

INSTITUTO FEDERAL
Goiano

BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**EFICIÊNCIA DO POLIMENTO QUÍMICO COM PAC E CLORETO
FÉRRICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO EM LAGOAS DE
ESTABILIZAÇÃO**

YASMIM MARIA DA SILVA SOUZA

RIO VERDE, GO

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO, CÂMPUS RIO VERDE**

BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**EFICIÊNCIA DO POLIMENTO QUÍMICO COM PAC E CLORETO
FÉRRICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO EM LAGOAS DE
ESTABILIZAÇÃO**

YASMIM MARIA DA SILVA SOUZA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Goiano, Câmpus Rio Verde, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Dra. Patricia Caldeira de Souza

RIO VERDE, GO

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S729e Souza, Yasmim Maria da Silva
EFICIÊNCIA DO POLIMENTO QUÍMICO COM PAC E
CLORETO FÉRRICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO EM
LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO / Yasmim Maria da Silva
Souza. Rio Verde 2025.

27f. il.

Orientadora: Prof.ª Dra. Patricia Caldeira de Souza.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220354 -
Bacharelado em Engenharia Química - Integral - Rio Verde
(Campus Rio Verde).

1. Tratamento terciário. 2. Efluente secundário. 3. Turbidez. I.
Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Yasmim Maria da Silva Souza

Matrícula:

2021102203540266

Título do trabalho:

EFICIÊNCIA DO POLIMENTO QUÍMICO COM PAC E CLORETO FÉRRICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO EM LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br
YASMIM MARIA DA SILVA SOUZA
Data: 28/08/2025 22:06:43-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Rio Verde

Local

28 / 8 / 2025

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
gov.br
PATRICIA CALDEIRA DE SOUZA
Data: 29/08/2025 08:35:17-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 28 dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco às 19:00 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Profª. Patrícia Caldeira de Souza (orientadora), Prof. Rogerio Favareto (membro interno) e Isis Danielle Sousa (membro externo), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "**Eficiência do Polimento Químico com PAC e Cloreto Férrico no Tratamento de Esgoto em Lagoas de Estabilização**" do **Yasmim Maria da Silva Souza**, estudante do curso de Engenharia Química do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº **2021102203540266**. A palavra foi concedida a estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição da candidata pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 28 de agosto de 2025.

(Assinado eletronicamente)

Patrícia Caldeira de Souza

Orientadora

(Assinado eletronicamente)

Rogerio Favareto

Membro da Banca Examinadora

DocuSigned by:

Isis Danielle Sousa

36402B7583154A3...

Isis Danielle Sousa

Coordenadora de Operação e Manutenção
BRK Ambiental

Membro Externo da Banca Examinadora

Documento assinado eletronicamente por:

- **Patricia Caldeira de Souza, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 28/08/2025 19:46:28.
- **Rogério Favareto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 28/08/2025 19:51:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 737819
Código de Autenticação: ed308422f5



Certificado de Conclusão

Identificação de envelope: 3D8A4ECB-C61D-4016-A45F-ACBB49094CDD	Status: Concluído
Assunto: Este é seu documento assinado: Documento (1).pdf	
Envelope fonte:	
Documentar páginas: 5	Assinaturas: 1
Certificar páginas: 2	Rubrica: 3
Assinatura guiada: Desativado	Remetente do envelope:
Selo com Envelopeld (ID do envelope): Desativado	Isis Danielle Sousa
Fuso horário: (UTC-08:00) Hora do Pacífico (EUA e Canadá)	Av das Nacoes Unidas14261
	Sao Paulo -, Sao Paulo - SP 00
	isis@brkambiental.com.br
	Endereço IP: 163.116.230.155

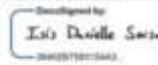
Rastreamento de registros

Status: Original	Portador: Isis Danielle Sousa	Local: DocuSign
29/08/2025 04:48:34	isis@brkambiental.com.br	

Eventos do signatário

Isis Danielle Sousa
 isis@brkambiental.com.br
 Supervisora de operação
 1003
 Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)

Assinatura


 Adoção de assinatura: Estilo pré-selecionado
 Usando endereço IP: 163.116.230.155

Registro de hora e data

Enviado: 29/08/2025 04:50:05
 Visualizado: 29/08/2025 04:50:15
 Assinado: 29/08/2025 04:51:21
 Assinatura de forma livre

Termos de Assinatura e Registro Eletrônico:
 Não oferecido através da DocuSign

Eventos do signatário presencial

Assinatura

Registro de hora e data

Eventos de entrega do editor

Status

Registro de hora e data

Evento de entrega do agente

Status

Registro de hora e data

Eventos de entrega intermediários

Status

Registro de hora e data

Eventos de entrega certificados

Status

Registro de hora e data

Eventos de cópia

Status

Registro de hora e data

Isis Danielle Sousa
 isis@brkambiental.com.br
 Supervisora de operação
 1003
 Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)

Copiado

Enviado: 29/08/2025 04:51:21

Termos de Assinatura e Registro Eletrônico:
 Não oferecido através da DocuSign

Eventos com testemunhas

Assinatura

Registro de hora e data

Eventos do tabelião

Assinatura

Registro de hora e data

Eventos de resumo do envelope

Status

Carimbo de data/hora

Envelope enviado	Com hash/criptografado	29/08/2025 04:50:05
Entrega certificada	Segurança verificada	29/08/2025 04:50:15
Assinatura concluída	Segurança verificada	29/08/2025 04:51:21
Concluído	Segurança verificada	29/08/2025 04:51:21

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, o meu agradecimento a Deus por acompanhar e abençoar a minha caminhada, iluminando meus passos e decisões.

