



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Jáderson Hugo de Paula

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES DE
PEQUENAS HIDRELÉTRICAS DEVIDO A INCRUSTAÇÃO
POR MEXILHÃO DOURADO**

Ouro Preto

2023

AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES DE PEQUENAS
HIDRELÉTRICAS DEVIDO A INCRUSTAÇÃO POR MEXILHÃO DOURADO.

Jáderson Hugo de Paula

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 28/08/2023

Área de concentração: Recurso Hídricos

Orientador: Profa. Dra. Ana Letícia Pilz de Castro – UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P324a Paula, Jaderson Hugo De.
Avaliação da perda de carga em tubulações de pequenas hidrelétricas devido a incrustação por Mexilhão dourado. [manuscrito] / Jaderson Hugo De Paula. - 2023.
38 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Ana Letícia Pilz de Castro.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Mexilhão dourado. 2. Usinas hidrelétricas. 3. Carga e distribuição elétrica. 4. Aspereza de superfície. I. Castro, Ana Letícia Pilz de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jáderson Hugo de Paula

AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES DE PEQUENAS HIDRELÉTRICAS DEVIDO A INCRUSTAÇÃO POR MEXILHÃO DOURADO.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em 28 de agosto de 2023.

Membros da banca

[Dra.] - Ana Letícia Pilz de Castro - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
[M.Sc.] - Maria Luíza Teófilo Gandini - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Engenheiro] - Igor Andrade Azevedo - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Ana Letícia Pilz de Castro, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Letícia Pilz de Castro**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2024, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0675275** e o código CRC **5BAA6104**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todos que desempenharam um papel, direto ou indireto, na concretização desta jornada. Em primeiro lugar, aos meus dedicados pais, Efigênia e José Hugo, cujo apoio incansável e generosidade contribuíram de forma crucial para a realização dos meus sonhos, que mesmo diante dos desafios e das adversidades, nunca hesitaram em me oferecer sua mão amiga. Além disso, quero destacar o papel essencial da minha avó Alice, do meu irmão Wallisson e das minhas irmãs Simone e Ludmila, que sempre estiveram ao meu lado, acompanhando meu processo de crescimento e amadurecimento. Aos amigos que a vida acadêmica me proporcionou, em especial ao Rafael e à Júlia, que compartilharam comigo todos os momentos da minha jornada na UFOP. Quero também agradecer ao Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil (PET Civil) por me acolher e proporcionar oportunidades valiosas de crescimento pessoal e profissional. Minha orientadora, Ana Letícia, merece um agradecimento especial por sua paciência, empatia e persistência ao longo de todo o processo, desde a concepção deste trabalho. Agradeço também aos meus amigos Elvis, Tarlys e Nicolly, que enriqueceram minha base de apoio junto com meus sobrinhos Gustavo e Sávio, que trouxeram alegria inestimável ao meio do percurso. Por fim, estendo minha gratidão ao Departamento de Engenharia Civil, à Escola de Minas e, por último, mas não menos importante, à Universidade Federal de Ouro Preto, assim como a todos os seus profissionais, que forneceram a estrutura e o suporte necessários ao longo da minha jornada acadêmica.

RESUMO

O mexilhão dourado, cientificamente conhecido como *Limnoperna Fortunei*, molusco bivalve de água doce, originário da Ásia, que de maneira inadvertida, adentrou a América do Sul através das águas de lastro de navios cargueiros. Seu primeiro registro em águas sul americanas ocorreu na Argentina, e posteriormente no Brasil. Sua presença, hoje confirmada nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país, tem instaurado debates intensos, especialmente no que diz respeito a atividades intrinsecamente ligadas à utilização das águas. Dentre essas atividades, ressalta-se a operação de usinas hidrelétricas. Dentro deste contexto, o propósito primordial deste estudo foi apresentar e discutir os impactos ocasionados por ele através de uma análise que visa estabelecer parâmetros das perdas de carga em uma hidrelétrica, advindas do aumento na rugosidade ocasionada pela incrustação proveniente do mexilhão dourado. Para concretizar este trabalho, tomou -se como base de estudo a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Poço Fundo localizada no município de São José do Vale Rio Preto no estado do Rio de Janeiro, para isso foi utilizado duas concentrações diferentes de infestação sendo elas 0,5 ind/cm² e 1,0 ind/cm², com isso constatou-se um déficit financeiro de aproximadamente 14 milhões de reais na concentração de 0,5 ind/cm² e 122 milhões para infestação de 1,0 ind/cm² devido a perda de carga no sistema de adução da hidrelétrica, que por sua vez gera uma perda de potência diminuindo então a capacidade energética do empreendimento. Diante disto ao fim deste trabalho foi apresentado a quantificação da perda de eficiência energética e financeira da PCH Poço Fundo - RJ devido a incrustação do mexilhão dourado.

Palavras-chaves: Mexilhão Dourado. Incrustação. Usinas Hidrelétricas. Perda de carga. Rugosidade.

ABSTRACT

The golden mussel, scientifically known as *Limnoperna Fortunei*, is a freshwater bivalve mollusk originating from Asia, which inadvertently entered South America through the ballast waters of cargo ships. Its first recorded appearance in South American waters occurred in Argentina and later in Brazil. Its presence, now confirmed in the Southern, Southeastern, and Central-Western regions of the country, has sparked intense debates, especially concerning activities intrinsically linked to water usage. Among these activities, the operation of hydroelectric power plants stands out. Within this context, the primary purpose of this study was to present and discuss the impacts caused by it through an analysis aimed at establishing parameters for the loss of pressure in a hydroelectric plant due to the increased roughness caused by the encrustation resulting from the golden mussel. To accomplish this task, the Poço Fundo Small Hydroelectric Power Plant (SHP), located in the municipality of São José do Vale do Rio Preto in the state of Rio de Janeiro, served as the study's foundation. For this purpose, two different infestation concentrations were used: 0.5 ind/cm² and 1.0 ind/cm². As a result, a financial deficit of approximately 14 million Brazilian reais was observed for the concentration of 0.5 ind/cm², and 122 million for an infestation of 1.0 ind/cm², due to the loss of pressure in the hydroelectric plant's intake system, which in turn leads to a power loss, consequently reducing the energy-generating capacity of the project. In conclusion, this work presented the quantification of the energy and financial efficiency losses of the Poço Fundo SHP in Rio de Janeiro due to the encrustation caused by the golden mussel.

Key words: Golden Mussel. Incrustation. Hydroelectric Power Plants. Pressure Loss. Rough- ness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mexilhão Dourado Fonte: Gustavo Darrigran	3
Figura 2 - Incrustação mexilhão em tubo Fonte: CORSAN,2008.....	4
Figura 3 - Aderência a uma Superfície Rígida Fonte: CBEIH/CEMIG.....	5
Figura 4 - Arranjo simplificado de uma usina Hidrelétrica Fonte: DE SOUZA,2023	11
Figura 5 – Ponto de turbulência, perda de carga localizada, Usina Itaipu	17
Figura 6 – Localização PCH Poço Fundo – RJ.....	20
Figura 7 – Arranjo a montante da PCH Poço Fundo.....	21
Figura 8– Arranjo a jusante da PCH Poço Fundo.....	21
Figura 9 - Curva de Geração PCH Poço Fundo	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de intensidade de infestação e fator de atrito.	24
Tabela 2 - Dados de entrada para cálculo de perda de carga.	24
Tabela 3 – Série de vazões médias no local PCH Poço Fundo (RJ)	25
Tabela 4 - Simulação Energética PCH Poço Fundo	27
Tabela 5 - Custos das alternativas - PCH Poço Fundo.....	28
Tabela 6 – Benefícios energéticos - PCH Poço Fundo.....	28
Tabela 7 - Benefícios energéticos - PCH Poço Fundo.....	28
Tabela 8 - Curva de Geração da PCH	30
Tabela 9 - Perda de carga (mca).	31
Tabela 10 - Potência gerada com infestação (kW)	32
Tabela 11 - Potência perdida (kW/dia).....	32
Tabela 12 - Perda de Potência por períodos(kW).....	33
Tabela 13 - Perda de geração em termos financeiros (R\$)	34

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos Específicos.....	2
2	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	O mexilhão dourado	3
2.2	Ciclo de Vida - Mexilhão Dourado	6
2.3	Impactos Econômicos.....	7
2.4	Impactos Ambientais	8
2.5	Usinas Hidrelétricas.....	10
2.6	Usinas a fio d'água	12
2.7	Barragens	14
2.8	Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH.....	16
2.9	Perdas de carga	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	Descrição PCH Poço Fundo (RJ)	19
3.2	Determinação da perda de carga e potência	21
3.3	Potência disponível.....	25
3.4	Estudos energéticos de implantação do Projeto Básico da PCH Poço Fundo (RJ)	26
3.5	Impactos econômicos devido à perda de carga	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29

4.1	Perda de carga no sistema de adução	29
4.2	Potência gerada pela PCH	31
4.3	Impactos Econômicos.....	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

