date, there are no data on other biofouler mussels, especially zebra mussels (an invasive mussel in North America), that can help in the discussion of our data. However, there is a noticeable decrease in the energy efficiency of pumping systems caused by the GM, with an increase in cost of almost 46%, after 30 months of infestation. The data obtained here can also support the Ivancost database, helping to obtain more assertive conclusions about the ecosystem costs related to the GM. In the first report on the cost of invasions in Brazil, they point out the scarce economic data reported for invasive species. Both Adelino et al. (2021) [19] and Burloková et al. [18] point to the increase in costs caused by bioinfestation also affecting ecosystem services.

4. Conclusions

The methodology used was appropriate for the analysis of energy efficiency related to the presence of the golden mussel (GM) in a water pumping system. The complexity of the methodology, including the use of classical equations and the construction of new ones, allowed all of the objectives of this work to be achieved, even without the analysis of all the variables commonly used in the calculation of energy efficiency. Shell growth increases in the first year, and after that period, it suffers reductions in growth rate of 50% per year, stabilizing after the third year of life. This growth rate was corroborated by data from the literature and provided validation for the methodology of proportional relations between the measures performed in the target GMs. This was the starting point for the construction of new equations (three new equations), which allowed for the construction of roughness and thickness curves for biofouling, proving for the first time the relationship between the three elements (shell growth, roughness, and thickness of biofouling). The interference

of hydrodynamic drag (flow velocity) was fundamental for the above conclusion, since it causes the detachment of individuals, interfering with the progression of GM fixation (biofouling thickness). In fact, the thickness of the biofouling suffers velocity interference, and this has also been pointed out in the literature. In this study, we show that velocities above 3.8 m/s prevented increased biofouling thickness. This is important for the definition of mussel control and management strategies in pumping systems by controlling flow velocity. Another relevant point was that the size of the individuals did not directly interfere with the increase in roughness, but rather, with the formation of colonies (increased density, number of individuals/cm²). This was especially the case for pipes of smaller diameter, where the increase in density represented a large increase in the load loss factor, proving that bioinfestation (an increase in biofouling thickness) causes a reduction in the efficiency of the pumping system by decreasing the flow diameter. This reduction in diameter causes an increase in energy consumption so that the same flow is achieved. We consider the cost of biofouling for other industrial plant systems, for example, to be much higher than that presented here (almost 46% for 30 months of infestation), since the calculations were made for only one water treatment plant, with simple mechanical fluid systems (when compared with an HPP, for example) and without taking into account localized losses, which would cause an even greater increase in the costs of pumping. As an alternative to the problem presented, performing stops during the operation of the pumping system for corrective maintenance would be the first option, avoiding an increase in operational costs. Another option could be adopting selective pumping criteria, which prioritize pumps and systems with larger diameters, since these are less impacted by GM biofouling. The application of this strategy in our case study could have meant a reduction in the operation time of Pump 3, since this pump is connected to a pipe with a smaller diameter (300 mm) than the other two pumps studied. To compensate, Pumps 1 or 2 could stay activated for a longer time. This way, the pump that was most affected by the bioinfestation, Pump 3, could serve as a backup. Measures such as regular pumping system inspections reduce the advancement of GM bioinfestation, preventing an increase in operational costs. Considering that this study focuses on the water supply and distribution sectors of the Amazon region, we call attention to the negative impacts of GM bioinfestation and provide possible ways to deal with this situation. Linked to these characteristics, bioinvasion would be very harmful for this type of pumping system, due to the morphology of the uptake and the difficulty of maintenance. Here, we provide results that demonstrate the energy efficiency of pumping systems impacted by the golden mussel.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/en16041858/s1>.

Author Contributions: Conceptualization, T.R.C.d.S., R.O.P.S., T.H.D.A.V., A.S.B. and C.B.M.; Formal Analysis, T.R.C.d.S., T.H.D.A.V. and C.B.M.; Investigation, T.R.C.d.S., R.O.P.S. and C.B.M.; Methodology, T.R.C.d.S., J.T.M.d.A., R.O.P.S. and C.B.M.; Project Administration, T.R.C.d.S. and C.B.M.; Supervision, T.R.C.d.S., T.H.D.A.V., E.M.d.F.V. and C.B.M.; Validation, T.R.C.d.S. and C.B.M.; Visualization, T.R.C.d.S., A.S.B. and C.B.M.; Essay—Original Draft, T.R.C.d.S. and C.B.M.; Essay—proofreading and editing, T.R.C.d.S., J.T.M.d.A., E.M.d.F.V. and C.B.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by CNPq—license number PQ: 304370/2018-5/305059/2022-0; Fapemig—license number PPM-00252-18; SEFAC/ANEEL—license number PD-06899-2912/2016 and this study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Finance Code 001.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available in article or supplementary material.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

ABNT	Brazilian Technical Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
CI	Cast iron
EPS	Elevated pumping station
GM	Golden mussel
HDPE	High-density polyethylene
HPP	Hydroelectric power plant
<i>L. fortunei</i>	<i>Limnoperna fortunei</i>
PVC	Polyvinyl chloride
Sin	Sine
Inf	Infestation
Op	Operation
Incr.	Increment

Nomenclature

A	Area
bt	Biofouling thickness
C1	Pumping system consumption
C2	Pumping system consumption
C3	Incremental consumption
C4	Incremental costs
C5	Daily costs
C6	Total cost per trimester
C7	Pumping cost
D	Diameter
D _{vd}	Daily flow deficit
e	Roughness
f	Load loss factor
g	Gravity
H	Discharge head
ΔH	Load loss
H _{total}	Total height of elevation
L	Length
mca (m H ₂ O)	Meters of water
P	Power
P _{pump}	Power of the pump
Q	Flow
R _a	Average roughness
Re	Reynolds number
bs	Shell base
sh	Shell height
sl	Shell length
V	Velocity
γ	Water-specific weight
ν	Kinematic viscosity of water
η	Energy yield
Θ	Fixation angle
ind/cm ²	Individuals per square centimeter
L/s	Liters per second
m/s	Meters per second
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hour
m ²	Square meters
m ³	Cubic meters
mm	Millimeters
n	Number of constants

B_1	First root of the Buzzelli equation
B_2	Second root of the Buzzelli equation
log	Logarithm
ln	Neperian logarithm
T_{ab}	Additional pumping time

References

- Nakano, D.; Strayer, D.L. Biofouling animals in fresh water: Biology, impacts, and ecosystem engineering. *Front. Ecol. Environ.* **2014**, *12*, 167–175. [CrossRef] [PubMed]
- Xu, M.; Darrigran, G.; Wang, Z.; Zhao, N.; Lin, C.C.; Pan, B. Experimental study on control of *Limnoperna fortunei* biofouling in water transfer tunnels. *J. Hydro-Environ. Res.* **2015**, *9*, 248–258. [CrossRef]
- Cataldo, D.H. Larval Development of *Limnoperna Fortunei*. In *Limnoperna Fortunei*; Boltovskoy, D., Ed.; Invading Nature—Springer Series in Ecology of Invasions; Springer: Cham, Switzerland, 2015; Volume 10. [CrossRef]
- Choi, S.S.; Chin, C.N. Study on the early development and larvae of *Limnoperna fortunei*. *Korean J. Malacol.* **1985**, *1*, 5–12.
- Boltovskoy, D.; Morton, B.; Correa, N.; Cataldo, D.; Damborenea, C.; Penchaszadeh, P.E.; Sylvester, F. Reproductive Output and Seasonality of *Limnoperna fortunei*. In *Limnoperna Fortunei*; Boltovskoy, D., Ed.; Invading Nature—Springer Series in Ecology of Invasions; Springer: Cham, Switzerland, 2015; Volume 10, ISBN 978-3-319-13494-9. [CrossRef]
- Darrigran, G.; Damborenea, M.C. Ecosystem Engineering Impact of *Limnoperna fortunei* in South America. *Zool. Sci.* **2011**, *28*, 1–7. [CrossRef] [PubMed]
- Darrigran, G.; Agudo-Padrón, I.; Baez, P.; Belz, C.; Cardoso, F.; Carranza, A.; Collado, G.; Correoso, M.; Cuezco, M.G.; Fabres, A.; et al. Non-native mollusks throughout South America: Emergent patterns in an understudied continent. *Biol. Invasions* **2020**, *22*, 853–871. [CrossRef]
- Barbosa, N.P.; Ferreira, J.A.; Nascimento, C.A.; Silva, F.A.; Carvalho, V.A.; Xavier, E.R.; Ramon, L.; Almeida, A.C.; Carvalho, M.D.; Cardoso, A.V. Prediction of future risk of invasion by *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) in Brazil with cellular automata. *Ecol. Indic.* **2018**, *92*, 30–39. [CrossRef]
- Campos, M.; Andrade, A.; Kunzmann, B. Modelling of the potential distribution of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) on a global scale. *Aquat. Invasions* **2014**, *9*, 253–265. [CrossRef]
- National Energy Balance 2022. Available online: <http://www.epe.gov.br> (accessed on 10 August 2022).
- Boltovskoy, D.; Correa, N.; Cataldo, D.; Sylvester, F. Dispersion and Ecological Impact of the Invasive Freshwater Bivalve *Limnoperna fortunei* in the Río de la Plata Watershed and Beyond. *Biol. Invasions* **2006**, *8*, 947–963. [CrossRef]
- Oliveira, M.D.; Campos, M.C.S.; Paolucci, E.M.; Mansur, M.C.D.; Hamilton, S.K. Colonization and Spread of *Limnoperna fortunei* in South America. In *Limnoperna Fortunei*; Boltovskoy, D., Ed.; Invading Nature—Springer Series in Ecology of Invasions; Springer: Cham, Switzerland, 2015; Volume 10. [CrossRef]
- Boltovskoy, D.; Xu, M.; Nakano, D. Impacts of *Limnoperna Fortunei* on Man-Made Structures and Control Strategies: General Overview. In *Limnoperna Fortunei*; Boltovskoy, D., Ed.; Invading Nature—Springer Series in Ecology of Invasions; Springer: Cham, Switzerland, 2015; Volume 10, ISBN 978-3-319-13494-9. [CrossRef]
- GPS (Pipeline Study Group). *Biology of Golden Mussel (Limnoperna fortunei)*. *Animal's Use and Prevention*; Institute of Aquatic Organisms of the Chinese Academy of Sciences: Wuhan, China, 1973; pp. 33–36.
- Simeão, C.; De Resende, M.F.; Martinez, C.B. Variação das Características Hidráulicas em Condutos Forçados Operando sob Condições de Infestação por *Limnoperna fortunei*. *RBRH* **2011**, *16*, 13–24. [CrossRef]
- Usher, K.M.; Kaksonen, A.H.; Cole, I.; Marney, D. Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2014**, *93*, 84–106. [CrossRef]
- de Castro, A.L.P.; Serrano, R.O.P.; Pinto, M.A.; da Silva, G.H.T.; Ribeiro, L.D.A.; Viana, E.M.D.F.; Martinez, C.B. Case study: Abrasive capacity of *Limnoperna fortunei* (golden mussel) shells on the wear of 3 different steel types. *Wear* **2019**, *12*, 438–439. [CrossRef]
- Burlakova, L.E.; Karatayev, A.Y.; Boltovskoy, D.; Correa, N.M. Ecosystem services provided by the exotic bivalves *Dreissena polymorpha*, *D. rostriformis bugensis*, and *Limnoperna fortunei*. *Hydrobiologia* **2022**, *1*–44. [CrossRef] [PubMed]
- Adelino, J.R.P.; Heringer, G.; Diagne, C.; Courchamp, F.; Faria, L.D.B.; Zenni, R.D. The economic costs of biological invasions in Brazil: A first assessment. *Neobiota* **2021**, *67*, 349–374. [CrossRef]
- Diagne, C.; Leroy, B.; Gozlan, R.E.; Vaissière, A.-C.; Assailly, C.; Nuninger, L.; Roiz, D.; Jourdain, F.; Jarić, I.; Courchamp, F. InvaCost, a public database of the economic costs of biological invasions worldwide. *Sci. Data* **2020**, *7*, 277. [CrossRef] [PubMed]
- Koutsandreas, D.; Kleanthis, N.; Flamos, A.; Karakosta, C.; Doukas, H. Risks and mitigation strategies in energy efficiency financing: A systematic literature review. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 1789–1802. [CrossRef]
- Patterson, M.G. What is energy efficiency? *Energy Policy* **1996**, *24*, 377–390. [CrossRef]
- Oikonomou, K.; Parvania, M.; Khatami, R. Optimal Demand Response Scheduling for Water Distribution Systems. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2018**, *14*, 5112–5122. [CrossRef]
- Dadar, S.; Durin, B.; Almatian, E.; Plantak, L. Impact of the Pumping Regime on Electricity Cost Savings in Urban Water Supply System. *Water* **2021**, *13*, 1141. [CrossRef]