A minha mãe e ao meu pai, que mesmo com a distância e a saudade, nunca deixaram de estar ao meu lado nessa fase tão importante. Muito obrigada por caminharem junto comigo nessa grande aventura que se chama vida. Palavras nunca serão suficientes para expressar minha gratidão e amor.

A grandes amigos e familiares que não soltaram a minha mão nos momentos difíceis. Vocês estarão sempre no meu coração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – ETE Sapo (Tratamento Preliminar)	16
Figura 2 – ETE Sapo	16
Figura 3 – Dimensões Lagoas Anaeróbias	18
Figura 4 – Dimensões Lagoas Facultativas	19
Figura 5 – Dimensões Lagoas de Maturação	20
Figura 6 - Efluente coletado da ETE Sapo	24
Figura 7 - Medição de pH de efluente tratado	24
Figura 8 - Medição de Turbidez de efluente tratado	25
Figura 9 - Adição de cloreto férrico no efluente tratado	26
Figura 10 - Agitação de Becker	26
Figura 11 - Efluentes pós adição de Cloreto Férrico em dosagens diferentes	28
Figura 12 - Efluentes pós adição de PAC em dosagens diferentes	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagens dos coagulantes.....	25
Tabela 2 - Resultados obtidos.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SAPO.....	16
2.1.1 Tratamento Preliminar.....	17
2.1.2 Tratamento primário – Lagoas Anaeróbias.....	17
2.1.3 Tratamento Secundário – Lagoas Facultativas.....	18
2.1.4 Polimento do efluente - Lagoas de maturação	19
2.1.5 Disposições do Efluente Tratado	20
2.2 QUALIDADE DO EFLUENTE	20
2.3 POLIMENTO QUÍMICO	21
2.3.1 Cloreto Férrico	22
2.3.2 Policloreto de Alumínio (PAC).....	23
3 METODOLOGIA.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5 CONCLUSÃO.....	30
REFERÊNCIAS	31

RESUMO

O saneamento básico é essencial para a saúde pública e para a preservação ambiental, sendo o tratamento de esgotamento sanitário uma das etapas mais relevantes desse processo. As lagoas de estabilização, amplamente utilizadas no Brasil por seu baixo custo e simplicidade operacional, apresentam limitações no atendimento a padrões mais rigorosos de qualidade, especialmente quanto à turbidez e ao aspecto final do efluente. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do polimento químico aplicado após o tratamento secundário em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) no município de Rio Verde – GO. Foram testados dois coagulantes amplamente empregados em processos de clarificação: o policloreto de alumínio (PAC) e o cloreto férrico, buscando identificar aquele de melhor desempenho técnico. As análises contemplaram parâmetros físico-químicos, como pH e turbidez, além da avaliação visual do efluente tratado, possibilitando uma comparação entre os diferentes ensaios. Os resultados obtidos contribuem não apenas para a melhoria da eficiência global do sistema de esgotamento sanitário da cidade, mas também fornecem subsídios técnicos aplicáveis a outras localidades com sistemas semelhantes, incentivando práticas mais sustentáveis e eficazes no tratamento de esgoto.

Palavras-chave: Coagulação-floculação; Turbidez; pH; Efluente secundário; Tratamento terciário.

ABSTRACT

Basic sanitation plays a crucial role in public health and environmental protection, with wastewater treatment being one of its most relevant components. Stabilization ponds, widely adopted in Brazil due to their low cost and operational simplicity, present limitations in meeting stricter quality standards, particularly regarding turbidity and the final appearance of the effluent. In this context, the present study aimed to evaluate the efficiency of chemical polishing applied after secondary treatment in a Wastewater Treatment Plant (WWTP) located in Rio Verde, Goiás. Two coagulants commonly used in clarification processes were tested: polyaluminum chloride (PAC) and ferric chloride, seeking to determine which one offered the best technical performance. The analyses included physicochemical parameters such as pH and turbidity, as well as the visual assessment of the treated effluent, enabling objective comparisons between treatments. The findings not only contribute to improving the overall efficiency of the city's wastewater system but also provide technical insights applicable to other regions with similar treatment structures, promoting more sustainable and effective practices in wastewater management.

Keywords: Coagulation-flocculation; Turbidity; pH; Secondary effluent; Tertiary treatment.

