

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

YASMIN DA COSTA LIMA ABECHÉ ROCHA

EFICIÊNCIA DO ULTRAVIOLETA NO CONTROLE DO MEXILHÃO DOURADO EM
USINAS HIDRELÉTRICAS

PONTAL DO PARANÁ

2024

YASMIN DA COSTA LIMA ABECHÉ ROCHA

EFICIÊNCIA DO ULTRAVIOLETA NO CONTROLE DO MEXILHÃO DOURADO EM
USINAS HIDRELÉTRICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel no Curso de Oceanografia da
Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Belz

PONTAL DO PARANÁ

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE OCEANOGRAFIA
Avenida Deputado Aníbal Khury, 2033, - Bairro Balneário Pontal do Sul, Pontal do Paraná/PR, CEP 83255-976
Telefone: (41) 3511-8626 - <http://www.ufpr.br/>

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

YASMIN DA COSTA LIMA ABECHÉ ROCHA

"Eficiência do ultravioleta no controle do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) em usinas hidrelétricas"

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Belz
Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR

Me. Otto Samuel Mader Netto
ATGC Consultoria Ambiental

Prof. Dr. Francisco José Lagreze Squella
CPP-CEM/UFPR

Pontal do Paraná, 13 de dezembro de 2024



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS EDUARDO BELZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/02/2025, às 10:55, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO JOSE LAGREZE SQUELLA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/02/2025, às 16:14, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Otto Samuel Mader Netto Otto Mäder civilmente Otto Samuel Mader Netto, Usuário Externo**, em 20/02/2025, às 19:09, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida aqui informando o código verificador **7329893** e o código CRC **182EA945**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, que sempre me apoiou e forneceu todo o suporte necessário para que eu me tornasse quem sou hoje. Em especial, à minha avó Vitória e ao meu avô Waldemar, por estarem ao meu lado em todos os momentos, proporcionando o alicerce fundamental para que eu chegasse até aqui. À minha mãe Fabiana, que sempre acreditou em minhas ideias e aventuras, sabendo exatamente a filha que tem e confiando em meu potencial, meu amor e eterna gratidão.

Também quero agradecer aos professores Paulo Lana e Carlos Soares, que continuamente me instigaram a ser uma pesquisadora dedicada e uma pensadora crítica. Seu incentivo e orientação foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico, pessoal e pela minha paixão pela oceanografia. Agradeço também ao meu orientador Carlos Eduardo Belz, que me ajudou a cumprir meus estágios e me proporcionou diversas oportunidades dentro de seu laboratório, além de unir nosso amor pelo mergulho.

Não posso deixar de mencionar Pontal do Sul e todas as pessoas que passaram pela minha vida nessa fase. Todos sabem o quão vital essa cidade é para nós, estudantes. O CEM (Centro de Estudos do Mar) é mais que um campus universitário; é um espaço onde aprendemos sobre a convivência, sobre a saudade constante de nossa família, mas que também nos dá uma nova família ao longo do tempo. Aprendemos sobre nós mesmos, sobre nossas limitações, frustrações e sobre a transformação do nosso ser. Pontal me transformou como pessoa, estudante e profissional. Entre idas e vindas, lágrimas e sorrisos, encontros e despedidas, esta cidade me encantou desde a primeira vez que pisei na areia da Farofa, ou até nas idas para a faculdade de bicicleta em meio às chuvas torrenciais, além da dor no coração de ter esquecido as roupas no varal. Tudo aqui é leve. Agradeço profundamente por cada experiência vivida, desde o primeiro dia até o último. Cada momento foi um tijolo na construção do meu eu, e levo comigo todas as lições e memórias.

“Além de compartilhar conosco sua beleza encantadora, o mundo submarino nos
concede outros saberes, em especial sobre nós mesmos”

- Bill François

RESUMO

A introdução de espécies invasoras é uma das principais ameaças à biodiversidade, sendo a navegação marítima uma via significativa para sua disseminação. A espécie *Limnoperna fortunei*, conhecido como mexilhão dourado, e o hidrozoário *Cordylophora caspia* são exemplos de espécies invasoras que causam problemas em usinas hidrelétricas brasileiras. Estas espécies provocam incrustações em tubulações e sistemas de resfriamento, prejudicando a eficiência operacional e aumentando os custos de manutenção. Diversas metodologias de controle do mexilhão dourado estão em uso, incluindo métodos químicos, físicos e biológicos. Uma abordagem inovadora é o uso de equipamento ultravioleta, que utiliza processos físicos para eliminar organismos na água. Este estudo, realizado de maio de 2022 a julho de 2023, foi dividido em três etapas. Na primeira etapa, nove placas de aço carbono foram analisadas em laboratório ao longo de 12 meses, cada uma associada a um biobox instalado em diferentes pontos dos sistemas de resfriamento da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (Salto Caxias), no Rio Iguaçu (PR). Na segunda etapa, ao final dos 12 meses, foi realizada uma inspeção in loco durante a parada de manutenção programada da usina, com a abertura dos sistemas para vistoria e análises. A terceira etapa consistiu em uma análise detalhada dos dados de manutenção dos trocadores de calor do sistema de resfriamento da usina. O objetivo principal foi avaliar a eficácia de um sistema de ultravioleta HOD no controle da bioincrustação, comparando placas sem tratamento, com tratamento químico (MXD100) e com o equipamento ultravioleta, para determinar qual método é mais eficaz no controle dos organismos. Os resultados mostraram que o Sistema UV HOD demonstrou 96,7% de eficácia no controle do mexilhão dourado, lama ferruginosa e hidrozoários. Em contraste, o método químico utilizado obteve eficácia de 50,5%, não eliminando completamente as larvas e os adultos do mexilhão dourado nas tubulações. Além disso, a análise dos dados de limpeza dos trocadores de calor revelou uma menor frequência de manutenção nas unidades equipadas com o Sistema UV HOD.

Palavras-chave: Espécies invasoras. *Limnoperna fortunei*. Mexilhão dourado. Bioincrustação. Biofouling. Controle físico. Equipamento ultravioleta. Sistema UV HOD

ABSTRACT

The introduction of invasive species is one of the main threats to biodiversity, with maritime navigation serving as a significant pathway for their dissemination. The species *Limnoperna fortunei*, known as the golden mussel, and the hydrozoan *Cordylophora caspia* are examples of invasive species causing issues in Brazilian hydroelectric plants. These species lead to fouling in pipelines and cooling systems, compromising operational efficiency and increasing maintenance costs. Various control methodologies for the golden mussel are currently in use, including chemical, physical, and biological methods. An innovative approach is the use of ultraviolet equipment, which employs physical processes to eliminate organisms in water. This study, conducted from May 2022 to July 2023, was divided into three stages. In the first stage, nine carbon steel plates were analyzed in a laboratory over 12 months, each associated with a biobox installed at different points within the cooling systems of the Governador José Richa Hydroelectric Plant (Salto Caxias) on the Iguaçu River (PR). In the second stage, at the end of the 12 months, an on-site inspection was carried out during the plant's scheduled maintenance shutdown, involving system openings for inspection and analysis. The third stage consisted of a detailed analysis of maintenance data for the heat exchangers in the plant's cooling system. The main objective was to evaluate the effectiveness of an HOD ultraviolet system in controlling biofouling, comparing untreated plates, plates treated with the chemical MXD100, and plates treated with ultraviolet equipment to determine the most effective control method. The results showed that the HOD UV System achieved 96.7% effectiveness in controlling the golden mussel, ferruginous sludge, and hydrozoans. In contrast, the chemical methods used were 50.5% effective, failing to completely eliminate golden mussel larvae and adults in the pipelines. Furthermore, the analysis of heat exchanger cleaning data revealed a lower maintenance frequency for units equipped with the HOD UV System.

Key-words: invasive species. *Limnoperna fortunei*. golden mussel. Biofouling. physical biofouling control. ultraviolet equipment. UV HOD system.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 HIDROZOÁRIO (Cordylophora Caspia).....	11
2.2 LAMA FERRUGINOSA (Fouling).....	13
2.3 MEXILHÃO DOURADO (Limnoperna Fortunei).....	13
2.3.1 Impactos do Mexilhão Dourado (Limnoperna fortunei)	16
2.3.1.1 Ambientais	16
2.3.1.2 Econômicos.....	18
2.4 MÉTODOS DE CONTROLE EM SISTEMAS INDUSTRIAIS.....	20
2.4.1 Métodos químicos.....	20
2.4.2 Métodos físicos.....	21
2.5 EQUIPAMENTO ULTRAVIOLETA HOD.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 ÁREA DE ESTUDO (USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR JOSÉ RICHÁ)..	23
3.2 SOBRE O EXPERIMENTO.....	24
3.3 ANÁLISE DE DADOS.....	26
3.3.1 Parte I – Análise das placas de aço carbono.....	26
3.3.2 Parte II – Vistoria e Limpeza dos sistemas.....	28
3.3.3 Análise dos dados de manutenção.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 PARTE I	30
4.1.1 Mexilhão Dourado (Limnoperna fortunei).....	30
4.1.2 Hidrozoário (Cordylophora Caspia).....	34
4.1.3 Biofouling.....	35
4.2 PARTE II.....	39
4.2.1 Coleta de água em rede de plâncton.....	39
4.2.2 Raspagem das tubulações.....	40
4.2.3 Utilização do boroscópio.....	41
4.3 PARTE III.....	43
4.3.1 Quantidade de limpezas.....	43
4.3.2 Diferencial de pressão.....	45
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

O Brasil está localizado predominantemente na zona tropical, uma região caracterizada pelo clima estável, radiação solar intensa, chuvas abundantes e uma grande variedade de ecossistemas. Essas condições, somadas à sua história evolutiva, onde a vida se desenvolveu, sem as interrupções causadas pelas eras glaciais que impactaram, por exemplo, as zonas temperadas, fazem das zonas tropicais ambientes ricos em biodiversidade. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (Governo Federal), o Brasil, ocupando quase metade da América do Sul, é um dos países mais ricos em biodiversidade do mundo, abrigando mais de 116.000 espécies animais e 46.000 espécies vegetais.

Atualmente, todo esse sistema está sob ameaça, por diversos fatores relacionados à atividade humana. A introdução de espécies invasoras no meio ambiente é reconhecida como a segunda maior causa de declínio da biodiversidade, perdendo apenas para a destruição de habitats naturais. A navegação marítima, por meio da descarga de água de lastro, representa uma importante via de introdução dessas espécies e uma significativa ameaça ao equilíbrio ecológico dos ambientes aquáticos, além de sérios problemas econômicos, principalmente em usinas hidrelétricas.

Um exemplo é a espécie *Limnoperna fortunei*, conhecido como mexilhão dourado, um molusco bivalve de água doce, originário do sudeste asiático, que foi introduzido na América do Sul em 1991 através do Rio da Prata (fronteira entre Argentina e Uruguai) (Pastorino *et al.*, 1993). No Brasil, sua presença foi inicialmente registrada no reservatório da Usina de Itaipu, Paraná, em abril de 2001 (Zanella e Marenda, 2002), acarretando sérios problemas operacionais. Atualmente, este molusco invasor está disseminado em várias usinas hidrelétricas do Brasil, incluindo São Paulo, Minas Gerais e no interior do Paraná.

A Usina Hidrelétrica Governador José Richa (Companhia Paranaense de Energia – COPEL), localizada no Rio Iguaçu, Paraná, enfrenta desafios significativos devido à presença dessas duas espécies invasoras: o *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae), e o hidróide *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) (Cnidaria), além da lama ferruginosa.

A presença de organismos incrustantes em tubulações e sistemas de resfriamento que utilizam água bruta, é um desafio significativo para diversos setores econômicos, especialmente em usinas hidrelétricas. Esses organismos comprometem a eficiência dos processos ao reduzir a capacidade de troca térmica, essencial para dissipar o calor produzido pelos geradores e equipamentos (Mäder Netto, 2011). A bioincrustação não apenas eleva os custos operacionais com mão de obra e métodos de controle, mas também causa interrupções completas para manutenção.

De acordo com Darrigran et al., 2009, diversos métodos de controle do mexilhão-dourado são utilizados, incluindo abordagens biológicas, químicas e físicas. Os métodos químicos disponíveis e testados, como cloro em diferentes formas, hidróxido de sódio e quaternários de amônia, apresentam o desafio de potencialmente alterar a qualidade da água, o que leva a exigências mais rigorosas por parte dos órgãos ambientais (Belz et al., 2006). Por outro lado, as abordagens biológicas exploram o controle por meio de predadores naturais ou competição com espécies concorrentes, mas requerem cuidadosa consideração dos potenciais impactos na ecologia local. Entre os métodos físicos, o uso de tecnologia ultravioleta se destaca e representa uma abordagem inovadora para o controle de organismos incrustantes em usinas hidrelétricas, onde a luz entra em contato com as partículas presentes nas tubulações de água, eliminando os organismos e esterilizando os sistemas, sendo utilizado amplamente também no tratamento de água para consumo e diversos setores industriais.