O Mexilhão-Dourado (*Limnoperna Fortunei*) é um bivalve de água doce, nativo de rios da China e sudeste asiático. Ele possui cerca de 3-4 cm de comprimento, de fecundação dioica externa, passando por diversos estágios livres até a fixação em algum substrato duro. Normalmente, em consequência de sua rápida reprodução, desenvolve grandes massas incrustantes em diferentes tipos de substrato (OLIVEIRA, 2003). Os primeiros registros da espécie para a América do Sul ocorreram em 1991 na praia de Bagliardi no litoral argentino próximo ao Rio da Prata (PASTORINO et al., 1993). Sua introdução na América do Sul provavelmente ocorreu devido às descargas de água de lastro com altas concentrações de larvas do bivalve (DARRIGRAN; PASTORINO, 2003). O processo de invasão, adaptação e permanência do *Limnoperna Fortunei* em águas continentais vem causando impactos ambientais e econômicos sem precedentes devido a sua capacidade de formar estruturas compactas conhecidas internacionalmente como “macro-fouling” ou “biofouling” (formação de macro aglomerações). Este biofouling é responsável por problemas de incrustação, e consequentemente obstrução, em sistemas de captação e tratamento de água, nos setores da sociedade que utilizam a água nas suas atividades principais, tais como a indústria, a geração de energia e a navegação (MMA, 2006). Os problemas decorrentes da formação de massas incrustantes são principalmente o entupimento de tubulações e filtros, trocas no fluxo de água e redução do diâmetro das tubulações, acúmulo e enchimento de válvulas nas estações de tratamento de água, indústrias e geradoras de energia. O custo de operação aumenta devido a diminuição da eficiência das bombas, corrosão de tubos devido a proliferação de bactérias e fungos, e interrupção do serviço para limpeza e trocas de filtros (OLIVEIRA, 2003). Os custos para processos de manutenção em cada hidrelétrica chegam a 220 mil reais ao ano e o molusco produz colônias que chegam a agrupar 40 mil mexilhões por metro quadrado, formando uma crosta que cresce rapidamente (G1, 2018). O controle do mexilhão dourado é muito complexo, e o grau de complexidade é intensificado na medida que a aplicação de metodologias de controle é retardada. Não há até o momento nenhum método de controle desse “macrofouling”

que se possa considerar como definitivo. As tentativas de controle até agora se detiveram em métodos físicos, químicos, pinturas antiincrustantes, controle biológicos por pre- dadores, parasitas e competidores (KOWALSKI; KOWALSKI, 2008). Contudo todos os impactos no cenário econômico, operacional e social desperta o interesse e desenvolvimento de estudo nesta área sendo de interesse público e privado.

1.1 Objetivo

Objetiva-se com este trabalho analisar os impactos causados pelo Mexilhão Dourado em uma Pequena Usina Hidrelétrica (PCH) levando em consideração a perda de carga causada pela incrustação do mesmo nas paredes dos tubos de adução do sistema.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Efetuar levantamento e coletar dados da PCH Poço Fundo (RJ);
- Realizar uma simulação de perda de carga levando em consideração níveis diferentes de concentração do Mexilhão Dourado;
- Realizar uma simulação de perda potência levando em consideração níveis diferentes de concentração do Mexilhão Dourado;
- Quantificar as perdas de potência e perdas financeiras, ao longo do tempo, em função das taxas de incrustação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O mexilhão dourado

Devido à intensa atividade portuária, a água de lastro dos navios cargueiros é despejada em costas, próxima a desembocadura dos rios, descarregando também, diversos organismos macro invertebrados e micro invertebrados. Parte destes seres vivos encontram nestas águas as condições ideais de sobrevivência e reprodução por não possuírem predadores naturais que possam controlar o avanço destas espécies, criando um problema ambiental de difícil controle já que se propagam sem barreiras físicas, químicas ou biológicas (KOWALSKI; KOWALSKI, 2008). Na década de 90 foram realizados os primeiros registros da presença do mexilhão dourado na América do Sul, bacia da Plata, Argentina (PASTORINO et al., 1993). Em 1999 foi na bacia do Guaíba no Rio Grande do Sul.

O mexilhão (Figura 1) possui cerca de 3-4 cm de comprimento, de fecundação dioica externa, passando por diversos estágios livres até a fixação em algum substrato duro. Normalmente, em consequência de sua rápida reprodução, desenvolve grandes massas incrustantes em diferentes tipos de substrato (OLIVEIRA, 2003).



Figura 1 - Mexilhão Dourado

Fonte: Gustavo Darrigran

O problema da presença do mexilhão dourado, principalmente nas usinas hidrelétricas onde afeta diretamente a produção de energia, fez com que o governo federal através do Ministério do Meio Ambiente, criasse a força tarefa nacional para o controle do mexilhão dourado.

Composta por representantes de sete ministérios e 13 entidades ligadas aos setores de geração de energia, abastecimento e meio ambiente. Contudo as medidas governamentais de forma geral não produziram os efeitos esperados, e na verdade, foram estabelecidas uma década após a identificação da presença do mexilhão dourado em águas brasileiras quando a espécie invasora já demonstrara seu potencial em causar problemas ao meio ambiente e para as indústrias que se utilizam de águas infestadas. Dentre os principais problemas causados pelo mexilhão dourado destacam-se a obstrução de tubulações de captação de água; a obstrução de filtros e sistemas industriais e de usinas hidrelétricas, danos a motores e embarcações; alterações nas rotinas de pesca tradicionais da população, e alteração nos ecossistemas aquáticos (KOWALSKI; KOWALSKI, 2008). Como é observado na Figura 2 a incrustação do mexilhão acarreta na diminuição do diâmetro nominal do tubo gerando mais obstáculos e pontos de atrito da água, permitindo perda de carga do sistema.



Figura 2 - Incrustação mexilhão em tubo

Fonte: CORSAN,2008

Em termos de meio ambiente além das alterações do ecossistema aquático tem-se uma poluição visual nas áreas infestadas, como pode ser visto na Figura 3, além do desequilíbrio ambiental provocado pela entrada de uma espécie exótica (KOWALSKI; KOWALSKI, 2008).



Figura 3 - Aderência a uma Superfície Rígida

Fonte: CBEIH/CEMIG

Experiências com os diversos métodos de controle têm sido alcançadas tanto na Ásia quanto na América do Sul, principais regiões com problemas de infestação do mexilhão dourado, porém, se por um lado os métodos químicos e alguns físicos são promissores e apresentam resultados mais rápidos e eficientes, por outro são agressivos e incertos ao meio ambiente. O uso de revestimentos antiincrustantes na parte interna de dutos e nas superfícies de máquinas industriais revela o alto custo em substituir instalações em funcionamento, visto que nem sempre foram projetadas para enfrentar o problema (SANTOS; JUNIOR et al., 2022).

2.2 Ciclo de Vida - Mexilhão Dourado

O (*Limnoperna Fortunei*) é uma espécie que possui ciclo de vida que inclui uma fase larval planctônica e uma fase juvenil adulta. Em seu processo de reprodução, os gametas são liberados na água, onde ocorre a fecundação e inicia-se a formação do embrião ou gástrula, em um diâmetro em torno de 60-100 μm , seguindo para as outras fases no seu processo de desenvolvimento até a forma adulta (DARRIGRAN; PASTORINO, 2003).

Conforme descrito por (SANTOS; JUNIOR et al., 2022) temos as seguintes descrições para cada fase do (*Limnoperna Fortunei*) em seu processo de desenvolvimento:

- Fase Trocófora ciliada é uma fase em que uma coroa ciliar e flagelos centrais caracterizam a larva;
- Fase Véliger é quando a trocófora desenvolve o formato de seu contorno em “D” e depois gradualmente em véu (organela ciliada com função de locomoção e filtração);
- Fase Véliger umbonada é a etapa onde a larva desenvolve o umbo e linhas de crescimento dos órgãos internos são verificadas;
- Fase pedivéliger onde há a formação e funcionamento do “pé” permitindo deslocamento tanto através do véu como a nado, onde a larva passa a frequentar os bentos e iniciar o recrutamento de substratos;
- Fase Plantígrada ou juvenil é a etapa onde a larva tem características de um pequeno mexilhão juvenil, o véu não é mais verificado e o pé torna-se o único meio de locomoção da larva e neste período o mexilhão-dourado já se fixa em substratos.

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. 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 mitiloide 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. A população de mexilhão dourado, quando da invasão de um ambiente, segue uma distribuição dividida em três fases 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.

2.3 Impactos Econômicos

As indústrias, principalmente aquelas que utilizam água bruta no seu processo industrial, sofrem sérios prejuízos com o aparecimento do mexilhão dourado. Eles invadem em forma de larva todas as tubulações, onde a água penetra no estado bruto, e lá se fixam e se transformam em adultos, obstruindo estas tubulações e obrigando a uma constante limpeza. Nos sistemas industriais os prejuízos econômicos causados pelo *Limnoperna fortunei* são oriundos da sua incrustação em tubulações, ocasionando basicamente entupimentos, oclusão de bombas e filtros, sendo o setor hidrelétrico o mais prejudicado (PENAFORTE, 2014). As áreas mais sensíveis são as bombas de resfriamento da transmissão, das estações de captação de água, porque o resfriamento insuficiente da água que abastece os trocadores de calor provoca uma inesperada parada do bombeamento de água bruta para a planta de purificação de água (CEMIG, 2015). As tubulações dos trocadores de calor de usinas hidrelétricas sofrem, também, entupimento, podendo causar a parada de unidades geradoras por aquecimento excessivo das máquinas.

