# REDUÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE LODOS ATIVADOS POR MEIO DO AJUSTE DA DOSAGEM DE CLORETO FÉRRICO PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO COM BASE NA PLUVIOSIDADE

**Sabrina Kamila Kammer Ribeiro**
Técnica em Química pela Escola Técnica Tupy – ETT. Graduada em Engenharia Química pela Universidade Sociedade Educacional de Santa Catarina – UniSociesc.

**Endereço:** Rua XV de Novembro, 3950 – Bairro Glória – Joinville – SC – CEP: 89.126-202 – Brasil – Tel: +55 (47) 2105-1684 – e-mail: sabrina.ribeiro@aguasdejoinville.com.br.

## RESUMO

O fósforo é um nutriente essencial, mas seu excesso em ambientes aquáticos pode causar eutrofização, comprometendo o equilíbrio ecológico. Para evitar esse impacto, legislações ambientais estabelecem limites para o lançamento de fósforo em corpos hídricos, exigindo sua remoção durante o tratamento de esgoto. Como a remoção biológica é limitada, muitas estações recorrem a processos físico-químicos, como a precipitação com coagulantes. No entanto, esses produtos possuem alto valor, elevando significativamente os custos operacionais de uma estação de tratamento. Na ETE Jarivatuba, operada pela Companhia Águas de Joinville, utiliza-se cloreto férrico para remoção química do fósforo. Joinville, uma das cidades mais chuvosas de Santa Catarina, apresenta redução na concentração de fósforo e aumento da vazão do esgoto em dias de chuva. Com base nessa variação, foi implementada uma metodologia para suspender a dosagem de coagulante nesses períodos, ajustando o processo às características do afluente. Essa estratégia resultou em uma economia de aproximadamente R$ 80 mil em 11 meses, representando uma redução de 11,7% no consumo de cloreto férrico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Remoção de fósforo, cloreto férrico, custos operacionais.

## INTRODUÇÃO

A composição das águas residuárias domésticas é diretamente influenciada pelos usos a que a água foi submetida, os quais variam em função de fatores climáticos, socioeconômicos e culturais da população. Em geral, é constituído predominantemente por água, representando cerca de 99,9% de sua composição. Os 0,1% restantes compreendem sólidos orgânicos e inorgânicos, tanto em suspensão quanto dissolvidos, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e microrganismos indicadores de contaminação fecal (Von Sperling, 1996). Apesar de sua baixa proporção, essa fração minoritária é responsável pela carga poluente do esgoto, tornando necessário o seu tratamento antes do lançamento em corpos hídricos.

O fósforo, em particular, desempenha um papel fundamental no metabolismo microbiano, sendo um nutriente limitante para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. Nas águas residuárias domésticas, o fósforo total encontra-se predominantemente sob a forma de fosfatos, os quais podem ser classificados em: fósforo inorgânico, incluindo ortofosfatos e polifosfatos, comumente oriundos de detergentes e produtos de limpeza doméstica; e fósforo orgânico, associados a compostos orgânicos de origem fisiológica, como excreções humanas (Von Sperling, 1996).

A concentração típica de fósforo total em esgotos domésticos pode variar entre 5,0 e 20,0 mg P/L. Em termos médios, estima-se que cerca de 60% do fósforo esteja na forma inorgânica e 40% na forma orgânica (Von Sperling et al., 2009; Randall et al., 2010; Jordão e Pessôa, 2011; apud Quevedo et al., 2017). Estudos indicam que os polifosfatos presentes em detergentes podem representar até 50% do fósforo total no esgoto doméstico (Von Sperling, 1996).

Embora o fósforo seja um nutriente essencial para o crescimento dos microrganismos envolvidos na estabilização da matéria orgânica durante o tratamento de esgotos, sua presença em corpos hídricos pode desencadear processos ecológicos indesejáveis, como a eutrofização. Esse fenômeno consiste no enriquecimento

excessivo da água por nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, promovendo o crescimento acelerado de plantas aquáticas e algas. Esse crescimento reduz a penetração da luz solar, limitando a fotossíntese de organismos submersos e, consequentemente, a produção de oxigênio dissolvido. Essa condição pode levar à anoxia, afetando negativamente a fauna aquática e o equilíbrio ecológico do ecossistema (Araújo, 2023; Thomann e Mueller, 1987 apud Von Sperling, 1996).