Embora o uso de ultravioleta e filtros seja eficaz em laboratórios e aquários, sua aplicação em sistemas de grande escala enfrenta desafios significativos, especialmente em tubulações com alto fluxo de água bruta, devido à complexidade e dinâmica dos ambientes aquáticos. De acordo com Perepelizin e Boltovskoy (2014), a eficácia da irradiação UV é reduzida em águas turvas devido à alta concentração de sólidos suspensos. Apesar dessas dificuldades, este estudo representa o primeiro teste do ultravioleta em escala industrial em uma usina hidrelétrica na América do Sul, se destacando por mitigar os danos econômicos da bioincrustação sem comprometer a qualidade da água, como uma solução promissora para os sistemas industriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem inúmeros fatores que diminuem a eficiência da produção de energia em usinas hidrelétricas, sendo um fator significativo a presença de organismos como *C. caspia* e *L. fortunei*, além da lama ferruginosa em seus sistemas.

2.1 HIDROZOÁRIO (*Cordylophora Caspia*)

Os hidrozoários pertencem ao filo Cnidária, com aproximadamente 11 mil espécies descritas, incluindo os corais, águas-vivas, anêmonas do mar e as hidras. São essencialmente marinhos, com poucos representantes de água doce (Daly et al., 2006). No Brasil existem poucas informações com relação aos hidrozoários de água doce, devido à inexistência de pesquisadores e instituições de pesquisa especializadas no estudo destes animais

Dentre essas espécies de água doce do Brasil, podem ser consideradas exóticas ou introduzidas, *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) e *Craspedacusta sowerbyi* (Lankester, 1880), ambas já relatadas em diferentes regiões do país. *C. caspia* é um animal eurialino, encontrado desde ambientes marinhos até estuários e águas continentais (Roos, 1979; Morri, 1980; Zamponi, 1991). Sobrevivem a temperaturas entre 8°C e 30°C, porém a temperatura ótima de crescimento e desenvolvimento está entre 18°C e 26°C. Abaixo ou acima disso há um crescimento mais lento da colônia. Essa temperatura ótima pode variar muito conforme a região e salinidade da água (Fulton 1962; Folino e Indelicato, 2005). Este organismo coloniza rochas, caules de plantas e conchas de bivalves, incluindo mexilhões-dourados (Curry et al., 1981; Olenin e Leppakoski, 1999). As colônias consistem em pólipos especializados para alimentação (hidrantes) ou reprodução (gonóforos). O crescimento ocorre rapidamente por brotamento assexuado, sendo mais intenso durante os meses de primavera/verão (Roos, 1979; Jormalainen et al., 1994;).

Figura 1 - *Cordylophora caspia*

Fonte: Foto: Rocha Y. Desenho: Pallas, 1771, according to Nutting, 1901

A espécie *C. caspia* tem sua origem considerada no Mar Cáspio e Mar Negro, tendo alcançado a América do Sul por meio de água de lastro de navios ou aderida a cascos de embarcações comerciais. Na América Latina já houve registros de ocorrências no México (Hurlbert e VillaLobos-Figueroa, 1982), em Cuba (Gaggero, 1923 apud Zamponi, 1991), no Uruguai (Cordero, 1941) e na Argentina (Zamponi, 1991)

A primeira citação no Brasil é de Van Beneden (1858) (apud Roch, 1924), no Rio de Janeiro. Porém esta ocorrência é considerada como duvidosa, por Silveira e Boscolo (1996), afirmando que sua primeira citação para o Brasil foi em 1991, quando a espécie foi encontrada no Paraná, no reservatório da usina hidrelétrica de Itaipu (Rio Paraná - município de Foz do Iguaçu) (Haddad; Nakatami, 1996); Mais tarde, em 1995, a espécie foi relatada em São Paulo, na foz do rio Escuro, Ubatuba, em ambiente costeiro (Silveira; Boscolo, 1996); em 1997, foi descrita no Rio de Janeiro, como material incrustado na tubulação do sistema de resfriamento das turbinas da usina hidrelétrica de Funil, próximo a Itatiaia (Grohmann, 2008); em 2004 impactou repentinamente as grades de tomada d'água e o sistema de resfriamento da usina hidrelétrica Governador José Richa (Salto Caxias), no rio Iguaçu, Paraná e em 2009, foi encontrada no Pará, causando problemas no sistema de resfriamento da usina hidrelétrica de Tucuruí (Mäder Netto, 2011), tendo como consequência direta o aumento da temperatura das máquinas.

O crescimento descontrolado desta espécie ocasiona obstruções em tubulações e queda na eficiência nos sistemas de troca térmica de usinas hidrelétricas, fazendo com que, muitas vezes, o sistema permaneça inoperante por longos períodos, gerando altos custos de manutenção (Belz et al., 2016).

2.2 LAMA FERRUGINOSA (Fouling)

De acordo com Mäder Netto (2011), os sistemas de resfriamento das unidades geradoras em usinas hidrelétricas geralmente operam de forma aberta, aproveitando a água do reservatório. Após ser captada, a água passa por um filtro autolimpante, e é direcionada para filtros, radiadores e trocadores de calor. Esses dispositivos são responsáveis por dissipar o calor de fluidos como o óleo lubrificante ou o ar, dependendo das necessidades específicas do sistema. Como utilizam água bruta, sem tratamento químico, a eficiência destes sistemas pode ser comprometida principalmente pela presença de microrganismos (bactérias oxidantes do ferro, oxidantes do enxofre, redutoras do sulfato e pseudomonas) e pela influência do meio ambiente no reservatório (chuvas, ventos e erosões) (Lima, 2008), que podem aumentar a turbidez da água e até mesmo alterar o pH.

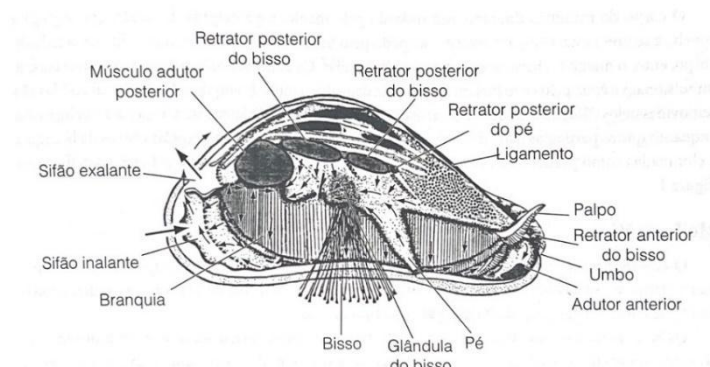
"Muitas são as alterações suscetíveis de ocorrer na água presente em grandes reservatórios, produzindo entre outros processos a eutrofização a estratificação térmica e a estratificação química" (Segundo et al., 1993). Estes processos podem acarretar um aumento da matéria orgânica disponível na água para incrustar em materiais e equipamentos das usinas (Mäder Netto, 2011). Em sistemas de resfriamento abertos, os principais problemas de depósitos são causados por sólidos suspensos, sais dissolvidos, gases dissolvidos e desenvolvimento microbiológico (Segundo et al., 1993). Problemas de entupimentos e perdas na capacidade térmica dos sistemas de resfriamento são principalmente ocasionados pela formação excessiva de biofilme, lama ferruginosa ou "fouling" (Lima, 2008).

2.3 MEXILHÃO DOURADO (*Limnoperna Fortunei*)

A espécie *Limnoperna fortunei*, mais conhecida como mexilhão dourado pela sua coloração amarelada (fase juvenil – adulta), é um molusco bivalve de água doce e pode atingir até 20 mm de comprimento no seu primeiro ano de vida. Seu ciclo de vida inclui uma fase larval planctônica e uma fase juvenil-adulta bentônica. Segundo

Belz (2006), morfologicamente, esta espécie é distinta das demais espécies do grupo, principalmente pela morfologia da concha, das cicatrizes das inserções musculares e da linha paleal.

Figura 2 - *Limnoperna fortunei*. Esquema da anatomia com detalhe das correntes ciliares



Fonte: Darrigran e Damborenea, 2003, modificado de Morton, 1973

Assim como o mexilhão zebra (*Dreissena polymorpha*) e diversas outras espécies de bivalves, a fixação da pediveliger (fase da larva que já possui uma pequena concha e um pé) ocorra em substratos filamentosos, como algas e colônias de briozoários (Ackerman et al., 1993 e Mansur et al., 2003) e que, mais tarde, utilizem mecanismos de translocação de formas juvenis para se fixar em substratos duros definitivos.

Figura 3 - Foto do mexilhão dourado juvenil na placa de aço carbono, foto de um mexilhão dourado na fase larval (1mm) e foto de um mexilhão dourado juvenil.



Fonte: Belz. C, 2023

O mexilhão dourado destaca-se como uma espécie invasora altamente bem-sucedida devido à sua notável resistência a condições ambientais adversas e à

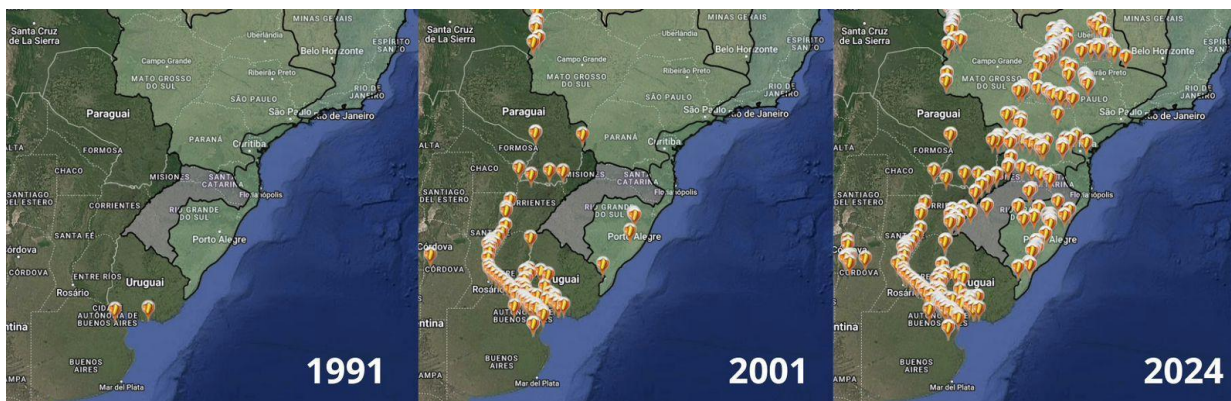
sua alta taxa de fecundidade, permitindo sua colonização em uma ampla variedade de habitats. Colônias dessa espécie podem atingir densidades surpreendentes, ultrapassando 150.000 indivíduos por metro quadrado. De acordo com Darrigran et al. (2000), as populações são caracterizadas por uma predominância de fêmeas, representando aproximadamente dois terços da população, e apresentam a ocorrência de indivíduos hermafroditas na natureza.

L. fortunei é nativo de rios e córregos chineses e do sudeste asiático (Morton, 1973). O processo de dispersão dessa espécie foi acelerado, inicialmente pelos rios da Prata, Paraná e Paraguai, com seu primeiro registro em 1991. Essa rápida expansão pode estar relacionada ao uso desses corpos d'água, que são largos, extensos e amplamente utilizados para transporte fluvial e pesca esportiva, transportando adultos fixados no casco ou em outras partes das embarcações, além de formas larvais presentes na água de lastro.

Darrigran e Pastorino (1995) sugeriram que a introdução da espécie se deu na água de lastro de navios provenientes de Hong Kong ou da Coréia. A partir daí, segundo Darrigran et al. (2000), esta espécie avançou com velocidade próxima de 240 km/ano, expandindo rapidamente sua distribuição para boa parte da América do Sul. Até 1994, a espécie tinha sido registrada apenas na costa Argentina, mas em setembro, Scarabino e Verde (1994), citaram o *L. fortunei* na costa uruguaia.

Em relação a prevenção do mexilhão dourado, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2017), a Organização Marítima Internacional (IMO) estabeleceu, em 2004, diretrizes para prevenir bioinvasões pela navegação oceânica. Uma das medidas é a troca oceânica da água de lastro, substituindo 95% do volume por água oceânica, o que dificulta a sobrevivência de organismos invasores devido às mudanças nos parâmetros de qualidade da água. Essa troca deve ocorrer a mais de 200 milhas náuticas da costa e em profundidades superiores a 200 metros. No Brasil, o Decreto Legislativo nº 148/2010 aprovou essas diretrizes, sendo regulamentadas pela NORMAM-20/DPC, da Marinha do Brasil, como medida preventiva contra novas invasões e dispersão de espécies.