25. Martin-Candilejo, A.; Santillán, D.; Iglesias, A.; Garrote, L. Optimization of the Design of Water Distribution Systems for Variable Pumping Flow Rates. *Water* **2020**, *12*, 359. [\[CrossRef\]](#)
26. Hajibabaei, M.; Nazif, S.; Sereshgi, F.T. Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *43*, 538–549. [\[CrossRef\]](#)
27. Hu, J.; Dong, H.; Xu, Q.; Ling, W.; Qu, J.; Qiang, Z. Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy. *Water Res.* **2017**, *129*, 428–435. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Shankar, A.R.; Anandkumar, B.; Thinaharan, C.; George, R.P.; Rooby, J.; Philip, J.; Mudali, U.K. Corrosion Evaluation of Buried Cast Iron Pipes Exposed to Fire Water System for 30 years. *Trans. Indian Inst. Met.* **2019**, *73*, 9–21. [\[CrossRef\]](#)
29. Mahato, A.C.; Ghoshal, S.K. Energy-saving strategies on power hydraulic system: An overview. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control. Eng.* **2021**, *235*, 147–169. [\[CrossRef\]](#)
30. Morales-Hernández, M.; Playán, E.; Latorre, B.; Montoya, F.; Madurga, C.; de Rivera, A.S.; Zapata, N. Normalized pressure: A key variable to assess zebra mussel infestation in pressurized irrigation networks. *Agric. Water Manag.* **2022**, *260*, 107300. [\[CrossRef\]](#)
31. Moody, L.F. Friction factors for pipe flow. *Trans. AMSE* **1944**, *66*, 671–684. [\[CrossRef\]](#)
32. Colebrook, C.F.; White, C.M. The Reduction of Carrying Capacity of Pipes with Age. *J. Inst. Civ. Eng.* **1937**, *7*, 99–118. [\[CrossRef\]](#)
33. Mohebbi, H.; Li, C.Q. Experimental Investigation on Corrosion of Cast Iron Pipes. *Int. J. Corros.* **2011**, *2011*, 506501. [\[CrossRef\]](#)
34. Lucio, F.D.S.; Xavier, G.B.; Mesquita, A.A.; Moreira, J.G.D.V.; Dos Santos, W.L.; Serrano, R.O.P. Granulometric and morphological variation of the bottom sediments of the Acre River: Initial contributions to the hydrosedimentological study of a river channel in the southeastern Amazon. *UÁQUIR* **2020**, *2*, 80–98. [\[CrossRef\]](#)
35. Serrano, R.O.P.; Santos, L.P.; Viana, E.M.D.F.; Pinto, M.A.; Martinez, C.B. Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil's Acre River. *Wear* **2018**, *408–409*, 131–137. [\[CrossRef\]](#)
36. DEPASA. ECA Report. Available online: <https://www.ac.gov.br> (accessed on 3 March 2022).
37. Garton, D.W.; Johnson, L.E. Variation in growth rates of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, within Lake Wawasee. *Freshw. Biol.* **2000**, *45*, 443–451. [\[CrossRef\]](#)
38. Nakano, D.; Kobayashi, T.; Sakaguchi, I. Population dynamics and growth of *Limnoperna fortunei*. In *Limnoperna Fortunei*; Boltovskoy, D., Ed.; Invading Nature—Springer Series in Ecology of Invasions; Springer: Cham, Switzerland, 2015; Volume 10, ISBN 978-3-319-13494-9. [\[CrossRef\]](#)
39. Boltovskoy, D.; Cataldo, D.H. Population dynamics of *Limnoperna fortunei*, an invasive fouling mollusc, in the lower Parana river (Argentina). *Biofouling* **1999**, *14*, 255–263. [\[CrossRef\]](#)
40. Darrigran, G.; Maroñas, M. Crecimiento valvar de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) de una localidad de clima templado de la región neotropical. In: Darrigran, G.; Bonel, N.; Colautti, D.; Cazzaniga, N.J. An Alternative Method to Assess Individual Growth of the Golden Mussel (*Limnoperna fortunei*). *Wild J. Freshw. Ecol.* **2002**, *26*, 527–535. [\[CrossRef\]](#)
41. Mackie, G.L.; Claudi, R. *Monitoring and Control of Macrofouling Mollusks in Freshwater Systems*; CRC Press: New York, NY, USA, 2010; ISBN 978-04-2914-964-1. (In Portuguese)
42. Frões, C.L.; Duarte, M.S.C.; Branco, J.R.T. Estudo morfológico das estruturas envolvidas no mecanismo de adesão do *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). *Rev. Agroambiental* **2012**, *4*, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
43. ABNT NBR 10007; Association of Technical Standards: Sampling of Solid Waste. 2004, pp. 1–21. Available online: <https://wp.ufpel.edu.br> (accessed on 23 April 2022).
44. Simeon, C.M.G. Influence of the variation of speed and pressure on *Limnoperna fortunei* Dunker, 1857 (Bivalvia, Mytilidae) and verification of the effects of latex toxicity of *Euphorbia splendens* Var *hislopiae* N.E.B. (Euphorbiaceae) for this species. Ph.D. Thesis, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2011.
45. Castro, A.L.P. Study of speeds and Reynolds number for the detachment of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*). Ph.D. Thesis, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2013.
46. Adams, T.; Grant, C.; Watson, H. A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness. *Int. J. Mech. Eng. Mechatronics* **2012**, *1*, 66–71. [\[CrossRef\]](#)
47. Robertson, R.H.S.; Emödi, B.S. Rugosity of Granular Solids. *Nature* **1943**, *152*, 539–540. [\[CrossRef\]](#)
48. Han, X.; Kang, Y.; Li, D.; Zhao, W. Effects of surface roughness on self-excited cavitating water jet intensity in the organ-pipe nozzle: Numerical simulations and experimental results. *Mod. Phys. Lett. B* **2019**, *33*, 39. [\[CrossRef\]](#)
49. Mataix, C. *Hydraulic Turbochargers*; Universidad Pontificia Comillas: Madrid, Spain, 2009; ISBN 978-84-8468-252-3.
50. Buzzelli, D. Calculating friction in one step. *Mach. Des.* **2008**, *80*, 54–55.
51. Kaya, D.; Kılıç, F.; Öztürk, H.H. Energy Efficiency in Pumps. In *Energy Management and Energy Efficiency in Industry*; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 329–374. [\[CrossRef\]](#)
52. Xu, M.; Cao, X.W.; Wang, Z.Y.; Wang, X.Z. Attachment characteristics of golden mussels (*Limnoperna fortunei*) in water transport projects. *J. Tsinghua Univ. [Qinghua Daxue Xuebao]* **2012**, *52*, 170–176. (In Chinese)
53. ANEEL: Residual Tariffs. Available online: <https://app.powerbi.com> (accessed on 9 June 2022).
54. BCB: Quotes and Newsletters. Available online: <https://www.bcb.gov.br> (accessed on 9 June 2022).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ANEXO 02

AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM GRADES DE TOMADA D'ÁGUA COM INFESTAÇÃO DE LIMNOPERNA FORTUNEI – Disponível: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/clagtee/2017/articles/23-009.pdf>

Avaliação da perda de carga em grades de tomada d'água com infestação do *Limnoperna fortunei*

Souza, T.R.D.C.¹; Diniz, D.M.D.A.^{3,4}; Castro, A.L.P.²; Rico, E. A. M.¹; Tarqui, J.L.Z.¹ Martinez, C. B.¹. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); ²Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP); ³IBMEC; ⁴Centro Universitário UNA. ¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UMG, Departamento de Engenharia Mecânica. Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, Escola de Engenharia da UFMG. Avenida Antônio Carlos 6627. Belo Horizonte. Minas Gerais; ²Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto – Minas Gerais. taamarccosta@hotmail.com; denisemadiniz@gmail.com; anacastro@em.ufop.br; ing.andresmancilla@hotmail.com; martinez@cce.ufmg.br; jlztarqui@yahoo.com.br

Abstract - Brazil has in its energy matrix a large portion of hydroelectric generation, a portion that has been suffering for some time from the impacts caused by the infestation of *Limnoperna fortunei*, popularly known as golden mussel. This mollusk is an invasive species from South Asia, detected in South America in 1991 in the Rio de La Plata and since then its remains are found along all coast as well as ports and rivers throughout the Brazilian territory. This type of mussel, in addition to affecting the local fauna and flora has been causing problems through its incrustation in the pipes and conduits of all the hydroelectric network and also domestic. Its fixation often causes the clogging of pipes with the smaller diameters and in other cases the reduction of the internal diameter of the pipes, which causes an increase of load loss. There are several studies on how to control the infestation of the species, however, so far no reports have been made of any process that has eradicated or contained such infestation. This work presents an evaluation of the effect of scale in pipes of several diameters, being possible to determine the evolution of the factor of loss of load as a function of the infestation, varying it according to the number of layers of incrustation. The results show that the smaller the pipes, the greater the impacts related to the losses and the efficiency, both, when compared to systems without any type of incrustation. In many cases there may be a problem of occlusion of the pipes, causing system clogging. For larger diameters, the impact is proportionately smaller. However, as the number of scale layers increases there is an increase in the loss of charge in the system. It is important to emphasize that the mollusc in study, presents high proportions of infestation and is able to survive, develop and grow under different conditions, requiring new and constant observations regarding its progress on the hydrographic basins in Brazil.

