



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

YURI MODESTO CARVALHO

**IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE EM ETE SANITÁRIA DE
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA: ESTUDO DE CASO NO CEARÁ**

FORTALEZA

2025

YURI MODESTO CARVALHO

IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE EM ETE SANITÁRIA DE
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA: ESTUDO DE CASO NO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Engenheiro Químico.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C329i Carvalho, Yuri Modesto.
Impacto ambiental e sustentabilidade em ETE sanitária de indústria siderúrgica : estudo de caso no Ceará / Yuri Modesto Carvalho. – 2025.
58 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.
1. Tratamento de efluente. 2. Indústria siderúrgica. 3. Resíduos sanitários. 4. Gestão ambiental. I.
Título.

CDD 660

YURI MODESTO CARVALHO

IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE EM ETE SANITÁRIA DE
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA: ESTUDO DE CASO NO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.

Aprovada em: 19/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Claudia Miranda Martins
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Venicio e Georgiana.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcos Venicio e Georgiana, que injetaram em mim motivação quando eu não mais tinha a minha própria e por, durante toda a minha vida, fornecer toda a plataforma possível para que eu determinasse meus sonhos e trilhasse o caminho até concretizá-los. Obrigado por deixarem claro para mim que sou capaz de tudo se eu realmente quiser e por me darem toda a segurança e apoio que puderam na minha jornada.

Ao Onofre Costa, Supervisor de Utilidades, e ao Luciano Júnior, Técnico Químico, por terem me recebido tão prontamente para a visita na planta da ETE que foi base deste estudo.

Ao meu tio Nágilo Modesto, que me acompanha desde sempre, nunca deixou de destacar o meu potencial, de me elogiar e de acreditar em trilhas para minha vida que sempre acabavam em sucesso. Minha vida não teria sido a mesma sem os seus conselhos valiosos e oportunidades oferecidas.

Ao Elton Torres, que, sempre que pôde, me agraciou com ótimos conselhos e me orientou para o sucesso em todas as áreas da vida. Minha vida profissional começou com o seu apoio e sua confiança e por isso eu serei eternamente grato.

À equipe do setor financeiro da Dias de Sousa Construções, Carol, Lara, Amanda e Luma, com quem performei meu estágio e que me receberam imensamente bem em um mundo que era novo para mim e me orientaram com paciência e amizade.

Aos amigos do Grupo LAJE, que foram minha companhia mais presente durante todos os anos de graduação e que me ajudam diariamente a abstrair toda a complexidade do dia a dia com leveza e senso de humor.

A todos os demais familiares e amigos que se fizeram presentes e ajudaram direta ou indiretamente e me incentivaram a alcançar meus objetivos.

Ao Prof. Dr. João José Hiluy Filho, por ter aceitado me orientar nesse trabalho, pela paciência com imprevistos sofridos e pelas valiosas colaborações.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar e Prof. Maria Valderez Ponte Rocha, pelo seu tempo e suas sugestões.

"If you surrender to the air, you can ride it."
(TONI MORRISON, Howard University,
1953).

RESUMO

Com o aumento da preocupação ambiental e a necessidade de uma gestão industrial mais sustentável, o tratamento de efluentes sanitários em plantas industriais tornou-se um tema essencial para mitigar impactos ambientais. Este estudo analisa a eficiência e os desafios operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em uma indústria siderúrgica no Ceará, abordando os processos físico-químicos e biológicos utilizados. Além de revisar a literatura sobre tratamento de efluentes, foram analisados dados operacionais da planta, identificando gargalos e oportunidades de otimização. Os resultados indicam que o sistema em uso atende parcialmente às exigências regulatórias, mas apresenta desafios na remoção de nutrientes e no aproveitamento do biogás gerado. Como alternativas, sugere-se a implementação de processos complementares para melhoria da eficiência e redução dos impactos ambientais. O estudo contribui para o aprimoramento da gestão de efluentes industriais, destacando a importância de soluções integradas e sustentáveis

Palavras-chave: Tratamento de efluente; Indústria siderúrgica; Resíduos sanitários; Gestão ambiental.

ABSTRACT

With the increasing environmental concerns and the need for more sustainable industrial management, the treatment of sanitary effluents in industrial plants has become a crucial topic for mitigating environmental impacts. This study examines the efficiency and operational challenges of a Sewage Treatment Plant (STP) in a steel industry located in Ceará, addressing the physical-chemical and biological processes employed. In addition to reviewing the literature on effluent treatment, operational data from the plant were analyzed, identifying bottlenecks and opportunities for optimization. The results indicate that the current system partially meets regulatory requirements but faces challenges in nutrient removal and the utilization of generated biogas. As alternatives, the implementation of complementary processes is suggested to improve efficiency and reduce environmental impacts. The study contributes to the enhancement of industrial effluent management, emphasizing the importance of integrated and sustainable solutions.