Figura 4 - Mapas da distribuição e abundância do mexilhão dourado na América do Sul em 1991, 2001 e 2024



Fonte: Base Colaborativa de dados CBEIH, 2024. www.cbeih.org/

"Há um conjunto de fatores ecológicos que podem tornar as espécies invasoras abundantes e persistentes, como o desenvolvimento de novas associações entre invasores e as espécies nativas, a ausência de predadores eficazes no novo ecossistema, além de habitats já perturbados que se tornam ecossistemas favoráveis a invasão" (Pimentel, 2005). Além da erradicação da espécie ser extremamente difícil, uma vez que ela é altamente adaptável e se reproduz com facilidade, se dispersando na água por meio de larvas microscópicas carregadas pelas correntes aquáticas, ou por atividades humanas. Por isso, o controle da sua disseminação é a principal estratégia adotada pelas autoridades ambientais para minimizar os impactos da sua presença nos ecossistemas aquáticos brasileiros (Belz, 2006). No entanto, nunca foi bem organizada e, até o momento, não obteve sucesso significativo em conter o avanço do problema.

2.3.1 Impactos do Mexilhão Dourado (*Limnoperna fortunei*)

2.3.1.1 Ambientais

Registros indicam que *L. fortunei* é parte significativa da dieta de várias espécies de peixes estuarinos e de água doce, impactando a composição das comunidades desses respectivos ambientes (Cataldo et al., 2002; Ferriz et al., 2000;). Assim como o Mexilhão Zebra, espera-se um aumento significativo na

abundância de espécies bentófagas, especialmente aquelas com adaptações para se alimentar de itens com revestimento rígido, como a corvina, *Micropogonias furnieri*, o piau, *Leporinus obtusidens*, e o Armado, *Pterodoras granulosus*. Também é conhecido por fixar-se em organismos aquáticos nativos, como o bivalve *Anodontites trapesialis* e o caranguejo *Aegla platensis* (Darrigran, 2000; Mansur et al., 1999; Mansur et al., 2003). Esse comportamento, também observado em espécies de *Dreissena polymorpha* e *Dreissena bugensis* (mexilhão zebra e mexilhão quagga), tem causado danos intensos a espécies nativas na América do Norte (Burlakova et al., 2000; Zanatta et al., 2002)

Segundo Mansur (2003), o mexilhão-dourado, devido ao seu comportamento gregário e rápido crescimento que resulta em altas densidades populacionais, causou alterações significativas na vegetação marginal do Lago Guaíba, no Rio Grande do Sul, Brasil. Esses organismos também formam verdadeiros "colchões" sobre os sedimentos e, além de colonizar substratos duros, podem se fixar em outros organismos. Mansur documentou a fixação do *L. fortunei* em partes moles do bivalve *Leila blainvilliana* Lea, 1834, especificamente na região do sifão exalante. Em gastrópodes, essa fixação pode impedir o fechamento do opérculo, tornando-os mais vulneráveis à predação.

"O mexilhão dourado é capaz de alterar significativamente a composição química da água, modificando a disponibilidade de nutrientes e afetando a cadeia alimentar. Isso pode ter consequências negativas para a vida aquática, causando a diminuição da diversidade de espécies e o desequilíbrio ecológico, além de poder prejudicar a qualidade da água para consumo humano" (Zhang et al., 2022). Também é acumulador de poluentes ambientais (Porta, 2001); (Villar et al., 1999).

"Considerando o mexilhão zebra como referência, é possível antecipar outras alterações ambientais nos ambientes aquáticos sul-americanos devido à presença de *L. fortunei* (Tabela I). As semelhanças na ecologia e biologia dessas espécies indicam impactos ambientais bastante semelhantes. De maneira geral, a cadeia trófica é significativamente alterada" (Brugnoli e Clemente, 2002).

Tabela I - Mudanças nos ecossistemas associadas a presença de *Limnoperna fortunei* inferidas a partir do conhecimento gerado para o mexilhão zebra

Parâmetros	Mudanças esperadas
Transparência da água	Aumenta
Seston	Diminui
Matéria orgânica	Diminui
Mineralização da matéria orgânica	Aumenta
Fitoplâncton	Diminui em quantidade e em clorofila
Produtividade primária pelo fitoplâncton	Diminui
Bacterioplâncton	Aumenta levemente em número
Macrófitas	Aumenta
Fitoperifito e fitobentos	Aumentam em quantidade, clorofila e produtividade primária
Zooplâncton	Diminui em quantidade (mudanças estruturais da comunidade)
Zoobentos	Aumenta em quantidade (mudanças na estrutura taxonômica e trófica)
Peixes	Aumento na quantidade de indivíduos de espécies bentófagas

Fonte: LACTEC e GIA, 2005. Modificada: Belz, 2006

2.3.1.2 Econômicos

O *L. fortunei* é altamente adaptável, capaz de se reproduzir em abundância em pouco tempo e formar grandes colônias que se agarram a superfícies submersas, como cascos de barcos, pedras e canos (Belz, 2006). As aglomerações formadas pelo mexilhão dourado causam principalmente a obstrução de encanamentos, redução do diâmetro de tubulações, entupimento de filtros, bombas, grades e trocadores de calor, redução da eficiência de troca térmica em trocadores de calor, principalmente em usinas hidrelétricas (Mansur, 2003)

De acordo com Phillips et al. (2005), a proliferação e a fixação de moluscos em usinas hidrelétricas podem causar diversos problemas operacionais e estruturais. Entre os principais impactos estão o entupimento ou a redução da seção de tubulações, a decomposição de material orgânico, o aumento na corrosão de tubulações, ligas metálicas, concreto e polímeros, devido à proliferação de outros agentes biológicos indesejáveis. Esses fatores resultam na diminuição da vida útil de equipamentos, no aumento da mão-de-obra necessária para limpeza, manutenção ou substituição de encanamentos e filtros, na redução da velocidade do fluxo de

água por perdas por fricção, na oclusão de filtros e na acumulação de valvas vazias. Além disso, o uso de tratamentos inadequados de controle pode levar à contaminação das vias de água.

Na América do Norte, a distribuição de espécies como *D. polymorpha* (mexilhão zebra) e *D. bugensis* (mexilhão quagga) tem sido extensivamente estudada, evidenciando as consequências e prejuízos causados por esses moluscos (Claudi, 1995; Kerley et al., 2000; Drake & Bossenbroek, 2004). De acordo com O'Neill (1997), os americanos gastam aproximadamente US\$500 milhões anuais para controlar o mexilhão zebra. No setor elétrico, os custos aumentam anualmente devido ao controle em usinas já afetadas e à prevenção em aquelas que ainda não possuem a espécie. Apesar de menos documentada, a literatura asiática e argentina sobre infestações causadas por *L. fortunei* indica impactos econômicos semelhantes aos causados por *D. polymorpha* (Brugnoli e Clemente, 2002; Cataldo et al., 2002).

O mexilhão-dourado também tem causado prejuízos significativos em embarcações e marinas. Esses organismos não apenas incrustam os cascos das embarcações, mas também se fixam no interior de motores, encanamentos, bombas, sistemas de refrigeração que utilizam água bruta, além de afetarem lemes e hélices, comprometendo o funcionamento e a eficiência desses equipamentos (Mansur et al., 2003).

No Brasil, praticamente todas as usinas hidrelétricas utilizam sistemas de resfriamento aberto, ou seja, a água é captada diretamente do reservatório à montante, de forma bruta, sem nenhum tratamento químico e é devolvida ao rio à jusante da usina. Os sistemas de resfriamento são de fundamental importância para o funcionamento das usinas hidrelétricas, pois os equipamentos têm certas limitações operacionais de temperatura (Chiesa, 2002). Por meio destes sistemas é possível remover o calor gerado nas máquinas, mantendo seu funcionamento. Contudo, é crucial preservar esses sistemas e controlar o ingresso de organismos e materiais indesejados, como o mexilhão-dourado (*L. fortunei*), o hidrozoário (*C. caspia*) e a lama ferruginosa.

Quando os organismos se incrustam nas estruturas, podem comprometer a eficiência do sistema e, em casos extremos, levar à parada total das máquinas, gerando prejuízos operacionais significativos. O sistema de resfriamento remove o

calor gerado em máquinas rotativas, sistemas elétricos e hidráulicos, que com o aumento de temperatura pode ocasionar, desligamento automático da unidade, redução da geração para controle da temperatura abaixo do valor recomendado, desgaste prematuro dos equipamentos e redução dos intervalos de manutenção (Mäder Netto, 2011).

O tamanho do sistema de resfriamento é diretamente proporcional ao porte da usina. Desta forma, grandes usinas necessitam de sistemas de resfriamento de grande porte e com maior eficiência. Estes sistemas possuem em um dos lados óleo ou ar, em circuito fechado, que realiza a troca térmica com a água em sistema aberto. O calor gerado nestes processos é resultante das perdas dos processos de transformação. Os trocadores de calor de fluidos podem ser de tubos ou placas, onde, o fluido a ser refrigerado circula ao redor da área do tubo ou por um lado da placa (Mäder Netto, 2011).

2.4 MÉTODOS DE CONTROLE EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

2.4.1 Métodos químicos

Os métodos de controle podem ser divididos em físicos, químicos e biológicos (Cataldo et al., 2002). Os métodos químicos são os mais utilizados, pois apresentam os melhores resultados e menores custos até o momento. No entanto, é crucial considerar o impacto ambiental a jusante da usina, pois a maioria dos produtos químicos pode ser letal tanto para espécies invasoras quanto para as nativas. Comumente, são utilizadas soluções de ácido clorídrico, hidróxido de sódio, hipoclorito de sódio e tratamento com ozônio, além de produtos como MXD 100, sulfato de cobre e pinturas anti-incrustantes (Giordani et al., 2005).

Darrigran e Damborenea (2009) destacam que o controle do mexilhão-dourado em instalações industriais pode ser feito de maneira proativa ou reativa. A abordagem proativa atua preventivamente, com a aplicação intermitente, contínua ou semicontínua de moluscicidas, durante o período de liberação de larvas

para evitar sua fixação. Já a abordagem reativa, é aplicada após o surgimento da infestação, nos adultos, geralmente ao final da estação reprodutiva. Ambas as estratégias exigem monitoramento constante das populações de larvas e adultos, utilizando agentes químicos, físicos e biológicos para combater esses bivalves invasores.

No Brasil, dois produtos receberam registro emergencial, exclusivamente para uso industrial (Decreto 4.074/2002), o MXD 100 (Instrução Normativa nº 17, 2015) e o Dicloro Isocianurato Diclorocianurato de Sódio (Instrução Normativa nº 18, 2015). O MXD 100, de acordo com o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, pode ser utilizado apenas em sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas, com o objetivo de criar um micro-ambiente inapropriado para a fixação das larvas do mexilhão dourado.

De acordo com Belz (comunicação pessoal, 2022), o uso de ozônio injetado na tubulação pode causar oxidação das tubulações. Além disso, a combinação de cloro com matéria orgânica particulada nos sistemas das usinas pode gerar trihalometanos, compostos cancerígenos altamente prejudiciais.

2.4.2 Métodos físicos

O controle físico pode ser feito por remoção mecânica, bombas de alta pressão, ondas sonoras, radiação ultravioleta e revestimentos anti-incrustantes sem biocidas (Zurita, 2012). Outros métodos testados no Brasil, são o ultrassom, filtragem e campo eletromagnético. Claudi & Oliveira (2015) sugerem filtros de areia ou filtros mecânicos autolimpantes para remover larvas do mexilhão em plantas industriais, utilizando um tamanho de poro de 150 µm. As bombas de alta pressão, por exemplo, são uma forma de controle reativo, no qual o controle físico pode ser feito por meio de jateamento, removendo os mexilhões aderidos aos equipamentos, superfícies metálicas e concreto. Oliveira et al. (2014) recomenda as bombas para a limpeza de tanques redes, utilizados na piscicultura, em reservatórios.

O tratamento com radiação ultravioleta é uma forma de tratamento proativo, ele foi testado pela primeira vez por Santos et al. (2012) com água bruta. Ao

contrário dos tratamentos químicos, os sistemas UV utilizam um processo de desinfecção físico. Quando bactérias, vírus e protozoários são expostos à luz ultravioleta germicida, são inativados ou incapazes de se reproduzir devido à desnaturação de proteínas (Hader & Sinha, 2005). A radiação UV é um método de esterilização que utiliza comprimentos de onda curtos para eliminar organismos vivos em superfícies ou fluidos (Seaver et al., 2009).

