

## 1178 - AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE ADUTORAS DE RECALQUE, UTILIZANDO MODELAGEM HIDRÁULICA E TÉCNICA DE PIG

**Leonardo Costa Silva<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil (FUNORTE). Pós-Graduado em Gestão Pública (IFNMG). Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico (UNOPAR). MBA em Gestão de Projetos para Engenheiros (UNOPAR). Engenharia de Sistemas (UNIMONTES). Modelagem Hidráulica (ALLEVANT) e Técnico Eletrotécnica (SENAI).

**Antônio Carlos Câmara Junior<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil (FUMEC). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente, Hidráulica e Recursos Hídricos (EE/UFMG). Especialista em Gestão Empresarial (FGV). Gerente de Manutenção Eletromecânica Norte e Leste (GMNL) da COPASA-MG.

**Dyhogo Henrique Veloso Leal<sup>(3)</sup>**

Zootecnista (UFMG). Mestre em Produção Animal (UFMG). MBA em Gestão de Equipes e Lideranças (UNIMAIS). MBA em Gestão de Negócios com ênfase em finanças (UNIMAIS) e Técnico Eletrotécnica (IFNMG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Dr. Mário Tourinho, Km 3,5 - B. Mangués - Montes Claros - Minas Gerais - 39403203 - Brasil - Cel: +55 (38) 99949-0333 – Tel: +55 (38) 3229-5707 e-mail: [leonardo.costa1@copasa.com.br](mailto:leonardo.costa1@copasa.com.br)

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar e otimizar o desempenho hidráulico de adutoras de recalque de água bruta nos municípios de Buritis e Brasilândia de Minas, em Minas Gerais, por meio de medições de campo, cálculos de coeficientes de rugosidade e modelagem computacional no software WaterGEMS. As adutoras avaliadas, construídas em ferro fundido e DeFoFo, apresentavam sinais de perda de eficiência devido à presença de incrustações internas, resultando em aumento das perdas de carga e redução de vazão.

A metodologia empregada envolveu testes de performance dos conjuntos motobomba, medições simultâneas de vazão e pressão nas adutoras, e posterior cálculo da rugosidade pelo método de Hazen-Williams. Os modelos hidráulicos foram calibrados com os dados de campo e, em seguida, simularam-se cenários com condições ideais de operação para avaliar o impacto de ações de manutenção, como a passagem do PIG (Pipeline Inspection Gauge).

Os resultados obtidos comprovaram a efetividade da intervenção: em Buritis, a vazão aumentou em 22%, enquanto em Brasilândia de Minas o incremento foi de 23%, com elevação significativa dos coeficientes de rugosidade após a limpeza. Esses ganhos operacionais demonstram a importância da manutenção preventiva e da modelagem como ferramentas de apoio à gestão eficiente de sistemas de adução. O estudo destaca a necessidade de estratégias contínuas de monitoramento, uso de tecnologias de simulação e capacitação técnica para garantir a longevidade e a eficiência das infraestruturas hidráulicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adutora de água bruta, coeficiente de rugosidade, Hazen-Williams, modelagem hidráulica, WaterGEMS, PIG, Otimização de vazão.



**33º CONGRESSO DA ABES**

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

**FITABES 2025**

Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental



## INTRODUÇÃO

As adutoras de água bruta desempenham um papel fundamental na captação e transporte de recursos hídricos para sistemas de abastecimento, garantindo que a água chegue em quantidade e com qualidade e eficiência às etapas subsequentes de tratamento e distribuição. No entanto, o desempenho dessas infraestruturas pode ser comprometido ao longo do tempo devido a fatores como incrustações, corrosão, aumento da rugosidade e perdas de carga, o que impacta diretamente a vazão e a eficiência operacional do sistema.

Este trabalho aborda a modelagem hidráulica, otimização e manutenção de adutoras de água bruta, com foco na análise de desempenho e na aplicação de intervenções corretivas e preventivas, como a passagem do PIG. O estudo visa melhorar a eficiência hidráulica e aumentar a vida útil das adutoras por meio de cálculos de coeficientes de rugosidade, modelagem no software WaterGEMS e estratégias de manutenção. A pesquisa foi realizada em duas adutoras de recalque, localizadas em Buritis e Brasilândia de Minas, ambas em Minas Gerais.