Keywords: Waste treatment; Steel industry; Sanitary waste; Environmental management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Passagem de D. João VI, sob os arcos da Rua do Ouvidor.....	17
Figura 2	- Caracterização de impurezas contidas em efluentes	20
Figura 3	- Representação visual da fração de sólidos no esgoto doméstico.....	23
Figura 4	- Valores de volume de gastos de água no Brasil em 2017.....	25
Figura 5	- Valores de volume de esgoto sanitário gerado por dia em ambientes industriais.....	26
Figura 6	- Fluxograma do processo de tratamento da ETE em estudo.....	27
Figura 7	- Exemplo de estrutura de elevatório sanitário para ETE.....	28
Figura 8	- Fluxograma do processo de digestão de matéria orgânica que ocorre no reator UASB.....	32
Figura 9	- Estrutura básica de um reator UASB.....	33
Figura 10	- Estrutura simplificada do reator aeróbio de fluxo ascendente.....	34
Figura 11	- Exemplo do material suporte presente no filtro aerado submerso.....	36
Figura 12	- Representação estrutural de um tanque de decantação.....	37
Figura 13	- Representação estrutural do tanque de cloração.....	38
Figura 14	- Mecanismo de captação de biogás no reator UASB.....	39
Figura 15	- Exemplo de corpo d'água vítima de um processo de eutrofização.....	42
Figura 16	- Representação de um molécula de trihalometano (THM).....	46
Figura 17	- Fertilizante organomineral peletizado com base orgânica em lodo de esgoto higienizado.....	49
Figura 18	- Torta de lodo proveniente do processo de tratamento de água.....	49
Figura 19	- Definição do parâmetro de concentração de ozônio no processo de ozonólise.....	51
Figura 20	- Representação morfológica de um composto surfactante.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Contaminantes de interesse para o tratamento de esgoto sanitário.....	21
Tabela 2 – Principais características biológicas dos esgotos domésticos.....	22
Tabela 3 – Principais componentes do biogás produzido em um reator UASB de ETE.....	40
Tabela 4 – Principais vias de contaminação associadas ao descarte incorreto do lodo de esgoto	44
Tabela 5 – Bactérias cuja presença pode ser verificada no lodo biológico de esgoto sanitário doméstico.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CEAA	Estudo de Contas Econômicas e Ambientais da Água
CFC	Clorofluorcarboneto
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente do Ceará
COV	Carga Orgânica Volumétrica
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FSA	Filtro Submerso Aerado
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NMP	Número Máximo Permitido
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Bomb Reactor</i>
UAHB	<i>Upflow Anaerobic Hybrid Blanket</i>
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSTA	Sólidos Suspensos do Tanque de Aeração
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
TRV	Tanque Regulador de Vazão
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral.....	16
1.2 Objetivos específicos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 O cenário do tratamento de resíduos sanitários no Brasil.....	17
2.2 Caracterização dos efluentes.....	20
2.2 Caracterização dos sistemas.....	23
3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO	27
3.1 Elevatório principal.....	28
3.2 Tanque de regulação de vazão (TRV).....	29
3.3 Reator UASB (ou RAFA).....	29
3.3.1 Hidrólise.....	30
3.3.2 Acidogênese.....	30
3.3.3 Acetogênese.....	31
3.3.4 Metanogênese.....	31
3.4 Reator Aeróbio de Lodo Ativado (RAFA).....	34
3.5 Tanque de decantação.....	36
3.6 Tanque de contato.....	37
4 RESULTADOS E OTIMIZAÇÕES PROPOSTAS	39
4.1 Resultados da análise de riscos e impactos.....	39
4.1.1 Reator UASB.....	39
4.1.2 Reator Aeróbio de Lodo Ativado.....	43
4.1.3 Tanque de Contato.....	46
4.2 Otimizações propostas.....	47
4.2.1 Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA ou UASB).....	47
4.2.2 Reator Aeróbio de Lodo Ativado.....	48
4.2.3 Tanque de contato.....	50
5 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de adequação das atividades econômicas humanas mundiais para um caminho ecologicamente mais sustentável, a atenção direcionada para o gerenciamento de dejetos sanitários teve considerável aumento. A importância de tratar e destinar adequadamente esses resíduos é substancialmente maior quando se trata da indústria, sobretudo das com maiores quadros de funcionários, cujos resíduos têm potencial de contaminação elevado e podem ser nocivos para ecossistemas completos.

A Resolução do CONAMA 357, de 17 de março de 2005, estabelece que “os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedecem às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis”. Esse marco normativo evidencia a urgência de estratégias de controle e mitigação dos impactos associados ao descarte inadequado de efluentes, especialmente em regiões onde o acesso a sistemas de saneamento básico ainda é desigual e deficiente.

Gerenciar eficazmente esses efluentes não só é fundamental para a conformidade regulatória das empresas, mas também para a manutenção da saúde dos ecossistemas vizinhos e das pessoas. A adoção de sistemas de esgotamento sanitário melhora a qualidade de vida da população e garante a preservação do meio ambiente, por meio do tratamento dos esgotos domésticos. Tais sistemas contribuem diretamente para a redução da poluição hídrica e minimizam os riscos de contaminação de aquíferos e corpos d'água superficiais, elementos vitais para comunidades urbanas e rurais.

Por outro lado, a falha ou falta de compromisso com o correto direcionamento desses resíduos pode acarretar em sérios problemas de cunho ambiental e de saúde, tais como a disseminação de doenças como a febre tifoide, febre paratifoide, as disenterias amebianas e bacilar, cólera, hepatite, esquistossomose, entre outras (JORDÃO & PESSOA, 2009). Epidemias locais envolvendo as patologias citadas podem ser facilmente instauradas se os esgotos sanitários de grandes empresas não são adequadamente tratados antes de serem redirecionados aos ecossistemas vizinhos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a falta de

saneamento mata cerca de 11 mil pessoas por ano no Brasil, por meio de doenças como a Doença de Chagas, transmitida pelo protozoário *Trypanosoma cruzi* e veiculada, principalmente, por insetos triatomíneos, como o mosquito “barbeiro”, que se beneficia da ausência de tratamento e consequente descarte deliberado de esgoto doméstico em corpos hídricos.