Em ambientes controlados, como plantas hidrelétricas, a exposição à radiação UV pode ser letal para microrganismos através de danos celulares (Lewis & Whitby, 1997; Rozema et al., 2002). Stewart-Malone et al. (2015) discutem vários experimentos bem-sucedidos usando radiação UV para controlar larvas de mexilhões invasores nos EUA, identificando uma mortalidade de 80% das larvas de *Dreissena rostriformis* em tubulações com uma dose de 79 mJ/cm².

2.5 EQUIPAMENTO ULTRAVIOLETA HOD

A Atlantium Technologies, empresa israelense, desenvolveu uma técnica inovadora para desinfetar grandes volumes de água em larga escala. Inspirada na descoberta de Niels Ryberg Finsen (1903) sobre a eficácia da radiação ultravioleta (UV) na eliminação de bactérias, a Atlantium combinou uma tecnologia antiga com o princípio da fibra óptica. Esse método, conhecido como "morte total", assegura que os raios UV alcancem todas as partes da água, garantindo sua purificação.

De acordo com Jeffay (2023), por meio do site de notícias NoCamels, a tecnologia Hydro-Optic da Atlantium é aplicada em várias situações, desde a desinfecção de água para a reprodução de peixe-lapa na Noruega até a proteção de turbinas de energia hidrelétrica contra mexilhões invasores na Represa Hoover, nos EUA. Esses exemplos demonstram a versatilidade e eficácia da abordagem da Atlantium no tratamento e purificação da água em diferentes contextos industriais e ambientais. Ao contrário dos métodos de tratamento químico, os sistemas UV empregam um processo de desinfecção física. Quando bactérias, vírus e protozoários são expostos à luz ultravioleta, são inativados, impedindo sua alimentação e reprodução.

Para realizar o piloto, foi utilizado o equipamento UV HOD da Atlantium, que utiliza uma tecnologia de Reflexão Interna Total (RIT) para maximizar a eficiência da luz UV. Essa tecnologia reflete a energia da luz UV na câmara UV HOD, onde as laterais feitas de quartzo revestido por uma camada de isolamento de ar garantem uma distribuição homogênea da dose UV. Isso é crucial para evitar a absorção da dose UV pelo metal, como ocorre nos sistemas UV tradicionais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO (USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR JOSÉ RICHÁ)

O estudo ocorreu na Usina Hidrelétrica Governador José Richa (Salto Caxias), localizada no Rio Iguaçu, Paraná, Brasil. Foi inaugurada em fevereiro de 1999, e desempenha um papel fundamental na matriz energética da Copel, com uma capacidade de 1.240 MW. Estrategicamente situada no município de Capitão Leônidas Marques, cerca de 600 km de Curitiba, a usina contribui significativamente para o fornecimento de energia e impulsiona o desenvolvimento local, gerando empregos na região.

Figura 5 – Mapa e imagem da Usina hidrelétrica Salto Caxias.



Fonte: Google Earth.

Problemas de incrustação de organismos, como *C. Caspia*, *L. Fortunei* e a lama ferruginosa, já foram enfrentados no passado. Experimentos anteriores utilizaram compostos químicos, como Dicloro isocianurato de sódio, MXD 100 e Hidróxido de sódio, para controlar esses organismos, com resultados satisfatórios. No entanto, esses produtos químicos deixam resíduos na água, e consequentemente lançados à jusante da usina, são prejudiciais ao meio ambiente.

3.2 SOBRE O EXPERIMENTO

O trabalho foi dividido em três etapas, realizadas ao longo de 12 meses, de maio de 2022 a julho de 2023. Na primeira etapa, foram coletadas amostras mensais do sistema de resfriamento, que foram posteriormente analisadas em laboratório. Já na segunda etapa, realizada in loco, durante a parada de manutenção programada da usina, os sistemas foram abertos para vistoria e análises. A terceira etapa consistiu em uma análise detalhada dos dados de manutenção dos trocadores de calor.

Foram instalados nove biobox (caixas de acrílico) em diferentes partes do sistema de resfriamento da usina, cada um contendo 12 placas de aço carbono, representando os 12 meses do experimento. A cada mês, uma placa de cada biobox era retirado para análise, totalizando nove placas por mês. As placas tinham as seguintes dimensões: Largura: 4,8 cm, Comprimento: 10 cm, Espessura: 0,15 cm.

Figura 6 - Biobox instalado no sistema de resfriamento da Usina de Salto Caxias.



Figura 7 - Ultravioleta HOD instalado no sistema de resfriamento da máquina 4, da Usina Governador José Richa



Em 16 de maio de 2022, foram instalados 9 Biobox distribuídos ao longo do sistema de tubulação e resfriamento, da seguinte forma:

Ponto 1 – Biobox instalado em tubulação de água bruta, na entrada do sistema de resfriamento, antes da passagem por qualquer equipamento de filtração;

Ponto 2 – Biobox instalado na tubulação de entrada da máquina 1;

Ponto 3 – Biobox instalado no final do sistema de resfriamento da máquina 1;

Ponto 4 – Biobox instalado na tubulação de entrada da máquina 2;

Ponto 5 – Biobox instalado no final do sistema de resfriamento da máquina 2;

Ponto 6 – Biobox instalado na tubulação de entrada da máquina 3;

Ponto 7 – Biobox instalado no final do sistema de resfriamento da máquina 3;

Ponto 8 – Biobox instalado na tubulação de entrada da máquina 4;

Ponto 9 – Biobox instalado no final do sistema de resfriamento da máquina 4.

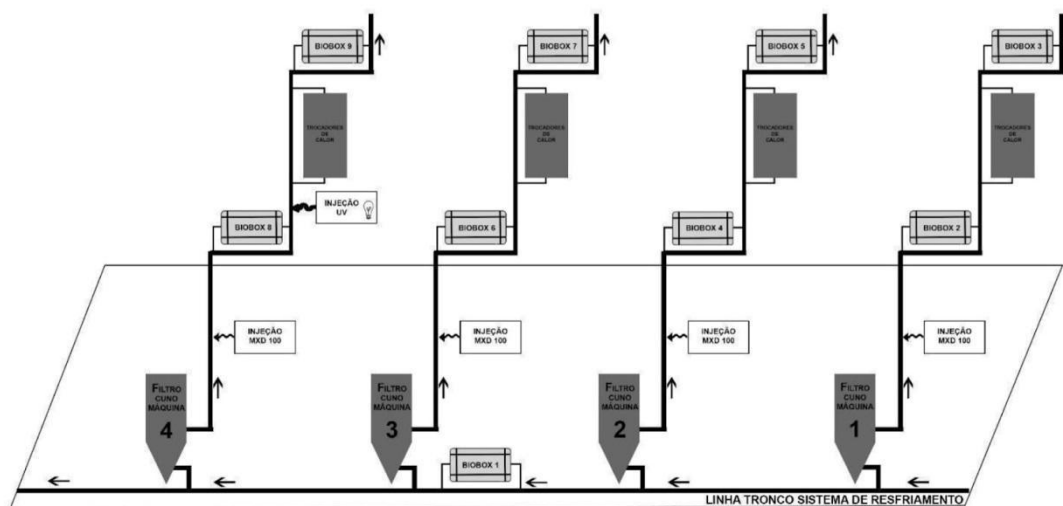
Cada biobox foi submetido a um tipo de tratamento para controle da incrustação de organismos: placas sem tratamento (água bruta), com tratamento químico (MXD100) e com tratamento físico (ultravioleta HOD), com o objetivo principal de avaliar a eficiência do equipamento ultravioleta HOD no controle da bioincrustação. Quanto aos diferentes tratamentos, estão distribuídos da seguinte forma:

Ponto 1 – Água bruta, sem nenhum produto ou método aplicado para controle do mexilhão dourado;

Pontos 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 – Com aplicação de produto químico (MXD 100) para controle do mexilhão dourado;

Ponto 9 – Com aplicação de método UV para controle do mexilhão dourado (Figura 8).

Figura 8 - Desenho esquemático do experimento mostrando os pontos de injeção de MXD 100 e UV HOD no sistema de resfriamento das quatro máquinas da Usina Governador José Richa.



Fonte: Belz, C. 2023

3.3 ANÁLISE DE DADOS

3.3.1 Parte I – Análise das placas de aço carbono

A cada mês, ao longo de 12 meses, uma placa de aço carbono foi retirada de cada Biobox. As placas foram fotografadas no local, armazenadas em frascos plásticos contendo álcool 70%, e transportadas até o Laboratório de Ecologia Aplicada e Bioinvasões (LEBIO), situado no Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná (Figura 9).

Figura 9 - Amostras armazenadas na Usina e prontas para serem transportadas.



No laboratório, as placas foram submetidas a análise em microscópio estereoscópico para detectar a presença de formas jovens e adultas de mexilhão-dourado, além de outros organismos incrustantes (Figura 10). Os mexilhões foram quantificados por contagem amostral e, em seguida, as placas foram colocadas em um ambiente desumidificado por 24 horas para secagem. Após isso, as superfícies das placas foram raspadas e pesadas. Os resultados foram submetidos a uma análise estatística descritiva para avaliar o desenvolvimento da incrustação por mexilhão-dourado e outros organismos nos sistemas de resfriamento da usina ao longo do tempo e em diferentes métodos de controle.

Figura 10 - Análise das placas amostrais em microscópio estereoscópico.



Figura 11 - Raspagem e pesagem do material incrustado nas placas amostrais



3.3.2 Parte II – Vistoria e Limpeza dos sistemas

Durante a parada de manutenção programada da máquina 4 da Usina Governador José Richa, realizada entre os dias 21 e 23 de julho de 2023, foram selecionados 15 pontos ao longo do sistema de resfriamento para vistoria e análise da presença de organismos incrustantes. Os pontos 1 e 2 foram escolhidos respectivamente na tubulação de água bruta antes do filtro cuno da máquina 3 e imediatamente após o filtro do sistema UV. Nessas localidades, foram instaladas redes de plâncton de 64 μm para a filtragem da água (Figura 12). As amostras foram posteriormente analisadas em microscópio estereoscópico para identificação e quantificação de larvas do mexilhão-dourado.

Figura 12 - Rede de Plâncton filtrando água da saída do filtro do Sistema UV HOD; Análise de amostras de água em microscópio estereoscópio; Raspagem interna de tubulação para contagem de organismos incrustantes.



Os pontos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 foram escolhidos em várias partes do sistema, tanto antes quanto depois do sistema de ultravioleta. Nessas localidades, realizamos raspagens de áreas internas das tubulações para quantificar os organismos incrustantes (Figura 12). Após a contagem dos organismos, o material também foi pesado para determinar a massa de hidrozoários e lama ferruginosa. Estabelecemos uma porcentagem de eficiência do controle dos organismos tanto para a quantificação numérica quanto para a pesagem.

Os pontos 9, 10, 11, 12, 13 e 14 foram selecionados em diferentes partes do sistema, antes e depois da passagem da água pelo sistema de ultravioleta. Nessas localidades, realizamos uma vistoria visual com um boroscópio introduzido nas tubulações (Figura 13). Utilizando este equipamento, analisamos a presença ou ausência de organismos incrustantes.

Figura 13 - Utilização do boroscópio em tubulação do sistema de resfriamento



3.3.3 Análise dos dados de manutenção

Durante todo o experimento, a Companhia Paranaense de Energia forneceu dados semanais sobre a limpeza dos trocadores de calor das quatro máquinas da Usina Hidrelétrica Governador José Richa. Esses dados incluíam o número de limpezas realizadas, o tipo de limpeza realizada, a vazão de água do equipamento, a pressão interna e a temperatura do óleo. Com base nessas informações, pudemos destacar as diferenças entre os trocadores de calor sujeitos aos diferentes tratamentos de controle do biofouling. Além disso, os dados foram utilizados para calcular o diferencial de pressão após a limpeza dos equipamentos e o tempo médio que cada equipamento levou para acionar novamente o aviso de limpeza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O equipamento UV HOD possui um sistema integrado de controle e monitoramento, essencial para garantir a dose UV necessária, especialmente considerando a variação de transmitância da água ao longo dos 12 meses de experimentos. A avaliação comercial da tecnologia UV HOD da Atlantium, realizada em instalações no Canadá e nos Estados Unidos, demonstrou sua eficácia em longo prazo. O piloto na Usina Governador José Richa da COPEL foi o primeiro teste desse tipo em uma planta hidrelétrica na América do Sul.