A seguir serão listados alguns danos causado pelo mexilhão dourado que geram grandes custos de manutenção para as concessionárias:

- Entupimento e Danos às Infraestruturas: O mexilhão dourado tem a capacidade de se fixar em estruturas submersas, como tubulações, grades, filtros e sistemas de

refrigeração das usinas hidrelétricas. A formação de grandes colônias pode levar ao entupimento dessas estruturas, reduzindo a eficiência operacional e aumentando os custos de manutenção e limpeza;

- **Perda de Eficiência:** A presença do mexilhão dourado nas usinas hidrelétricas pode resultar em uma redução da eficiência de geração de energia. O entupimento de tubulações e condutos forçados diminui o fluxo de água, afetando o desempenho das turbinas e geradores. Isso pode levar a uma diminuição na capacidade de produção de energia elétrica e, conseqüentemente, redução nos lucros das usinas;

- **Aumento dos Custos Operacionais:** A limpeza e a remoção do mexilhão dourado das estruturas das usinas hidrelétricas exigem recursos adicionais, incluindo mão de obra, equipamentos e produtos químicos. Esses custos operacionais adicionais podem representar uma carga financeira significativa para as usinas hidrelétricas afetadas;

- **Paralisação de Operações:** Em casos mais graves, a infestação do mexilhão dourado pode levar à paralisação total ou parcial das operações das usinas hidrelétricas. A necessidade de limpeza e descontaminação extensiva pode exigir a interrupção das atividades de geração de energia, resultando em perdas financeiras consideráveis devido à diminuição ou ausência de produção;

- **Custos de Prevenção e Controle:** Além dos custos operacionais diretos, as usinas hidrelétricas também precisam investir em medidas de prevenção e controle do mexilhão dourado. Isso pode incluir inspeções regulares, monitoramento, implementação de medidas de biossegurança e pesquisa científica para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo da espécie invasora.

2.4 Impactos Ambientais

Os impactos causados pelos mexilhões foram documentados em várias literaturas sobre diferentes componentes da biota aquática, bem como aos habitats de água-doce.

No ambiente aquático o *Limnoperna Fortunei* pode se fixar em galhos e raízes de macrófitas que compõem a vegetação ribeirinha, bem como em animais. O mexilhão

dourado pode incrustar sobre as conchas das espécies nativas, impedindo seu fechamento e causando a morte destas espécies. Mudanças na qualidade da água também podem ser atribuídas aos mexilhões quando em grandes quantidades (OLIVEIRA, 2004).

Por meio de experimentos laboratoriais e de uma série de dados de campo de longo prazo, que populações do mexilhão-dourado diminuem as concentrações de matéria orgânica particulada na coluna d'água e elevam os teores de amônia, nitrato e fosfato, acarretando o aumento da relação Fósforo/Nitrogênio (BOLTOVSKOY et al., 2015). Também causam o aumento da transparência da água, a diminuição do séston, do fitoplâncton e da produtividade primária. O mexilhão-dourado afeta o ciclo de nutrientes no ambiente aquático clarificando a coluna d'água (KARATAYEV et al., 2015), além disso ele é capaz de filtrar grandes volumes de água para se alimentar de partículas suspensas, como fitoplâncton e detritos orgânicos. Esse processo de filtração pode afetar a disponibilidade de alimentos para outras espécies, incluindo peixes e micro-organismos, causando alterações na cadeia alimentar e na dinâmica do ecossistema.

O mexilhão dourado possui alto potencial incrustante, principalmente quando se instala em ambientes modificados pelo homem, como os reservatórios de água, o que a tem tornado uma praga, presença e o crescimento rápido do mexilhão dourado podem competir com espécies nativas por recursos, como alimentos e substratos para fixação. Isso pode levar ao deslocamento e redução da biodiversidade local, afetando negativamente os ecossistemas aquáticos causando o deslocamento das espécies nativas (OLIVEIRA et al., 2004).

É nítido as influencias causadas pelo molusco e podem causar alterações estruturais em função dos aglomerados de conchas, devido a maior disponibilidade de substrato duro e aumento da complexidade de substrato, aumentando a fauna móvel e diminuindo a epifauna endêmica; diminuição do fluxo d'água devido ao acúmulo de conchas. Alguns autores ainda relacionam impactos potenciais como o aumento dos peixes onívoros, competição com bivalves nativos e degradação de raízes de plantas.

Os impactos do mexilhão dourado podem variar dependendo das características específicas do ecossistema afetado, bem como da densidade e estabelecimento da espécie invasora. O controle e a prevenção da propagação do mexilhão dourado são desafios importantes para a gestão ambiental e a preservação dos ecossistemas aquáticos.

2.5 Usinas Hidrelétricas

Dentre as fontes energéticas exploradas, a hidroeletricidade se destaca por ser resultante da força da água, um recurso de fácil disponibilidade em alguns locais como no Brasil e que permite sua reutilização a jusante (BORGES; SILVA, 2011). Com uma grande participação de fontes renováveis, isso se dá porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem, especialmente, das usinas hidrelétrica, que historicamente desempenhou um papel fundamental na geração de eletricidade no Brasil. As usinas hidrelétricas aproveitam os recursos hídricos disponíveis, como rios e reservatórios, para gerar eletricidade de forma limpa e renovável.

Segundo EPE (2022), a geração de energia por hidrelétricas no Brasil representa 56,8 % enquanto o Gás Natural, que é a segunda maior fonte de energia, representa 12,8% da energia gerada. Esses dados reforça a importância das hidrelétricas para o país que se dá por uma combinação de fatores geográficos, hidrológicos e históricos.

De acordo com Moretto et al. (2012) a opção brasileira pelas usinas hidrelétricas pode ser justificada basicamente pela segurança temporal no provimento de energia em função da formação de um reservatório e pelo grande potencial hidrelétrico ainda disponível no território brasileiro. O fato do Brasil possuir uma grande rede hidrográfica, com rios extensos e um clima propício para a ocorrência de chuvas regulares em várias regiões do país, assim como uma topografia favorável com relevos montanhosos e grandes desníveis altímetros, o que facilita a construção de barragens para a criação de reservatórios, são fatores que contribuíram para esse tipo de empreendimento no país. Além disso o baixo custo de operação uma vez que a principal despesa é a manutenção e operação, envolvendo principalmente a inspeção, limpeza e reparo de equipamentos o que torna a geração hidrelétrica economicamente atraente e competitiva em relação a outras fontes de energia.

Devido a essas características o histórico do Brasil possui grandes investimentos e desenvolvimento em usinas hidrelétricas. A construção de grandes projetos hidrelétricos, como Itaipu e Belo Monte, contribuiu para a consolidação dessa fonte de energia como uma das principais na matriz energética brasileira.

A estrutura de uma usina apresenta, dentre outros, os seguintes componentes, conforme é ilustrado na figura 4:

- Vertedor: permitem a regulação das vazões afluentes ao leito natural do rio;
- 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;

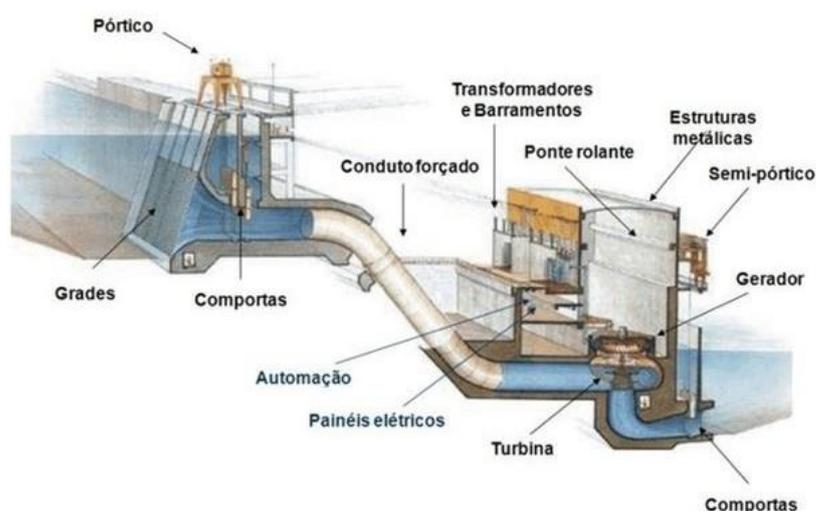


Figura 4 - Arranjo simplificado de uma usina Hidrelétrica

Fonte: DE SOUZA,2023

- 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.

2.6 Usinas a fio d'água

As características naturais do meio ambiente e das bacias hidrográficas influenciam diretamente nas condições de projeto e interfere diretamente no arranjo escolhido de uma hidrelétrica. O objetivo principal dos arranjos de hidrelétricas é maximizar a produção de energia elétrica e otimizar o aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis (PEREIRA, 2015). Cada usina dentro do arranjo é projetada para gerar energia de forma eficiente, levando em consideração as características do rio, como o fluxo de água, a altura do desnível (queda d'água) e a capacidade de armazenamento de água.

No geral as usinas hidrelétricas se caracterizam por aquelas que utilizam águas de reservatório, conhecidas como usinas à fio d'água, ou aquelas que utilizam reservatório de regularização. Usinas a fio d'água produzem energia exclusivamente em função das vazões afluentes aos seus reservatórios, mantendo praticamente invariantes os níveis dos reservatórios e as áreas alagadas pelos mesmos. (AZEVEDO; SILVA; QUEIROGA, 2021). Nessas usinas, incluem-se as usinas com regularização diária ou semanal, que permitem o fornecimento da potência máxima em períodos de ponta. O arranjo geral desse tipo de empreendimento consiste em:

- barragem de enrocamento com face de concreto;

- vertedouro na ombreira com número de comportas variáveis podendo ter calha de concreto e dois degraus aeradores, para prevenir a cavitação do concreto e promover a dissipação de energia;
- Tomada de água na ombreira com seis comportas tipo vagão;
- Túnel de pressão, em número de três;
- Casa de força abrigada.