Para atenuar os impactos da eutrofização, é imprescindível a adoção de medidas preventivas que limitem a contribuição de fósforo aos corpos hídricos. Entre tais medidas, tem-se o aprimoramento do tratamento de efluentes domésticos com foco na remoção de nutrientes.

A remoção de fósforo em estações de tratamento de esgoto pode ser realizada por meio de processos biológicos, físico-químicos ou pela combinação de ambos.

Os processos biológicos baseiam-se na capacidade de certos microrganismos acumular fósforo intracelularmente sob condições ambientais específicas. Ao remover essas bactérias do sistema no excesso de lodo biológico, o fósforo absorvido por elas também é removido (Von Sperling, 2002). Já os processos físico-químicos envolvem a precipitação do fósforo com sais metálicos, como os de alumínio, ferro ou cálcio, formando compostos pouco solúveis que também são posteriormente removidos através da sedimentação.

Em ambos os casos, o objetivo é converter o fósforo solúvel presente nas águas residuárias em formas particuladas, incorporadas a sólidos suspensos, sejam eles de origem biológica (biomassa microbiana) ou química (precipitados metálicos), facilitando sua separação do meio líquido.

A remoção biológica de fósforo, embora eficiente em determinadas condições operacionais, apresenta limitações inerentes à capacidade de assimilação dos microrganismos. Em geral, esse processo é capaz de remover entre 30% e 35% do fósforo presente no afluente, o que pode ser insuficiente para o atendimento aos padrões legais mais rigorosos (Metcalf e Eddy, 2016). No Estado de Santa Catarina, a Resolução CONSEMA nº 182/2021 determina que a concentração média anual de fósforo total nos efluentes tratados não deve exceder 4 mg/L. Sendo assim, para alcançar maiores eficiências, recorre-se à precipitação química. A reação química que descreve a adição de sais metálicos que reagem com os fosfatos presentes na água pode ser representada genericamente conforme Equação 1 (Metcalf e Eddy, 2016):

$$\mathbf{r Me^{3+} + HPO_4^- + (3R - 1)OH^- \rightarrow Me_rH_2PO_4(OH)_{3r-1}(s)} \qquad \text{equação (1)}$$

onde r = 1,6 para Fe (III)

Na Estação de Tratamento de Esgoto Jarivatuba, localizada em Joinville (SC), a precipitação química é empregada como etapa complementar à remoção biológica, com o objetivo de atender aos limites de lançamento estabelecidos pela legislação. O coagulante utilizado é o cloreto férrico.

A ETE Jarivatuba é uma das maiores do estado de Santa Catarina, com capacidade projetada para tratar 600 L/s e vazão média atual de 505 L/s. A unidade é responsável por aproximadamente 90% do esgoto tratado da cidade de Joinville, que possui uma cobertura de rede coletora de 50,9%. A tecnologia adotada é o sistema *ICEAS* (do inglês: *Intermittent Cycle Extended Aeration System*, ou Sistema de Aeração Prolongada de Fluxo Intermitente), no qual todas as etapas do tratamento biológico ocorrem em um único reator, dispensando estruturas adicionais como tanques anóxicos, decantadores secundários e sistemas de recirculação de lodo.

A vazão afluente aos sistemas de esgotamento sanitário é composta por diferentes contribuições, sendo as principais: esgoto doméstico, infiltração e contribuições externas. A infiltração refere-se à entrada de água subterrânea na rede coletora por meio de juntas comprometidas, trincas ou rupturas nas tubulações. Já a vazão externa ocorre quando águas de chuva acessam o sistema por meio de dispositivos como bocas de lobo, descargas de telhados, drenos de fundações ou tampas de poços de visita. A proporção relativa dessas componentes varia conforme as condições locais, o estado de conservação da infraestrutura e a sazonalidade climática. Em períodos chuvosos, por exemplo, a contribuição de vazões externas pode se tornar significativa, alterando substancialmente a carga hidráulica e a composição do esgoto afluente (Metcalf e Eddy, 2016).

O Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) Jarivatuba conta atualmente com cerca de 720 km de extensão, abrangendo redes coletoras, coletores-tronco, interceptores, emissários e linhas de recalque. A projeção para o

ano de 2040 estima uma ampliação para aproximadamente 1.328 km. O projeto do SES Jarivatuba adotou uma taxa média de infiltração de 0,25 L/s.km.