Keywords: Golden Mussel, Embedding, Hydropower

I. INTRODUÇÃO

Ação antrópica sobre os rios e lagos tem sido a causa de uma progressiva degradação de ambientes. Dentre os impactos causados por ação humana tem-se a bio-invasão do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (DUNKER, 1857) que é um molusco bivalve de água doce pertencente à família Mytilidae, exótico no continente americano e originário da China. Esse organismo vivo teve provavelmente sua introdução no continente Sul Americano, por meio da água de lastro de navios [1] e [2], por volta de 1991 na Argentina. A espécie pode atingir aproximadamente 40 mm de comprimento valvar e tem como características a alta capacidade reprodutiva, o crescimento acelerado e a capacidade de aderir a diversos tipos de substratos sólidos, onde aglomerados compostos por vários indivíduos se formam, recobrendo extensas áreas. Não raro, podem atingir concentrações superiores a 400.000 indivíduos/m² [3]. Por tratar-se de um bivalve filtrador, também pode provocar alterações nos ecossistemas aquáticos em que se instala causando o aumento da transparência da água e alterações da cadeia alimentar [4]. Além de causar graves danos ao meio ambiente a presença deste invasor vem ameaçando vários setores econômicos, sendo um deles o hidrelétrico. Com a infestação do mexilhão dourado e a dissipação de comunidades desse molusco a incrustação acaba obstruindo as tubulações provocando danos a motores, embarcações, redes tradicionais de pesca, filtros, equipamentos industriais e outros tantos. Em Usinas Hidrelétricas, o mexilhão dourado atinge tubulações e filtros, sistemas de resfriamento, grades de tomada d'água e vários outros tipos de equipamentos, provocando perdas de carga, corrosão, pelo acúmulo de material retido, aumento na frequência de limpeza e manutenção e conseqüentemente aumento de custos [5].

De acordo com [6] várias ações de controle são aplicadas a fim de se eliminar ou controlar o aparecimento / crescimento do mexilhão dourado. Algumas ações utilizaram sistemas com descarga elétrica, compostos tóxicos, eletromagnetismo, altas temperaturas, turbulência,

ultrassom, desoxigenação da água, etc.. Apesar disso nenhuma dessas alternativas se mostrou um sucesso absoluto. Isso se deve ao fato de muitos desses métodos apresentarem dificuldades de operação, elevados custos e no caso dos compostos tóxicos um residual preocupante no meio ambiente. Como no ambiente natural existem muitos fatores que não podem ser controlados e que atuam na sobrevivência desse organismo, ainda não se conhece uma condição favorável para eliminação do molusco sem comprometer outras espécies, por isso, se torna tão necessário o entendimento de como ele se comporta e como sua evolução afeta os diversos setores de atividade humana. No caso do setor hidrelétrico a infestação acarreta inúmeros prejuízos principalmente àqueles relacionados com o aumento das perdas de carga que resultam em uma redução da eficiência global da instalação.

Um dos componentes das usinas hidrelétricas que são muito afetados pela infestação do mexilhão dourado são as grades de tomadas d'água. Essas grades têm papel fundamental na proteção do grupo gerador de uma usina. Situam-se na entrada da tomada d'água ou do canal de adução, impedindo a passagem de objetos que possam danificar peças da turbina em movimento. Entretanto, apesar de sua importância, no que tange à proteção física dos equipamentos, as grades influem no rendimento hidráulico da usina gerando uma perda de carga localizada no sistema. Essa perda é contabilizada na fase de projeto e faz parte do sistema de geração. Com o aparecimento do *Limnoperna fortunei*, esta perda de carga passou a ter um acréscimo significativo, podendo chegar a níveis de comprometimento da continuidade de operação da usina. Além disso, a redução da área livre, pela incrustação dos mexilhões e pelo acúmulo de resíduos no local, provoca um aumento na força de arraste, podendo ocasionar o rompimento da mesma.

Segundo [1] a perda de carga global em grades planas, compostas de barras de formas diversas, colocadas em um conduto retilíneo, compreende as perdas na entrada, em função da redução do vão para escoamento da água, as perdas por atrito na superfície das barras e as perdas pelo brusco alargamento à saída da seção estreita entre as barras. Ela ainda depende de vários outros fatores relacionados à construção da grade, tais como: espessura e forma das barras, velocidade de aproximação do escoamento e ângulo de colocação da grade em relação à direção do escoamento, etc..

II. METODOLOGIA

Para determinação da perda de carga nas grades de tomada d'água, foi adotada a metodologia descrita através da Figura 1 e da Equação 1. Esta metodologia consiste em avaliar a variação da coluna de lâmina d'água a montante e a jusante da grade, sendo a diferença entre elas a perda de carga observada no experimento.

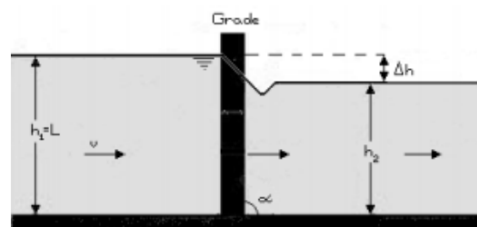


Fig. 1. Parâmetros para avaliação da perda de carga em grades, adaptado de [7].

$$\Delta h = \phi \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \frac{v^2}{2g} \operatorname{sen} \alpha \quad (1)$$

Onde:

Δh = perda de carga (m);

s = espessura da barra vertical (m);

b = espaço livre entre as barras (m);

v = velocidade média de aproximação do escoamento (m/s);

ϕ = é o coeficientes de perda de carga da barra.

α = ângulo de inclinação entre a grade e a linha horizontal, visto da lateral do canal (em graus);

Através da Equação 1, é possível determinar os valores de perda de carga e compará-los aos obtidos a partir da montagem do experimento do canal de tomada d'água. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático da montagem do canal. A Figura 3 mostra em detalhe o experimento conduzido em um modelo de grade de tomada d'água infestada por mexilhão dourado.

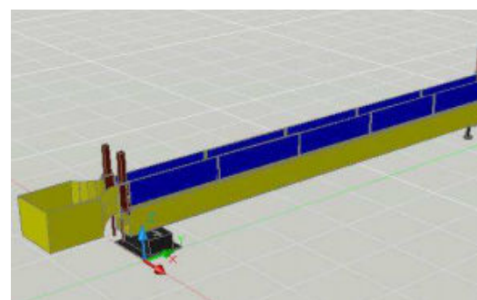


Fig. 2. Esquema de montagem do canal de tomada d'água, adaptado de [7]

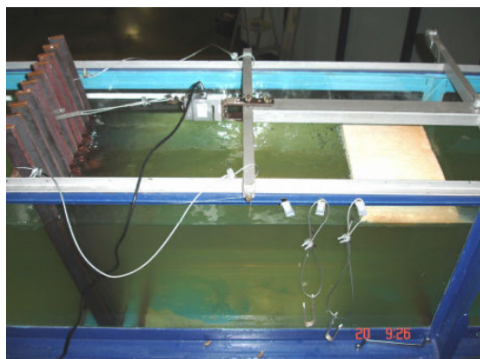


Fig. 3. Detalhe das grades de tomada d'água, adaptado de [7].

Para a realização dos ensaios inicialmente estabeleceu-se uma lâmina d'água no canal que permitisse a realização das medições na grade. Essa lâmina d'água tem no mínimo 300 mm. Na região central do canal foi fixada a estrutura metálica. Na lateral do canal, em local de fácil acesso, foi afixado um papel milimetrado com indicação feita por meio de ponta limimétrica apresentando as profundidades de lâmina d'água e a inclinação das grades. Em seguida, os modelos de grades foram introduzidos no canal, no local apropriado. Já a parte superior das grades foi mantida em balanço, para permitir o seu movimento devido à força de arrasto que a água impõe ao sistema durante o experimento. Na parte superior da grade, na região central da peça soldada horizontalmente às barras verticais, foi acoplada uma "alça" por meio do gancho de alumínio, no tamanho calibrado de forma a fornecer a inclinação de 90°, 80°, 70° e 60° com a horizontal. Esta alça estava acoplada, em sua outra extremidade, à célula de carga, permitindo a leitura da força de arrasto provocado pela ação da água sobre a grade. Foram realizados cinco ensaios para cada taxa de infestação. Os ensaios fornecem os dados de força de arrasto, perda de carga das grades frente às diversas inclinações da grade. Foram ensaiadas grades com barras de 6,35 mm (1/4") de espessura e com espaçamento vertical entre as barras de 50 mm. A grade tem largura de 395 mm e altura molhada da grade variável em função da inclinação, conforme apresentado na Tabela 1. A altura de lâmina d'água no canal é de 300 mm.

TABELA I
ALTURA MOLHADA DA GRADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO EM GRAUS

Ângulo inclinação (graus)	Altura molhada da grade (mm)
60	346
70	319
80	305
90	300

Fonte: Adaptado de [7]

O ensaio foi conduzido sob uma condição de vazão no canal de 0,07 m³/s, já que a máxima rotação da bomba é de 3500 rpm, que impõe uma velocidade de 0,59 m/s durante o ensaio.

III. RESULTADOS

A partir das medições realizadas no canal de tomada d'água, têm-se a média dos valores de perda de carga para cada situação. A Tabela 2 apresenta a variação da perda de carga da grade em função das inclinações utilizadas no experimento. A Tabela 3 mostra os valores dos coeficientes de perda de carga da grade em função das inclinações utilizada.

TABELA II
MÉDIA DA PERDA DE CARGA DADA EM MILIMETROS, PARA CADA INCLINAÇÃO E TAXA DE INFESTAÇÃO DO MEXILHÃO DOURADO EM INDIVÍDUOS / CM² (VALORES MEDIDOS).

Inclinação da grade	Taxa infestação ind/cm ²		
	0	1	3
Graus	Perda de carga		
60	1,0	12,5	43,0
70	0,5	13,5	55,6
80	1,0	12,0	54,0
90	2,5	10,0	52,0
Σ (desvio padrão)	0,866	1,472	5,629

Fonte: Adaptado de [7]

TABELA III
MÉDIA DA PERDA DE CARGA DADA EM METROS, PARA CADA ÂNGULO ENTRE A GRADE DE TOMADA D'ÁGUA E A LINHA HORIZONTAL E TAXA DE INFESTAÇÃO DO MEXILHÃO DOURADO EM INDIVÍDUOS/CM².

Inclinação da grade	Taxa infestação ind/cm ²		
	0	1	3
Graus	Valor de Teta coeficiente de perda de carga da grade		
60	1,0194	12,7428	43,8351
70	0,4698	12,6833	52,2364
80	0,8965	10,7576	48,4091
90	2,2071	8,8285	45,9080
Σ (desvio padrão)	0,7442	1,8609	3,6142

Fonte: Adaptado de [7]

IV. CONCLUSÕES FINAIS

Pelos resultados obtidos nos ensaios é possível verificar que a perda de carga na grade sofre um acréscimo considerável na medida que a infestação pelo mexilhão dourado progride. Assim, para infestações com 1 ind/cm², dependendo do ângulo de posicionamento das grades, a perda de carga e o coeficiente de perda de carga aumentam de 4 a 27 vezes da condição de não infestação. No caso de infestações com 3 ind/cm², dependendo do ângulo de posicionamento das grades, a perda de carga e o coeficiente de perda de carga aumentam de 20 a 100 vezes da condição de não infestação. Também é possível se verificar a grande influência que a inclinação da grade tem sobre a perda de carga na mesma. A situação que se tem maior variação da perda de carga em função da evolução da infestação foi para a inclinação de 70 graus.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à ANEEL, à CEMIG, à ELETROBRAS-FURNAS, a FAPEMIG ao CNPq, CAPES e a Fundação GORCEIX pelo suporte financeiro para a realização desse trabalho.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] IDELCIK, I. E. - Memento des pertes de charge - Coefficients de pertes de charge singulières et pertes de charge par frottement. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité De France - Eyrolles - Editeur Paris, Paris, 1979.
- [2] DARRIGRAN, G.; AND DAMBORENEA, C. Introdução a biologia das invasões. O mexilhão dourado na américa do sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle. Cubo editora. São Carlos, P. 1-246. (2009).
- [3] ISHIKAWA, W. 2015. Moluscos Bivalves. Disponível em <http://www.planetainvertebrados.com.br>. Acesso em: 23 de agosto de 2015.
- [4] SYLVESTER, F.; DORADO, J.; BOLTOVSKOY, D.; JUÁREZ, A.; CATALDO, D. - Filtration rates of the invasive pest bivalve *Limnoperna fortunei* as a function of size and temperature - *Hydrobiologia*, 534, p 71-80, Springer, 2005.
- [5] BONAFÉ, R.A.; UEDA, R.R.; LÓPEZ, L.E.U.; MUSTAFÁ, A.L.; MACHADO, C. Efeitos da utilização de revestimento antiincrustante no controle do mexilhão dourado na confiabilidade de equipamentos e redução de custos de manutenção. In: XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 14 a 17 de Outubro, 2007.
- [6] BOLTOVSKOY, D.; XU, M.; NAKANO, D. Impacts os *Limnoperna fortunei* on man-made structures and control strategies: general overview. In: BOLTOVSKOY (Ed.) *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly invasive fouling mussel. Argentina: Springer, 2015. P.375-393.
- [7] DINIZ, M.A.D. Verificação da influência da infestação do mexilhão dourado nas grades de tomadas d'água. Dissertação Mestrado Programa de Pós Graduação Saneamento e Recursos Hídricos UFMG.(2010).