4.1 PARTE I

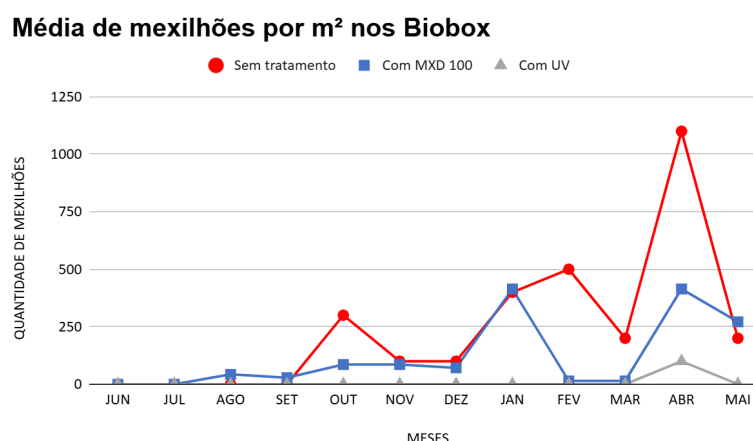
4.1.1 Mexilhão Dourado (*Limnoperna fortunei*)

As análises das placas realizadas no laboratório evidenciaram uma variação temporal na presença de mexilhões, ilustrada na Figura 14, e em cada biobox, detalhada na Tabela II.

Tabela II - Valor total da densidade de mexilhões por metro quadrado, durante 12 meses, em cada um dos 9 Biobox

Área da Usina	Área do Sistema de Resfriamento	Tratamento	Número do Biobox	Densidade total (m ²)
Água bruta	Linha de água bruta	Água bruta	Biobox 1	2900
Máquina 1	Entrada do sistema	MXD100	Biobox 2	1400
	Saída do sistema	MXD100	Biobox 3	4500
Máquina2	Entrada do sistema	MXD100	Biobox 4	1200
	Saída do sistema	MXD100	Biobox 5	1500
Máquina 3	Entrada do sistema	MXD100	Biobox 6	600
	Saída do sistema	MXD100	Biobox 7	500
Máquina 4	Entrada do sistema	MXD100	Biobox 8	400
	Saída do sistema	SISTEMA UV	Biobox 9	100

Figura 14 - Gráfico evidenciando a variação na quantidade de mexilhões nas placas ao longo dos 12 meses



Fonte: Rocha, Y. 2024

Os dados coletados ao longo de 12 meses evidenciam uma variação mensal na quantidade de mexilhões. A primeira coleta ocorreu em junho de 2022, mas os primeiros indivíduos só foram registrados na terceira coleta, realizada em agosto de 2022. Na quinta coleta, em outubro de 2022, foi identificado o primeiro pico de recrutamento de larvas, indicando o período em que a espécie se reproduz intensamente. Esse recrutamento, caracterizado pela liberação massiva de larvas na água, ocorre predominantemente entre a primavera e o verão.

A partir da oitava coleta, em janeiro de 2023, iniciou-se um processo prolongado de recrutamento de larvas, que se estendeu até a coleta de abril de 2023. É comum que a espécie apresente dois picos de recrutamento ao longo do ano, um menor no início da primavera e um maior no início do verão, o que condiz com os resultados encontrados. Segundo Boltovskoy et al. (2015), o ciclo gametogênico (espermatozoides e óvulos maduros) do *L. fortunei* na América do Sul observado em seu experimento durante o ano, resultou em uma reprodução relativamente contínua, com picos sazonais na primavera e no final do verão. Morton (1982) sugere que o início da gametogênese está provavelmente relacionado à qualidade da água. Além disso, Pereira (2014) observou que a liberação de larvas na primavera foi associada ao aumento da condutividade, alcalinidade e teor de sulfatos.

O pico esperado para o verão ocorreu mais tarde e durou mais tempo, possivelmente devido às grandes chuvas na primavera, que alteraram a turbidez da água e a oferta de fitoplâncton, principal alimento do mexilhão dourado. Além da temperatura, outros fatores, como o pH, salinidade, oxigênio dissolvido, sólidos em suspensão, clorofila a e ciclos de inundação/seca desencadeiam o ciclo reprodutivo (Boltovskoy et al., 2015)

As 12 placas do Biobox 1 não receberam nenhum tratamento e permaneceram com água bruta do reservatório por 12 meses, explicando a maior quantidade de mexilhões nesse Biobox. Os Biobox 2 ao 8 foram tratados com o produto MXD 100, enquanto o Biobox 9 foi tratado com o Sistema Ultravioleta HOD. A Figura 14 destaca a diferença entre esses três tratamentos, mostrando a maior eficácia do sistema UV em controlar a quantidade de mexilhões nas placas do experimento, com uma quantidade significativamente menor de mexilhões.

Ao longo dos 12 meses do experimento, o Biobox 9, tratado com o sistema UV HOD, apresentou apenas um indivíduo de mexilhão dourado na coleta de abril de 2023. A Tabela III mostra a média das quantidades de mexilhões por metro quadrado dos três tratamentos.

Tabela III - Quantidade de mexilhões por metro quadrado por tratamento

Média da quantidade de mexilhão dourado por m² a cada mês de experimento			
Meses	Sem tratamento	Com MXD 100	Com UV
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	42,8	0
4	0	28,5	0
5	300	85,71	0
6	100	85,71	0
7	100	71,4	0
8	400	414,2	0
9	500	14,28	0
10	200	14,28	0
11	1100	414,2	100
12	20	271,4	0
Média Geral	226,67	120,21	8,33

Considerando o Biobox 1, com água bruta, como o cenário com a maior quantidade de mexilhões nas placas, e, portanto, com 0% de eficácia de controle, a Tabela IV demonstra a porcentagem de eficiência dos dois métodos de controle testados.

Tabela IV - Porcentagem de eficiência dos diferentes tratamentos para controle da densidade de mexilhões dourados

Eficiência no controle da densidade de mexilhões (%)	
Água bruta	0
MXD 100	50,5
Ultravioleta HOD	96,7

De acordo com o estudo de Santos C. et al, .2009, comparando amostras tratadas com radiação ultravioleta e amostras sem tratamento (realizados em duas condições principais: com água deionizada e água bruta). Ambos os testes mostraram resultados onde a mortalidade das larvas de mexilhão dourado foi significativamente maior nas amostras expostas à radiação UV em comparação com aquelas que não foram tratadas. Na menor vazão de 1400 L/h, a mortalidade média foi de 99,55% para as larvas expostas à radiação UV, enquanto as amostras não tratadas apresentaram uma densidade maior de organismos vivos.

Ambos os estudos destacam a eficiência da radiação UV no controle do mexilhão dourado, com resultados que indicam uma mortalidade elevada das larvas

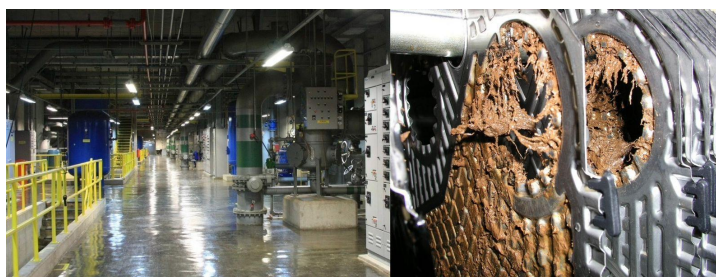
e uma redução na bioincrustação. O presente estudo complementa os achados de Santos et al. ao demonstrar a aplicação prática do Sistema UV HOD em um ambiente de usina, evidenciando sua superioridade em relação aos métodos químicos

4.1.2 Hidrozoário (*Cordylophora Caspia*)

O hidrozoário *Cordylophora caspia* foi identificado em todas as placas ao longo da análise de dados laboratoriais, e embora sua presença não tenha sido quantificada, pode-se afirmar que ela é bem acentuada. Também foi observado que em placas com mais lama ferruginosa, a quantidade de hidrozoários era maior. Este parâmetro não foi avaliado no presente trabalho, mas é crucial que seja considerado em estudos futuros para avaliar a eficiência dos métodos de controle, especialmente no que diz respeito ao impacto deste organismo. A proliferação descontrolada desta espécie resulta em grandes impactos operacionais

Além da identificação na fase laboratorial, durante a vistoria as colônias de hidrozoários foram identificadas nas placas dos trocadores de calor (Figura 15), dispositivos compostos por tubos que permitem a circulação de água e óleo quente entre os vãos das placas. Esses trocadores de calor operam de forma que, em uma placa passa água, enquanto na seguinte circula óleo quente. O óleo transfere calor para a água, que eventualmente é liberada no rio novamente. Contudo, os vãos também acumulam organismos e lama, o que reduz o fluxo de água. Esse bloqueio impede a troca eficiente de calor entre o óleo e a água, resultando no retorno de óleo ainda quente para o sistema. Essa condição ativa os alarmes da máquina, exigindo manutenções frequentes para restabelecer o funcionamento adequado.

Figura 15 - Andar do sistema de resfriamento da Usina e placas dos trocadores de calor infestados de hidrozoários



4.1.3 Biofouling

Após a raspagem e pesagem do material aderido às placas amostrais, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela V e nas Figuras 16 à 23 (o Biobox 5 foi excluído da análise por ter apresentado problemas com circulação de água no decorrer do experimento).

Figura 16 - peso médio biobox 1

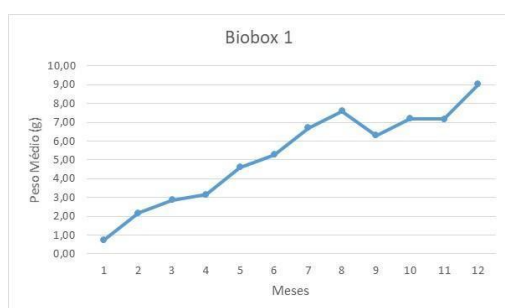


Figura 17 - peso médio biobox 2

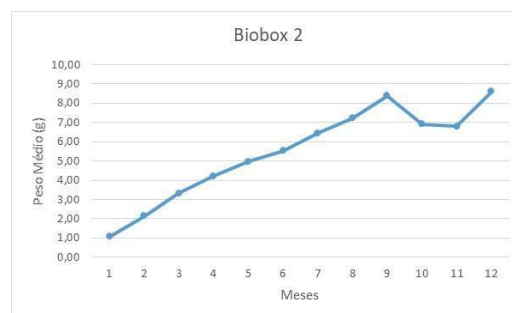


Figura 18 - peso médio biobox 3

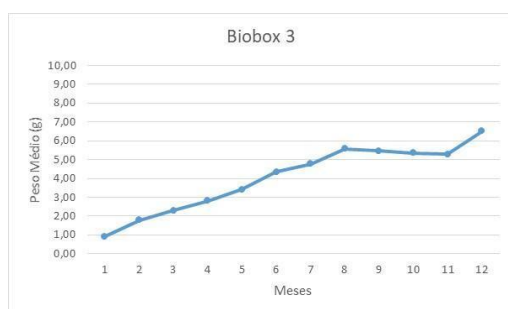


Figura 19 - peso médio biobox 4



Figura 20 - peso médio biobox 6

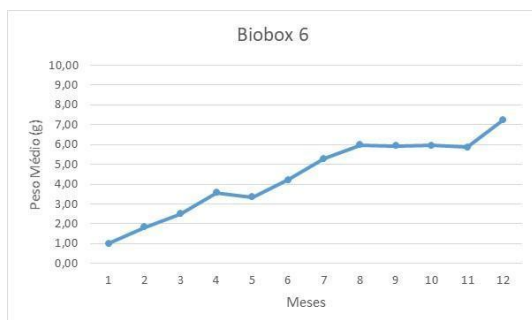


Figura 21 - peso médio biobox 7



Figura 22 - peso médio biobox 8

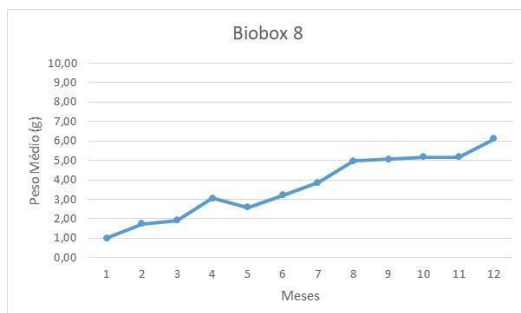


Figura 23 - peso médio biobox 9



Tabela V - Peso médio de Biofouling das placas 1, 6 e 9 amostradas durante os 12 meses

Biobox	Peso Médio (g) para cada uma das 12 placas											
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8	9°	10°	11°	12°
1 (sem tratamento)	0,75	2,17	2,86	3,16	4,61	5,28	6,71	7,59	6,31	7,20	7,16	9,03
6 (MXD 100)	1,00	1,83	2,50	3,58	3,35	4,22	5,28	5,97	5,94	5,95	5,86	7,24
9 (Ultravioleta)	1,08	2,14	2,24	2,57	2,91	4,44	4,79	5,38	5,27	5,19	5,09	5,12

O peso do biofouling aderido às placas foi um dado crucial ao longo do experimento, pois permitiu avaliar a quantidade de outros organismos incrustantes além do mexilhão dourado. A lama ferruginosa e o hidrozoário *C. caspia* são problemas sérios para o setor elétrico, frequentemente associados ao mexilhão dourado, com um organismo frequentemente favorecendo o outro e criando um ambiente mais propício para a incrustação.