1 INTRODUÇÃO

A importância do saneamento básico está ligada a diversos fatores dentro da comunidade num todo, inclusive quando se trata de esgotamento sanitário. Não há como falar sobre saúde pública sem falar sobre o tratamento adequado dos resíduos gerados. O saneamento básico é um procedimento indispensável para prevenção e controle de transmissão de doenças por microrganismos (CAVINATTO, 1996).

De acordo com Díaz e Nunes (2020), a falta de um esgotamento sanitário estruturado e que realmente funcione, foi responsável pela proliferação de diversas doenças que mataram milhares de pessoas e desestabilizaram populações ao longo dos anos em diferentes lugares. A necessidade da universalização do saneamento básico é uma decisão que impacta todos no Brasil e no mundo.

Um dos métodos mais antigos e conhecidos que são utilizados para o tratamento de efluentes são as chamadas lagoas de estabilização, onde há um processo totalmente biológico para remoção de matéria orgânica e remoção de patógenos. É um tratamento composto por lagoas anaeróbias, lagoas facultativas e lagoas de maturação. Haandell e Santos (2021) constatam que esse tipo de tratamento apresenta diversas vantagens, como à sua simplicidade operacional e ao baixo custo de implantação, porém necessitam de uma área grande para seu desenvolvimento. Uma de suas desvantagens também, é que ela apenas consegue realizar o tratamento secundário, e falha quando há necessidade de retirar nutrientes mais complexos.

Uma etapa fundamental é o tratamento primário, que tem como objetivo principal a remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica em suspensão. Esse processo é predominantemente físico e se baseia em operações como gradeamento, desarenação e decantação. Segundo Von Sperling (2005), o tratamento primário pode remover cerca de 50 a 70% dos sólidos suspensos totais, mas sua eficiência na remoção de matéria orgânica (DBO – Demanda biológica de oxigênio) é limitada, ficando entre 25 e 40%.

Assim, o efluente ainda apresenta elevada carga poluidora, onde será necessário seguir para o tratamento secundário, que é voltado para a remoção da matéria orgânica dissolvida e coloidal, utilizando processos biológicos aeróbios ou anaeróbios. De acordo com Jordão e Pessoa (2014), essa etapa se fundamenta na ação de microrganismos que degradam a matéria orgânica, transformando-a em biomassa e produtos estáveis, como CO₂ (Dióxido de carbono) e H₂O (Água).

Outra parte importante é como o efluente deve chegar aos pontos de lançamento para não haver prejuízos a vida aquática e as plantas e algas presentes. O monitoramento da turbidez

no efluente tratado é fundamental porque esse parâmetro está diretamente relacionado à presença de sólidos suspensos finos, matéria orgânica particulada e microrganismos.

Segundo Von Sperling (2005), a turbidez elevada pode indicar ineficiência nas etapas de decantação ou filtração, comprometendo a qualidade final do efluente. Além disso, a turbidez interfere na eficiência dos processos de desinfecção. Conforme Metcalf & Eddy (2014), partículas em suspensão podem proteger bactérias, vírus e protozoários da ação de agentes desinfetantes, como o cloro ou o ozônio. Isso significa que mesmo em efluentes tratados, níveis elevados de turbidez aumentam o risco de contaminação microbológica.

Outro ponto importante é que a turbidez está relacionada à qualidade estética e ambiental do efluente. Um lançamento com valores acima do padrão permitido pela legislação pode causar impacto visual negativo, alterar a penetração de luz no corpo receptor e comprometer processos ecológicos, como a fotossíntese aquática (Jordão e Pessôa, 2014). Logo, o acompanhamento desse parâmetro também é um requisito normativo. De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA n.º 430/2011 o efluente tratado deve atender a limites específicos de qualidade, incluindo turbidez, assegurando a proteção dos usos múltiplos da água e do equilíbrio ambiental.

De acordo com os históricos de análises, ao final do tratamento das lagoas, temos bons resultados que estão dentro do pedido pela CONAMA n.º 430/2011, porém, pode apresentar uma turbidez alta e com um visual que aparenta cores esverdeadas ou acinzentadas, o que para os olhos humanos, aparenta um efluente não tratado. Visando essa problemática, o objetivo desse trabalho é realizar um polimento químico com diferentes coagulantes e avaliar se ocorre desempenhos ambientais como: a diminuição da turbidez; visando um aspecto visual mais agradável para o efluente tratado de uma das estações de tratamento de esgoto de Rio Verde, pela prestadora de serviços BRK Goiás.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SAPO

A ETE é composta por um sistema de tratamento preliminar seguido por lagoas, constituído por:

- Tratamento preliminar (grade grossa e fina; caixa de areia);
- Tratamento primário (2 lagoas anaeróbias);
- Tratamento secundário (2 lagoas facultativas);
- Polimento do efluente (4 lagoas de maturação).

Figura 1 – ETE Sapo (Tratamento Preliminar)



Fonte: BRK (interno), 2021.

Figura 2 – ETE Sapo



Fonte: BRK (interno), 2021.