As adutoras de Buritis, com diâmetro de DN250 em FoFo e comprimento de 1.412 metros, e a de Brasilândia de Minas, com diâmetro de DN200 em DeFoFo e comprimento de 1.870 metros, foram analisadas para avaliar a eficiência do sistema, otimizar o fluxo, reduzir perdas de carga e aumentar a vida útil das infraestruturas.

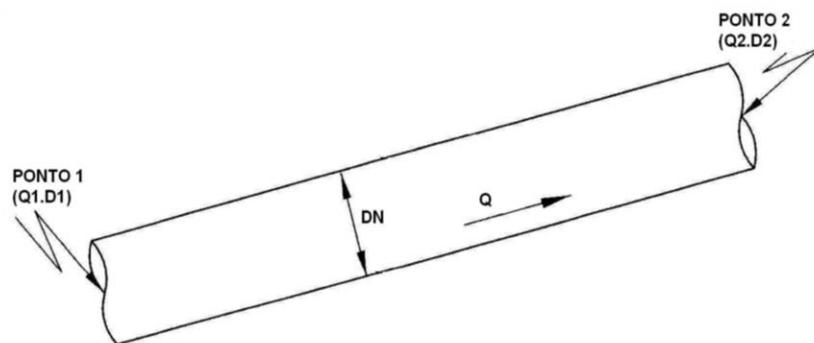
## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar e otimizar o desempenho hidráulico de adutoras de água bruta, focando na otimização da vazão e redução das perdas de carga, por meio da análise das condições operacionais, determinação de coeficientes de rugosidade e simulações hidráulicas computacionais, visando aumentar a eficiência e prolongar a vida útil da adutora.

## METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada neste trabalho foi composta por várias etapas interligadas, visando a análise detalhada e otimização do desempenho da adutora de água bruta do tipo recalque. Primeiramente, foram realizados testes de performance no sistema de bombeamento, levantando grandezas como corrente, tensão, potência, rotação, pressão de recalque e sucção, temperatura da água e vazões, para avaliar as condições operacionais iniciais dos conjuntos motobomba.

Para a obtenção dos dados hidráulicos das tubulações analisadas, foram instaladas estações de medição nos trechos inicial e final das adutoras em estudo. Nessas estações, foram realizadas medições simultâneas de pressão e vazão com o uso de equipamentos específicos. As cotas altimétricas dos pontos de medição foram determinadas por meio de levantamento com GPS e posteriormente validadas pela diferença de pressão com a bomba desligada, o que permitiu confirmar o desnível geométrico entre os pontos de forma independente. O comprimento das tubulações foi obtido a partir do cadastro técnico georreferenciado da rede, garantindo maior confiabilidade no mapeamento dos trechos avaliados. As medições de pressão e vazão foram realizadas de forma sincronizada nas duas estações, assegurando consistência e precisão nos dados utilizados para análise e modelagem hidráulica.



**Figura 1: Esquema de Tubulação com Indicação de Fluxo e Pontos de Medição**

A partir dos dados obtidos em campo, foram calculados os coeficientes de rugosidade (C) das adutoras, utilizando a fórmula empírica de Hazen-Williams. Os valores de perda de carga, comprimento da adutora, diâmetro da tubulação e vazão foram inseridos na equação, permitindo estimar o coeficiente de rugosidade (C) ao longo do trecho avaliado.

A fórmula utilizada foi:

$$h_f = \left( \frac{10,674}{C^{1,852}} \cdot \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}} \right) \cdot L$$

Onde:

- $h_f$  é a perda de carga (m);
- $L$  é o comprimento da adutora (m);
- $Q$  é a vazão (l/s);
- $D$  é o diâmetro interno da tubulação (mm);
- $C$  é o coeficiente de rugosidade (adimensional)

A perda de carga foi determinada pela diferença entre as cotas piezométricas medidas nas estações de medição, já descontando perdas localizadas. O valor de  $C$  foi então isolado na equação para ser estimado com base nas condições reais de operação da adutora. Esse procedimento permitiu quantificar o nível de deterioração hidráulica da tubulação e comparar os resultados antes e depois da passagem do PIG, avaliando a eficácia da limpeza.

Como parte do processo de avaliação do desempenho hidráulico das adutoras, foi utilizada a modelagem computacional no software WaterGEMS, com a finalidade de validar os coeficientes de rugosidade ( $C$ ) obtidos em campo e aprofundar a análise do comportamento do sistema em diferentes condições operacionais.