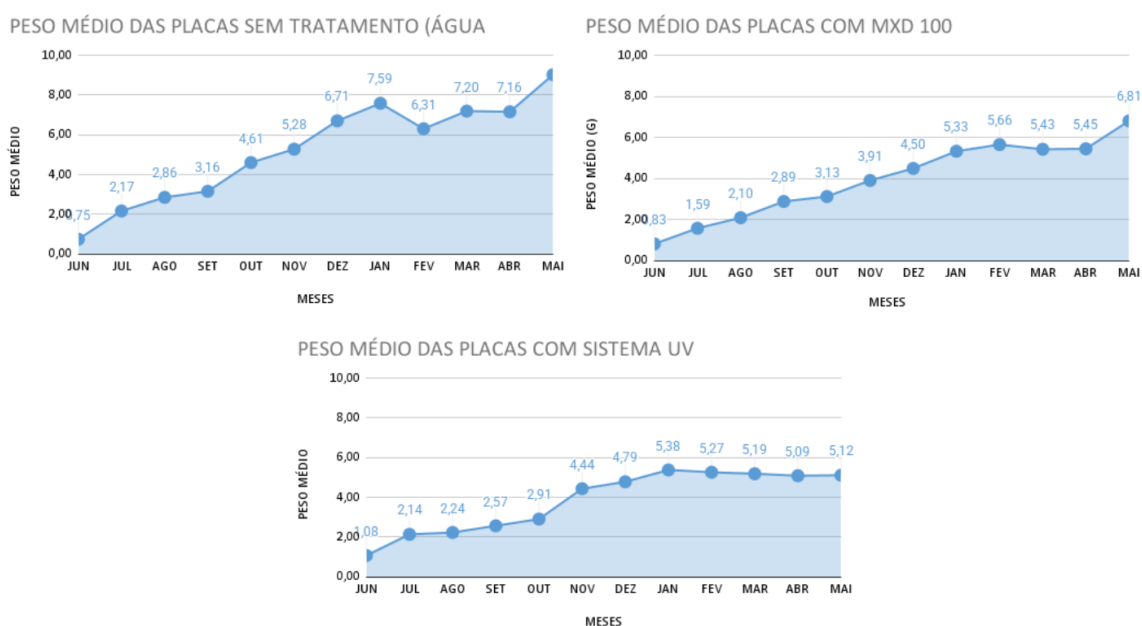
O Biobox 5 apresentou problemas de circulação de água em vários momentos ao longo do experimento, e por isso seus dados foram excluídos das análises.

Os pesos da parte superior e inferior das placas foram analisados separadamente, mas não apresentaram diferenças significativas. Portanto, as análises aqui apresentadas consideraram o peso médio das placas. Esse peso aumentou mensalmente, à medida que mais organismos se aderiam às placas. Ao longo do experimento, a quantidade de lama ferruginosa, hidrozoários e mexilhões dourados aumentou, resultando em um incremento no peso das placas. As placas do Biobox 9, com o Sistema Ultravioleta HOD, apresentaram menos mexilhões e hidrozoários do que as dos outros Biobox (Figura 24). A quantidade de lama

ferruginosa também se estabilizou no Biobox 9, enquanto nos outros Biobox continuou a aumentar em espessura.

Netto O. (2011) investigou o controle da incrustação de organismos invasores e demonstrou que a quantidade de lama e organismos incrustados aumentou ao longo do tempo, refletindo a sazonalidade do recrutamento dessas espécies. No entanto, os tratamentos aplicados (hidróxido de sódio, dicloro e MXD 100) resultaram em uma redução na quantidade de "fouling" quando comparados ao controle (sem tratamento). As placas tratadas com MXD 100 apresentaram um aumento no peso, embora inferior ao observado no controle. O mesmo fenômeno foi observado no presente estudo.

Figura 24 - Gráficos dos diferentes tratamentos com a média de peso de biofouling nas placas durante os 12 meses de coleta.



Visualmente, as placas também exibiram diferenças notáveis na quantidade de biofouling. Na Figuras 25 e 26, é possível observar as variações na espessura e densidade do biofouling entre os Bioboxs 1 (água bruta), 4 (com MXD 100) e 9 (com ultravioleta HOD). O Biobox 9 apresentou significativamente menos biofouling em comparação com todos os outros Biobox.

Figura 25 - Quantidade de biofouling das placas dos Biobox 1, 4 e 9 após 12 meses de experimento.



Figura 26 - Espessura do biofouling nas placas dos Biobox 1, 4 e 9 após 12 meses de experimento.



Na Figura 27, observa-se uma menor presença de hidrozoários na placa do Biobox 9 durante a coleta número 6, um padrão que se manteve ao longo de todo o experimento. Visualmente, também foi possível perceber um menor grau de corrosão nas placas do Biobox 9 em comparação com os demais Biobox (Figura 28). Embora não tenha sido estabelecida uma metodologia para comprovar essa observação, ela merece uma investigação mais aprofundada, pois pode evidenciar outros benefícios do sistema ultravioleta.

Netto O. (2011) em sua tese, concluiu que, além do aumento da espessura, as análises de corrosão nas placas de aço carbono revelaram que o controle apresentou os piores resultados em relação à corrosão. Esse efeito pode ser atribuído ao maior acúmulo de "biofouling" nas placas não tratadas.

Figura 27 - Fotografias microscópicas evidenciando a ausência de hidrozoários na placa do Biobox 9 em comparação com os demais

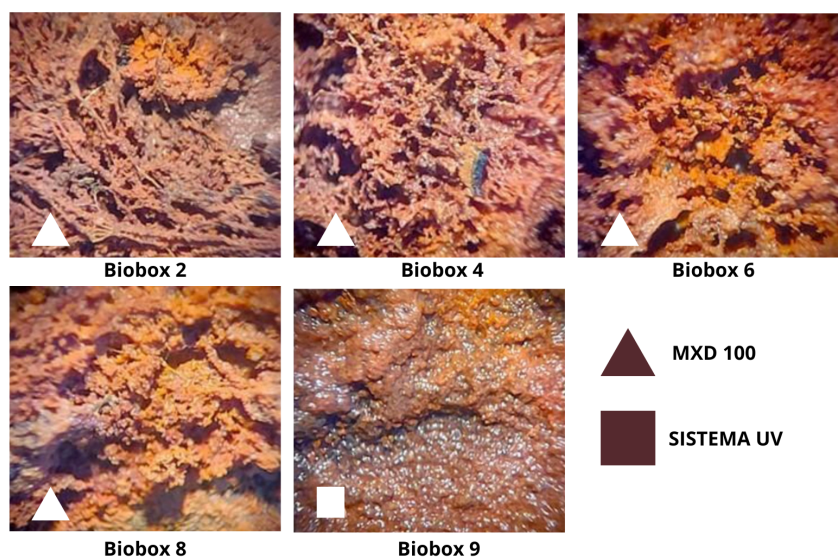
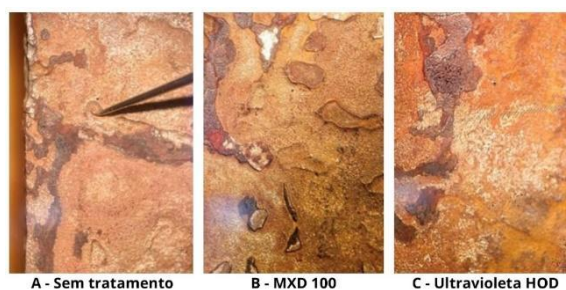


Figura 28 - Pontos de corrosão visualizados nas placas coletadas dos Biobox 1, 7 e 9.



4.2 PARTE II

4.2.1 Coleta de água em rede de plâncton

Nos dois pontos de coleta de água com rede de plâncton foram encontradas larvas vivas de mexilhão dourado. No Ponto 1 (água bruta), a densidade foi de 60 larvas/m³, enquanto no Ponto 2 (saída do filtro do sistema UV HOD), a densidade foi de 250 larvas/m³. A maior densidade de larvas no Ponto 2, em comparação com a água bruta do reservatório, pode estar relacionada à presença de mexilhões adultos nas tubulações do sistema de resfriamento. A elevada quantidade de adultos em um sistema fechado, liberando larvas viáveis, representa um grande problema para os

sistemas da usina e indica que a metodologia de controle utilizada não tem sido eficaz.

4.2.2 Raspagem das tubulações

Os pontos selecionados para a raspagem da tubulação e seus resultados estão indicados na Figura 32. As tubulações localizadas antes do sistema UV apresentaram altas densidades de mexilhões adultos, lama e hidrozoários. Em contraste, os pontos selecionados após o sistema UV apresentaram baixa ou nenhuma presença desses organismos incrustantes, evidenciando o efeito positivo do Sistema UV HOD no controle do biofouling.

Netto O. (2011), mostra que a densidade de larvas de *L. fortunei* aumentou consideravelmente entre os meses de maio de 2006 e agosto de 2007, passando de 0,37 indivíduos/m² para 149.000 ind./m², aumento característico do período de recrutamento. No presente estudo, a raspagem das tubulações antes do sistema UV revelou uma densidade de 126.600 mexilhões/m², enquanto a densidade média nas tubulações após o sistema UV foi de 2.844 mexilhões/m², com vários pontos livres de organismos incrustantes, resultando em uma eficiência média estimada de 97,75%.

A pesagem do material raspado também foi essencial, pois não seria possível contar o número de hidrozoários ou quantificar a lama ferruginosa. O peso do material raspado representou a quantidade total de biofouling na tubulação, incluindo todos os organismos. Nas tubulações antes do sistema UV, esse peso foi de 35,5 g por 100 cm². Nas tubulações após o sistema UV, o peso médio foi de 2,35 g por 100 cm², com uma eficiência média estimada de 93,3%.

Tabela VI - Eficiência média do Sistema UV HOD no controle de mexilhões e biofouling nas tubulações do sistema de resfriamento.

Análise	Eficiência
Controle da densidade de mexilhões nas tubulações	97,75
Controle do biofouling total nas tubulações	93,3

Nos pontos imediatamente antes e após o sistema, foi identificada a presença de uma alga verde de aspecto gelatinoso (Figura 29). É provável que isso tenha ocorrido devido ao escape da luz ultravioleta do sistema para as tubulações conectadas, favorecendo o desenvolvimento da alga e permitindo a fotossíntese mesmo dentro da tubulação. No entanto, a menos de meio metro do sistema UV, esse organismo já não estava mais presente.

Figura 29 - Alga verde encontrada próxima do sistema UV, mas sem potencial de causar prejuízos para a usina.



4.2.3 Utilização do boroscópio

O boroscópio foi utilizado em pontos estratégicos onde a raspagem não era possível, e os resultados foram consistentes com os obtidos pela raspagem. Os pontos inspecionados antes do sistema UV HOD apresentaram altas densidades de mexilhões, hidrozoários e lama, como visto na Figura 30, que mostra uma imagem capturada pelo boroscópio na tubulação do mancal, antes da passagem pelo sistema UV. Além da imagem, foi possível coletar uma camada de organismos aderidos à tubulação. A contagem de densidade nesse ponto foi utilizada para calcular a eficiência dos tratamentos aplicados pela usina. Os pontos inspecionados após o sistema UV apresentaram poucos ou nenhum organismo aderido (Figura 31).

Figura 30 - Foto do Boroscópio evidenciando grande quantidade de mexilhões, lama e hidrozoários na tubulação do Mancal, antes do sistema UV HOD.