VII. BIOGRAFIAS



Tâmara Rita Costa de Souza: Engenheira Mecatrônica, formada pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2013). Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração: Energia e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Minas Gerais (2016). Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Atua principalmente nos seguintes temas: Engenharia Mecânica, Recursos Hídricos e

Recursos Energéticos.



Denise Maciel de Almeida Diniz: Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (1985). Mestre no Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na Universidade Federal de Minas Gerais, na área de concentração Hidráulica e Recursos Hídricos (2010). Atualmente é professora na área de fluidos no Centro Universitário UMA, e professora na área de fluidos na Faculdade IBMEC.



Ana Leticia Pilz de Castro: Engenheira Sanitarista e Ambiental, formada pela Universidade Federal de Mato Grosso (2010). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, área de concentração: Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2013). Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de

Minas Gerais. Atualmente é professora do departamento de engenharia civil da UFOP.



Edwin Andrés Mancilla Rico: Possui graduação em Engenharia Ambiental - Universidad Manuela Beltrán (2007), especialização em Planejamento Ambiental e Gestão dos Recursos Naturais - Universidad Militar Nueva Granada (2009) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, área de concentração Hidráulica e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais (2013). Doutorando do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - UFMG. Tem experiência na área de engenharia ambiental, execução e avaliação de projetos e Ciências Ambientais. Atua principalmente nos temas: Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos, Recursos Energéticos e Engenharia Ambiental.



Jorge Luis Zegarra Tarqui: Possui graduação em Engenharia Mecânica de Fluidos - Universidad Nacional Mayor de San Marcos (1992), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (1996) e doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2001). Foi Professor da Universidade Católica do Salvador (UCSal) e da Universidade do Estado da Bahia (UNEB). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Tem experiência na área de Engenharia Recursos Hídricos, com ênfase em Gestão de Recursos Hídricos e Hidráulica, atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento integrado de recursos hídricos, engenharia de sedimentos, hidráulica experimental, participação e educação ambiental.

ANEXO 03

METODOLOGIA PARA FIXAÇÃO DE CARÇAÇAS DE MEXILHÃO DOURADO NA CONFECCÃO DE MODELOS FÍSICOS – Disponível em: [link](#)THE 12th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2017

1

Metodologia para fixação de carcaças de mexilhão dourado na confecção de modelos físicos

D. M. A. Diniz¹; R. O. S. Perea²; T.R. Costa³; A. P. M. Saliba⁴; C. B. Martinez⁵ e S. A. Coelho⁶

Abstract -- The golden mussel (MD) is invasive in the American continent, observed for the first time in 1991, Rio La Plata, Argentina, presenting high reproductivity, fast growth and ability to adhere to solid substrates, forming agglomerates with up to 150,000 individuals / m². Their larvae are microscopic, free, living under water effects for their dispersal. Its incrustations have caused damages in all places where contaminated water circulates. Studies are being developed to know the invader and control its spread. Despite the latest scientific advances, there is still no universal theory that models complex systems considering aspects such as constituents heterogeneity and interactions with other systems. Physical models are considered appropriate for some studies. For example, the influence of MD on hydraulic systems is worked with colonies of dead and stabilized individuals, eliminating risks of contamination and mortality. However, the carcasses are fragile to handle and suffer dimensional variations due to breakage and compromise the results. This work presents procedures to generate colonies of similar appearance to the real aggregates and resistant to water flow high velocities. The proposed technique was used by researchers for UFMG Hydraulic and Water Resources Research Center presenting satisfactory results with possibility of reuse of the colonies.

Index of terms — Animal behavior; Environmental monitoring; Modeling; Pest control.

I. NOMENCLATURA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
 CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento;
 CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG;
 ind – indivíduo;
 MD – Mexilhão dourado;
 UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;

II. INTRODUÇÃO

ma invasão biológica ocorre quando animais, plantas ou microrganismos, nativos de um determinado lugar, são levados para outro onde não há predadores ou parasitas para limitar sua população que, sem esse controle natural, acaba afetando o

ambiente, a economia e a saúde do homem, além de comprometer, de forma impactante, a biodiversidade do planeta [1].

O mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei*, espécie descrita por Dunker em 1857, é um molusco bivalve de água doce pertencente à família *Mytilidae*, invasor biológico no continente americano, sendo originário da China e tendo sido introduzido neste continente, provavelmente, por meio da água de lastro de navios [2]. A espécie pode atingir aproximadamente 40 mm de tamanho e tem como características a alta capacidade reprodutiva, o crescimento rápido e a capacidade de viver aderida a diversos tipos de substratos sólidos, onde forma aglomerados compostos por vários indivíduos, que recobrem extensas áreas chegando a atingir, em alguns casos, concentrações superiores a 150.000 ind/m² [3]. Esta capacidade de aderência está diretamente associada à sua produção de bisso, uma rede de fios interligados, produzidos pela glândula bissal, que fixam os bivalves aos mais diversos substratos. É composto, principalmente, por colágeno, uma substância proteica que contém glicina e prolina, substâncias estas possuidoras de sítios de ligação potencial para metais e que polimeriza na presença de ar [4]. O MD é capaz de segregar quantos bissoos forem necessários para sua efetiva fixação ao substrato selecionado. Possui larvas microscópicas livres e planctônicas, isto é, não possuem capacidade própria de locomoção e vivem sob o efeito do movimento da água, o que favorece a sua dispersão no ambiente aquático, e ainda por meio da água de lastro de navios, aderida a embarcações ou através da propagação por peixes e aves aquáticas. Na América do Sul, o MD vem se dispersando a uma taxa média de 240 km/ano [5]. Por tratar-se de um bivalve filtrador, também pode provocar alterações nos ecossistemas aquáticos em que se instala, pelo aumento da transparência da água, e alterações da cadeia alimentar [6].

Segundo Andersen *et al.*, 2004, citado por [7], o processo de invasão biológica pode ser dividido em quatro partes:

- U • A entrada do indivíduo, caracterizada pelo momento quando efetivamente a espécie chega a um ou mais pontos do novo ecossistema;
- O estabelecimento, caracterizado pelo início da reprodução da espécie e pela sua constante tentativa de escapar da extinção no novo ambiente;
- A dispersão, quando a espécie passa a ocupar os *habitat's* disponíveis; e
- O impacto, quando a espécie persiste e passa a competir no novo ambiente.

¹ Ibmec e Centro Universitário UNA (denisemadiniz@gmail.com).

² Universidade Federal do Acre (ropereas@gmail.com).

³ UFMG (tamararccosta@hotmail.com).

⁴ UFMG (asaliba@chr.ufmg.br).

⁵ UFMG (martinez@cce.ufmg.br).

⁶ UFMG (stenio-augusto@hotmail.com).

Além disso, para que haja êxito nas invasões biológicas, Morton (1996), citado por [3], lista algumas características que tais espécies devem ter, quais sejam:

- Vida de alcance curto, por exemplo, de 2 a 3 anos;
- Rápido crescimento;
- Rápida maturidade sexual (tipicamente uma estratégia sexual dióica com ocasional hermafroditismo);
- Alta fecundidade;
- Capacidade de colonizar uma vasta gama de *habitat's*;
- Grande tolerância fisiológica, ou seja, adaptação a grandes variações de temperatura;
- Comportamento gregário;
- Alguma forma de associação com as atividades humanas;
- Ampla variabilidade genética e plasticidade filogenética;
- Boa capacidade de suspensão de alimentação;
- Capacidade para repovoar *habitat's* anteriormente colonizados.

Os invasores bivalves, em geral, apresentam muitas das características acima. Além disso, eles também são capazes de superar as transições que sequenciam as etapas da invasão com alto índice de êxito. Este é o caso do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) no continente americano, cuja aparência geral e forma estão apresentadas na Fig. 1.

Tem-se observado, ao longo destes anos de estudos no continente americano, que o MD tem se fixado e causado danos não só nas usinas hidrelétricas, mas em todos os locais por onde circula a água por ele colonizada. Além de causar graves danos ao meio ambiente com alterações nos ecossistemas aquáticos, a presença deste invasor vem ameaçando vários setores econômicos, como, por exemplo, obstruindo tubulações de sistemas de abastecimento de água (como na CORSAN), obstruindo sistemas de irrigação, provocando danos a motores e embarcações, incrustando em redes tradicionais de pesca, obstruindo filtros e outros equipamentos industriais e prejudicando, em vários aspectos, a geração de energia hidrelétrica. Em Usinas Hidrelétricas, o mexilhão dourado adere em diversas estruturas e, pela sua facilidade de dispersão, atinge tubulações e filtros, sistemas de resfriamento, grades e vários outros tipos de equipamentos, provocando perdas de carga, corrosão, pelo acúmulo de material retido, necessidade de aumento na frequência de limpeza e manutenção e consequente aumento de custos [10].

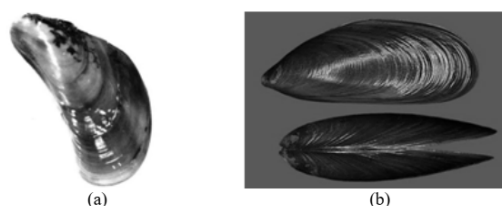


Fig. 1. *Limnoperna fortunei* (a) adulto ainda vivo [8] e (b) vistas frontal e lateral de um indivíduo morto ou carcaça [9].

Sua presença na forma de incrustações, como mostradas na Fig. 2, têm provocado prejuízos em várias áreas, devendo ser desenvolvidos estudos no sentido de conhecer mais profundamente o invasor e controlar sua disseminação.

Segundo [11], normalmente, o controle de pragas de moluscos em alguns países é realizado através de descargas elétricas, venenos muito tóxicos, eletromagnetismo, altas temperaturas e ultrassom, métodos estes que apresentam dificuldades de operação, elevados custos e, no caso dos venenos, toxicidade residual no meio. No ambiente natural há muitos fatores que não podem ser controlados e que atuam na sobrevivência dos organismos. Portanto, ainda não se conhece uma condição favorável de se eliminar o molusco no ambiente natural sem comprometer outras espécies.