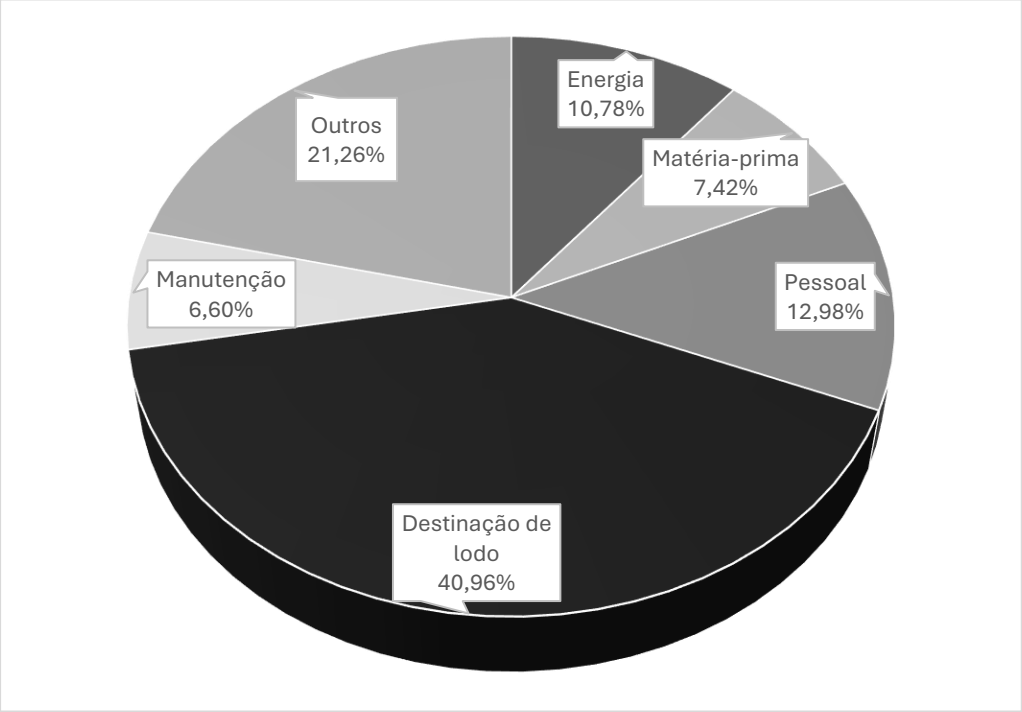
A cidade de Joinville está situada em uma das regiões mais chuvosas do estado de Santa Catarina e em área de manguezal, o que a torna particularmente suscetível à influência de marés e à entrada de águas pluviais no sistema de esgotamento. Essa condição impacta diretamente as características do esgoto afluente, especialmente durante eventos de precipitação intensa.

Um dos parâmetros afetados é o fósforo total, cuja concentração tende a ser reduzida em dias chuvosos devido ao efeito de diluição provocado pela água de chuva. Essa variação pode influenciar a eficiência dos processos de remoção de nutrientes na ETE, exigindo ajustes operacionais para garantir o atendimento aos padrões de lançamento.

Os principais fatores que influenciam na implementação de remoção química de fósforo são: concentração e forma química no afluente, padrões de qualidade exigidos para o efluente final, teor de sólidos suspensos, estratégias de disposição final dos lodos gerados e os custos e disponibilidade de produtos químicos (Metcalf e Eddy, 2016).

A Figura 1 apresenta a distribuição dos principais custos operacionais da ETE Jarivatuba no ano de 2024. Ressalta-se que os gastos com produtos químicos estão incluídos na categoria denominada "matéria-prima".

**Figura 1 – Distribuição dos principais custos operacionais da ETE Jarivatuba no ano de 2024**




Fonte: elaboração própria.

A partir da análise da Figura 1, verifica-se que a matéria-prima constitui uma parte significativa dos custos de operação de uma estação de tratamento de esgoto.