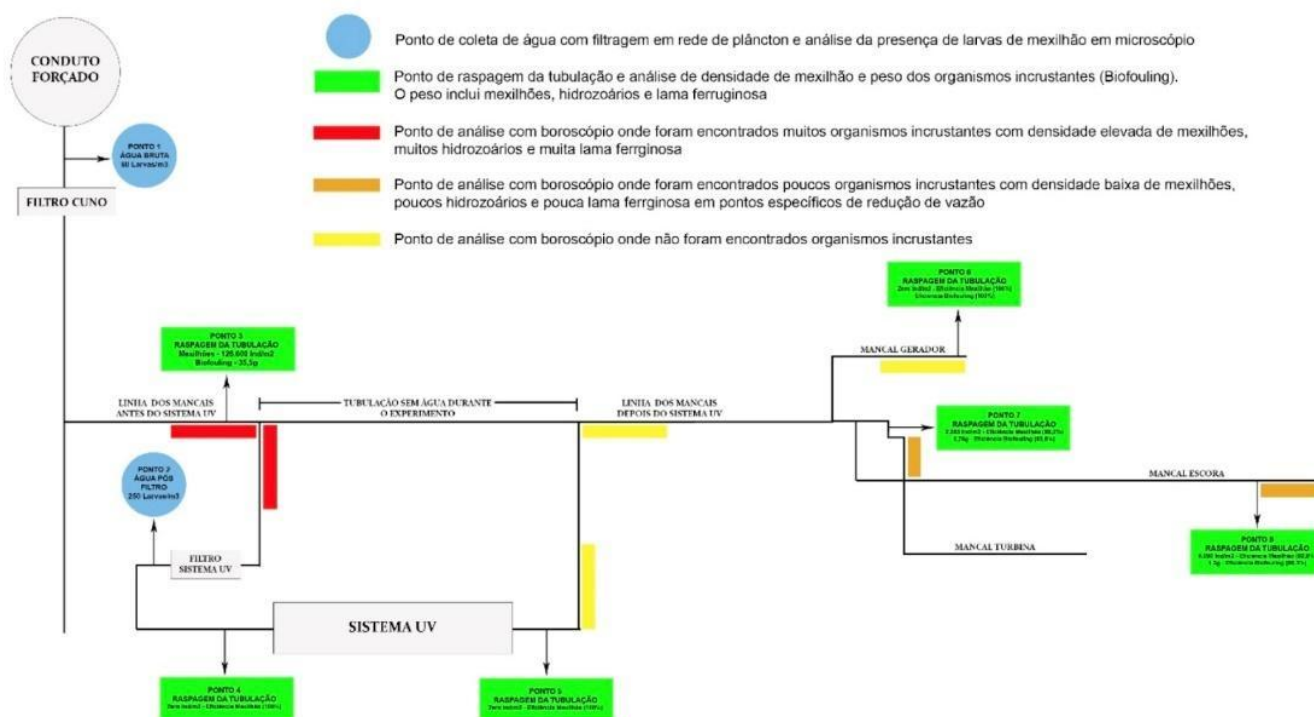


Figura 31 - Foto do Boroscópio sem mexilhões, lama ou hidrozoários na tubulação do Mancal, depois do sistema UV HOD. Os pontos observados na foto são de corrosão na tubulação.



As imagens do boroscópio foram classificadas de acordo com a quantidade de biofouling: muito (vermelho), pouco (laranja) e nenhum (amarelo). Essa classificação por ponto inspecionado está apresentada na Figura 32.

Figura 32 - Desenho esquemático com todos os pontos vistoriados e analisados na Etapa 2 do experimento, com os resultados de densidade de larvas e biofouling.



4.3 PARTE III

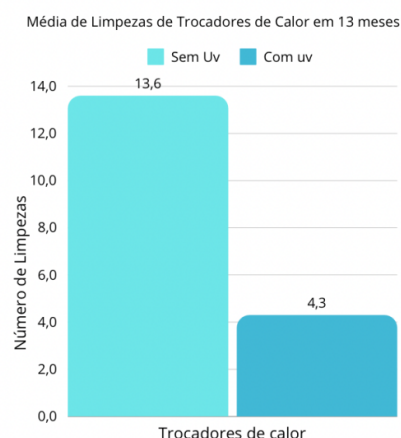
4.3.1 Quantidade de limpezas

A Companhia Paranaense de Energia realiza um monitoramento diário de todos os trocadores de calor da linha dos mancais, e esses dados foram disponibilizados para análise ao longo do experimento. Após a análise desses dados, constatou-se que o número de limpezas dos trocadores de calor durante o período experimental foi significativamente menor na máquina 4, onde o Sistema UV HOD estava instalado (conforme apresentado na Tabela VII). A Figura 33 também ilustra a média do número de limpezas, comparando as unidades sem ultravioleta com a unidade equipada com ultravioleta ao longo dos 13 meses de experimento.

Tabela VII - Número total de limpezas dos 13 meses de experimento em cada uma das 4 unidades geradoras da usina.

Total de limpezas por unidade da usina	
Unidade 1	85
Unidade 2	67
Unidade 3	338
Unidade 4	56

Figura 33 - Média de número de limpezas nos trocadores de calor sem e com UV HOD em 13 meses de experimento



As limpezas dos trocadores de calor são realizadas atualmente de duas formas distintas, a primeira limpeza, mais simples, é realizada com uma retro lavagem do equipamento. Se mesmo assim, o trocador de calor continuar sujo, é realizada uma segunda limpeza utilizando produtos químicos. A Tabela VIII indica o número de limpezas químicas realizadas em cada unidade geradora da usina, evidenciando um menor número de limpezas químicas na unidade 4, onde foi instalado o Sistema UV HOD.

Tabela VIII - Número total de limpezas químicas em cada unidade geradora ao longo de 13 meses de experimento

Unidades Geradoras	Total de limpezas químicas
Unidade 1	8
Unidade 2	4
Unidade 3	134
Unidade 4	1

4.3.2 Diferencial de pressão

A Tabela IX detalha a variação de pressão (ΔP) no Mancal Guia da Turbina e o Mancal Escora, entre os períodos de limpeza, gerando uma média de variação de pressão dia a dia.

No Mancal Guia da Turbina, este aumento gradual da pressão foi 70% mais lento na unidade gerado 4, com o Sistema UV HOD, mostrando que as outras unidades geradoras tiveram mais organismos incrustantes e, portanto, aumentaram mais rapidamente a pressão, necessitando então de limpezas mais periódicas. Ela detalha os mesmos dados para o Mancal Escora, onde o aumento gradual da pressão foi 25% mais lento na unidade geradora 4, com o Sistema UV HOD.

Tabela IX - Média da variação de pressão (ΔP) das datas de limpeza para o Mancal Guia da Turbina e o Mancal Escora

Local	Unidade Geradora	Média Variação ΔP
Mancal Guia Turbina	Unidade 1	0,0094
	Unidade 2	0,0117
	Unidade 3	0,0116
	Unidade 4	0,0056
Mancal Escora	Unidade 1	1,28
	Unidade 2	0,86
	Unidade 3	2,49
	Unidade 4	0,69

Analisando os dados do Mancal Escora da Unidade 4 antes do início do experimento, no ano de 2021 (Tabela X), podemos perceber que houve uma melhora significativa no número de limpezas. Com a instalação do Sistema UV HOD na unidade 4, a elevação do diferencial de pressão no foi 78% mais lenta.

Tabela X - Média da variação de pressão (ΔP) das datas de limpeza para o Mancal Escora no ano de 2021, antes da instalação do Sistema UV HOD, e 2023 durante o experimento, com o UV HOD.

Local	Unidade Geradora	Média Variação ΔP
Mancal Escora	Unidade 4 (sem UV HOD) - 2021	1,2213
	Unidade 4 (com UV HOD) - 2023	0,69

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que a maior densidade de mexilhão-dourado por metro quadrado ocorreu no mês de abril, indicando o pico reprodutivo da espécie no período avaliado. Além disso, os dados evidenciaram a eficiência do método ultravioleta (UV) em comparação ao método químico MXD 100, com todas as análises apresentando resultados consistentes e satisfatórios.

O uso da radiação UV demonstrou-se uma alternativa promissora no controle de bioincrustações, especialmente por não gerar resíduos químicos no ambiente aquático. Essa característica o torna um método mais sustentável e ecologicamente responsável, reduzindo impactos negativos associados ao uso de biocidas químicos. Tal abordagem é particularmente relevante em sistemas industriais hídricos, como o sistema de resfriamento da Usina Governador José Richa, onde a qualidade da água e a eficiência operacional são prioridades.

Ao longo dos 13 meses de experimentos, tanto em laboratório quanto em campo, os resultados obtidos indicaram que o Sistema UV HOD foi eficiente no controle do mexilhão-dourado, hidrozoários e lama ferruginosa, alcançando uma taxa de 96,5%. Nos experimentos com biobox, a quantidade de mexilhões e o peso de hidrozoários e lama foram significativamente menores nas placas expostas ao sistema UV HOD. Além disso, a vistoria do sistema de resfriamento evidenciou uma redução expressiva de bioincrustação nas tubulações após o uso do UV, refletida também em uma menor frequência de limpezas de manutenção nos trocadores de calor da unidade equipada com o sistema UV.

Ficou claro, durante os experimentos, que o método químico utilizado atualmente pela usina não tem alcançado resultados satisfatórios, permitindo a presença de larvas e adultos de mexilhão-dourado em todas as tubulações analisadas. Por outro lado, os dados demonstraram que o Sistema UV HOD não apenas controla eficientemente a bioincrustação, mas também é uma alternativa mais sustentável e viável para substituir os métodos químicos, causando menos impacto ambiental e otimizando a eficiência dos sistemas industriais.

Houve dificuldade em comparar o presente trabalho com outros estudos devido à questão do sigilo industrial. Muitas empresas, como as responsáveis por

usinas hidrelétricas, evitam divulgar resultados relacionados a problemas operacionais, especialmente aqueles envolvendo dados sobre manutenção, aumento ou redução de sua frequência. Além disso, empresas que atuam no setor de tecnologia ultravioleta também optam por não compartilhar informações, visando proteger sua competitividade frente à concorrência.

A radiação ultravioleta é amplamente utilizada para eliminar microorganismos em água e possui um histórico de muitos estudos para o uso em água de consumo humano, não causando prejuízo à qualidade da água. O equipamento UV HOD já possui parecer dos órgãos federais (Ofício MAPA nº 57/2018/CGAA e Ofício IBAMA nº 336/2020/DIQUA). No entanto, como qualquer método de controle de microorganismos em água bruta, o processo deverá atender às exigências do órgão ambiental competente no âmbito do licenciamento ambiental, em conformidade com a Lei 6.938 de 1981, com atribuições estabelecidas na Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011, e com as diretrizes da Resolução CONAMA nº 237 de 1997.

O Sistema UV HOD foi projetado para eliminar as larvas de mexilhão que passam pela radiação. Os adultos já aderidos anteriormente serão eliminados lentamente, permanecendo nas tubulações pelo tempo médio de vida dos indivíduos, que é de dois anos. Como novos indivíduos não se fixarão, após este período, as tubulações estarão com menores quantidades de adultos. Além disso, o Sistema UV HOD diminuirá a quantidade de alimento disponível para os adultos nas tubulações, afetando também sua sobrevivência. Caso a metodologia seja aplicada pela Usina, um monitoramento periódico deve ser implementado para acompanhar seus resultados a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, J. D.; ETHIER, C. R.; ALLEN, D. G.; & SPELT, J. K. 1993. Biomechanics of byssal adhesion in zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): tests with a rotating disk. *1* (16): 265-282.
- BELZ, C. E. 2006. Análise de risco de bioinvasão por *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857): um modelo para a bacia do rio Iguaçu, Paraná. *Acervo Digital UFPR*, setor de ciências biológicas [online], doutorado. p. 1-102.
- BELZ, C. E.; BORGES, P. D.; HADDAD, M. A.; GROHMANN, P. A.; & MÄDER NETTO, O. S. 2016. Cnidários Límnicos. In: *Espécies Exóticas Invasoras de Águas Continentais no Brasil*. Cap. V. MMA. pp. 82–101.
- BOLTOVSKOY, D.; MORTON, B.; CORREA, N.; CATALDO, N.; DAMBORENEA, C.; PENCHASZADEH, P.E.; SYLVESTER, F. 2015. Reproductive output and seasonality of *Limnoperna fortunei*. In: BOLTOVSKOY, D. (Ed.) *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Switzerland: Springer, 2015. P. 77-104 (Invading Nature - Springer Series in Invasion Ecology, 10).
- BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Diagnóstico sobre a invasão do mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*) no Brasil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017.
- BRUGNOLI, E.; & CLEMENTE, J. M. 2002. Los moluscos exóticos en la Cuenca del Plata: su potencial impacto ambiental y económico. *Sección Limnología. Facultad de Ciencias. Universidad de la República Oriental del Uruguay*.
- BURLAKOVA, L. E.; KARATAYEV, A. Y.; & PADILLA, D. K. 2000. The impact of *Dreissena polymorpha* (Pallas) invasion on unionid bivalves. *International Review of Hydrobiology* 85 (5-6): 529–541.
- CATALDO, D. H.; BOLTOVSKOY, D.; & POSE, M. 2002. Control del molusco incrustante *Limnoperna fortunei* mediante el agregado del moluscicidas al agua. In: Tercera jornada sobre conservación de la fauna íctia em el río Uruguay, Paysandú Uruguay.
- CBEIH, Centro de Bioengenharia de Espécies Invasoras de Hidreletricas. Base colaborativa de dados sobre invasões biológicas. Disponível em: <base.cbeih.org.> Acesso em: agosto de 2024
- CHIESA, F. 2002. Resfriadores compactos: uma proposta de solução para trocadores de calor ar-água. *Dissertação de mestrado apresentada ao departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná*.
- CLAUDI, R. 1995. Zebra mussel mitigation: Overview. In: *Proceedings of the Fifth International Zebra Mussel and Other Aquatic Nuisance Organisms Conference*, Toronto, Canada. pp. 47–55.