Os dados coletados nas medições de campo, incluindo pressão, vazão, cotas altimétricas e comprimento das adutoras foram inseridos no modelo para realizar a calibração hidráulica, garantindo a representação fiel das condições reais da rede. Em seguida, foram simulados cenários projetados de envelhecimento, adotando-se valores de rugosidade típicos de tubulações com mais de 10 anos de uso, conforme dados técnicos de referência.

Embora os coeficientes calculados em campo indicassem uma condição ainda mais crítica, compatível com níveis de rugosidade superiores a 20 anos de operação, a simulação com rugosidade de 10 anos já demonstrou ganhos significativos em termos de vazão, redução de perdas de carga e melhoria no desempenho hidráulico. Esses resultados reforçaram a necessidade de intervenção corretiva, demonstrando que a limpeza da adutora traria benefícios operacionais mensuráveis.

Com base nessa análise, foi recomendada a passagem do PIG (Pipeline Inspection Gauge) para remoção de incrustações e recuperação da rugosidade original da tubulação. Após a execução do procedimento, novas medições de campo foram realizadas, permitindo recalcular os coeficientes de rugosidade e comparar o desempenho do sistema antes e depois da intervenção. Os novos dados também foram utilizados para recalibrar o modelo hidráulico, consolidando a validação técnica da manutenção realizada.

Por fim, os dados pós-limpeza foram analisados para estimar os ganhos reais em vazão e eficiência, além de avaliar o impacto da intervenção na extensão da vida útil da infraestrutura e na redução dos custos operacionais a longo prazo, reforçando a importância de ações de manutenção preventiva e corretiva embasadas em modelagem e dados de campo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na localidade de Buritis, MG, foi realizada a análise da adutora de recalque em ferro fundido (FoFo), com diâmetro nominal de DN250 e extensão total de 1.412 metros. A avaliação iniciou-se com a realização de medições de campo de vazão e pressão, que permitiram, por meio da fórmula de Hazen-Williams, o cálculo do coeficiente de rugosidade ( $C$ ) de 91,78. Esse valor está de acordo com tubulações com mais de 20 anos de uso, evidenciando condições hidráulicas degradadas e presença de incrustações significativas.

Com base nesses dados, foi realizada a modelagem hidráulica no software WaterGEMS (Figura 2). O modelo foi calibrado de forma a ajustar a vazão medida em campo (40,30 L/s), e o coeficiente de rugosidade simulado necessário para representar essa condição foi de 94,20. Essa pequena diferença entre o valor calculado (91,78) e o ajustado no modelo (94,20) demonstra a coerência entre os dados de campo e a simulação computacional, garantindo confiabilidade ao modelo desenvolvido.

Em seguida, foi simulado um cenário com coeficiente de rugosidade  $C = 120$ , representando uma adutora com aproximadamente 10 anos de uso e boas condições internas, conforme a literatura técnica. Nesse cenário, a modelagem indicou uma vazão de 49,35 L/s, evidenciando o potencial de ganho com a melhoria da condição interna da tubulação. A comparação com o cenário atual indicou um possível incremento de 9,05 L/s, reforçando