## OBJETIVOS

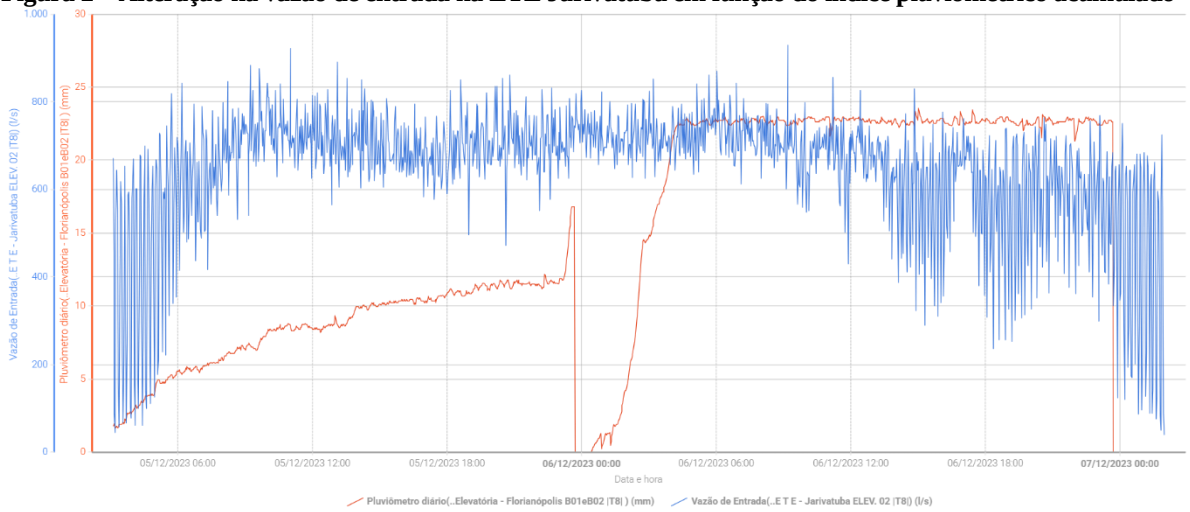
Este trabalho tem como objetivo otimizar a dosagem de produto químico utilizado na remoção de fósforo do esgoto, de modo a manter a qualidade do efluente tratado dentro dos padrões exigidos pela legislação vigente, ao mesmo tempo em que se busca a redução dos custos operacionais da estação de tratamento.

## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseou-se na análise de dados operacionais obtidos por meio do sistema de telemetria da estação de tratamento, o qual registra continuamente a vazão de entrada e os índices pluviométricos.

A partir da correlação entre esses dados, observou-se que a vazão afluente à estação é significativamente influenciada por eventos de precipitação superiores a 5 mm, resultando em vazões acima de 600 L/s (Figura 2). Verificou-se ainda que, para chuvas com acumulados entre 5 e 40 mm, essa influência persiste por até 6 horas após o término da precipitação, enquanto para chuvas superiores a 40 mm, o impacto na vazão pode se estender por até 12 horas.

**Figura 2 – Alteração na vazão de entrada na ETE Jarivatuba em função do índice pluviométrico acumulado**

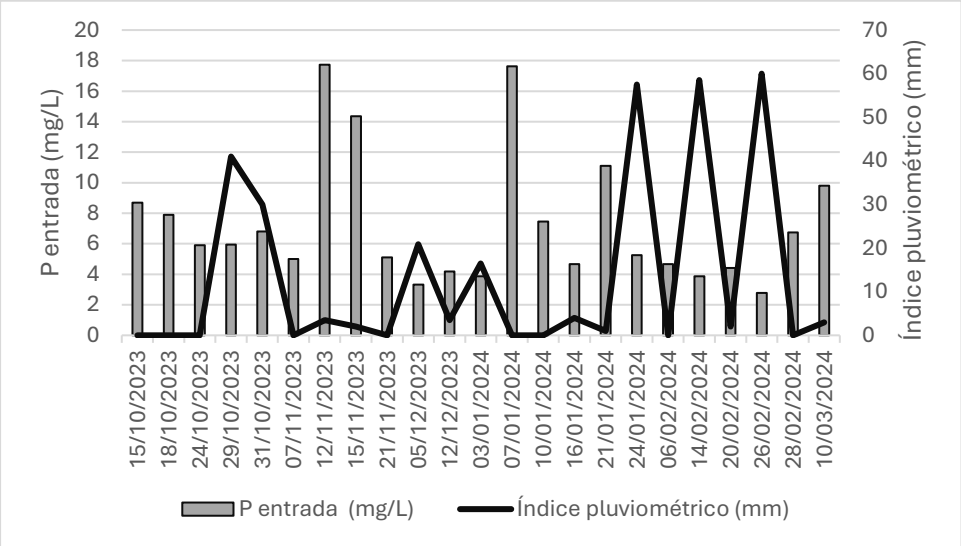



Fonte: portal de telemetria da Companhia Águas de Joinville – Ensitec Telelog (2025).

Paralelamente, foi conduzido um monitoramento da concentração de fósforo no efluente bruto ao longo de seis meses consecutivos, entre outubro de 2023 e março de 2024. As amostras foram correlacionadas com os dados de pluviometria acumulada nas 24 horas anteriores à coleta, permitindo avaliar a influência das chuvas na concentração de fósforo.