O funcionamento de uma usina a fio d'água baseia-se no fluxo contínuo de água do rio. A água é captada por uma barragem ou dique baixo, conhecido como barramento a fio d'água, que desvia uma parte do fluxo para as turbinas instaladas na usina. Essas turbinas são acionadas pela força da água em movimento, que passa por elas e gera energia mecânica (TEIXEIRA; PAULA, 2015). Usinas a fio d'água são mais adequadas para rios com fluxo constante e estável ao longo do ano. Elas são particularmente eficientes em regiões onde há uma diferença significativa de elevação entre a área de captação da água e o local onde a usina está localizada, permitindo uma queda d'água suficiente para acionar as turbinas.

Uma das principais vantagens das usinas a fio d'água é a redução do impacto ambiental em comparação com as usinas hidrelétricas convencionais. Elas exigem menor interferência no curso natural do rio, resultando em menor alteração dos ecossistemas e menor deslocamento de comunidades locais. Além disso, elas podem responder rapidamente às variações de demanda de energia, uma vez que não dependem da disponibilidade de água armazenada em reservatórios (SILVA et al., 2022).

Ainda de acordo com Silva et al. (2022) as usinas a fio d'água também têm algumas limitações. Elas são mais sensíveis a mudanças na disponibilidade de água, como secas, o que pode afetar sua capacidade de geração de energia. Além disso, em regiões com flutuações sazonais significativas no fluxo do rio, a geração de energia pode ser afetada durante os períodos de menor vazão.

2.7 Barragens

As barragens de hidrelétricas são estruturas imponentes e complexas que desempenham um papel fundamental na geração de energia elétrica a partir da força da água. O controle de vazão exercido pela barragem reduz os picos de cheias podendo comprometer a distribuição sazonal dos fluxos fluviais com conseqüente reorganização do padrão natural do canal (SERRA; OLIVEIRA, 2020). Essas barragens são consideradas uma das formas mais antigas e eficientes de geração de energia renovável em larga escala.

Ao longo dos anos, as barragens de hidrelétricas têm desempenhado um papel crucial no suprimento energético de muitos países, oferecendo uma fonte de energia limpa e renovável. Além disso, elas desempenham um papel importante no controle de enchentes, irrigação, abastecimento de água potável e navegação em muitas regiões.

A construção de uma barragem envolve o represamento do rio através da construção de uma parede maciça de concreto ou terra. Essa estrutura cria um reservatório capaz de armazenar grandes quantidades de água. Quando necessário, as comportas da barragem são abertas, permitindo que a água flua através das turbinas instaladas nas usinas hidrelétricas. A força da água em movimento aciona as turbinas, que, por sua vez, acionam os geradores elétricos, convertendo a energia mecânica em energia elétrica (PEREIRA, 2015).

Os tipos de barragens são variáveis de acordo com as características do local da implantação das hidrelétricas. Os tipos mais comuns são:

- Barragem de terra com seção homogênea: As barragens de terra são construídas principalmente com solo, rochas, areia e outros materiais naturais. Elas são mais flexíveis em termos de projeto e podem ser construídas em grandes alturas e extensões. As barragens de terra podem ser do tipo enrocamento, em que são usadas camadas de pedras e material granular compactado, ou barragens de terra compactada, em que o solo é compactado em camadas.

- Barragem de enrocamento: As barragens de enrocamento são construídas usando pedras e rochas de grande porte. Essas pedras são empilhadas e compactadas para formar uma estrutura estável. O espaço entre as pedras é preenchido com materiais de enchimento para fornecer estabilidade adicional.

- Barragem de concreto: As barragens de concreto são construídas usando concreto reforçado ou concreto compactado com rolo. Elas são projetadas para suportar grandes cargas e fornece uma base sólida para a operação das turbinas. Barragens de concreto podem ser do tipo gravidade, arco ou abóbada, dependendo da forma e da maneira como são estruturadas

- Barragem em arco: As barragens de arco são curvas em forma de arco e são construídas usando concreto. Elas transferem o peso da água para as abutments (apoios laterais) por meio de forças de compressão. As barragens de arco são adequadas para locais com cânions estreitos e rochas resistentes, onde a água pode ser retida por meio de uma combinação de curvatura e resistência à compressão.

As soluções tecnicamente viáveis são diversas e a escolha da seção deverá ser feita em um processo iterativo pelo critério de menor custo global. As barragens de interligação com as estruturas de concreto, através dos muros de abraço ou de encosto, são de enrocamento com núcleo que, com seus taludes mais íngremes, possibilitam reduzir o comprimento dos muros e, conseqüentemente, os custos (PEREIRA, 2015).

As barragens das hidrelétricas são projetadas com alto grau de detalhamento e confiabilidade para não sofrer modificação do ponto de vista de estrutura civil, visto que um reparação se torna algo fora de cogitação se tratando de custos, por isso as barragens ainda contam com estruturas que ajudam a manter as condições de projeto, que é o caso dos vertedouros projetados para suportar vazões geradas por chuvas extremas, controlando o nível do reservatório, garantindo as condições de projeto e evitando o galgamento ("transbordamento") da barragem (PEREIRA, 2015). Cada projeto de barragem é único e requer uma análise cuidadosa de fatores geológicos, hidrológicos e ambientais para garantir sua segurança e eficiência.

2.8 Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) são projetadas para ter uma capacidade instalada de até 30 megawatts (MW) e são consideradas empreendimentos de menor porte em comparação com as grandes usinas hidrelétricas (ABRAPCH, 2023). Será apresentado a seguir algumas das características técnicas que geralmente são encontradas nas PCH's:

- **Capacidade de Geração:** As PCHs têm uma capacidade de geração relativamente baixa, geralmente variando de alguns quilowatts (kW) até 30 MW. Essa capacidade está relacionada ao tamanho do reservatório, vazão do rio e queda d'água disponível no local.

- **Barragem:** As PCHs podem ter barragens de diferentes tipos, como barragens de concreto, barragens de enrocamento ou barragens de terra compactada. A escolha do tipo de barragem depende das características do terreno e do fluxo de água disponível.

- **Turbinas:** As PCHs podem utilizar diferentes tipos de turbinas, como turbinas Francis, turbinas Pelton ou turbinas Kaplan, dependendo das características hidrológicas e de queda d'água específicas do local. Essas turbinas convertem a energia hidráulica da água em energia mecânica.

- **Geradores:** Os geradores são responsáveis por converter a energia mecânica fornecida pelas turbinas em energia elétrica. Eles geralmente são acoplados às turbinas e produzem energia em corrente alternada.

- **Linhas de Transmissão:** A energia gerada pelas PCHs precisa ser transmitida para a rede elétrica, para ser distribuída aos consumidores. Para isso, são construídas linhas de transmissão que transportam a energia elétrica para as subestações, onde ocorre a distribuição para os locais de consumo.

- **Impactos Ambientais:** Embora as PCHs geralmente tenham um menor impacto ambiental em comparação com grandes usinas hidrelétricas, elas ainda podem ter impactos, como alterações no fluxo de água, modificação de habitats aquáticos e

terrestres e impactos na fauna e flora local. A avaliação e mitigação dos impactos ambientais são aspectos importantes durante o planejamento e a operação das PCHs.

As PCHs desempenham um papel importante na matriz energética brasileira, contribuindo para a geração de energia elétrica em escala local e regional. Segundo dados da ABRAPCH (2023), Associação Brasileira de PCHs e CGHs, há em funcionamento no Brasil cerca de 425 unidades sendo responsável por cerca de 3,5% de toda a capacidade instalada do sistema interligado nacional.

2.9 Perdas de carga

A perda de carga faz alusão a quantidade de energia perdida por um fluido devido a diversos fatores como as turbulências causadas pela aceleração da água e/ou ao atrito do fluido com uma camada estacionaria aderida às paredes internas de um tubo (DINIZ, 2010). Existem dois tipos de perdas de cargas, sendo eles a Perda de carga distribuída ou continua e a perda de carga localizada. A perda de carga localizada se dá em trechos onde há acessórios instalados como válvulas, grades, turbinas, entre outros (SOUZA et al., 2023). Em usinas hidrelétricas uma das causas de perda de carga localizadas mais comuns é causada pela mudança de aceleração da água dependente do alargamento ou afunilamento das tomadas d'águas como ilustra a figura 5.



Figura 5 – Ponto de turbulência, perda de carga localizada, Usina Itaipu

Para quantificar a perda de carga devida a aceleração usamos a seguinte fórmula dependente da forma da tomada d'água representada pelo coeficiente m.

$$h = \frac{v_2^2 - v_m^2}{2g} \quad (3.1)$$

Onde v_2 é a velocidade d'água na saída da tomada d'água, v_1 a velocidade antes da tomada e m um fator de forma que varia entre 0,01, para forma hidrodinâmica bem afunilada e arredondada e 0,1 para transições bruscas. Para tomadas bem projetadas, essa perda não assume valores grandes. Se, por exemplo, a água entra na tomada diretamente de um reservatório grande a velocidade v_1 pode ser considerada zero.

Segundo o teorema de Bernoulli, um fluido real escoando em condutos forçados e livres sempre terá uma perda de carga ou energia, denominada de perda de carga distribuída ou contínua, devido ao atrito interno e à fricção entre o fluido e as paredes (DINIZ, 2010). Após inúmeras experiências conduzidas por Darcy e outros investigadores, com tubos de seção circular, concluiu-se que a resistência ao escoamento é:

- Proporcional ao comprimento (L) da canalização;
- Inversamente proporcional ao diâmetro (1/D);
- Proporcional a uma potência da velocidade (V^n);
- Variável com a natureza dos tubos (rugosidade);
- Independentemente da posição dos tubos;
- Independente da pressão interna.