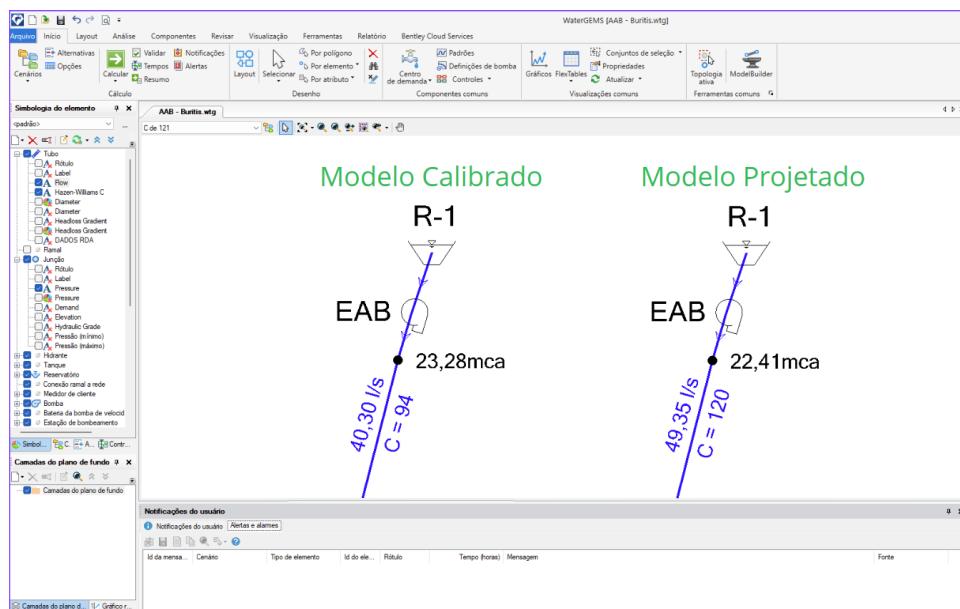


**33º CONGRESSO DA ABES**  
Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

**FITABES 2025**  
Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental



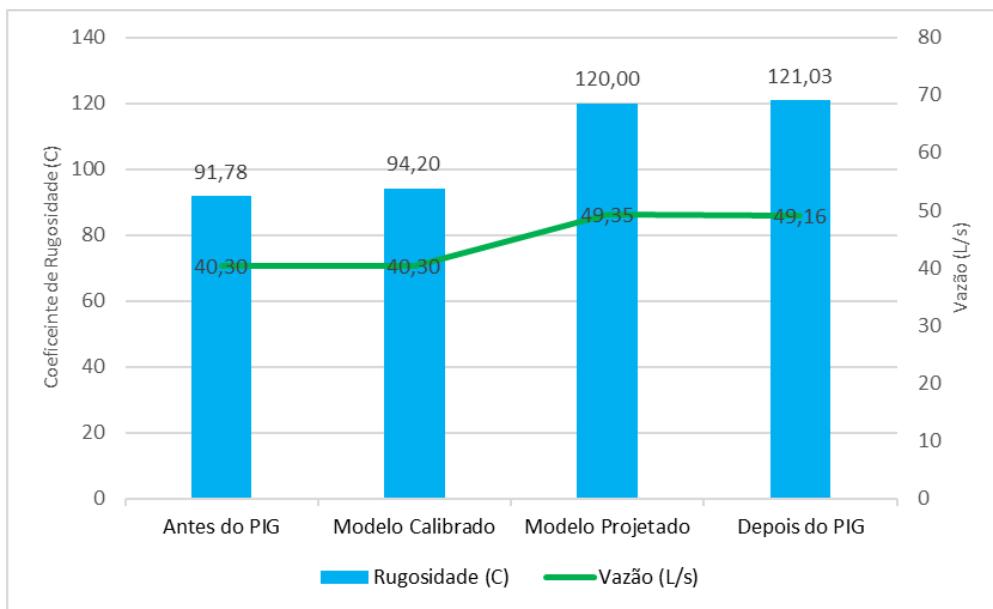
tecnicamente a necessidade da intervenção com a passagem do PIG (Pipeline Inspection Gauge).



**Figura 2: Tela Software de modelagem WaterGEMS - Buritis**

Após a realização da limpeza com o PIG, novos testes de campo foram realizados. A rugosidade medida aumentou para 121,04 e a vazão registrada foi de 49,16 L/s, resultando em um ganho real de 8,86 L/s, o que representa um incremento de aproximadamente 22% em relação à vazão inicial. Esse aumento é diretamente atribuído à remoção das incrustações internas, o que reduziu as perdas de carga e melhorou significativamente a eficiência do sistema.

Os Gráficos 1 e 2 apresentam a comparação dos principais parâmetros antes da passagem do PIG, do modelo calibrado, do modelo projetado e após a intervenção, conforme os resultados finais dos cálculos, das adutoras de Buritis e Brasilândia de Minas, respectivamente.