Os resultados, apresentados na Figura 3, demonstram uma redução significativa da concentração de fósforo durante períodos chuvosos. A média de fósforo em tempo seco foi de 8,46 mg/L, com valor máximo encontrado de 17,74 mg/L, enquanto nos períodos com precipitação acumulada superior a 5 mm, a média foi de 4,55 mg/L.

**Figura 3 – Concentração de fósforo no afluente *vs.* Índice pluviométrico acumulado**




Fonte: elaboração própria.

Com base nessas observações, foi estabelecida uma estratégia operacional para otimização da dosagem de cloreto férrico durante períodos chuvosos. A dosagem é interrompida pela operação quando a pluviometria atinge 5 mm. Após o fim da chuva, realiza-se a análise do gráfico de pluviometria para determinar o índice pluviométrico acumulado. A partir desse valor, define-se o tempo de espera necessário antes da retomada da dosagem, considerando os intervalos de influência previamente identificados.

A Tabela 1 descreve os parâmetros operacionais adotados para a interrupção e posterior retomada da dosagem de cloreto férrico, com base nas condições pluviométricas observadas.

**Tabela 1 – Ações operacionais referentes à dosagem de cloreto férrico com base nas condições pluviométricas**

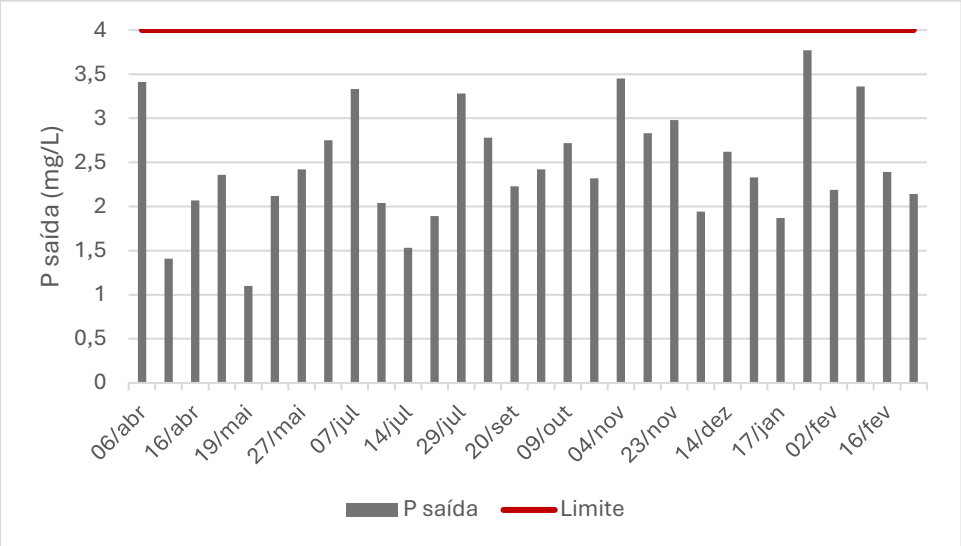
| Pluviometria (mm) | Dosagem |
|---|---|
| > 5 | Interromper |
| 5 – 40 | Retomar **6 horas** após chuva cessar |
| > 40 | Retomar **12 horas** após chuva cessar |

Fonte: elaboração própria.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de avaliar a eficácia da estratégia de otimização da dosagem de cloreto férrico em dias de chuva, foram analisados os dados operacionais coletados entre abril de 2024, início da implementação do teste, e fevereiro de 2025. Inicialmente, foi realizado o levantamento diário do acumulado pluviométrico ao longo do período estudado, verificando-se, em seguida, a aplicação das regras de dosagem estabelecidas para eventos de precipitação. Posteriormente, foram analisados os resultados laboratoriais das concentrações de fósforo no efluente bruto, obtidos após os eventos chuvosos, permitindo a correlação entre a aplicação da estratégia e a qualidade do efluente tratado. Os dados consolidados estão apresentados na Figura 4.

**Figura 4 – Concentração de fósforo no efluente tratado após aplicação da metodologia**




Fonte: elaboração própria.

A partir da análise da Figura 4, verifica-se que, mesmo com a redução ou interrupção da dosagem de cloreto férrico durante os períodos de precipitação, a aplicação da metodologia proposta foi eficaz na manutenção das concentrações de fósforo total no efluente tratado abaixo de 4 mg/L, apresentando conformidade com o limite estabelecido pela Resolução CONSEMA 182/2021.