Com isso chega-se a fórmula denominada de Darcy-Weisbach ou ainda, Fórmula Universal:

$$h = f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.2)$$

Contudo, entende-se como maior dificuldade para a utilização da fórmula apresentada a obtenção do coeficiente de atrito (f), pois esta é uma função da rugosidade do tubo, da viscosidade e densidade do fluido, da velocidade e diâmetro

da tubulação. Sendo assim a formula de Hazen- Willians possui grande aceitação pelo seu amplo uso e inúmeros experimentos que comprovam sua perspicácia. Sendo assim a formula universal pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$h = \frac{8 * f * Q^2 * L}{\pi^2 * g * D^5} \quad (3.3)$$

Onde: Q é a vazão em m³/s; D é o diâmetro em metros; C é o coeficiente que depende da natureza do material empregado e das condições das paredes internas; f é o coeficiente de atrito e; L é o comprimento da canalização.

3 METODOLOGIA

Com base no referencial teórico descrito no capítulo anterior a metodologia utilizada para atingir os objetivos citados foi a realização de consultas bibliográficas com o intuito de levantar dados pertinentes sobre o assunto levando em consideração estudos de casos já existentes para a coleta de dados pertinente que serviram como base para a realização de simulações.

3.1 Descrição PCH Poço Fundo (RJ)

A pequena central Hidrelétrica (PCH) de Poço Fundo, localizada no Município de São José do Vale do Rio Preto, próximo à cidade de Teresópolis, no Estado do Rio de Janeiro conforme figura 6 possui 73 metros de queda bruta e queda líquida de 69,44 metros ocasionando cerca de 4,88% de perda, estima-se que essa PCH possui potência instalada de 14MW para uma vazão turbinada de 22,55 m³/s.

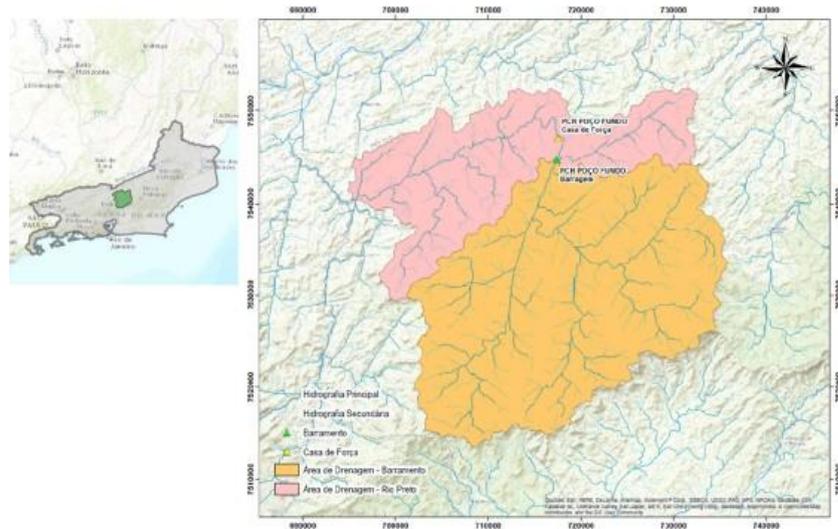


Figura 6 – Localização PCH Poço Fundo – RJ

Fonte: Disponibilizado por GeoEnergy Engenharia.

A PCH Poço Fundo possui um arranjo denominado de Usinas Hidrelétricas a Fio d'água cujo nível de água operativo (NA) não varia (ou varia muito pouco), conforme explanado anteriormente, sendo assim o arranjo geral desse empreendimento, apresentado conforme figura 7 e 8, consiste em:

- Barragem de enrocamento com face de concreto;
- Tomada de água;
- Túnel de adução e;
- Casa de força.

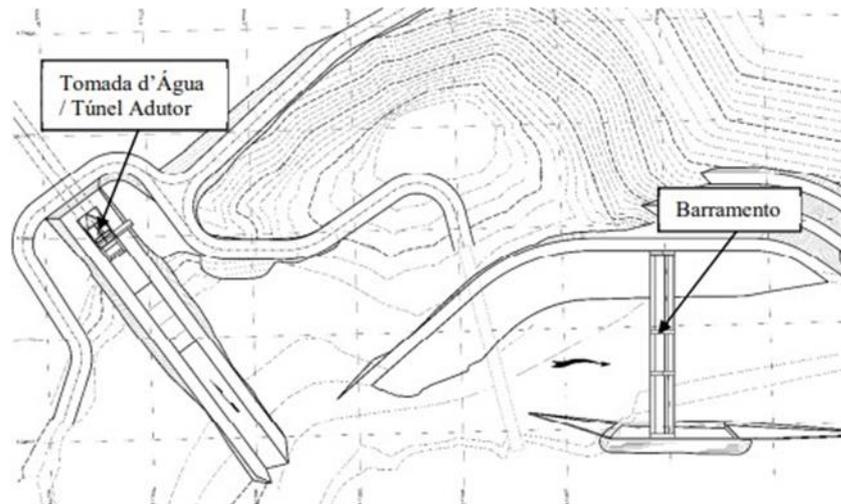


Figura 7 – Arranjo a montante da PCH Poço Fundo

Fonte: Disponibilizado por GeoEnergy Engenharia.

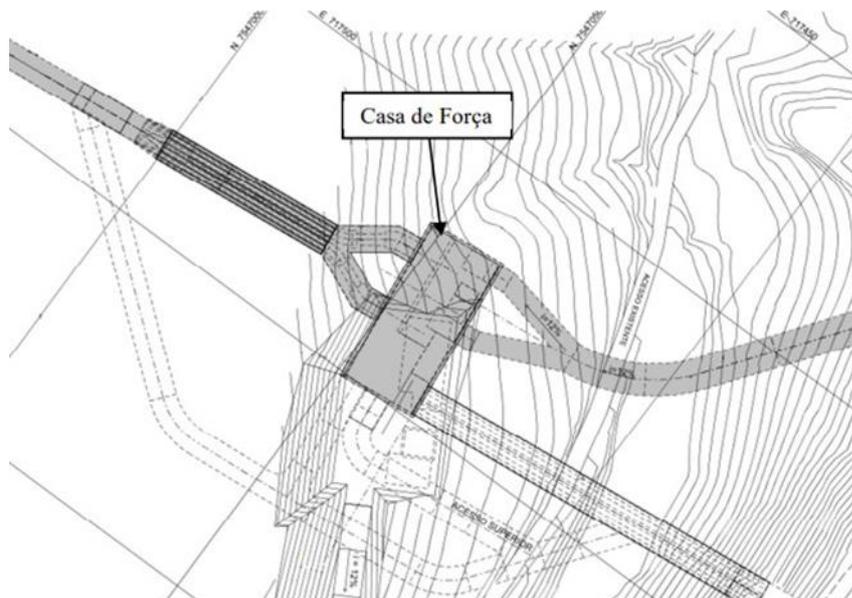


Figura 8– Arranjo a jusante da PCH Poço Fundo

Fonte: Disponibilizado por GeoEnergy Engenharia.

3.2 Determinação da perda de carga e potência

A determinação da perda de carga em um sistema hidráulico é fundamental para projetar e dimensionar corretamente tubulações, válvulas, bombas e outros

componentes. Nos sistemas de adução, que é o conjunto de tubulações e componentes que transportam água desde a captação até a estação de tratamento ou distribuição, a perda de carga refere-se à queda de pressão que ocorre devido ao atrito e resistência ao fluxo ao longo das tubulações e componentes do sistema. Para calcular a perda de carga em um sistema de adução é necessário realizar os seguintes procedimentos:

- Identificação do traçado da adução: Mapear o percurso do sistema de adução, incluindo a localização das tubulações, válvulas, conexões e outros componentes relevantes;
- Realização do levantamento de dados e propriedades: Obter informações sobre o diâmetro interno das tubulações (D), comprimento total de cada trecho (L), rugosidade das paredes internas das tubulações, vazão de água (Q) e velocidade do fluxo (V) em cada trecho da adução;
- Determinação do tipo de escoamento: Com base nas informações sobre a vazão e o diâmetro das tubulações, determinar se o escoamento é laminar ou turbulento. Isso ajudará a escolher a equação correta para o cálculo do fator de atrito;
- Determinação do fator de atrito: O fator de atrito é determinado usando as equações adequadas para o tipo de escoamento presente em cada trecho da adução;
- Realização do cálculo da perda de carga: Utilizando a equação de Darcy-Weisbach para calcular a perda de carga em cada trecho da adução;
- E por fim realizar o somatório das perdas de carga em cada trecho da adução para obtendo a perda de carga total do sistema.

Para sistemas de adução mais complexos, com várias ramificações e componentes, pode ser necessário realizar análises hidráulicas mais avançadas, incluindo o uso de softwares de simulação hidráulica com o HydroSim XP e EPANET, que não é o caso da PCH escolhida.

Contudo as fontes primárias de perdas de carga no conduto são o atrito do fluído com as paredes, as curvas e as bifurcações. Para o estudo em questão a perda de carga calculada será referente a incrustação do mexilhão dourado nas paredes dos tubos, sabendo que conforme o mesmo for invadindo o sistema de adução a perda de carga irá aumentar reduzido a queda disponível da instalação.