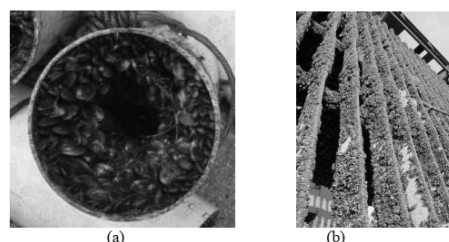


Fig. 2. Incrustação de mexilhão dourado (a) em tubulações [1] e (b) em grade de tomada d'água de usina hidrelétrica, foto de Rodrigo de Fellipo em [12].

Por este motivo, estudiosos de diversas áreas em vários estados do Brasil e na Argentina, desde 1993, apresentam trabalhos científicos objetivando avaliar os impactos provocados e visando desenvolver técnicas de controle biológico, dentre outros objetivos paralelos [13]. Estes estudos são realizados com indivíduos vivos. Para isso foi instalado na UFMG um laboratório de biossegurança. Testes com mexilhões vivos foram realizados em usinas contaminadas para determinação da velocidade de retirada dos indivíduos pela força da água que foi definida como sendo próximo de 2,8 m/s. [14] Mas a grande maioria dos testes relativos a perdas de carga, interferências na produção de energia hidrelétrica e no abastecimento de água urbana, são realizados por meio de modelos com a utilização de carcaças estabilizadas de mexilhões dourados mortos.

Modelos para estudos podem ser classificados em mental, simbólico ou físico. Modelos mentais são baseados em questionamentos mentais e intuitivos, individuais ou em grupo, sendo confusos, complexos, incompletos, instáveis e imprecisos, não acessíveis de forma direta e sim por meio de ações, da fala, da escrita ou outras formas simbólicas. Modelos mentais não são considerados científicos conforme [15] e Norman, 1983, citado por [16]. Modelos simbólicos ou conceituais tratam de uma primeira abordagem para entendimento de um sistema real e são baseados apenas em formalismo conceitual [17].

Já os modelos físicos são uma descrição do sistema real por meio de uma representação análoga ou pela construção de um protótipo [18]. A utilização científica destes modelos físicos deve resultar em dados que possam fornecer forças, quantidades de movimento e cargas dinâmicas existentes no sistema real analisado. E podem ser realizados em tamanho real ou em escala, desde que sejam geométrico, cinemático e dinamicamente semelhantes [19].

Para realização dos estudos mencionados, observou-se que os modelos físicos são os mais apropriados, apesar de suas limitações. Porém, não existe ainda uma teoria universal para modelar sistemas tão complexos e que leve em conta todos os aspectos, desde a heterogeneidade dos elementos constituintes até as interações com outros sistemas e, em especial, com o ambiente, conforme Chu *et al.*, citado por [20]. As colônias dos mexilhões são agregados disformes, não seguindo um padrão de fácil reprodução, inclusive por meio computacional, e sofrem constantes influências do ambiente (intempéries, mudanças de direção preferencial do movimento das águas, sedimentação natural dos rios e represas, ataques de outros animais ou do próprio homem no seu combate, dentre outros), modificando sua forma de integração e agregação constantemente.

Em locais onde não há ainda a infestação do MD, para evitar uma possível e provável contaminação, é recomendável trabalhar com as carcaças de indivíduos mortos, já que eles se dispersam e se adaptam a novos ambientes com extrema facilidade. Como eles possuem curto período de vida, é fácil obter estas carcaças, porém, elas se apresentam frágeis para o manuseio e, conseqüentemente, também para realização de certos testes, sendo que resultados de trabalhos realizados podem ficar comprometidos.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma técnica de modelagem física adequada, cujos modelos finais obtidos se apresentaram com aparência similar aos agregados reais observados, além de apresentar outros aspectos positivos, como resistência a fatores como a alta velocidade do escoamento da água entre as colônias. Diversos pesquisadores utilizaram essa técnica e obtiveram resultados satisfatórios e sem destruição das carcaças e das colônias o que possibilitou a reutilização dos arranjos de colônias de mexilhões em vários ensaios.

III. METODOLOGIA E RESULTADOS

As colônias de mexilhões foram artificialmente instaladas em trechos de grades similares àquelas utilizadas em tomadas d'água de usinas hidrelétricas. As carcaças fixadas foram originárias de indivíduos mortos, cedidas pela Itaipu Binacional. Por se tratar de material de descarte e também por efeitos do transporte até o CPH, as carcaças de mexilhões utilizadas estavam bastante quebradas e aderidas entre si por meio dos biscoitos secos e a uma grande quantidade de detritos, o que exigiu uma meticulosa "limpeza" e seleção de apenas carcaças inteiras para o procedimento final de colagem. A Fig. 3 apresenta a situação descrita.



Fig. 3. Carcaças de mexilhões: (a) material descartado e (b) carcaças selecionadas.

Foi feita uma análise qualitativa da população de mexilhões, para observar se ela correspondia à uma população característica de MD. Para isto, foi utilizado o método do quarteamento da amostra, que é um procedimento de redução de amostras a pequenas porções representativas da amostra inicial. No caso, o quarteamento foi efetuado manualmente e segundo o seguinte procedimento, determinado por [21], e também ilustrado na Fig. 4:

- Colocou-se grande parte do material selecionado sobre um papel perfeitamente limpo, de modo que os mexilhões se dispusessem sob a forma de um cone;
- Com a ajuda de uma espátula e fazendo pressão no vértice do cone, obteve-se um cone truncado;
- Dividiu-se o cone truncado em 4 partes iguais (utiliza-se geralmente 4, 8 ou outro número par de partes);
- Retirou-se metade das partes obtidas, opostas entre si e descartou-se; misturou-se as duas partes restantes obtendo-se uma nova amostra, menor e recomenceu-se o processo até se reduzir a amostra à quantidade desejada.

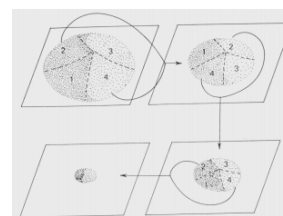


Fig. 4. Processo de quarteamento [23].

Com relação ao tamanho da amostra a ser analisada, a opção foi uma amostragem não probabilística, por se tratar de um processo sem definição de dimensão final, apenas para fins de comparação qualitativa do material selecionado com uma população real de mexilhões e assim viabilizar sua utilização científica [22].

Após o quarteamento, os indivíduos da amostra obtida foram selecionados em faixas de comprimento com a utilização de um paquímetro digital. Foram analisados os 793 indivíduos da amostra obtida e as medidas foram realizadas segundo orientação do *US Army Corps of Engineers*, em que o comprimento do indivíduo adulto deve ser medido do seu umbo anterior à região posterior, onde se localiza o sifão, conforme apresentado na Fig. 5.

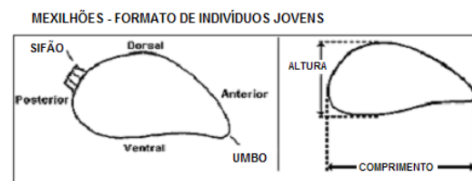


Fig. 5. Orientação para medição de indivíduos adultos de mexilhões [24].

A amostra obtida, medida e selecionada se apresentou como mostrado na Fig. 6. Os dados foram aplicados em um gráfico (Fig. 7) e comparados com outros dois estudos (gráficos das

Figs 8 e 9) representativos de populações de mexilhões estudados por [25] e [26] em ambiente natural.

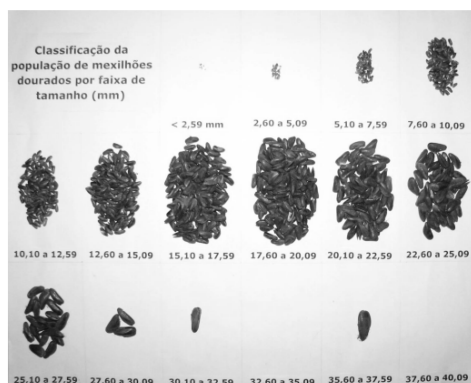


Fig. 6. População obtida por quarteamento e selecionada por tamanho.

A população apresentada por [25] apresenta-se em três estágios: inicialmente, em setembro de 1994, uma população concentrada em tamanhos maiores de mexilhões, onde o pico de frequência se dá com 22 mm. Em seguida, em torno de um ano depois, agosto de 1995, já aparece uma população mais jovem se introduzindo no ecossistema e os mais velhos ainda em crescimento, sendo que o pico de frequência foi para 26 mm. Por último, mais ou menos um ano depois, julho de 1996, a população jovem se sobressaindo, estando o pico de frequência em 16 mm e constatando a mortalidade da população com aproximadamente dois anos de vida.

A população estudada por [26], apresenta-se com uma distribuição semelhante à obtida na classificação efetuada, porém com indivíduos mais jovens, em torno de 1 ano de vida, com frequência maior para o tamanho em torno de 11 mm.

Considerou-se que a população obtida pela classificação das carcaças de indivíduos mortos cedida pela Itaipu Binacional é bastante representativa de uma população de mexilhões dourados, em idade adulta, podendo ser utilizada cientificamente para as infestações necessárias ao experimento.

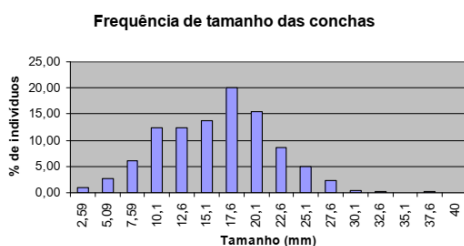


Fig. 7. Gráfico da distribuição de tamanho da população de carcaças de mexilhões recolhidos em Itaipu, após limpeza e classificação para colagem nas grades.

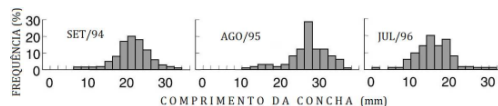


Fig. 8. Gráficos da distribuição de tamanho da população de mexilhões dourados no sistema Lago Biwa-Rio Yodo, Japão, em 2001 [25].

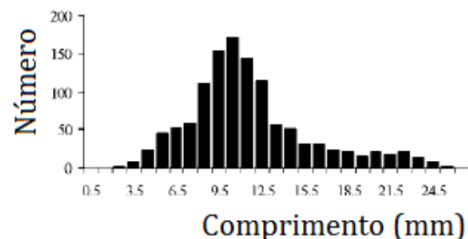


Fig. 9. Gráfico da distribuição de tamanho da população de mexilhões dourados no Rio de La Plata, Argentina, em 1995 [26].

Os mexilhões foram manualmente colados nas grades citadas, simulando as incrustações naturais, com o emprego do adesivo de secagem rápida Araldite® [27], de forma que a densidade apresentada ao final fosse a mais uniforme possível, seguindo o padrão geralmente observado nas incrustações ocorridas em vários substratos. Foram experimentadas grades com os graus de infestação de 1,0 ind/cm² e 3,0 ind/cm², correspondendo a 10.000 ind/m² e 30.000 ind/m², respectivamente.