Para estimar o impacto econômico da medida, foram selecionados os dias com precipitação superior a 5 mm, nos quais a dosagem foi reduzida ou interrompida conforme a metodologia proposta. A quantidade de cloreto férrico utilizada nesses dias foi comparada com a média de consumo em dias sem chuva, permitindo o cálculo da economia gerada.

A Tabela 2 apresenta a consolidação dos dados referentes à redução da dosagem de cloreto férrico ao longo dos meses, em função dos índices pluviométricos acumulados. Além disso, evidencia a economia gerada com o insumo no processo de tratamento, refletindo os ganhos operacionais decorrentes da aplicação da estratégia de dosagem ajustada em períodos chuvosos.

**Tabela 2 – Economia obtida através da redução na dosagem de cloreto férrico utilizando a metodologia proposta**

| Mês | Pluviometria acumulada (mm) | Redução na dosagem de cloreto férrico (kg) | Economia (R$) |
|---|---|---|---|
| abr/24 | 276 | 9.240 | R$ 12.474,00 |
| mai/24 | 227 | 4.900 | R$ 6.615,00 |
| jun/24 | 48 | 1.400 | R$ 1.890,00 |
| jul/24 | 151 | 7.280 | R$ 10.774,40 |
| set/24 | 114 | 1.680 | R$ 2.486,40 |
| out/24 | 103 | 4.060 | R$ 6.008,80 |
| nov/24 | 162,5 | 6.720 | R$ 9.945,60 |
| dez/24 | 283 | 10.080 | R$ 14.918,40 |
| jan/25 | 257,5 | 4.200 | R$ 6.216,00 |
| fev/25 | 113 | 3.640 | R$ 5.387,20 |
| **Total** | | | **R$ 76.715,80** |

Fonte: elaboração própria.

Como resultado, observou-se uma redução total de 53.200 kg na dosagem de produto químico ao longo do período analisado, o que representa uma economia financeira de R$ 76.715,80, entre abril de 2024 e fevereiro de 2025, considerando o custo por quilograma do insumo.

## CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia proposta, que consiste na interrupção da dosagem de cloreto férrico durante períodos chuvosos, demonstrou-se tecnicamente viável e economicamente vantajosa. Essa estratégia baseia-se na alteração das características do afluente em função das chuvas, que resultam na diluição da carga de fósforo afluente. Mesmo com a suspensão da dosagem, as concentrações de fósforo no efluente tratado permaneceram abaixo do limite de 4 mg/L estabelecido pela Resolução CONSEMA nº 182/2021, evidenciando a eficácia do controle operacional adotado.

Do ponto de vista econômico, a metodologia resultou em uma redução de 11,7% no consumo de cloreto férrico na ETE Jarivatuba durante o período avaliado, representando uma economia significativa nos custos operacionais. Esses resultados reforçam o potencial da abordagem para otimização do uso de insumos químicos em sistemas de tratamento de esgoto por lodos ativados.

No entanto, foram identificadas oportunidades de melhoria operacional. Em alguns momentos, mesmo com índices pluviométricos suficientes para justificar a interrupção da dosagem, manteve-se a aplicação do produto químico, possivelmente devido a falhas operacionais. Isso indica que a economia obtida poderia ter sido ainda maior. Recomenda-se, portanto, a implementação de bombas com controle PID integradas a dados pluviométricos em tempo real, a fim de automatizar e aprimorar a resposta do sistema às variações nas condições do afluente.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia adotada é eficaz para alcançar os objetivos propostos, promovendo a eficiência no uso de insumos, a conformidade com a legislação ambiental vigente e a sustentabilidade operacional do sistema de tratamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, W. L. Jornal da USP, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/entender-como-bacterias-interagem-com-fosforo-pode-melhorar-tratamento-de-esgotos/>. Acesso em: 15/04/2025.

CONSEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução nº 182, de 06 de agosto de 2021. Estado de Santa Catarina - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável.

METCALF & EDDY. Tratamento de Efluentes e recuperação de recursos. 5ª edição – AMGH, 2016.

Portal de Telemetria Companhia Águas de Joinville – ENSITEC TELELOG.

QUEVEDO, C. M. G., PIVELI, R. P., PAGANINI, W. S. A contribuição das frações de fósforo nos esgotos sanitários. Congresso ABES. FENASAN, 2017.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 2ª ed. Revisada, 1996.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 4. Lodos ativados. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 2ª ed. 2002.