2.1.1 Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar de esgoto é uma etapa crucial no processo de saneamento, responsável por remover sólidos grosseiros e particulados que podem danificar ou obstruir os sistemas de tratamento subsequentes. Essa etapa, localizada na Elevatória de Esgoto Sapo, inclui o gradeamento grosso, fino e a caixa de areia (desarenador).

O gradeamento fino atua como uma barreira física, retendo materiais como plásticos, tecidos e outros resíduos sólidos que possam prejudicar bombas e tubulações. Segundo Von Sperling (2014), o uso adequado de grades finas reduz a carga de sólidos no sistema, diminuindo o risco de entupimentos e aumentando a eficiência global do tratamento. A caixa de areia, por sua vez, tem a função de separar partículas inorgânicas, como areia e cascalho por meio de sedimentação. De acordo com Metcalf e Eddy (2013), a remoção de partículas inertes impede o desgaste excessivo de equipamentos e evita o acúmulo de material nos tanques de tratamento biológico.

Ambos os processos são fundamentais para garantir o bom funcionamento das etapas subsequentes, promovendo a eficiência energética e operacional da Estação de Tratamento de Esgoto.

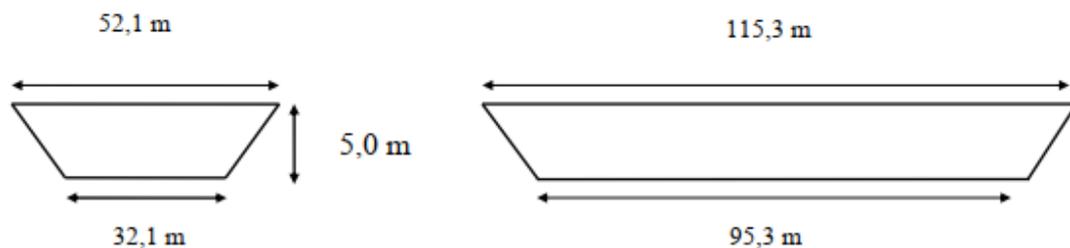
2.1.2 Tratamento primário – Lagoas Anaeróbias

O tratamento primário com lagoas anaeróbias é uma técnica de tratamento de esgoto amplamente utilizada. As lagoas anaeróbias têm como objetivo principal a remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos através de processos biológicos anaeróbios, que ocorrem na ausência de oxigênio.

Segundo Von Sperling (2007), as lagoas anaeróbias são extremamente eficazes na redução da carga orgânica, especialmente em efluentes com altas concentrações de sólidos. Esse processo resulta na formação de lodo estabilizado, que se acumula no fundo da lagoa. A eficiência de remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) pode chegar a 60-70%, dependendo do tempo de retenção hidráulica e das condições climáticas (Von Sperling, 2007; Chernicharo, 2016).

Além disso, as lagoas anaeróbias apresentam baixo custo de operação e manutenção, sendo uma alternativa viável quando se trata de economia. No entanto, devem ser dimensionadas adequadamente para evitar problemas com odores e a formação excessiva de lodo (Chernicharo, 2016). Na ETE Sapo, há duas lagoas anaeróbias, com profundidades de 5 metros cada, com volume útil de 22.246 m³.

Figura 3 – Dimensões Lagoas Anaeróbias

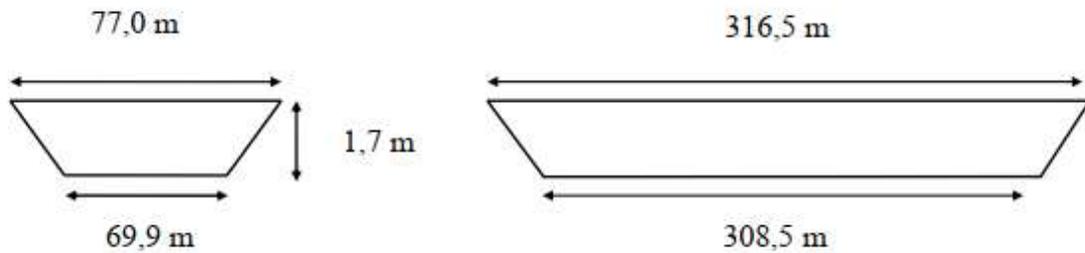


Fonte: SENHA ENGENHARIA – SES Rio Verde (interno), 2013.

2.1.3 Tratamento Secundário – Lagoas Facultativas

As lagoas facultativas são uma das tecnologias mais utilizadas para o tratamento secundário de esgoto, devido à sua simplicidade e baixo custo operacional. Essas lagoas combinam processos anaeróbios e aeróbios, o que permite a degradação da matéria orgânica em diferentes camadas da lagoa. A parte superior, mais próxima da superfície, é aeróbia, onde ocorre a oxigenação natural por meio da fotossíntese de algas e a troca de gases com a atmosfera. Na parte inferior, há condições anaeróbias, onde a decomposição da matéria orgânica é realizada por microrganismos na ausência de oxigênio (Von Sperling, 2007).