CLAUDI, R.; OLIVEIRA, M. D. Chemical strategies for the control of golden mussel. In: Boltovskoy, D. (Ed.) *Limnoperna fortunei* - The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel. Springer, p. 417-442, 2015.

CORDERO, E. H. 1941. Observaciones sobre algunas especies sudamericanas del género *Hydra*. *Hydra y Cordylophora em el Uruguay*. An. Acad. Bras. Ciências, 11: 335-400.

CURRY, M. G.; EVERITT, B.; & VIDRINE, M. F. 1981. Haptobenthos on shells of living freshwater clams in Louisiana. *Wasmann J. Biol.* 39 (1-2), 56-62.

DALY, M.; BRUGLER, M. R.; CARTWRIGHT, P. The Phylum Cnidaria: A Review Of Phylogenetic Patterns And Diversity 300 Years After Linnaeus *. ZOOTAXA, v. 127-182, 2007. Disponível em: <www.mapress.com/zootaxa/>. .

DARRIGRAN, G.; PASTORINO, G. 1995. The recent introduction of a freshwater Asiatic bivalve, *Limnoperna fortunei* (Mytilidae), into South America. *The Veliger* 38(2): 171-175.

DARRIGRAN, G. Invasive Freshwater Bivalves of the Neotropical Region. *Dreissena*, v. 11, p. 7-13, 2000.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, M. C.; PENCHASZADEH, P.; TARABORELLI, A. C. Adjustment of *Limnoperna fortunei* (Bivalvia: Mytilidae) after ten years of invasion in the Americas. *Journal of Shellfish Research*, v. 22, n. 1, p. 141-146, 2003.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, M. C.; PENCHASZADEH, P. E. Biologia reprodutiva do *Limnoperna fortunei*. In: *Introdução à Biologia das Invasões – O Mexilhão Dourado na América do Sul: Biologia, Dispersão, Impacto, Prevenção e Controle*. São Carlos: Cubo Multimídia Ltda, p. 61-75, 2009.

DRAKE, J.; & BOSSENBROEK, J. 2004. The potential distribution of zebra mussels in the United States. *BioScience* v54: 931-941.

FERRIZ, R. A.; VILLAR, C. A.; COLAUTTI, D.; & BONETTO, C. 2000. Alimentación de *Pterodoras granulosus* (Valenciennes) (Pisces, Doradidae) em la baja cuenca del Plata. *Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat., n.s.* 2: 151-156.

FOLINO-ROREM, N. C.; INDELICATO, J. 2005. Controlling biofouling caused by the colonial hydroid *Cordylophora caspia*. *Water Research*, 39: 2731-2737.

FULTON, C. 1962. Environmental factors influencing the growth of *Cordylophora*. *Journal of Experimental Zoology*, 151: 61-78.

GROHMANN, P. A. 2008. Bioincrustation caused by a hydroid species in the turbine cooling systems at the Funil Hydroelectric Power Plant, Itatiaia, Rio de Janeiro, Brazil. *Naturalia*, 31: 1-7.

GIORDANI, S.; NEVES, P. S.; ANDREOLI, 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.

HADER, D.-P.; SINHA, R. P. Solar ultraviolet radiation-induced DNA damage in aquatic organisms. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, v. 571, n. 1-2, p. 221–233, maio 2005. Disponível em: PubMed.

HADDAD, M. A.; NAKATANI, K. 1996. Primeiro registro de *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) (Cnidaria, Hydroida) em águas continentais brasileiras. Resumos do XIV Congresso Brasileiro de Zoologia, SBZ, Porto Alegre, 1996. p. 10.

HURLBERT, S. H.; VILLALOBOS-FIGUEROA, A. (Eds.) 1982. *Aquatic biota of México, Central America and West Indies*. *Aquatic Biotic SDSU Fondation*, San Diego. 529: 62-63.

JEFFAY, John. How UV And Fiber Optics Are Cleaning The World's Water. NoCamels Israeli Innovation news, 22 fev. 2023. Disponível em: <https://nocamels.com/2023/02/how-uv-and-fiber-optics-are-cleaning-the-worlds-water/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

JORMALAINEN, V.; HONKANEN, T.; VUORISALO, T.; LAIHONEN, P. 1994. Growth and reproduction of an estuarine population of the colonial hydroid *Cordylophora caspia* (Pallas) in the northern Baltic Sea. *Helgol. Wiss. Meeresunters.*, 48: 407–418.

KERLEY, B.; BRODIE, G.; HELTON, B. Hydro plant interim zebra mussel control strategy. Public Power Institute Study Closure Report 97026, Tennessee Valley Authority. Knoxville, Tennessee, 2000.

LEWIS, D.; WHITBY, G. E. Methods and apparatus for controlling zebra and related mussels using ultraviolet radiation. U.S. Patent No. 5655483, 1997.

LIMA, M. A. G. A. Biocorrosão em unidades geradoras de energia elétrica. 28º Congresso Brasileiro de Corrosão, 2008.

MADER NETTO, O. S. Controle da incrustação de organismos invasores em materiais de sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, 2011.

MANSUR, M. C. D.; RICHINITTI, L. M. Z.; SANTOS, C. P. DOS. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), molusco bivalve invasor, na bacia do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. *Biociências*, v. 7, n. 2, p. 147-150, 1999.

MANSUR, M. C. D.; SANTOS, C. P. DOS; DARRIGRAN, G.; HEYDRICH, I.; CALLIL, C. T.; CARDOSO, F. R. 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*, v. 20, n. 1, p. 75-84, 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA; INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Consulta pública sobre o diagnóstico do mexilhão-dourado no Brasil, 2017.

MORTON, B. Some aspects of the biology and functional morphology of the feeding and digestion of *Limnoperna fortunei* (Dunker) (Bivalvia: Mytilacea). *Malacologia*, v. 12, p. 265-281, 1973.

MORTON, B. Some aspects of the biology and functional morphology of the organs of feeding and digestion of *Limnoperna fortunei*. (Dunker) (Bivalvia: Mytilacea). *J. Zool.*, v. 206, p. 206, p. 23-34, 1982.

MORRI, C. 1980. Alcune osservazioni sulle *Cordylophora italiane* (Cnidaria, Hydroida). *Atti V Conf. Gruppo "G.Gadio"*, Varese, 1980. p. 151–170.

O'NEILL, C. R. JR. Economic impact of zebra mussels – results of the 1995 National Zebra Mussel Information Clearinghouse Study. *Great Lakes Research Review*, v. 3, n. 1, p. 35-42, 1997.

OLENIN, S.; LEPPÄKOSKI, E. Non-native animals in the Baltic Sea: alteration of benthic habitats in coastal inlets and lagoons. *Hydrobiologia*, v. 393, p. 233–243, fev. 1999.

OLIVEIRA, M. D.; AYROSA, D. M. R.; CASTELLANI, D.; CAMPOS, M.; MANSUR, M. C. Mexilhão-dourado nas pisciculturas em tanques-rede. *Panorama da Aquicultura*, v. 145, p. 23–29, 2014.

OLIVEIRA, M. D.; BARROS, L. F. DE. Mexilhão-dourado no Pantanal - um problema ambiental e econômico. *Jornal da Fundação Dalmo Giacometti*, p. 1-3, 2003.

PASTORINO, G., DARRIGRAN, G., MARTÍN, S. and LUNASCHI, L., 1993. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae), Nuevo bivalvo invasor en aguas del Rio de La Plata. *Neotropica*, vol. 39, no. 101-102, p. 34.

PEREPELIZIN, P. V.; BOLTOVSKOY, D. Effects of 254 nm UV irradiation on the mobility and survival of larvae of the invasive fouling mussel *Limnoperna fortunei*. *Taylor e Francis*, v. 30, n. 2, p. 197–202, 2014.

PEREIRA, D. Bivalves Límnicos em Regiões Hidrográficas e Ecorregiões na América do Sul e Subsídios para o Controle do Bivalve Invasor *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PHILLIPS, S.; DARLAND, T.; SYTSMA, M. Potential economic impacts of zebra mussels on the hydropower facilities in the Columbia River Basin. Prepared for the Bonneville Power Administration by Pacific States Marine Fisheries Commission, 2005.

PIMENTEL, D.; ZUNIGA, R.; MORRISON, D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecology Economics*, v. 52, p. 273-288, 2005.

PORTA, A. Biomarkers of contamination in coastal aquatic organisms of Rio de la Plata (Argentina). *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, v. 35, n. 2, p. 261-271, 2001.

ROOS, P. J. 1979. Two-stage life cycle of a *Cordylophora* population in the Netherlands. *Hydrobiologia*, Vol. 62, 3: 231–239.

ROCH, F. Experimentelle Untersuchungen na *Cordylophora caspia* (Pallas) über die Abhängigkeit ihrer geographischen Verbreitung und ihrer Wuchsformen von den physikalisch-chemischen Bedingungen des umgebenden Mediums. *Z Morph. Ökol. Tiere*, v. 2, p. 350-426, 1924.

ROZEMA, J.; VAN DE STAAIJ, J.; BJÖRN, L. O.; CALDWELL, M. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems – an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 66, n. 1, p. 2–12, mar. 2002.

SANTOS, C. Radiação Ultravioleta como Controle da Incrustação do Mexilhão Dourado em Tubulações de Captação de Água para Usinas Termelétricas. In: V CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2009.

SANTOS, C. P.; RAYA RODRIGUEZ, M. T.; MANSUR, M. C. D.; VILAR NEHRKE, M.; LEITE ZURITA, M. L. Controle de *Limnoperna fortunei* com aplicação de radiação ultravioleta. In: *Moluscos Límnico Invasores no Brasil: Biologia, Prevenção, Controle*. Redes Editora, Porto Alegre, p. 335–338, 2012.

SCARABINO, F.; VERDE, M. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) em la costa Uruguay del Río de la Plata (Bivalvia; Mytilidae). *Com. Soc. Malac. Urug.*, v. 7, n. 66-67, p. 374-376, 1994.

SEAVER, R. W.; WONG, W. H.; GERSTEL, M. A.; MYERS, T. Effects of ultraviolet radiation on gametic function during fertilization in zebra mussels (*Dreissena polymorpha*). *Journal of Shellfish Research*, v. 28, n. 3, ago. 2009.

SEGUNDO, S. M. A.; KOSEL, O.; VIANNA, L. F. L.; ESMANHOTO, E.; NEVES, E. F. A. Metodologia desenvolvida para remoção de “fouling” no sistema de resfriamento das unidades geradoras da usina Governador Parigot de Souza – US/GPS. XII SNPTEE, 1993.

SILVEIRA, F. L.; BOSCOLO, H. K. Primeira ocorrência de *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) para o estado de São Paulo. *Resumos... XIV Congresso Brasileiro de Zoologia, SBZ, Porto Alegre*, p. 10, 1996.

STEWART-MALONE, A.; MISAMORE, M.; WILMOTH, S.; REYES, A.; WONG, W. H.; GROSS, J. The effect of UV-C exposure on larval survival of the dreissenid quagga mussel. *PLoS ONE*, v. 10, e0133039, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0133039.

VILLAR, C.; STRIPEIKIS, J.; D'HUICQUE, L.; TUDINO, M.; TROCCOLI, O.; BONETTO, C. CD, CU and ZN concentrations in sediments and the invasive bivalves *Limnoperna fortunei* and *Corbicula fluminea* at the Rio de la Plata basin, Argentina. *Hydrobiologia*, v. 416, p. 41-49, 1999.

ZAMPONI, M. O. 1991. Los Cnidaria de la República Argentina. Castellanos, Z. A. (ed.) *Fauna de Agua Dulce de la Republica Argentina*, Vol. 7: 20–21.

ZHANG, J.; et al. 2022. Impact of golden mussel (*Limnoperna fortunei*) colonization on bacterial communities and potential risk to water quality. *Ecological Indicators*, 144: 109499.

ZANATTA, D. T.; MACKIE, G. L.; METCALFE-SMITH, J. L.; WOOLNOUGH, D. A. A refuge for native freshwater mussels from impacts of the exotic zebra mussel in Lake St. Clair. *Journal of Great Lakes Research*, v. 28, n. 3, p. 479-489, 2002.

ZANELLA, O.; MARENDIA, L. D. Ocorrência de *Limnoperna fortunei* na Central Hidrelétrica de Itaipu. In: V Congresso Latinoamericano de Malacologia. Instituto Butantan/Instituto de Biociências – USP, São Paulo, Brasil, p. 41, 2002.

ZURITA, M. L. L. Controle físico: conceitos básicos. In: *Moluscos Límnicos Invasores no Brasil: Biologia, Prevenção, Controle*. Redes Editora, Porto Alegre, p. 207-217, 2012.