Além dos impactos diretos à saúde, a liberação de efluentes sem o tratamento adequado pode levar a processos de eutrofização em corpos hídricos receptores, comprometendo não apenas a biodiversidade aquática, mas também as atividades humanas dependentes desses recursos, como a pesca e o abastecimento de água potável. Pereira (2010) aponta o excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, frequentemente presentes nesses efluentes, como um dos principais agentes dessa degradação ambiental, reforçando a importância de sistemas eficientes para remoção desses compostos.

No contexto industrial, o desafio é ainda maior devido à complexidade dos resíduos gerados. A implementação de tecnologias híbridas, que combinam processos biológicos e físico-químicos, tem se mostrado uma solução promissora para atender às exigências legais e reduzir os impactos ambientais. No entanto, essas tecnologias demandam investimentos substanciais e um planejamento integrado, considerando tanto os custos operacionais quanto os benefícios ecológicos e sociais a longo prazo.

Diante desse cenário, este estudo justifica-se pela necessidade de preencher uma lacuna na literatura quanto à análise de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em indústrias siderúrgicas, setor que, apesar de sua relevância econômica, ainda carece de estudos detalhados sobre a eficiência e os desafios operacionais de seus sistemas de tratamento de efluentes. A escolha da planta industrial analisada, localizada no Ceará, deve-se à sua representatividade no setor e à oportunidade de avaliar um sistema que opera em uma região com desafios específicos de gestão hídrica e ambiental.

Além disso, a análise dos dados operacionais desta ETE permite identificar gargalos e propor soluções que possam ser replicadas em contextos semelhantes, contribuindo para o avanço de práticas sustentáveis no tratamento de efluentes industriais.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a eficiência e os desafios operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em uma indústria siderúrgica no Ceará, avaliando seus processos físico-químicos e biológicos, identificando gargalos operacionais e propondo melhorias para otimizar o tratamento dos efluentes e reduzir impactos ambientais.

1.2 Objetivos específicos

Tal estudo far-se-á por meio de análise presencial e coleta de dados do processo, de modo que os objetivos específicos sejam:

- Descrever os processos físico-químicos e biológicos empregados na ETE, bem como os equipamentos, o seu funcionamento e as suas principais etapas;
- Embasar a funcionalidade do processo com métodos comprovados na literatura;
- Identificar gargalos operacionais e limitações do processo, incluindo desafios na remoção de nutrientes, geração de lodo e aproveitamento do biogás;
- Propor otimizações e alternativas tecnológicas para melhorar a eficiência do tratamento, reduzir impactos ambientais e aumentar a sustentabilidade da operação.

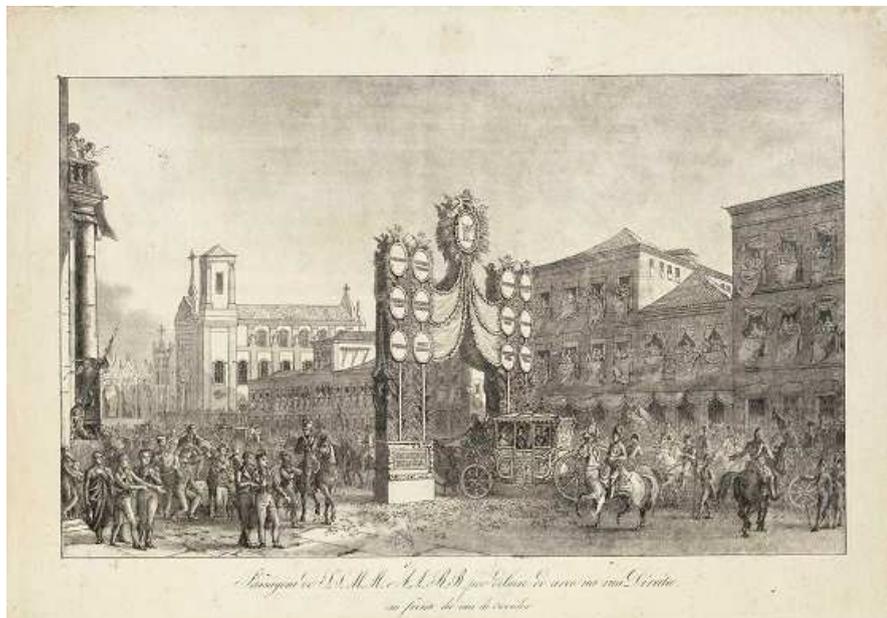
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O cenário do tratamento de resíduos sanitários no Brasil

A gestão dos resíduos sanitários no Brasil evoluiu de forma lenta ao longo dos séculos. No período colonial e imperial as cidades brasileiras não possuíam infraestrutura para coleta e tratamento de esgotos, e os resíduos eram frequentemente despejados em ruas e rios. Somente no início do século XIX, com a chegada da corte portuguesa, surgiram as primeiras medidas de saneamento, como a drenagem de terrenos alagados e a remoção de dejetos na cidade do Rio de Janeiro, então sede da Coroa, estabelecidas pela Intendência Geral de Polícia da Corte (1808), instituída por Dom João VI.

Na Figura 1 ilustra-se uma a passagem da Coroa pela Rua do Ouvidor, beneficiada pelos primeiros projetos de saneamento e pavimentação da época, com objetivo de se assemelhar aos padrões europeus e atrair viajantes e comerciantes.

Figura 1 – Passagem de D. João VI, sob os arcos da Rua do Ouvidor.



Fonte: Domínio Público, Biblioteca Nacional Digital

Os primeiros sistemas de esgoto começaram a ser construídos no final do século XIX, mas o tratamento dos resíduos ainda não era uma prioridade. Foi

apenas na década de 1930 que o Brasil inaugurou sua primeira Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), localizada em Santos, São Paulo, com o objetivo de reduzir o despejo de esgotos *in natura* no oceano. A partir de então, a necessidade de tratamento adequado começou a ganhar mais espaço nas políticas públicas.