De acordo com Chernicharo (2016), as lagoas facultativas são eficazes na remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e patógenos, podendo atingir eficiências de até 80% na remoção de DBO. A capacidade de tratar grandes volumes de efluentes e a baixa exigência de manutenção tornam essa tecnologia uma opção viável para o tratamento de esgoto em áreas rurais e urbanas de pequeno porte. No entanto, para funcionar adequadamente, requerem grandes áreas e longos tempos de retenção hidráulica (Von Sperling, 2007).

Figura 4 – Dimensões Lagoas Facultativas

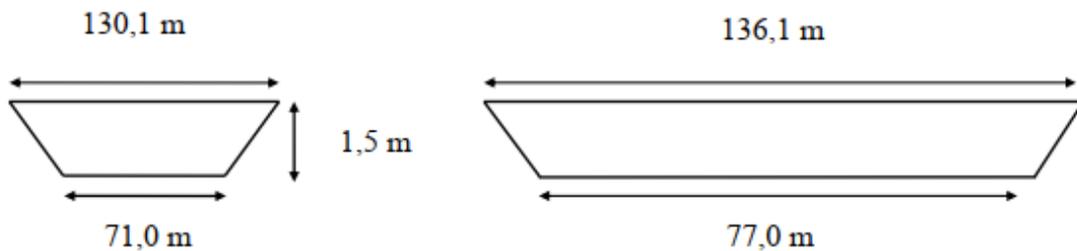
Fonte: SENHA ENGENHARIA – SES Rio Verde (interno), 2013.

2.1.4 Polimento do efluente - Lagoas de maturação

As lagoas de maturação são as etapas finais no tratamento de esgotos e são projetadas principalmente para a remoção de organismos patogênicos, garantindo a qualidade sanitária do efluente final. Essas lagoas atuam através de processos biológicos naturais, onde a ação conjunta da radiação solar, da sedimentação e da atividade microbiológica auxilia na desinfecção da água (Von Sperling, 2007). O ambiente aeróbio predominante nas lagoas de maturação permite a atuação de algas e bactérias, que promovem a oxigenação e a degradação de matéria orgânica residual, além de reduzir a concentração de microrganismos patogênicos.

De acordo com Von Sperling (2007), as lagoas de maturação são eficazes na remoção de coliformes termotolerantes, vírus e outros organismos patogênicos, tornando-as essenciais quando o efluente tratado é destinado ao reúso. O tempo de detenção hidráulica nessas lagoas é geralmente maior do que em outras lagoas, o que garante uma remoção mais eficiente de patógenos. Além disso, as lagoas de maturação exigem baixa manutenção e são adequadas para regiões com climas quentes, onde a radiação solar intensa acelera o processo de desinfecção natural (Chernicharo, 2016).

Figura 5 – Dimensões Lagoas de Maturação



Fonte: SENHA ENGENHARIA – SES Rio Verde (interno), 2013.

2.1.5 Disposições do Efluente Tratado

O efluente final é lançado no Ribeirão do Sapo, localizado dentro do perímetro urbano de Rio Verde. Este corpo d'água é margeado principalmente pela Avenida Paulo Roberto Cunha, pelo Parque Espelho D'Água e pela Rua Maria de Lourdes. Sua bacia hidrográfica possui cerca de 3.166 hectares, dos quais aproximadamente 58% encontram-se em área urbanizada, refletindo forte influência antrópica.

2.2 Qualidade do Efluente

A fiscalização da qualidade de efluentes tratados é realizada por diversas entidades reguladoras e ambientais, tanto em âmbito nacional quanto regional. No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e os Órgãos Estaduais de Meio Ambiente, como a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), são responsáveis por monitorar e garantir que o lançamento de efluentes tratados siga os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011, que complementa a Lei das Águas e define os parâmetros para a qualidade do efluente.

Além disso, as agências municipais de regulação e fiscalização, como a AMAE (Agência de Regulação de Serviços Públicos), também podem monitorar o cumprimento das normas locais e garantir a qualidade dos efluentes dentro dos padrões ambientais estabelecidos. Esses órgãos realizam inspeções periódicas, análises laboratoriais, e podem aplicar penalidades em casos de não conformidade com as normas.

A Resolução CONAMA nº 430/2011, que complementa e altera a Resolução nº 357/2005, estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes, incluindo aqueles provenientes de sistemas de tratamento por lagoas de estabilização. De acordo com o artigo 11 da referida norma, os efluentes secundários oriundos de lagoas de estabilização podem ser lançados em corpos hídricos sem a obrigatoriedade de desinfecção, desde que o corpo receptor não seja destinado ao abastecimento público para consumo humano. No entanto, quando houver utilização do manancial para esse fim, torna-se obrigatória a etapa de desinfecção do efluente, assegurando a proteção da saúde pública.

Além dessa condição específica, a resolução define padrões gerais de lançamento de efluentes que também se aplicam às lagoas de estabilização, como a necessidade de manter a DBO_{5,20} do efluente em até 120 mg/L ou garantir uma remoção mínima de 60% da carga orgânica afluente, bem como manter o pH na faixa de 5 a 9 e a temperatura inferior a 40 °C. Também há limites para óleos e graxas, que não devem ultrapassar 100 mg/L, e a proibição do lançamento de materiais flutuantes visíveis.