A colagem das carcaças do mexilhão dourado nas grades no grau de infestação 1 ind/cm² se deu sem problemas, por se tratar da aplicação de apenas 1 camada de indivíduos na superfície metálica, a não ser pelo processo ser extremamente artesanal e, conseqüentemente, demorado. Já no caso da infestação de 3 ind/cm², apresentou-se uma dificuldade adicional. Enquanto a primeira infestação se dava em apenas uma camada, a de 3 indivíduos/cm² teve que ser estabelecida em até mais de duas camadas, dependendo do tamanho dos mexilhões selecionados para a colagem, o que foi feito de forma aleatória. A dificuldade residiu na impossibilidade de se fazer essa colagem em camadas com o adesivo inicialmente selecionado, o Araldite® de secagem rápida. Esse adesivo apresenta uma alta viscosidade, o que dificulta a sua distribuição sobre a primeira camada de carcaças, cheia de reentrâncias, para possibilitar a colagem da segunda camada antes de sua secagem. Quando da necessidade de inclusão da terceira camada a dificuldade foi ainda maior. Foram feitos vários testes com solventes para o adesivo Araldite®, indicados pela Brascola, fabricante do produto, porém como as dissoluções eram limitadas a 10% em volume, estas não foram suficientes para promover uma fluidificação adequada do adesivo para aplicação sobre as camadas já aderidas às grades.

Finalmente conseguiu-se uma solução eficiente e que também promoveu um benefício adicional ao experimento. Passou-se a fazer a colagem da primeira camada, diretamente na grade, com o adesivo de secagem rápida Araldite®, por ser o de melhor aderência metal-carcaças, estudado por [27]. Após

a secagem do adesivo da primeira camada, o restante das carcaças, que complementavam a infestação de 3 ind/cm², foram coladas sobre a primeira camada com o uso da cola branca Cascorez®, comumente utilizada para colagens em madeira. Esta cola é bem mais fluida que o Araldite® e permite diluições de até 50% sem perder suas propriedades normais de colagem, facilitando significativamente o procedimento. Após a secagem total da cola dessas camadas adicionais de mexilhões, por vezes durante mais de 24 horas, foi aplicada uma camada espessa, por meio de pistola de ar comprimido, do verniz marítimo Suvinil®.

O verniz marítimo criou uma camada impermeável sobre as colônias formadas, impedindo que as carcaças fossem arrancadas pela passagem da água, já que a cola Cascorez® é solúvel em água.

O benefício adicional observado refere-se à maior resistência adquirida pelas carcaças após a aplicação do verniz. As carcaças de indivíduos mortos, utilizadas nas colagens, apresentavam uma resistência baixa ao manuseio em geral: apresentavam-se frágeis, quebrando com facilidade até pelo próprio transporte. Esta camada de verniz promoveu uma maior resistência às carcaças, deixando-as mais próximas do que é na realidade um agregado de mexilhões dourados vivos. Este procedimento também favorecerá as situações em que se deseja experimentar infestações maiores que as citadas, já que as infestações naturais já foram observadas em até 150.000 ind/m².

A Fig. 10 apresenta um detalhe de uma colônia de mexilhões real e outra artificialmente simulada em uma grade, apenas para análise qualitativa.

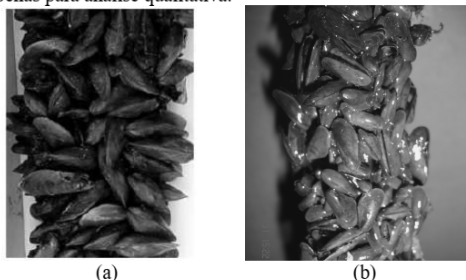


Fig. 10. Colônia de mexilhões dourados: (a) infestação real [28] e (b) artificialmente simulada.

A Fig. 11 mostra os detalhes finais dessa colagem, apresentando uma grade de configuração específica sem mexilhões, ao fundo, e com as duas infestações: 1 ind/cm², ao meio, e 3 ind/cm² à frente.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada é de fácil realização, utilizando-se de materiais de custo mais baixo e de fácil manuseio e disponibilidade no mercado. Os modelos físicos obtidos foram resistentes aos esforços e desgastes nos experimentos realizados. Também se mostraram em condições de reutilização, mesmo sendo observadas velocidades superiores às definidas como de arrancamento dos mexilhões [14].



Fig. 11. Representação das grades nas densidades de infestação 3, 1 e 0 ind/cm², respectivamente, da esquerda para a direita da foto.

V. REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, M.D. *Introdução de Espécies, Uma das Maiores Causas de Perda de Biodiversidade*. ADM, Embrapa Pantanal, Corumbá-MS, n. 75, p.1-3, Dezembro, 2004.
- [2] GIORDANI, S.; NEVES, P. S.; ANDRELI, C. V. *Limnoperna fortunei* ou mexilhão dourado: impactos causados, métodos de controle passíveis de serem utilizados e a importância do controle de sua disseminação. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.
- [3] DARRIGRAN, G.A. *Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments*. Biological Invasions 4: 145-156, 2002.
- [4] COIMBRA, A.G. *Distribuição de metais pesados em moluscos e sedimentos nos manguezais de Coroa Grande e da Enseada das Garças, Baía de Sepetiba, RJ*. (in: www.bdt.d.ndc.uff.br) Niterói, 2003.
- [5] DARRIGRAN, G. A.; DAMBORENEA, C.; GREC, N. - *An evaluation pattern for antimacroc fouling procedures: Limnoperna fortunei larvae study in a hydroelectric power plant in South America*. Ambio, vol 36, n° 7, 575-579, 2007.
- [6] SYLVESTER, F.; DORADO, J.; BOLTOVSKOY, D.; JUÁREZ, A.; CATALDO, D. - *Filtration rates of the invasive pest bivalve Limnoperna fortunei as a function of size and temperature* - Hydrobiologia, 534, p 71-80, Springer, 2005.
- [7] BARBOSA, F.G. *Invasões biológicas e o Limnoperna fortunei*. Revista Eletrônica de Biologia, v. 1 (4): 31-45, 2008.
- [8] biolo.bg.fcen.uba.ar/primeirapagina.htm, acessado em Set/2009.
- [9] www.cenemar.org.br, acessado em Set/2009.
- [10] BONAFÉ, R.A.; UEDA, R.R.; LÓPEZ, L.E.U.; MUSTAFÁ, A.L.; MACHADO, C. *Efeitos da utilização de revestimento antiincrustante no controle do mexilhão dourado na confiabilidade de equipamentos e redução de custos de manutenção*. In: XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 14 a 17 de Outubro, 2007.
- [11] DARRIGRAN, G.; PASTORINO, G.; *The Recent Introduction of a Freshwater Asian Bivalve, Limnoperna fortunei (Mytilidae) into South America*. The Veliger, v. 38 (2): 171 - 175, 1995.
- [12] www.mma.gov.br/aguadestrapro. Acessado em Set/2009.
- [13] SOUZA, T. R. C.; "Determinação da variação do fator de perda de carga em sistemas fluido mecânicos por ação de bio incrustantes, o caso do Limnoperna fortunei: uma correlação com o tempo de operação desses sistemas". Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- [14] Simeão, C.M.G. "Influência da variação de velocidade e pressão sobre Limnoperna Fortunei Dunker, 1857 (Bivalvia, Mytilidae) e verificação dos efeitos da toxicidade do látex de Euphorbia splendens var. hislopii N. E. B. (Euphorbiaceae) para esta espécie". Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [15] ROSÁRIA, J.; *La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos*. Enseñanza de las ciencias, 2006, 24(2), 173-184.

- [16] GOMES, T. e FERRACIOLI, L.; *A investigação da construção de modelos no estudo de um tópico de Física utilizando um ambiente de modelagem computacional qualitativo*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 4, p. 453-461, 2006.
- [17] LISBOA FILHO, J. e IOCHPE, C. *Um estudo sobre Modelos Conceituais de Dados para Projeto de Banco de Dados Geográficos*. Revista Informática Pública, Ano 1, n. 2, Prefeitura de Belo Horizonte, 1999.
- [18] SILVA, L. C.; *Modelagem e simulação*. Boletim técnico: MS: 02/06 em 17/06/2006 – UFES – Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
- [19] FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T.; *Introdução à mecânica dos fluidos*. 8ª ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [20] NAIME, J. M.; “*Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura*” – Editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 412p. ISBN 978-85-7035-429-7.
- [21] BRASIL, NBR-10.007. *Amostragem de resíduos sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2004.
- [22] LEITE, F. *Amostragem analítica em laboratório*. Revista Analytica, n. 06, p. 52-59, Agosto/Setembro, 2003.
- [23] BRISOLA, D.F.; FERNANDES, T.L.A.P. *Optimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios X*. In: XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM, Rio de Janeiro, 2008.
- [24] http://el.erc.usace.army.mil/zebra/zmis/zmishelp4/shell_orientation_and_measurement.htm. Acessado em Set/2009.
- [25] MAGARA, Y.; MATSUI, Y.; GOTO, Y.; YUASA, A. Invasion of the non-indigenous nuisance mussel, *Limnoperna fortunei*, into water supply facilities in Japan. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, v. 50,3, p.113-124, IWA Publishing, 2001.
- [26] MAROÑAS, M.E.; DARRIGRAN, G.A.; SENDRA, E.D.; BRECKON, G. *Shell growth of the golden mussel, Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) (Mytilidae), in Rio de la Plata, Argentina*. Hydrobiologia 495: 41-45, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003.
- [27] RESENDE, M. F. *A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo Limnoperna fortunei*. 2007, 89 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- [28] OLIVEIRA, M.D.; PEREIRA, R.A.C. *Medidas de Controle da Dispersão da Espécie Exótica “Mexilhão Dourado” (Limnoperna fortunei) no Pantanal Sul*. Circular Técnica 51, EMBRAPA, Corumbá, Dezembro, 2004

VI. BIOGRAFIAS

Denise Maciel de Almeida Diniz: Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (1985). Mestre no Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na Universidade Federal de Minas Gerais, na área de concentração Hidráulica e Recursos Hídricos (2010). Atualmente é professora na área de fluidos no Centro Universitário UNA, e professora na área de fluidos na Faculdade IBMEC.



Rodrigo Otávio Perea Serrano: Possui graduação em Engenharia Agrônoma e Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais Pela Universidade Federal do Acre (UFAC). Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), na área de Energia e Sustentabilidade. Atualmente é professor Adjunto da UFAC. Atuando nas áreas de topografia, cartografia, recursos hídricos e hidráulica.



Tâmara Rita Costa de Souza: Engenheira Mecatrônica, formada pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2013). Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração: Energia e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Minas Gerais (2016). Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Atua principalmente nos seguintes temas: Engenharia Mecânica, Recursos Hídricos e Recursos Energéticos.



Aloysio Portugal Maia Saliba: Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (1995), mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2000) e Doutorado concluído junto ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG (2009). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Recursos Hídricos. Sócio fundador da TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda. e Diretor de Comunicação do Núcleo Regional de Minas Gerais do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.



Carlos Barreira Martinez: Possui graduação em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia Civil de Itajubá (1984), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (1988) e doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos pela Universidade Estadual de Campinas (1994). Atualmente é professor associado IV da Universidade Federal de Minas Gerais. Participa dos seguintes grupos de Pesquisa: i) Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia (Líder em parceria com prof. Dr. Silva, S.R.); ii) Grupo de pesquisa Rede de Estudos Avançados de *Limnoperna fortunei* (Líder em parceria com profa. Dra. Vidigal, T.H.D.A.). Tem experiência na área de Fontes Renováveis de Energia e Planejamento Energético. Também tem atuação na área de pequenas e micro centrais hidrelétricas, mecanismo de transposição de peixes, mexilhão dourado, transposição de peixes, sistema fluido mecânicos e modelagem física.