A instauração de legislação que abrangesse critérios para o projeto e execução desses sistemas de encanamento, porém, só ocorreu a partir dos anos 1940, com o início da comercialização desses serviços. A existência desses serviços ocasionou, em seguida, a instauração de autarquias e de mecanismos de financiamento e fiscalização para o abastecimento de água, como o Serviço Especial de Saúde Pública (SESP), que viria a se tornar a FUNASA (Fundação Nacional de Saúde)

Em 1971, por meio do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), criaram-se diretrizes, métricas e infraestrutura para o saneamento básico no Brasil, estruturando empresas estaduais de saneamento e incentivando a construção de novas ETEs. Hoje, essas diretrizes são estabelecidas pelo PLANASAB (Plano Nacional de Saneamento Básico), instrumentado pelo Ministério da Saúde.

No entanto, a maior evolução no tratamento de efluentes ocorreu a partir da década de 1990, com a adoção do reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), tecnologia que se mostrou eficiente para a realidade brasileira por seu baixo custo e simplicidade operacional.

A atualização do marco legal do saneamento, em 2020, teve o intuito de reverter o panorama apontado por um estudo de 2017 do programa Atlas Esgotos, que apontava 38,6% dos esgotos gerados no Brasil como não coletados e, conseqüentemente, descartados sem tratamento propício, um cenário denotado pelos esgotos correndo a céu aberto em várias partes do país. Outros 18,8% eram coletados e lançados diretamente corpos d'água, ainda sem algum tipo de tratamento e apenas uma parcela de 42,6% do esgoto produzido era coletado e tratado antes de ser lançado nos corpos hídricos (ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Com o marco legal, o país estabeleceu metas para garantir que até 2033, 90% do esgoto gerado seja tratado, o que impulsiona investimentos no setor e reforça a necessidade de estações de tratamento eficientes e sustentáveis.

O marco legal do saneamento definiu, segundo o Ministério das Cidades, diretrizes importantes para a correta aplicação dos esforços na manutenção sustentável do programa de saneamento:

1. Universalização do acesso aos serviços
2. Uniformização da regulação do setor
3. Prestação regionalizada e governança interfederativa
4. Eficiência e eficácia dos serviços prestados
5. Formalização dos contratos
6. Estímulo à expansão dos investimentos
7. Cobrança dos serviços
8. Maior participação do Estado
9. Sustentabilidade e equilíbrio econômico-financeiro da prestação dos serviços

Para o presente estudo, focado em uma instalação industrial no município de Caucaia, no Ceará, precisa-se considerar as legislações definidas pelo CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) e do COEMA (Conselho Estadual de Meio Ambiente do Ceará), que tem dentre as suas resoluções mais importantes, a de número 02, de fevereiro de 2017, que dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos receptores e em rede coletora de esgoto, em atendimento aos princípios e respectivos objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente.

Da resolução, podem-se identificar parâmetros de interesse para a confirmação da regularidade legal da estação de tratamento em estudo:

Art.12. Os efluentes sanitários, somente poderão ser lançados diretamente no corpo hídrico desde que obedeçam, resguardadas outras exigências cabíveis, as seguintes condições e padrões específicos:

I - pH entre 5 e 9;

II - temperatura: inferior a 40°C;

III - materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff;

IV - Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO 5 dias, 20°C: até 120 mg/L;

V - substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L;

VI - ausência de materiais flutuantes;

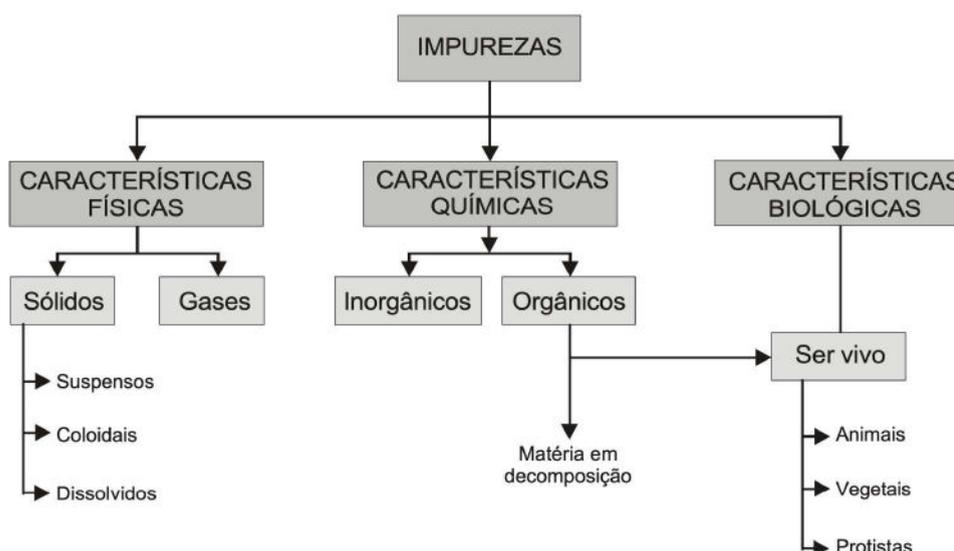
VII - sulfeto: até 1 mg/L;

VIII - NMP de coliformes termotolerantes: até 5000 CT/100ml;

2.2 Caracterização dos efluentes

A caracterização dos efluentes é essencial para compreender sua composição e definir os métodos de tratamento mais adequados para sua mitigação antes do descarte no meio ambiente. Os efluentes são constituídos por diversas impurezas, que podem ser classificadas com base em suas características físicas, químicas e biológicas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Caracterização de impurezas contidas em efluentes



Fonte: VON SPERLING, 1996

Do ponto de vista físico, os efluentes podem conter sólidos suspensos, coloidais e dissolvidos, além de gases dissolvidos. Já do ponto de vista químico, os contaminantes se dividem em substâncias orgânicas, como matéria em decomposição, e inorgânicas, como metais pesados e sais.