Segundo Jordão e Pessoa (2014), a flexibilização quanto à obrigatoriedade da desinfecção em lagoas de estabilização justifica-se porque esses sistemas, em função do tempo de detenção hidráulica prolongado e da ação combinada de fatores naturais, como radiação solar e atividade fotossintética de algas, já promovem uma redução significativa da carga microbiológica. Dessa forma, a legislação busca equilibrar a viabilidade técnica e econômica desses sistemas com a necessidade de garantir padrões mínimos de qualidade ambiental.

A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece regras detalhadas para o lançamento de efluentes líquidos, com o objetivo de proteger os corpos d'água no Brasil. Ela complementa a Resolução CONAMA nº 357/2005, que define os padrões de qualidade das águas. Esse conjunto de normas visa a proteção da qualidade da água, minimizando os riscos de contaminação, preservando a saúde pública e os ecossistemas aquáticos.

2.3 POLIMENTO QUÍMICO

Em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) baseadas em lagoas australianas, o processo é predominantemente natural e voltado ao tratamento primário e secundário, com ênfase na remoção de matéria orgânica e sólidos sedimentáveis. No entanto, essas lagoas

apresentam limitações na remoção de nutrientes, o que impossibilita a realização de um tratamento terciário eficaz apenas com processos naturais (Von Sperling, 2005).

Para alcançar níveis mais elevados de depuração, é necessário incorporar etapas de polimento químico, que é uma etapa complementar após o tratamento biológico, utilizando coagulantes inorgânicos. Dentre os mais utilizados na literatura, destacam-se o cloreto férrico e o policloreto de alumínio (PAC), reconhecidos por sua alta eficiência na redução da turbidez e um melhor aspecto visual em efluentes secundários (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014; METCALF & EDDY, 2013).

A alta turbidez em efluentes lançados diretamente em corpos receptores pode causar sérios impactos ambientais e comprometer a qualidade da água. A turbidez, geralmente causada por partículas em suspensão, interfere na penetração da luz solar, afetando a fotossíntese de organismos aquáticos e servindo de veículo para microrganismos patogênicos e poluentes associados às partículas (TCHOBANOGLIOUS; STENSEL; BURTON, 2014). Portanto, a remoção adequada desses parâmetros é essencial para minimizar os impactos ambientais e atender aos padrões de qualidade exigidos pela legislação brasileira, como os estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011.

2.3.1 Cloreto Férrico

O cloreto férrico demonstrou desempenho notável como coagulante no tratamento terciário de efluentes provenientes de lagoas de estabilização. No estudo de Marguti *et al.* (2008), sua aplicação permitiu alcançar reduções expressivas nos parâmetros de qualidade do efluente, especialmente na redução na turbidez e cor aparente. Os autores observaram que a melhor eficiência foi obtida com a dosagem de 40 mg/L de cloreto férrico, que resultou em remoções de até 74% de turbidez.

Esses resultados evidenciam a capacidade do cloreto férrico de atender aos padrões ambientais estabelecidos para o lançamento de efluentes em corpos receptores, especialmente no controle da eutrofização. Além disso, o estudo reforça a importância da ajustagem de pH e da realização de testes de jarro para otimização da dosagem, uma vez que a eficiência do coagulante é sensível a essas variáveis operacionais. Assim, o uso do cloreto férrico como etapa de polimento químico se apresenta como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente eficaz para complementar o tratamento biológico de lagoas (MARGUTI et al., 2008).

2.3.2 Policloreto de Alumínio (PAC)

O policloreto de alumínio (PAC) é um coagulante inorgânico amplamente utilizado no tratamento de águas e efluentes devido à sua elevada eficiência na remoção de sólidos suspensos, cor e matéria orgânica. Diferente dos coagulantes tradicionais, como o sulfato de alumínio, o PAC apresenta uma estrutura polimérica mais complexa e uma alcalinidade residual mais alta, o que proporciona maior estabilidade ao pH da água tratada e reduz a necessidade de correção com agentes alcalinizantes. Segundo Moreno (2023), essa característica torna o PAC especialmente vantajoso em sistemas onde o controle do pH é crítico, como no tratamento terciário de efluentes com potencial para reuso ou lançamento em corpos receptores mais sensíveis.

Além disso, o PAC tende a gerar menor volume de lodo em comparação ao sulfato de alumínio, o que reduz os custos e a complexidade associados ao gerenciamento de resíduos sólidos nas estações de tratamento. Moreno (2023) também destaca que o PAC apresenta desempenho superior em condições de baixa temperatura e em águas com turbidez variável, mantendo boa eficiência mesmo em situações em que coagulantes convencionais apresentariam instabilidade. Essas vantagens operacionais reforçam o potencial do PAC como uma alternativa eficiente e economicamente viável para o polimento químico de efluentes tratados por lagoas, contribuindo para o cumprimento das normas ambientais com menor impacto operacional.