Stênio Augusto Coelho: Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais, técnico em Eletromecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, aprendizagem em Manutenção Mecânica pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.



ANEXO 04

**DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE UMA PLACA CERÂMICA INFESTADA
COM MEXILHÃO DOURADO – Disponível: [link](#)**

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

USO DE SCANNER 3D NA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE UMA PLACA CERÂMICA INFESTADA COM MEXILHÃO DOURADO

Leirisson Patrick Santos¹; Tâmara Rita Costa de Souza¹; Stênio Augusto de Souza Coelho¹; Felipe Laffiti Assis Soares²; Jorge Luis Zegarra Tarqui³ & Edna Maria de Faria Viana^{1,2}

l.patrick santos@gmail.com; tamararccosta@hotmail.com; stenio-augusto@hotmail.com; laffiti@gmail.com; jlztarqui@yahoo.com.br; ednamariafaria@bol.com.br

RESUMO – A presença do mexilhão dourado (MD) em usinas hidrelétricas, gera diversos problemas como exemplo a obstrução parcial das tomadas d’água e grades protetoras, tendo como consequência perda de carga significativa pelo aumento da rugosidade superficial e redução da seção transversal da passagem do fluido. Portanto, o estudo da rugosidade de uma superfície infestada com MD tem grande validade para pesquisas relacionadas às consequências geradas em ambientes demarcados pela presença desse molusco. Este trabalho tem como fundamento propor uma metodologia para o cálculo da rugosidade e caracterização de uma superfície infestada com MD, mediante a utilização de um scanner 3D. A rugosidade média calculada com essa metodologia foi de 10,15 mm, sendo validada pela comparação com outro estudo experimental, com condições de cultivo do molusco semelhantes.

Palavras-Chave – Mexilhão Dourado, Rugosidade, Perdas Hidráulicas.

ABSTRACT– The presence of the *Limnoperma fortunei*, also known as the golden mussel, in hydroelectric plants has many consequences, such as the partial obstruction of the intake grates, resulting in a significant loss of load due to the increase in surface roughness and reduction of the cross-section area where occurs the flow. Therefore, the study and determination of the roughness of a surface infested with the golden mussel is important for the development of other researches that focus on the consequences of the invasion of this species in water transfer systems. The objective of this paper is to propose a methodology for calculating the roughness and characterization of a surface infested with *Limnoperma fortunei* using a 3D scanner. The average roughness calculated was 10.15 mm, a value comparable to what was found in a different experimental study, with similar culture conditions.

Palavras-Chave – Golden Mussel, Roughness, Hydraulic Losses.

1) Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG – Brasil,

2) Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG – Brasil.

3) Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG – Brasil.

INTRODUÇÃO

O *Limnoperna fortunei*, popularmente conhecido como mexilhão dourado (MD) é um molusco bivalve de água doce com os primeiros registros da sua presença na América do Sul em 1991 no rio da Prata, Argentina (Darrigran, 1995). Já em território nacional (Brasil) os primeiros registros desse molusco ocorreram em 1998 no conjunto hidrográfico Delta do Jacuí, Rio Grande do Sul e posteriormente em 1999 ao sul do Lago Guaíba, Rio Grande do Sul (Mansur *et. al*, 2003). A hipótese que justifica a chegada do MD na América Latina, é que o mesmo veio por meio de lastros de navio oriundos do sudeste asiático (Darrigran *et al*, 2012).

Por não se tratar de uma espécie local nativa, o MD ainda não possui predadores naturais além de apresentar a característica de alta taxa de reprodução e de propagação, por esses motivos, geram diversos problemas ambientais e até mesmo econômicos. Nos estágios iniciais da vida do mexilhão, fase larval, é produzida uma substância denominada ‘bisso’ que permite a sua fixação nos mais diversos substratos como exemplos metal, madeira, couro e concreto, aglomerando-se em diversas camadas irregulares (Costa *et. al*, 2016).

Em instalações hidráulicas a presença do MD ocasiona diversos problemas, pois a sua fixação em regiões específicas influencia o desempenho do sistema, por exemplo, em tubulações ou grades de tomadas d’água em usinas hidrelétricas, os efeitos da perda de carga possuem intensidade para reduzir a potência do sistema e alterar os efeitos transientes do fluido de trabalho durante manobras de válvulas (Ferreira Junior *et. al*, 2017). Em condutos forçados, com a incrustação pelo ‘MD’ ocorre um efeito denominado ‘*macrofouling*’ que consiste na obstrução parcial ou total da seção transversal da tubulação, sendo um fenômeno grave principalmente em instalações de bombeamento por reduzir a eficiência do sistema exigindo o aumento na periodicidade de manutenções relacionadas à limpeza ou troca das tubulações (Ferreira Junior *et. al*, 2018).

Por se tratar de um fator biológico, as características dos mexilhões dependem amplamente das condições climáticas e ambientais do seu local de instalação, dificultando assim as pesquisas relacionadas à esses moluscos, além do fato de que essas devem ser realizadas em ambientes controlados e autorizados, para evitar contaminações de ambientes que ainda não são marcados pela presença do MD. Por esse motivo, o dimensionamento de montagens hidráulicas contaminados com larvas do MD devem prever a sua influência no comportamento do sistema para a correta elaboração de planos de manutenção e de manobras em acessórios (válvulas) como exemplo.

Um dos principais fatores que influenciam no desempenho de um sistema hidráulico é a rugosidade das superfícies com que o fluido de trabalho interage, por essa razão, ter a ciência de um valor aproximado da rugosidade superficial imposta por uma camada desenvolvida de mexilhão

dourado facilita a elaboração ou alteração de projetos e modos de operação de um sistema hidráulico com a presença desses moluscos.

Visto essa necessidade, este trabalho tem como objetivo obter a rugosidade superficial de uma placa cerâmica incrustada artificialmente por mexilhão dourado mediante o escaneamento tridimensional da peça e comparar os resultados com outro estudo experimental para validação.

METODOLOGIA

Uma placa cerâmica com dimensões de 31 x 31 cm foi infestada artificialmente com mexilhão dourado (MD), mediante a fixação com cola quente em uma disposição similar à encontrada na natureza.

Com o intuito de calcular a rugosidade superficial da placa infestada pelo MD, foi utilizado o scanner 3D, que tem por finalidade transformar a placa física em um modelo virtual tridimensional com a escala de 1:1, possibilitando assim a edição do modelo em um software CAD (Computer-Aided Design). A Figura 1 demonstra a placa cerâmica com mexilhões encrustados, a qual foi revestida com tinta spray branca, por possibilitar melhores resultados no processo de leitura do scanner.



Figura 1 – Placa cerâmica incrustada artificialmente com MD.

O arquivo gerado pela tecnologia de scanner 3D, transforma o corpo sólido em uma malha composta por superfícies triangulares. O software de código aberto MeshLab foi utilizado na leitura do arquivo gerado, sendo representado na Figura 2.

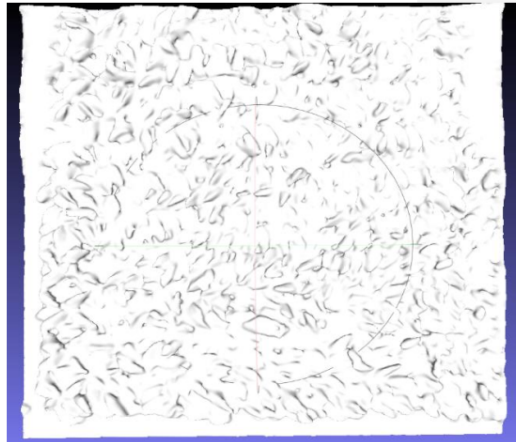


Figura 2 – Modelo Virtual 3D escaneado.

A quantidade de faces triangulares geradas para a representação do modelo virtual da placa foi de 2.730.064. Devido à limitação da capacidade computacional, softwares CAD sugerem para edição, arquivos com um valor máximo de 20.000 faces.

Deste modo, o software MeshLab foi utilizado para realizar uma simplificação na malha do arquivo, com o intuito de reduzir a quantidade de faces triangulares. Foram gerados, portanto, arquivos com 10, 20, 40 e 60 mil faces respectivamente, para o cálculo da rugosidade e posterior comparação para verificar a influência da simplificação nos resultados. A Figura 3 representa a malha com 20 mil superfícies triangulares.

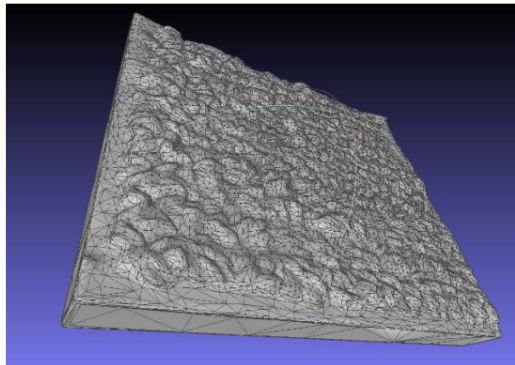


Figura 3 – Malha com 20 mil faces.

Na interseção de cada vértice adjacente das superfícies triangulares, é gerado um ponto com coordenadas espaciais representadas por (X,Y,Z) , os quais foram utilizados como base para o mapeamento topográfico da superfície.

A fim de facilitar e garantir confiabilidade aos dados adquiridos, a superfície da cerâmica que foi infestada com mexilhão, foi utilizada como plano de referência, correspondendo ao plano cartesiano XY no software CAD SolidWorks®. Desse modo, a altura referente aos picos e vales formados pela incrustação do mexilhão na placa, correspondem à coordenada Z coletada no software CAD.

A rugosidade média de uma superfície (S_a), ou média aritmética das alturas, é calculada de acordo com a Equação 1, na qual 'z' representa a altura do ponto mensurado, e 'P' a quantidade de pontos tabelados no levantamento topográfico (Deleanu *et al.*, 2012).

$$S_a = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P z(x_i, y_j) \quad (1)$$

Outro parâmetro muito difundido na análise da rugosidade de superfícies, consiste na rugosidade média quadrática (S_q), demonstrada pela Equação 2. Tal parâmetro representa o desvio padrão da distribuição das alturas da área observada, sendo mais sensível à alturas com grande desvio em relação à rugosidade média (Gadelmawla *et al.*, 2002).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P z^2(x_i, y_j)} \quad (2)$$

Os parâmetros S_a e S_q , não caracterizam a suavidade e distribuição dos picos e vales existentes na superfície analisada, podendo existir amostras de materiais distintos com rugosidade similar mas com características geométricas dos picos e vales extremamente distintas. Portanto é importante avaliar os parâmetros de assimetria (S_{sk}) e curtose (S_{ku}) da distribuição de alturas topográficas, que podem ser calculados conforme As Equações 3 e 4 respectivamente (Sadowski, 2014).

$$S_{sk} = \sqrt{\frac{1}{PS_q^3} \sum_{i=1}^P z^3(x_i, y_j)} \quad (3)$$

$$S_{ku} = \sqrt{\frac{1}{PS_q^4} \sum_{i=1}^P z^4(x_i, y_j)} \quad (4)$$

O parâmetro S_{sk} é utilizado para mensurar a assimetria do perfil topográfico em relação ao plano principal (Gadelmawla *et al.*, 2002). Para casos nos quais o plano principal encontra-se entre as máximas coordenadas dos picos e vales, um valor positivo para esse indicador demonstra predominância de picos no perfil topográfico, simetria quando for igual a zero, e valores negativos

demonstram a predominância de vales (Naylor *et al*, 2016). No caso em questão, no qual o plano principal (altura zero) encontra-se abaixo dos demais pontos mensurados, o valor 1 para esse fator delimita tais características, podendo ser também utilizado como ferramenta qualitativa para comparações futuras em experimentos relacionados ao cálculo da rugosidade em superfícies enfiadas com mexilhão dourado.