Para determinar a perda de carga no sistema de adução, foi necessário estabelecer alguns critérios de cálculo levando em consideração que o sistema de adução é dividido em três grandes componentes: a) tomada d'água; b) Tubulação forçada; c) Singularidades, como juntas, curvas e bifurcações. Para cada um desses componentes, é adotada uma porcentagem de perda de carga total permitida. Dessa maneira, é possível obter o valor da perda de carga específica apenas na tubulação.

Para o levantamento de dados, a perda de carga foi estimada pela equação 3.3, denominada de "Equação Universal"(descrita por Vennard, 1963, e Azevedo Neto, 1998).

Ainda de acordo com do projeto básico da PCH do Poço fundo a perda de carga assume o valor 5% admitindo um diâmetro de 4,20 m. Com isso adota-se, hipoteticamente, os seguintes valores de distribuição de perda carga no sistema:

- Tomada de água = 10%;
- Singularidades = 10%;
- Tubulação em conduto fechado = 80%.

Outro parâmetro importante a se definir trata-se do fator de atrito provocado pela incrustação do mexilhão dourado nas paredes dos tubos, para este trabalho será utilizado a correlação matemática apresentada por Simeão (2011)

A tabela 1 indica o fator de atrito com as intensidades de infestação segundo Simeão (2011), esses valores serão usados para quantificar a perda de carga e posteriormente realizar os levantamentos de impactos econômicos causados pela incrustação do mexilhão dourado.

Tabela 1 - Relação de intensidade de infestação e fator de atrito.

Intensidade de infestação (Ind/cm ²)	Fator de atrito (f)
0,0	0,014
0,5	0,025
1,0	0,120

Fonte: Obtido a partir de Simeão, 2011.

Os dados apresentados na Tabela 2 fazem parte do relatório de projetos básico da PCH Poço Fundo elaborado pela Watermark Engenharia (RJ) essa tabela apresenta dados de estudos baseados no histórico de vazões médias mensais e a potência geradas pelas respectivas vazões, esses dados serviram de base para produzir os patamares de energia de potência instalada.

Tabela 2 - Dados de entrada para cálculo de perda de carga.

Potência (kW)	14000	10930	8320	6670	5360
Vazão (m ³ /s)	26,58	17,60	13,40	10,75	8,63

Fonte: Disponível em Projeto de Usinas Hidrelétricas, Passo a Passo, (PEREIRA, 2015) - Adaptado pelo autor

Esses dados foram utilizados com o intuito de se adequar aos estudos matemáticos aqui apresentados, e permitindo produzir a curva de geração da PCH Poço Fundo tendo como base a a tabela 3, que indica a série de vazões médias do local. Essa curva de geração nos mostra a que vazão a PCH irá operar ao longo do dia assim como a quantidade de energia gerada.

Tabela 3 – Série de vazões médias no local PCH Poço Fundo (RJ)

Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out	Nov.	Dez.
1931	26,5	34,6	30,0	23,3	17,5	14,4	12,6	11,6	13,0	17,1	20,8	25,7
1932	35,0	28,9	23,6	17,1	17,1	14,7	11,8	12,5	11,0	13,3	16,0	31,5
1933	34,4	22,9	22,2	16,5	15,7	12,6	11,2	9,3	10,0	16,0	17,9	22,8
1934	33,3	18,6	19,9	15,0	11,3	9,6	10,1	7,8	8,9	8,8	12,0	25,2
1935	26,4	37,2	21,3	18,3	14,3	11,6	10,5	9,8	12,1	16,5	14,7	19,9
1936	11,2	15,3	22,4	17,2	11,3	9,2	7,0	6,3	6,8	7,1	7,7	16,7
1937	30,1	28,4	14,4	15,6	15,2	9,3	7,7	5,9	5,6	10,8	20,6	65,1
1938	37,1	32,6	25,2	24,8	16,3	16,0	10,8	14,3	10,7	11,5	16,2	33,0
1939	35,6	26,0	17,1	16,6	11,7	8,6	7,7	6,4	7,2	6,4	10,5	25,8
1940	37,4	28,7	24,5	15,1	11,8	9,2	7,7	6,7	7,1	10,6	17,8	26,8
(*)												
2000	38,5	17,8	20,1	16,4	10,0	8,2	8,7	9,7	13,6	9,1	11,9	19,0
2001	25,4	21,2	17,2	14,8	11,9	8,3	7,3	6,0	6,6	7,7	10,0	23,5
2002	23,0	22,8	16,1	11,8	10,3	7,7	7,2	6,0	8,4	6,0	16,9	43,1
2003	32,6	16,1	17,2	12,5	10,7	8,7	7,5	8,5	8,7	11,2	21,1	23,4
2004	28,3	28,3	21,2	17,3	12,9	11,1	13,5	8,7	6,9	10,8	16,2	26,7
2005	38,1	43,0	30,3	17,7	14,4	12,5	12,4	9,3	10,0	8,4	16,1	29,1
2006	13,7	12,5	13,0	15,5	10,2	8,1	6,5	6,3	6,6	8,8	16,7	23,0
2007	49,4	22,1	14,1	13,9	12,0	9,1	7,9	6,3	5,5	6,5	13,2	18,3
2008	20,1	29,4	27,2	21,3	13,7	10,7	8,4	7,7	7,8	9,7	18,3	22,4
Mín.	9,8	9,6	8,5	8,5	7,5	6,0	4,6	3,8	3,5	4,4	6,2	6,9
Méd.	30,0	26,5	24,1	18,4	13,4	10,6	9,1	8,0	8,8	10,9	16,8	25,7
Máx.	69,5	55,6	54,6	38,0	28,8	32,5	17,4	14,3	31,5	37,2	32,7	65,1

Fonte: Disponível em Projeto de Usinas Hidrelétricas, Passo a Passo, (PEREIRA, 2015) pág. 128

Logo com todos os dados necessários levantados e bem definidos foi utilizado a equação 3.3 para a definição da perda de carga causada pelas infestações de acordo com os índices de infestação apresentado na tabela 1.

3.3 Potência disponível

Após definir as perdas de cargas foi utilizada a equação 4.1 para encontrar a potência ainda disponível no sistema e utilizou-se a equação 4.2 para encontrar os valores da potência gerada com a infestação.

$$P_{disp} = g * Q * \frac{8 * Q^2 * L_{equiv}}{\Pi * g * D^5} (f_{inf} - f_{inicial}) * \eta_{el-mec} \quad (4.1)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade;

Q = vazão (m^3/s);

L_{equiv} = comprimento da tubulação (m);

D = Diâmetro da tubulação (m);

f_{inf} = coeficiente de perda de carga com infestação;

$f_{inicial}$ = coeficiente de perda de carga inicial;

η_{el-mec} = rendimento eletromecânico (91%).

A equação 4.1 pode ser simplificada e reescrita da seguinte forma:

$$P_{disp} = \frac{8 * Q^2 * L_{equiv}}{\Pi * D^5} (f_{inf} - f_{inicial}) * \eta_{el-mec} \quad (4.2)$$

Com a potência que foi gerada com a incrustação definida ao subtrair da potência gerada disponível encontramos a perda de geração devido a infestação do mexilhão dourado.

3.4 Estudos energéticos de implantação do Projeto Básico da PCH Poço Fundo (RJ)

Os estudos enérgicos aqui apresentados foram baseados no Projeto básico da PCH Poço Fundo (RJ) desenvolvido pela Watermark Engenharia (RJ) e apresentado por Pereira (2015). Por se tratar de uma PCH que opera a fio d'água sem a presença de empreendimentos a montante para a regularização de vazões, conforme apresentado no item 4.1, a simulação energética foi elaborada em um modelo individualizado considerando sua operação mês a mês segundo os históricos de vazões mensais já apresentados na tabela 3. Os dados utilizados na simulação que permitiu a determinação da energia média das vazões turbinadas e das vazões vertidas foram:

- N.A. máximo normal de operação do reservatório: 691,00 m;
- N.A. médio do canal de fuga: 618,00m;
- perdas hidráulicas: 4,88 % da queda bruta = 3,56 m;

- rendimento global nominal do grupo turbina-gerador: 90,6 %;
- vazão sanitária: 1,96 m³/s;
- indisponibilidade forçada: 2%;
- indisponibilidade programada: 3 %.

Com base nesses dados e na tabela de vazões médias (3) foram apresentados os seguintes resultados:

Tabela 4 - Simulação Energética PCH Poço Fundo

Pot. Inst.(MW)	Energia Méd. (MW méd)	Fator de capacidade	Vazão de ref. (m³/s)
12,00	7,29	0,61	19,05
13,00	7,52	0,58	20,78
14,00	7,69	0,55	22,55
15,00	7,83	0,52	24,37
16,00	7,94	0,50	26,24

Fonte: Disponível em Projeto de Usinas Hidrelétricas, Passo a Passo, (PEREIRA, 2015) pág.

149

Para calcular o custo anual da instalação utilizou-se o Fator de Recuperação de Capital (FRC) que é obtido através da equação 4.3. Considerando, por se tratar de uma PCH, a energia média obtida deve ser com base em um histórico de vazões de no mínimo 30 anos de dados, com isso temos $n = 30$ anos e $i = 12\%$ a.a., sendo n a vida útil do empreendimento e i a taxa de desconto.

$$FRC = \frac{i(1 + i)^n}{i(1 + i)^n - 1} \quad (4.3)$$

Com base nesses dados foram apresentados os custos das alternativas de projetos e foi adotado a potência de 14MW pois sua relação custo benefício é a mais próxima do valor ideal que é 1, conforme relata a tabela 5, tabela 6 e tabela 7.