3 METODOLOGIA

O efluente utilizado foi coletado na Estação de tratamento de esgoto, sob gestão da BRK Goiás, Sapo, que é situada na zona rural do município de Rio Verde – GO, cidade situada a 200 Km da capital do estado (Goiânia - GO). A estação fica próxima ao bairro Promissão e Gameleira. A área de atendimento da rede coletora engloba a região central da cidade e seu entorno, onde a densidade populacional é maior, sendo uma estação dimensionada para receber 256L/s na etapa final. Foi utilizado o efluente tratado para essa análise, onde foram coletados seis frascos de 1L no dia 28 de julho de 2025 para a realização dos testes. Foram medidos o pH e a turbidez inicial para uma melhor consolidação de dados.

Figura 6 - Efluente coletado da ETE Sapo



Fonte: Autora, 2025.

Figura 7 - Medição de pH de efluente tratado



Fonte: Autora, 2025.

Figura 8 - Medição de Turbidez de efluente tratado



Fonte: Autora, 2025.

Foram realizados testes com várias dosagens com a solução já preparada de ambos os coagulantes. Os coagulantes foram disponibilizados pela empresa. As dosagens aplicadas foram definidas com base nos parâmetros já utilizados em outras Estações de Tratamento de Esgoto operadas pela BRK em Goiás.

A metodologia adotada seguiu os procedimentos padronizados descritos por APHA; AWWA; WEF (2017), os quais apresentam métodos internacionalmente reconhecidos para a realização de diferentes testes e análises químicas aplicados à engenharia sanitária.

Tabela 1 - Dosagens dos coagulantes

Becker	Coagulante	Dose (mL/L)
1	Cloreto Férrico	20
2	Cloreto Férrico	40
3	Cloreto Férrico	60
4	PAC	20
5	PAC	40
6	PAC	60

Fonte: Autora, 2025.

Etapas do processo:

1. Adição dos coagulantes

Foi adicionado a dose de cada coagulante com uma proveta de acordo com a tabela 1, diretamente nos beckeres.

Figura 9 - Adição de cloreto férrico no efluente tratado



Fonte: Autora, 2025.

2. Agitação rápida (Coagulação)

Foi agitado manualmente cada becker com bastão de vidro rapidamente por 1 a 2 minutos.

Figura 10 - Agitação de Becker



Fonte: Autora, 2025.

3. Agitação lenta (Floculação)

Depois, continuou-se a agitação de forma mais suave por 15 a 20 minutos.

4. Decantação

Os beckeres ficaram em repouso por volta de 1 hora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a fase de teste, foram apresentados os seguintes resultados:

Tabela 2 - Resultados obtidos

Becker	Coagulante	Dosagem (mL/L)	pH Inicial	Turbidez Inicial (NTU)	pH Final	Turbidez Final
1	Cloreto Férrico	20	7,31	144	6,80	66,3
2	Cloreto Férrico	40	7,31	144	6,25	6,06
3	Cloreto Férrico	60	7,31	144	5,72	2,92
4	PAC	20	7,31	144	7,01	23,00
5	PAC	40	7,31	144	6,89	122,00
6	PAC	60	7,31	144	5,71	97,10

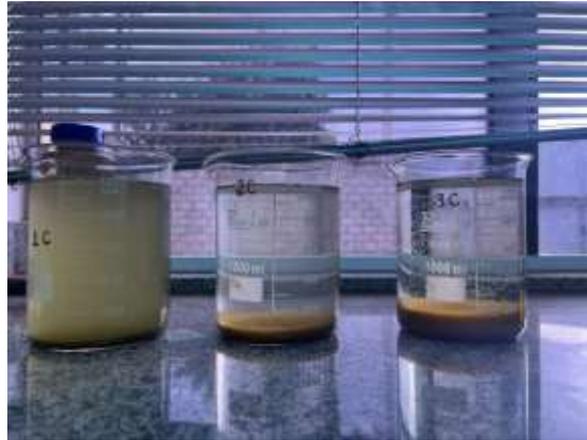
Fonte: Autora, 2025.

Os ensaios de coagulação-floculação apresentados na Tabela 02 permitem avaliar a eficiência do cloreto férrico e do policloreto de alumínio (PAC) na remoção de turbidez do efluente tratado. Inicialmente, o efluente apresentava pH de 7,31 e turbidez de 144 NTU, parâmetros típicos de um efluente secundário.

Nos testes realizados com cloreto férrico, observou-se redução progressiva da turbidez conforme o aumento da dosagem. Com 20 mL/L, a turbidez final foi de 66,3 NTU, correspondendo a uma eficiência de remoção de aproximadamente 54%.

Ao aumentar a dosagem para 40 mL/L, a turbidez foi reduzida drasticamente para 6,06 NTU, alcançando uma remoção superior a 95%. No ensaio com 60 mL/L, a turbidez final atingiu 2,92 NTU, representando uma remoção acima de 98%. Entretanto, esse aumento na dosagem esteve acompanhado de uma redução significativa no pH, que passou de 7,31 para 5,72, evidenciando o caráter acidificante do coagulante férrico. Segundo Von Sperling (2005), a queda de pH é um comportamento esperado devido à hidrólise do FeCl_3 , podendo exigir correção posterior para adequação às normas de lançamento.