Por fim, os aspectos biológicos englobam a presença de microorganismos vivos, que podem ser classificados como animais, vegetais ou protistas (VON SPERLING, 1996). A identificação desses componentes é crucial para avaliar o potencial de poluição dos efluentes e selecionar tecnologias de tratamento que atendam às exigências ambientais e normativas.

Os efluentes industriais são resultantes de processos produtivos específicos de cada indústria e, portanto, sua composição varia amplamente dependendo do setor industrial e dos produtos fabricados. Podem conter uma diversidade de substâncias químicas, metais pesados, compostos orgânicos recalcitrantes, óleos, graxas e outros poluentes potencialmente tóxicos.

Devido à sua complexidade e variabilidade, o tratamento de efluentes industriais requer uma abordagem mais específica e particular, frequentemente envolvendo processos físico-químicos, como coagulação-floculação, adsorção, filtração, ou tratamentos avançados como oxidação química e biorremediação (ZANITH, 2016).

Por outro lado, os efluentes sanitários são aqueles gerados a partir de atividades humanas cotidianas, como banhos, lavagem de roupas, limpeza de utensílios domésticos e dejetos fisiológicos. Esses efluentes possuem uma composição relativamente constante, predominando matéria orgânica biodegradável, nutrientes como nitrogênio e fósforo, e microrganismos patogênicos.

O tratamento desses efluentes visa principalmente a remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e agentes patogênicos (VON SPERLING, 2005). Na Tabela 1 é possível identificar, sob a ótica de Metcalf & Eddy, alguns dos parâmetros verificáveis e tratáveis a partir dos quais pode-se identificar o tratamento ideal para o efluente.

Tabela 1 – Contaminantes de interesse para o tratamento de esgoto sanitário

Contaminantes	Importância
Sólidos em Suspensão	Sólidos suspensos podem levar ao desenvolvimento de depósitos de lodo e condições anaeróbias quando o efluente líquido não tratado é lançado no ambiente aquático.
Compostos Orgânicos Biodegradáveis	Compostos principalmente por proteínas, carboidratos e gorduras, os orgânicos biodegradáveis são quantificados basicamente em termos de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio). Se lançado sem tratamento ao ambiente, sua estabilização biológica pode levar à queda da reserva de oxigênio natural e ao desenvolvimento de condições sépticas.
Organismos Patogênicos	Algumas doenças podem ser transmitidas por organismos patogênicos em águas residuárias.
Nutrientes	Tanto nitrogênio quanto fósforo, juntos ao carbono, são nutrientes

Contaminantes	Importância
	essenciais para o crescimento. Quando lançados no ambiente aquático, estes nutrientes podem levar ao crescimento de uma vida aquática não desejável. Quando lançados em excessivas quantidades sobre a terra, também podem poluir águas subterrâneas.
Inorgânicos Dissolvidos	Constituintes inorgânicos como cálcio, sódio e sulfato são adicionados à água de abastecimento doméstico e devem ser removidos se o efluente for reutilizado.

Fonte: METCALF & EDDY, 2003

A principal diferença entre os dois tipos de efluentes reside na sua origem e composição. Enquanto os efluentes sanitários apresentam uma carga poluidora mais homogênea e previsível, como aponta Von Sperling (2005) (conforme a Tabela 2), permitindo tratamentos padronizados, os efluentes industriais exigem uma caracterização detalhada e soluções de tratamento customizadas para garantir a eficiência na remoção de contaminantes específicos.

Tabela 2 - Principais características biológicas dos esgotos domésticos

Parâmetro	Descrição
Sólidos totais	Em suspensão: fração de sólidos orgânicos e inorgânicos que são retidos em filtros de papel de 0,45 a 2,0 μm . Dissolvidos: fração de sólidos orgânicos e inorgânicos que não são retidos em filtros de papel de 0,45 a 2,0 μm . Sendo os sólidos fixos os componentes minerais e os voláteis, os orgânicos. Sedimentáveis: fração de sólidos orgânicos e inorgânicos que sedimenta em 1 hora no cone Imhoff.
Matéria orgânica	DBO5: fração biodegradável dos componentes orgânicos carbonáceos. DQO: representa a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea.
pH	Indicador das características ácidas ou básicas do esgoto. Uma solução é neutra em pH 7. Os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzir o pH.
Organismos patogênicos	Os principais organismos encontrados nos esgotos são as bactérias, os vírus, os protozoários e os helmintos. Deste grupo, as bactérias são as mais importantes, pois são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica, tanto na natureza como nas estações de tratamento.
Indicadores de contaminação fecal	Os principais organismos encontrados nos esgotos são as bactérias, os vírus, os protozoários e os helmintos. Deste grupo, as bactérias são as mais importantes, pois são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica, tanto na natureza como nas estações de tratamento.