Tabela 5 - Custos das alternativas - PCH Poço Fundo

Pot.Inst.(MW)	Custo total (R\$)	Custo Anual (R \$)	Custo incremental (R \$)
12	59.168.870,00	7.984.044,00	-
13	60.952.189,00	8.225.580,00	241.536,00
14	62.437.950,00	8.424.919,00	199.340,00
15	63.980.630,00	8.628.679,00	203.778,00
16	65.493.610,00	8.826.160,00	197.463,00

Fonte: Disponível em Projeto de Usinas Hidrelétricas, Passo a Passo, (PEREIRA, 2015) pág. 150

Tabela 6 – Benefícios energéticos - PCH Poço Fundo

Pot.Inst.(MW)	Energia Méd.(MW méd.)	Ben. Anual (R \$)	Ben. Anual incremental (R \$)
12	7,29	8.940.456,000	-
13	7,52	9.222.528,00	282.072,00
14	7,69	9.431.016,00	208.488,00
15	7,83	9.602.721,00	171.696,00
16	7,94	9.737.616,00	134.904,00

Fonte: Disponível em Projeto de Usinas Hidrelétricas, Passo a Passo, (PEREIRA, 2015) pág. 150

Tabela 7 - Benefícios energéticos - PCH Poço Fundo

Pot.Inst.(MW)	Ben. Anual incremental (R \$)	Custo incremental (R \$)	Custo/benefício
12	-	-	-
13	282.072,00	241.536,00	1,17
14	208.488,00	199.340,00	1,05
15	171.696,00	203.778,00	0,84
16	134.904,00	197.463,00	0,68

Fonte: Disponível em Projeto de Usinas Hidrelétricas, Passo a Passo, (PEREIRA, 2015) pág. 151

Portanto para o empreendimento da PCH Poço Fundo estima-se:

- Custo Total do empreendimento: R\$ 62.437.950,00;
- Custo Anual do empreendimento: R\$ 8.424.919,00;
- Benefício Anual do empreendimento: R\$ 9.431.016,00;

3.5 Impactos econômicos devido à perda de carga

Conforme detalhado na seção 3.3, as usinas hidrelétricas enfrentam desafios significativos decorrentes da infestação do Mexilhão Dourado em suas estruturas, provocando perda de eficiência no fluxo hídrico. Uma vez que a geração de energia elétrica depende diretamente do fluxo contínuo de água, qualquer interferência nesse processo compromete a viabilidade operacional. O mecanismo subjacente à produção de energia hidrelétrica engloba a conversão da energia potencial gravitacional da água em energia cinética, a qual, por sua vez, é convertida em energia elétrica. Portanto, a preservação da integridade do fluxo hídrico é fundamental para otimizar a geração de eletricidade nesse contexto.

Para o levantamento dos impactos econômicos devido à perda de carga causada pelo mexilhão dourado o resultado da potência perdida foi recalculado afim de exemplificar as perdas de potência em 1 dia, 1 mês e 30 anos, períodos escolhidos para embasar a perda financeira com as concentrações de 0,50 ind/cm² e 1,0 ind/cm².

Com esses dados e tomando como o valor de R\$ 0,754 / kWh, referência do custo de energia divulgado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com última atualização em dezembro de 2022, é simulado o impacto econômico gerado devido à perda de carga e potência causado pelo mexilhão dourado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Perda de carga no sistema de adução

Para calcular a perda de carga se faz necessário a confecção da curva de geração, para isso foram utilizadas as vazões médias apresentadas na tabela 3, para isso utilizou-se do método de análise que envolve a categorização das vazões com base em seus valores. Para isso foram coletados os 12 valores médios obtidos através da tabela 3 e separou-se os valores em ordem decrescente, aqueles que possuíam valores próximos, foi calculado a média, desta forma estipulando o tempo de geração em 24 horas conforme apresenta a tabela 8. Criando a hipótese da curva de geração.

Tabela 8 - Curva de Geração da PCH

Vaz .Méd..	Valor Méd	Pot. Gerada (MW)	Geração(%)	Horas de geração(h)
30,00 26,50 25,70 24,10	26,58	14,00	33,33	8,00
18,40 16,80	17,60	10,93	16,70	4,00
13,40	13,40	8,32	8,33	2,00
10,90 10,60	10,75	6,67	16,67	4,00
9,10 8,80 8,00	8,63	5,36	25,00	6,00

Fonte: Autor

Esses dados foram adaptados com o intuito de se adequar aos estudos matemáticos aqui apresentados, e permitindo produzir a curva de geração da PCH Poço Fundo, apresentada na figura 9. Essa curva de geração nos mostra a que vazão a PCH irá operar ao longo do dia, e a quantidade de energia que será gerada.

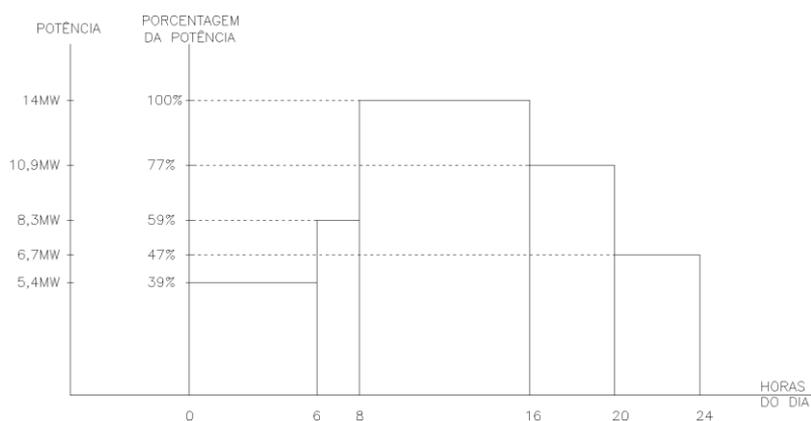


Figura 9 - Curva de Geração PCH Poço Fundo

Fonte: Autor.

Com os dados necessários já definidos e apresentados na Tabela 2 inicia-se os cálculos de perda de geração de energia, o primeiro a ser apresentado trará como resultado a perda de carga causada pelas infestações de acordo com os índices de infestação apresentado na tabela 1. Para isso foi utilizado a equação 3.3 cujo resultados estão descritos na tabela 9;

Tabela 9 - Perda de carga (mca).

Dados de entrada					
Potência (kW)	14000	10930	8320	6670	5360
Vazão (m ³ /s)	26,58	17,60	13,40	10,75	8,63
Perda de carga (mca)					
Sem infestação	0,99	0,603	0,35	0,224	0,145
0,50 ind/cm ²	1,768	1,077	0,624	0,4	0,259
1,0 ind/cm ²	8,487	5,17	2,997	1,922	1,243

Fonte: Autor

Com base nisso constatou-se que há uma perda de carga significativa no sistema de adução, para o estudo em questão foram utilizados dois valores diferentes de infestação, 0,5 ind/cm² e 1,0 ind/cm², podendo esses valores serem agravados, levando ao aumento de perda de carga e possivelmente maiores danos, logo para que isso não ocorra é necessário realizar inspeções periódicas afim de mitigar a infestação do molúsculo.

4.2 Potência gerada pela PCH

Após definir as perdas de cargas foi utilizado a equação 4.2 que possibilitou encontrar os valores descritos na tabela 10 representando os valores da potência gerada mesmo com a infestação servindo de argumento para a manipulação de dados a seguir.

Tabela 10 - Potência gerada com infestação (kW)

Dados de entrada					
Potência (kW)	14000	10930	8320	6670	5360
Vazão (m ³ /s)	26,58	17,60	13,40	10,75	8,63
Potência gerada com infestação (kw)					
Sem infestação	14000	10930	8320	6670	5360
0,50 ind/cm ²	13843	10855	8287	6653	5351
1,0 ind/cm ²	12647	10286	8036	6524	5284

Fonte: Autor

Definida a potência gerada com a incrustação, se faz necessário encontrar a perda de geração devido a incrustação, para isso foi realizado a operação de subtração, sendo que já é conhecido o valor da potência inicial do sistema, apresentado na tabela 2, e o valor da potência gerada com a presença do mexilhão dourado, apresentado na tabela 10 efetuando essa operação encontramos os resultados descritos na tabela 11.

Tabela 11 - Potência perdida (kW/dia)

Dados de entrada					
Potência (kW)	14000	10930	8320	6670	5360
Vazão (m ³ /s)	26,58	17,60	13,40	10,75	8,63
Potência perdida (kW/dia)					
Sem infestação	0	0	0	0	0
0,50 ind/cm ²	157	75	33	17	9
1,0 ind/cm ²	1353	644	284	146	76

Fonte: Autor

Com base nos resultados encontrados constatou-se que uma perda de carga significativa no sistema de adução, para o estudo em questão foram utilizados dois valores diferentes de infestação, 0,5 ind/cm² e 1,0 ind/cm².

Considerando a concentração de 0,5 ind/cm², conforme já era de se esperar, a concentração mais baixa de infestação resultaria em uma perda de carga baixa, logo foi constatado um aumento de aproximadamente 1,8 vezes levando em consideração os estudos realizados com a concentração nula, resultando em uma perda de potência entre 0,17 %, para vazão de 8,63 m³/s, a 1,12% para vazão maior de 26,58 m³/s. Já

para a concentração de 1,0 ind/cm² essa perda chega a 1,42 % para vazão de 8,63 m³/s chegando a 9,66 % para vazão de 26,58 m³/s.