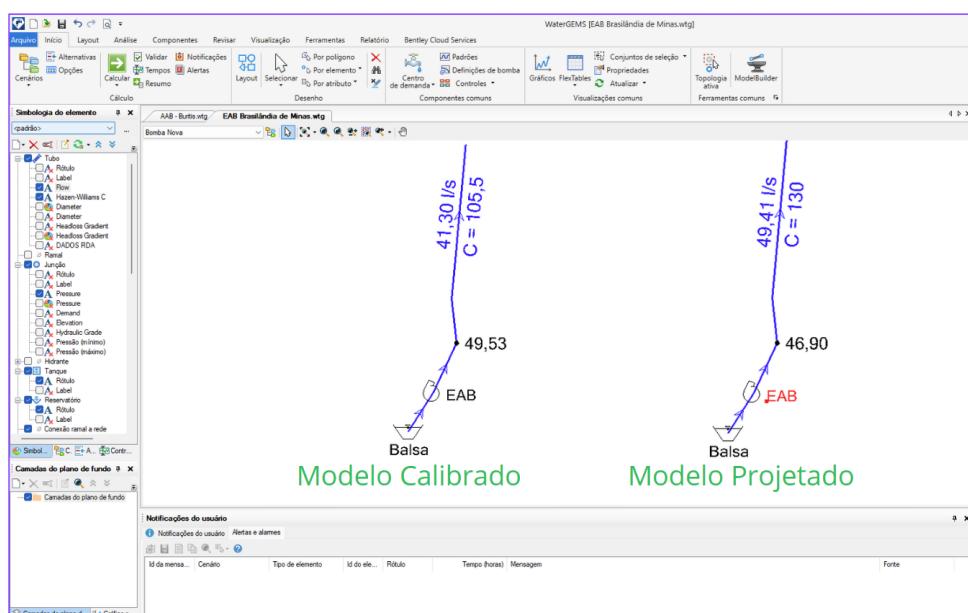
**Gráfico 1: Comparativo de Rugosidade e Vazão - Adutora Buritis**

A melhoria na rugosidade e o ganho expressivo de vazão confirmam a eficácia da intervenção e a precisão do modelo hidráulico, demonstrando que ações de manutenção baseadas em dados de campo e simulações computacionais são fundamentais para preservar o desempenho hidráulico, reduzir custos operacionais e prolongar a vida útil da infraestrutura.



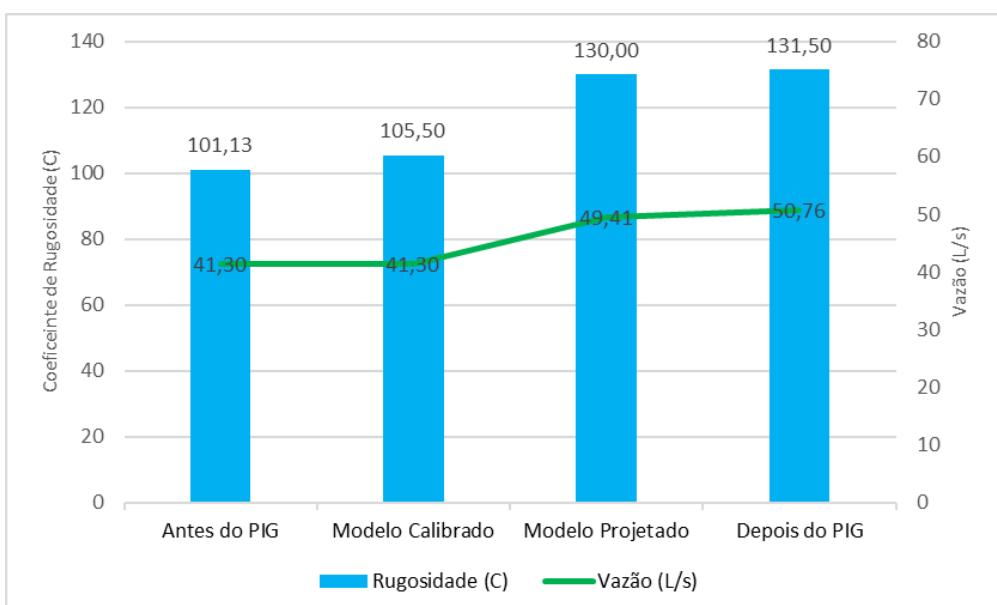
Em Brasilândia de Minas, MG, foi analisada a adutora de recalque em DeFoFo DN200, com extensão total de 1.870 metros. Com base nas medições de campo de vazão e pressão, foi calculado o coeficiente de rugosidade ( $C$ ) de 101,13, indicando uma condição de desgaste. A modelagem hidráulica no software WaterGEMS (Figura 3) foi calibrada utilizando a vazão medida em campo de 41,30 L/s, o que resultou em uma rugosidade ajustada no modelo de 105,5, valor próximo ao calculado em campo, confirmando a consistência entre as medições e a simulação.