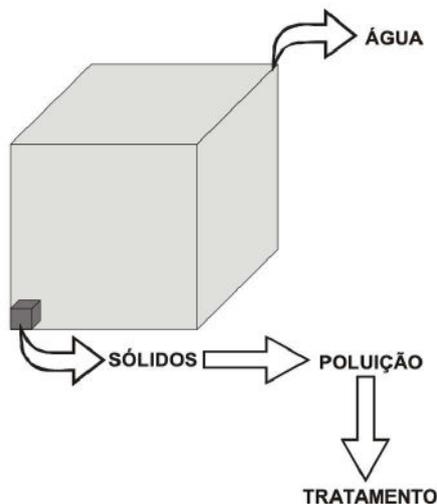
Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2014)

2.2 Caracterização dos sistemas

O propósito de um sistema de tratamento de esgoto é retirar a maior parte do material sólido da água, e devolvê-la de forma mais limpa à natureza, de modo a atender aos padrões de qualidade de lançamento de efluentes, conforme a legislação vigente. A escolha do sistema de tratamento de esgoto deve levar em consideração a situação do fluxo a tratar e dos níveis de contaminação presente nele (BRASIL, 2009).

Segundo Chernicharo (1997), os processos de tratamento biológico são desenvolvidos para eliminar a matéria orgânica presente em águas residuais, tanto na forma dissolvida quanto suspensa (conforme a Figura 3), criando condições ambientais ideais para o crescimento de microrganismos que consomem esses compostos orgânicos como fonte de energia.

Figura 3: Representação visual da fração de sólidos no esgoto doméstico



Fonte: VON SPERLING (1996)

Esses tratamentos podem ocorrer de maneira aeróbia, na presença de oxigênio, ou de forma anaeróbia, na ausência de oxigênio. Além de remover a matéria orgânica, esses processos também reduzem outros elementos das águas residuais, como sólidos em suspensão, nitrogênio, fósforo e metais pesados. De maneira geral, os tratamentos biológicos são métodos mais sustentáveis, eficientes

e econômicos para o tratamento de águas residuais e efluentes.

Dentre as tecnologias utilizadas atualmente, os processos anaeróbicos de alta taxa tem se mostrado capazes de suprir grande parcela dos tratamentos de efluentes e algumas das desvantagens dos sistemas aeróbios, principalmente no que toca ao consumo de energia e produção de lodo (VAN HAANDEL, 1999). No entanto, esses procedimentos, sozinhos, não costumam atender aos requerimentos legais para descarte de efluentes, proporcionando remoção de até 70% da carga biótica do fluxo de entrada de esgoto (CHERNICHARO, 1997). Dessa forma, a adição de um pós-tratamento faz-se necessária.

Por outro lado, os sistemas aeróbios, embora eficientes na remoção de matéria orgânica, apresentam altos custos operacionais devido à necessidade de energia para aeração e de unidades adicionais para adensamento e digestão de lodo. Além disso, esses sistemas geram grandes volumes de lodo com baixa concentração e alto grau de instabilidade (VAN HAANDEL, 1999).

Visando equilibrar as vantagens e desvantagens dos sistemas anaeróbios e aeróbios, os procedimentos mais eficientes têm explorado a combinação desses dois processos. Ainda segundo Van Haandel, essa configuração representa uma alternativa economicamente promissora, que ganha cada vez mais destaque no cenário mundial.

Segundo o CONAMA (2009), os principais sistemas de tratamento de esgotos sanitários utilizados no Brasil são os Sistemas de Lagoas de Estabilização e os Sistemas de Lodo Ativado.

Nas últimas décadas, o sistema de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, conhecido pela sigla UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), é uma tecnologia que passou a ter um grande destaque no âmbito global e brasileiro (BRASIL, 2019), sendo ele o principal processo discutido no presente trabalho.

A quantidade de matéria orgânica nos esgotos sanitários pode ser avaliada por meio de ensaios de:

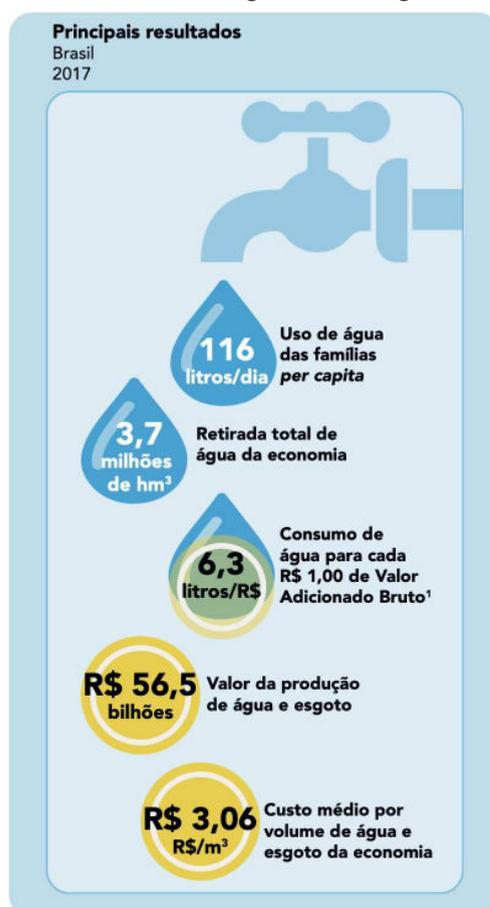
- DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio, que é uma medida indireta de matéria orgânica, que avalia, em condições normais, quanto de oxigênio dissolvido em um corpo hídrico, a matéria orgânica biodegradável presente, tanto nas formas solúveis e coloidais, precisaria captar para seu completo processo de degradação;

- DQO – Demanda Química de Oxigênio, que é uma medida indireta de matéria orgânica, que avalia praticamente as formas biodegradáveis ou não-biodegradáveis, solúveis e em suspensão (coloidais e sedimentáveis).