Ao considerar concentração de 1,0 ind/cm² nota-se que, com concentração maior, o resultado no aumento de perda de carga foi de aproximadamente 8,5 vezes o valor sem a infestação, resultando em uma perda de potência de 1,42 % para vazão de 8,63 m³/s, chegando a 9,66 % para vazão de 26,58m³/s. Martinez et al. (2013) observou que para uma PCH com vazões e diâmetros de tubulações inferiores as estudadas neste trabalho, a perda de geração no pior cenário chegou a 35%. Sendo assim é importante ressaltar que quanto menor o diâmetro das tubulações, maior o efeito da perda de carga no sistema pois maior será o atrito fo fluido com as paredes da tubulação.

4.3 Impactos Econômicos

Para este estudo a tabela 11, com base na curva de geração da PCH, foi recalculada afim de exemplificar as perdas de potência em 1 dia, 1 mês, 1 ano e 30 anos, períodos escolhidos para embasar a perda financeira com as concentrações de 0,50 ind/cm² e 1,0 ind/cm² que foram simuladas anteriormente, sendo assim os resultados obtidos estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Perda de Potência por períodos(kW)

-	Dia	Mês	1 Anos	30 anos
0,50 ind/cm ²	1.744	52.320	627.840	18.835.200
1,0 ind/cm ²	15.008	450.240	5.402.880	162.086.400

Fonte: Autor

Com esses dados e tomando como o valor de R\$ 0,754 / kWh, referência do custo de energia divulgado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica com última atualização em dezembro de 2022, o impacto econômico gerado devido à perda de carga e potência causado pelo mexilhão dourado estão apresentando na tabela 13.

Tabela 13 - Perda de geração em termos financeiros (R\$)

-	Dia	Mês	1 Anos	30 anos
0,50 ind/cm ²	1.314,98	39.449,28	473.391,36	14.201.740,80
1,0 ind/cm ²	11.316,03	339.480,96	4.073.771,52	122.213.145,60

Fonte: Autor

Analisando os valores encontrados, convertendo os valores de perda de potência para valores monetários chega-se ao resultado que com a infestação de 0,50 ind/ cm² o déficit em 30 anos supera o valor de 14 milhões de reais totalizando 23% do custo total do empreendimento. Já com a infestação de 1,0 ind/cm² esse valor extrapola o custo total do empreendimento em 196%.

A diminuição da potência energética pode provocar prejuízos econômicos inviabilizando a produção de energia na PCH estudada. Para que a geração não seja prejudicada, em caso de infestação por mexilhão dourado, o sistema deverá criar um plano de manutenção, que gerará aumento dos custos de manutenção, não só no sistema de adução conforme foi abordado neste trabalho, mas também nos outros componentes da PCH como as turbinas por exemplo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados foi possível levantar dados de uma simulação energética e financeira referente aos impactos causados pelo Mexilhão Dourado em uma Pequena Usina Hidrelétrica, logo constatou-se uma perda de carga significativa no sistema de adução,

Considerando a concentração de 0,5 ind/cm² observou-se um aumento na perda de carga de aproximadamente 1,8 vezes, ocasionando uma perda de 1744 kW por dia, considerando a vida útil do empreendimento, que é 30 anos, o acumulado de perdas chega a 18,8 milhões kW causando um déficit de 14 milhões de reais.

Com a concentração de 1,0 ind/cm² nota-se que o aumento de perda de carga foi de aproximadamente 8,5 vezes o valor sem a infestação, a perda de geração chegou a 9,66 % para a maior vazão de operação da PCH que é de 26,58 m³/s, neste caso, considerado o pior cenário, há uma perda de 162 milhões kW em 30 anos que

convertidos em termos financeiros causaria um déficit que chegaria ao valor próximo de 120 milhões de reais.

Esses indicativos de perdas financeiras verificadas, devido a diminuição da capacidade de geração da PCH, podem acarretar em um risco alto causando prejuízos que provavelmente inviabilizam a operação do sistema, por isso a presença do mexilhão dourado deve ser monitorada desde a fase inicial de colonização permitindo o conhecimento da evolução do problema a tempo de serem evitados.

REFERÊNCIAS

- ABRAPCH. Associação brasileira de pchs e cghs. disponível em: <<https://abrapch.org.br/>>. acesso em: 14 jul. 2023. 2023.
- AZEVEDO, C. O. R.; SILVA, J. M. d.; QUEIROGA, M. S. C. Análise comparativa de usina hidrelétrica com reservatório e usina hidrelétrica a fio d'água por meio da análise de custo e efetividade. 2021. Centro de Ensino Unificado do Distrito Federal., 2021.
- BOLTOVSKOY, D. et al. Nutrient recycling, phytoplankton grazing, and associated impacts of *limnoperna fortunei*. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*, 2015. Springer, p. 153–176, 2015.
- BORGES, R. S.; SILVA, V. d. P. d. Usinas hidrelétricas no Brasil: a relação de afetividades dos atingidos com os lugares inundados pelos reservatórios. *Caminhos da geografia*, 2011. v. 12, n. 40, p. 222–231, 2011.
- CEMIG. mexilhão dourado: entenda porque essa espécie invasora é perigosa para a natureza. disponível em: <<https://www.cemig.com.br/usina-do-conhecimento/mexilhao-dourado-entenda-porque-essa-especie-invasora-e-perigosa-para-a-natureza/>>. acesso em: 26 mar. 2023.
- DARRIGRAN, G.; PASTORINO, G. The golden mussel *limnoperna fortunei* (dunker, 1857) (bivalvia: Mytilidae), in the neotropical region: a 10-year story of invasion. *Tentacle*, 2003. v. 11, p. 8–9, 2003.
- DINIZ, D. M. de A. Verificação da influência da infestação do mexilhão dourado nas grades detomadas d'água. 2010. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- EPE, . Balanço energético nacional <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. acesso em: 11 ago. 2023. 2022.
- G1. Mexilhões dourados prejudicam geração de energia em usinas hidrelétricas do país. disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/2018/12/03/mexilhoes-dourados-prejudicam-geracao-de-energia-em-usinas-hidreletricas-do-pais.ghtml>>. acesso em: 26 mar. 2023. *TV Tem*, 2018.
- KARATAYEV, A. Y. et al. Parallels and contrasts between *limnoperna fortunei* and species of *dreissena*. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*, 2015. Springer, p. 261–297, 2015.
- KOWALSKI, E. L.; KOWALSKI, S. C. Revisão sobre métodos de controle do mexilhão dourado em tubulações. *Revista Produção Online*, 2008. v. 8, n. 2, 2008.

MARTINEZ, C. B. et al. Impacto da infestação de mexilhões dourados em uma pequena central hidrelétrica de alta queda. *Simpósio Brasileiro de Recurso Hídricos, XX, 2013, BentoGonçalves-RS, 2013.*

MMA. Caderno da região hidrográfica do são francisco. *Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos: Brasília, Brasil, 2006.*

MORETTO, E. M. et al. Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinashidrelétricas brasileiras: a antiga e atual fronteira amazônica. *Ambiente & Sociedade, 2012. SciELO Brasil, v. 15, p. 141–164, 2012.*

OLIVEIRA, M. D. de. *O Mexilhão Dourado causará danos ecológicos na Bacia do Miranda.*[S.I.]: Embrapa Pantanal, 2004.

OLIVEIRA, M. de. Ocorrência e impactos do mexilhão dourado (*limnoperna fortunei*, dunker1857) no pantanal mato-grossense. 2003. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2003.

OLIVEIRA, M. de et al. Área de ocorrência do mexilhão dourado (*limnoperna fortunei*) na bacia do alto paraguai, entre os anos de 1998 e 2004. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2004.

PASTORINO, G. et al. *Limnoperna fortunei (Dunker, 1857)(Mytilidae), nuevo bivalvo invasoren aguas del Río de la Plata.* [S.I.], 1993.

PENAFORTE, L. R. Invasão do mexilhão dourado, *limnoperna fortunei* (dunker, 1857): impactos, métodos de controle e estratégias de gestão adotadas. 2014. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

PEREIRA, G. M. *Projeto de Usinas Hidrelétricas: passo a passo.* [S.I.]: Oficina de Textos,2015.

SANTOS, A. M. E. S. dos; JUNIOR, N. T. et al. Ocorrência do mexilhão-dourado (*limnoperna fortunei*, dunker 1857) no canal do sertão, delmiro gouveia-al, brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina, 2022. v. 19, n. 2022.*

SERRA, J. P.; OLIVEIRA, T. Impactos ambientais decorrentes da construção de barragens de usinas hidrelétricas: reflexões e desdobramentos físico-naturais. *Ciências ambientais: diagnósticos ambientais, 2020. Carmino Hayashi Ribeirão Preto, p. 64–83, 2020.*

SILVA, K. B. de O. et al. Uma análise da geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas nobrasil. 2022.

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 *euphorbiasplendens var. hislopii neb* (euphorbiaceae) para esta espécie. 2011. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

SOUZA, T. R. C. de et al. Variação temporal do fator de perda de carga em sistemas

fluido mecânicos provocada pela bioincrustação do mexilhão dourado: um estudo de caso. 2023. Universidade Federal de Minas Gerais, 2023.

TEIXEIRA, L. R.; PAULA, N. C. P. D. Estudo de caso: Melhoria do sistema de controle de geração na cgh ponte queimada, em operação à fio d'água. 2015.