Figura 11 - Efluentes pós adição de Cloreto Férrico em dosagens diferentes



Fonte: Autora, 2025.

No caso do PAC, os resultados foram distintos. Com a dosagem de 20 mL/L, obteve-se uma turbidez final de 23,0 NTU, correspondendo a uma eficiência de cerca de 84%, resultado satisfatório quando comparado ao cloreto férrico na mesma dosagem. Entretanto, o aumento da dosagem não resultou em melhor desempenho. Em 40 mL/L, a turbidez residual foi de 122,0 NTU, próxima ao valor inicial, indicando provável fenômeno de sobredosagem, em que ocorre redispersão das partículas coaguladas.

Situação semelhante foi observada em 60 mL/L, onde a turbidez final foi de 97,1 NTU, ainda elevada em relação ao valor obtido com a menor dosagem. O pH apresentou pequena variação, mantendo-se entre 7,01 e 5,71, o que reforça a menor influência do PAC sobre a acidez do meio. Esse comportamento é coerente com Moreno (2023), que aponta como uma das vantagens do PAC a relativa estabilidade do pH durante o processo de coagulação.

Figura 12 - Efluentes pós adição de PAC em dosagens diferentes



Fonte: Autora, 2025.

Comparando os dois coagulantes, nota-se que o cloreto férrico apresentou desempenho mais consistente e eficiente na remoção de turbidez, alcançando valores residuais inferiores a 5 NTU em dosagens mais elevadas, notando que segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, a turbidez em águas doces de classes 1, 2 e 3 não deve exceder 100 NTU. Por outro lado, o PAC apresentou boa performance apenas na menor dosagem, sendo sensível ao fenômeno de sobredosagem em concentrações mais altas. Dessa forma, o cloreto férrico se mostrou mais adequado para o polimento químico do efluente em questão, embora sua aplicação demande atenção quanto à queda de pH e possível necessidade de correção antes do lançamento.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios de coagulação-floculação demonstraram que a utilização do cloreto férrico foi mais eficiente no polimento químico do efluente proveniente de lagoas de estabilização, alcançando turbidez residual inferior a 5 NTU em maiores dosagens. Apesar dessa eficiência, verificou-se a tendência de acidificação do meio, o que pode exigir ajuste posterior de pH para atender aos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

O policloreto de alumínio (PAC) apresentou bom desempenho apenas na menor dosagem testada, com significativa redução da turbidez e maior estabilidade do pH, mas mostrou queda acentuada na eficiência em concentrações mais elevadas, possivelmente devido a fenômenos de sobredosagem.

Dessa forma, conclui-se que o cloreto férrico representa a alternativa mais eficaz para a remoção de turbidez no efluente estudado, enquanto o PAC pode ser viável em condições de dosagens otimizadas. A escolha do coagulante ideal deve considerar não apenas a eficiência de remoção, mas também o impacto no pH e os custos operacionais envolvidos.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANEAMENTO BÁSICO DO MUNICÍPIO DE RIO VERDE (AMAE). *[Documento institucional sobre saneamento básico]*. Rio Verde, [s.d.].

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, p. 89-93, 16 maio 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

CAVINATTO, Vilma Maria. *Saneamento básico: fonte de saúde e bem-estar*. 13. ed. São Paulo: Moderna, 1996.

DÍAZ, Rafael Rodrigo Licheski; NUNES, Larissa dos Reis. A evolução do saneamento básico na história e o debate de sua privatização no Brasil. *Revista de Direito da Faculdade Guanambi*, Guanambi, v. 7, n. 2, p. 1-20, dez. 2020.

HENZE, M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, D. *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design*. London: IWA Publishing, 2008.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

MARGUTI, André Luiz; FERREIRA FILHO, Sidney Seckler; PIVELI, Roque Passos. Otimização de processos físico-químicos na remoção de fósforo de esgotos sanitários por processos de precipitação química com cloreto férrico. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 395-404, 2008.

METCALF, L.; EDDY, H. P. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MORENO, Angel Campos. *Uso do Policloreto de Alumínio (PAC): vantagens sobre o Sulfato de Alumínio em sistema de tratamento de água*. São Paulo: Editora Dialética, 2023.

SPERLING, Marcos von. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

SPERLING, Marcos von. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

SPERLING, Marcos von. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.

SPERLING, Marcos von. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lagoas de estabilização*. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

TCHOBANOGLOUS, George; BURTON, Franklin L.; STENSEL, H. David. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

VAN HAANDEL, A.; SANTOS, S. Lucas dos. Transformação de lagoas de estabilização: reengenharia de um sistema obsoleto de tratamento de águas residuárias. *Reengenharia de Lagoas de Estabilização*, v. 69, n. 229, p. 6–24, 2021.