A planta de tratamento sanitário em estudo, importa salientar, está compreendida na Classe 1 de ETE do COEMA, que compreende as estações de tratamento com vazões inferiores a 500m³/dia.

O dimensionamento da estação, no entanto, considera uma demanda de 144m³/dia, com base em um consumo médio de 116 L/pessoa.dia, dado fornecido pelo CEAA, Estudo de Contas Econômicas Ambientais da Água: Brasil 2013-2017 (Figura 4), e em um número total de funcionários de 1165 pessoas.

Figura 4 - Valores de volume de gastos de água no Brasil em 2017



Fonte: IBGE, Agência Nacional de Águas - ANA, 2017

No estudo do IBGE, do ano de 2017, determina-se também a geração média de esgoto sanitário por pessoa por dia no ambiente industrial, conforme informa a

Figura 5:

Figura 5 - Valores de volume de esgoto sanitário gerado por dia em ambientes industriais

Atividade	Esgoto (L/dia)
Fábrica em geral (por pessoa)	70
Escritório (por pessoa)	50
Restaurantes (por refeição)	25

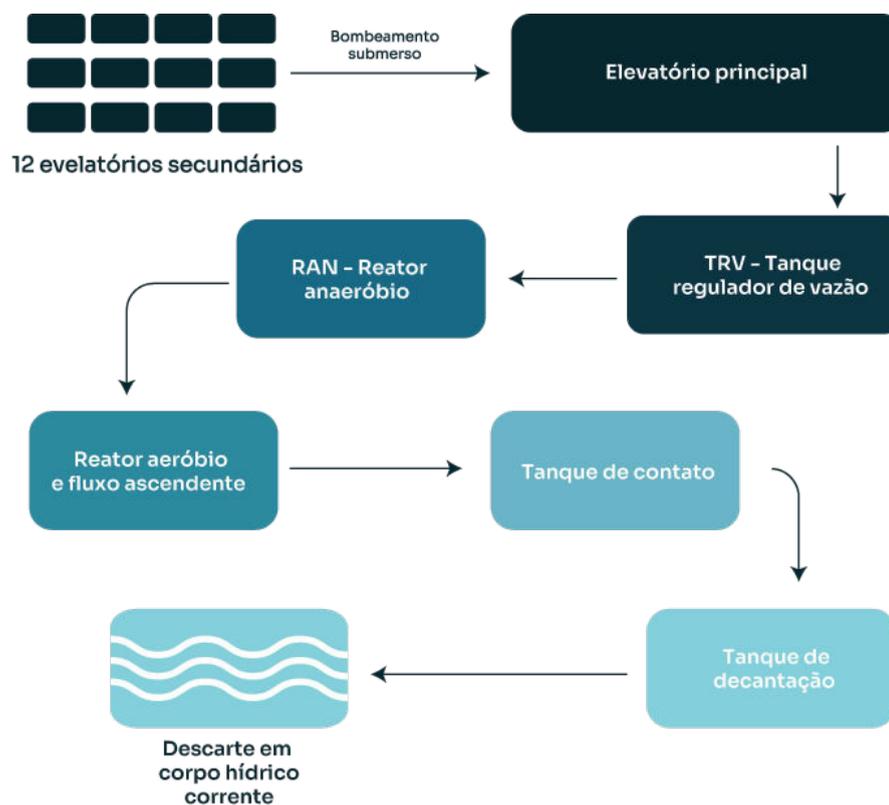
Fonte: Adaptado de IBGE, Agência Nacional de Águas - ANA, 2017

3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

A Figura 6 permite analisar, de forma ampla, a cadeia de tratamentos executados pela ETE do estudo, que é composta por 4 etapas básicas que promovem efetivamente a degradação ou remoção da carga orgânica presente no efluente:

- RAN ou UASB - Reator anaeróbio;
- RAFA - Reator aeróbio;
- Tanque de contato;
- Tanque de decantação.

Figura 6 - Fluxograma do processo de tratamento da ETE em estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

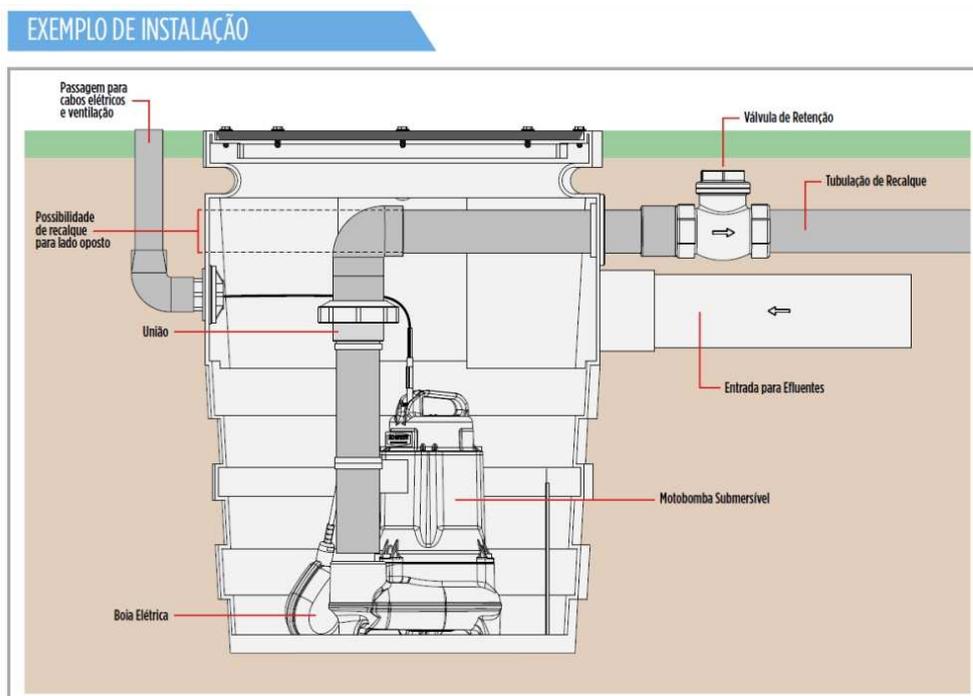
Tais equipamentos e seus adjacentes, como o TRV - Tanque de Regulação de Vazão e o sistema de elevatórios, são também tratados no decorrer do estudo, uma vez que desempenham papéis primordiais para o correto funcionamento do sistema de tratamento.