O indicador de curtose S_{ku} representa a homogeneidade ou não da distribuição de picos e vales na área observada, valores inferiores a 3 indicam uma distribuição mais homogênea dos picos e vales, a valores superiores a 3 relatam um maior grau de aleatoriedade desses pontos (Gadelmawla *et al.*, 2002). Foi relatado também a máxima altura de pico (S_p) e vale (S_v).

RESULTADOS

Diante da necessidade de simplificar o arquivo original criado pelo scanner 3D, devido à elevada quantidade de faces triangulares geradas na conversão do modelo real em virtual, torna-se necessário investigar o impacto de tal simplificação na sensibilidade dos resultados.

A quantidade de coordenadas X,Y,Z da placa escaneada (P), aumenta conforme o incremento das faces triangulares constituintes do modelo 3D.

Sendo assim, modelos com malhas mais refinadas apresentam maior precisão nos resultados, por ter uma quantidade maior de dados amostrais.

A Tabela 1 exhibe os parâmetros relativos à rugosidade, calculados para a placa cerâmica incrustada escaneada com 10, 20, 40 e 60 mil faces respectivamente.

Tabela 1– Parâmetros de rugosidade calculados.

Faces	10x10 ³	20x10 ³	40x10 ³	60x10 ³
P	4990	9277	18612	27712
S_a (mm)	9,95	10,13	10,16	10,15
S_q (mm)	10,41	10,55	10,56	10,54
S_{sk}	1,12	1,11	1,11	1,11
S_{ku}	1,34	1,30	1,29	1,29
S_p (mm)	20,87	20,78	20,96	20,93
S_v (mm)	1,14	1,15	1,15	1,15

É possível observar pelos dados calculados e exibidos na Tabela 1, que conforme o aumento da quantidade de faces e consequentemente de pontos com coordenadas (X,Y,Z) tabelados, os parâmetros referentes à rugosidade tendem a convergir. A Figura 4 demonstra o erro relativo de cada parâmetro, conforme há o incremento da quantidade de faces nos modelos virtuais.

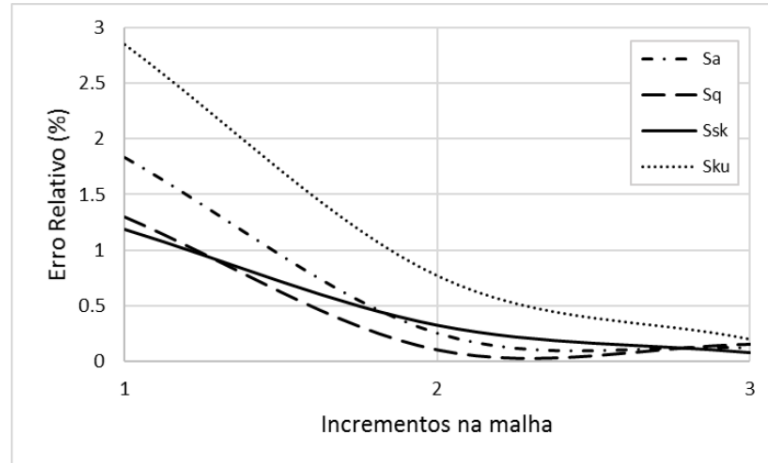


Figura 4 – Erro relativo a cada incremento de malha.

Nota-se que no último incremento, referente ao modelo com 60 mil faces triangulares, todos os parâmetros calculados apresentam erro relativo inferior a 0,2%, demonstrando o comportamento convergente, e garantindo por sua vez a confiabilidade dos resultados obtidos para a malha com maior refinamento.

A placa cerâmica ensaiada, com dimensões 30x30 cm, incrustada com mexilhão dourado, apresentou rugosidade média de 10,15 mm. De acordo com trabalho experimental realizado por Costa (2016), com condições de cultivo do MD similares à desenvolvida neste trabalho, o qual consistiu em analisar manualmente o perfil 2D de placas de uma grade incrustada artificialmente, encontrou uma rugosidade média equivalente a 10,25 mm. Os valores próximos da rugosidade para metodologias distintas contribuem para validar os resultados obtidos pelo escaneamento 3D da peça.

Por ressaltar melhor os picos e vales, é esperado que a rugosidade média quadrática calculada, seja superior à média aritmética S_a , conforme o obtido, correspondendo a 10,54mm. O parâmetro de assimetria S_{sk} calculado, por ser pouco superior a 1, denota que a presença dos picos é mais representativa em relação aos vales, no entanto, a dispersão das alturas apresenta uma boa simetria em relação à rugosidade média.

O valor calculado de 1,29 referente ao parâmetro S_{ku} , por ser inferior a 3 caracteriza a boa distribuição dos picos e vales na área analisada, conforme o esperado, por se tratar de uma placa infestada artificialmente com uma única camada de MD.

A metodologia desenvolvida utilizou como referência uma placa infestada artificialmente com MD coletados na região, o que pode ser uma fonte de propagação de erros quando aplicada a um caso de infestação real. Outra possível fonte de erros na metodologia é que por se tratar de fatores

biológicos, as dimensões de cada indivíduo podem apresentar uma grande variância quando extraídos de regiões distintas. No entanto, os resultados obtidos foram significativos para comprovar que a rugosidade de uma superfície infestada com MD é elevada e pode causar efeitos negativos consideráveis em instalações hidráulicas.

O estudo de caso desenvolvido por Ferreira Junior (2017), demonstrou que em uma tubulação de tomada d'água de uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH) com 550 mm de diâmetro e 600 m de comprimento, infestada com mexilhão dourado, representando uma rugosidade de 10,25 mm, pode ocorrer uma redução de 22,3% da potência gerada, podendo até inviabilizar a geração. O mesmo estudo mostrou que para os efeitos de transiente hidráulico em uma manobra de fechamento de válvula, o limite de segurança de 30% de sobrepressão é ultrapassado em uma tubulação infestada em todo o seu comprimento chegando a 34,1%, podendo causar problemas graves como ruptura da tubulação de tomada d'água.

Sendo assim, os valores da rugosidade de uma superfície infestada por mexilhão dourado são fundamentais no dimensionamento de sistemas hidráulicos na presença dessa espécie, como exemplo para o cálculo do tempo de manobra de válvulas e potência gerada ou consumida por um sistema.

CONCLUSÕES

O conhecimento da rugosidade de uma superfície infestada por mexilhão dourado, tem grande importância por exemplo em estudos hidráulicos relacionados à perda de carga. Com a metodologia desenvolvida nesse trabalho para a determinação da rugosidade, obteve-se resultados coerentes com demais pesquisas experimentais mediante situações de cultivo do molusco semelhante.

A utilização de um scanner 3D pode apresentar como benefício, agilidade nos resultados, além de possibilitar que a análise da rugosidade seja realizada sobre toda a superfície desejada e não somente em algumas secções transversais, sendo este o modo comumente realizado, o qual é mais suscetível a erros e exige maior tratamento estatístico.

O scanner 3D gera um corpo sólido virtual formado por superfícies triangulares. Devido à limitação da capacidade computacional, a quantidade dessas superfícies em relação ao arquivo original deve ser reduzida. A análise da independência das malhas simplificadas geradas, demonstrou um erro relativo dos parâmetros de rugosidade calculados inferior a 0,2% para o modelo virtual com 60 mil faces, sendo o resultado da rugosidade média para esse caso equivalente a 10,15 mm.

É importante ressaltar que por se tratar de uma pesquisa envolvendo fatores bióticos, os indivíduos podem apresentar tamanhos e formatos distintos entre diferentes regiões, alterando consequentemente a rugosidade média. Sendo assim essa metodologia é aconselhável a ser aplicada nos locais de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à UFMG, à CAPES, ao CNPq, ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG (PPG-SMARH/UFMG), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG (PPGMEC/UFMG) e a toda a equipe do CPH/UFMG pelo suporte na elaboração do trabalho.

REFERÊNCIAS

- DARRIGRAN, G. (1995). “*Limnoperna fortunei: Um problema para los sistemas naturales de água dulce del Mercosur?*,” Museo La Plata, nº 1, pp. 85-87.
- MANSUR, M. C., SANTOS, C. P., DARRIGRAN, G., HEYDRICH, I., CALLIL, C. T., & CARDOSO, F. R. (2003). *Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhão-dourado, Limnoperna fortunei (Dunker), no Delta do Jacuí, no Lago Guaíba e na Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente*. Revista Brasileira de Zoologia, 20, 75-84.
- DARRIGRAN, G.; DAMBORENEAR, C.; DRAGO, E. C.; DRAGO, I. E.; PAIRA, A.; ARCHUBY, F. (2012). *Invasion process of Limnoperna fortunei (Bivalvia: Mytilidae): The case of Uruguay River and emissaries of the Esteros del Iberá Wetland, Argentina*. Zoologia (Curitiba). vol 29, nº 6, pp. 531-535.
- COSTA, T. R.; RICO, A. A. M.; JUNIOR, A. G. F.; MARTINEZ, C. B.; VIANA, E. M. F. (2016). “*Análise da perda de carga causada pela rugosidade, advinda da incrustação do mexilhão dourado,*” em XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Peru.
- FERREIRA JÚNIOR, A. G.; MARTINEZ, C. B. ; SALIBA, A. P. M. ; SERRANO, R. O. P. ; COSTA, T. R. ; SANTOS, L. P. (2017). *Simulação De Uma Rejeição De Carga E Os Efeitos Causados Pela Incrustação Do Mexilhão Dourado Nos Condutos Forçados Das Centrais Geradoras Hidrelétricas No Brasil: Um Estudo De Caso*. In: XII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2017, Mar Del Plata - Argentina. GLAGTEE 2017. v. 1. p. 1-8.
- FERREIRA JUNIOR, A. G. ; SANTOS, L. P. ; MARTINEZ, C. B. ; FILHO, J. N.; VIANA, E. M. F. (2018) . *Os Efeitos Da Infestação Pelo Mexilhão Dourado Em Uma Instalação De Bombeamento Para Abastecimento De Água - Um Estudo De Caso*. Em: XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires. TRABAJOS COMPLETOS.
- DELEANU, L.; GEORGESCU, C.; SUCIU, C. (2012). “*Comparison Between 2D And 3D Surface*”. Ann. "dunarea de Jos" Univ. Galati- Fascicle v. 1. 5-12.
- GADELMAWLA, E.; KOURA, M. M.; MAKSUD, T. M. A.; ELEWA I. M.; SOLIMAN, H. H. (2002) “*Roughness parameters,*” Materials Processing Technology, pp. 133-145, 14 Janeiro.
- SADOWSKI, L. (20014). “*Application of three-dimensional optical laser triangulation method for concrete surface morphology measurement,*” Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol. 21, pp. 92-700.
- NAYLOR, A.; TALWALKAR , S. C.; TRAIL, I. A.; JOYCE, T. J. (2016). “*Evaluating the Surface Topography of Pyrolytic Carbon Finger Prostheses through Measurement of Various Roughness Parameters*”. Journal of Functional Biomaterials.