Na sequência, foi projetado um cenário com  $C = 130$ , representando condições ideais para a operação adequada da adutora, conforme referências técnicas. A simulação indicou uma vazão de 49,41 L/s, evidenciando o potencial de ganho com a remoção de incrustações e reforçando, assim como em Buritis, a necessidade da intervenção com a passagem do PIG.



**Figura 3: Tela Software de modelagem WaterGEMS - Brasilândia de Minas**

Após a limpeza, os testes de campo e cálculos mostraram um ganho na rugosidade para 131,5 e uma vazão final de 50,76 L/s, representando um ganho real de 9,46 L/s, equivalente a um aumento de 23% em relação à condição inicial. A intervenção demonstrou ser eficaz também neste sistema, promovendo melhorias notáveis no desempenho hidráulico ao longo de uma adutora de maior extensão.



**Gráfico 2: Comparativo de Rugosidade e Vazão - Adutora Brasilândia de Minas**

Assim como observado em Buritis, a passagem do PIG proporcionou ganhos expressivos, reforçando a eficácia da técnica como ferramenta de manutenção corretiva e preventiva. A melhoria da rugosidade e o aumento da vazão comprovam a importância da adoção de estratégias baseadas em medições de campo e modelagem hidráulica, com impactos diretos na eficiência energética, redução de perdas e prolongamento da vida útil das infraestruturas de recalque.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo demonstrou a eficácia da passagem do PIG como uma solução eficiente para otimizar o desempenho de adutoras de recalque, com base nas análises realizadas nos sistemas de Buritis e Brasilândia de Minas. Após a intervenção, observou-se um incremento de 8,86 L/s (22%) em Buritis e 9,46 L/s (23%) em Brasilândia de Minas, acompanhado por uma melhora expressiva nos coeficientes de rugosidade, comprovando a eficácia da limpeza das incrustações acumuladas nas tubulações ao longo dos anos.

A aplicação da modelagem hidráulica com o software WaterGEMS foi essencial tanto na validação dos dados de campo quanto na projeção de cenários, permitindo estimar com precisão os ganhos potenciais e justificar tecnicamente as intervenções. A calibração dos modelos, alinhada às medições em campo, demonstrou que a integração entre dados operacionais e simulações computacionais representa uma estratégia robusta para o gerenciamento de sistemas de adução.

Diante dos resultados obtidos, é recomendada as seguintes ações:

- **Manutenção Regular:** Programar passagens periódicas do PIG como parte da rotina de manutenção das adutoras, garantindo a redução de perdas de carga e a preservação da capacidade hidráulica;
- **Monitoramento Contínuo:** Estabelecer um cronograma de testes de performance e medições de pressão e vazão, permitindo o acompanhamento do estado hidráulico das adutoras e a detecção precoce de degradações;
- **Uso de Modelagem Hidráulica:** Continuar utilizando o software WaterGEMS como ferramenta de suporte à tomada de decisões técnicas e operacionais;
- **Capacitação Técnica:** Promover treinamentos constantes das equipes de operação e manutenção, incentivando o uso eficaz de ferramentas de simulação e diagnósticos hidráulicos;
- **Análise Econômica das Intervenções:** Realizar estudos de custo-benefício para garantir a viabilidade financeira das ações de manutenção e sua integração ao planejamento estratégico da operação.

Essas recomendações visam assegurar a eficiência, a durabilidade e a sustentabilidade dos sistemas de adução de água bruta, contribuindo para a gestão eficiente dos recursos hídricos e a continuidade dos serviços de abastecimento com qualidade, quantidade e segurança.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. Manual de Hidráulica. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

GIROL, G. (2020). Aplicação da modelagem hidráulica na otimização de sistemas de abastecimento de água. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/case-02-aplica%C3%A7%C3%A3o-da-modelagem-hidr%C3%A1ulica-na-otimiza%C3%A7%C3%A3o-girol>. Acesso em: de Novembro, 2024.

BENTLEY SYSTEMS, INCORPORATED. (2021). WaterGEMS. Disponível em: <https://www.bentley.com/software/openflows-watergems>. Acessado em: Outubro de 2024.