3.1 Elevatório principal

Após ser coletado através de doze estações elevatórias secundários distribuídos por toda a planta da indústria, o efluente de vestiários, sanitários, refeitório, cozinhas e outras fontes de uso de água é redirecionado, por meio de bombeamento submerso, para um elevatório principal, dentro da área da ETE.

O elevatório principal é uma construção de alvenaria que comporta todo o montante de dejetos (ÁGUA CLARAS, 2023). A construção funciona como um poço em cujo nível mais inferior encontram-se motobombas submersíveis, com objetivo de encaminhar o esgoto não tratado até a entrada do tratamento da ETE, assim como representa a Figura 7:

Figura 7 – Exemplo de estrutura de elevatório sanitário para ETE.



Fonte: Casa da Cisterna - Soluções Sustentáveis, 2021

A estrutura, coberta e protegida de luz solar direta, permite acesso direto ao montante de efluente, o que proporciona a coleta de amostras periodicamente, a fim de aferir a carga de matéria orgânica inicial do processo por meio de teste de DBO e DQO, parâmetros necessário para fins de cálculo de efetividade do tratamento da planta.

3.2 Tanque de regulação de vazão (TRV)

Após ser bombeado pelas motobombas presentes no elevatório principal, o fluxo de esgoto da indústria segue para um Tanque de Regulação de Vazão (TRV), cuja principal função é homogeneizar a concentração de entrada de matéria orgânica e evitar oscilações bruscas na carga orgânica do processo.

Esse processo é particularmente relevante para mitigar os picos de alimentação decorrentes de horários específicos da fábrica. Horários de alta utilização de lavatórios e banheiros, tais como trocas de turnos e horários de almoço culminam em um efluente mais concentrado, em função do grande consumo de água e geração de matéria orgânica proveniente de banho de funcionários, acionamento de descargas sanitárias e lavagem de utensílios da cozinha, como apontado *in loco* na ETE de estudo.

3.3 Reator UASB (ou RAFA)

O reator anaeróbio, ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*, é o pilar principal do processo de degradação de matéria orgânica. No processo, a matéria orgânica é degradada anaerobiamente, ou seja, na ausência de oxigênio, por bactérias dispersas no reator à medida que a carga orgânica segue gradualmente o fluxo ascendente por meio da camada densa de biomassa sólida, chamada de lodo, resultando em um efluente tratado e na geração de gases como metano e gás carbônico na parte superior do reator. (VON SPERLING, 1996).

O lodo, formado por uma gama de bactérias degradantes, é acumulado na parte inferior do reator, o que proporciona o adensamento contínuo dessa camada de biomassa, com concentração progressivamente maior. Von-Sperling (1996) aponta que, em função dessa concentração, o volume requerido para o reator é bastante reduzido, em comparação com outros sistemas de tratamento como reatores aeróbios, lagoas de estabilização e sistemas aeróbios com biofilmes.

O lodo é mantido em suspensão pelo fluxo ascendente do efluente e pela produção de biogás, o que otimiza a interação com a carga orgânica presente no

fluxo.

A digestão anaeróbia ocorre pela ação consecutiva de vários microrganismos, em um processo estruturado que apresenta quatro etapas distintas:

3.3.1 Hidrólise

O processo inicial na digestão anaeróbia é a hidrólise de polímeros de cadeia longa, realizada por bactérias hidrolíticas. Os principais alvos dessa hidrólise incluem a celulose, proteínas e lipídios. Para que essas bactérias prosperem, o pH ideal é em torno de 6 e a temperatura ideal é de aproximadamente 45 °C (CHERNICHARO, 2005).

A hidrólise é frequentemente o fator limitante na conversão da matéria orgânica em metano, já que os produtos resultantes dessa etapa são fermentados e posteriormente transformados em metano. As bactérias transicionais desempenham um papel crucial ao converter a matéria orgânica solúvel, produzida pelas bactérias hidrolíticas, em substrato para a metanogênese. Certos substratos são hidrolisados em aminoácidos, que podem ser utilizados como fonte de carbono e energia em reações fermentativas.

Durante a digestão anaeróbia, as bactérias fermentativas convertem o material orgânico solúvel em ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico, hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂). Alguns produtos da fermentação, como o acetato e o hidrogênio, podem ser metabolizados diretamente pelas bactérias metanogênicas. No entanto, outros compostos, como os ácidos propiônico e butírico, não são digeridos diretamente e requerem etapas adicionais de processamento antes de serem convertidos em metano.

3.3.2 Acidogênese

Os organismos acidogênicos absorvem açúcares e aminoácidos, fermentando-os, de forma intracelular, para produzir ácidos graxos de cadeia curta, como ácido propiônico e butírico, além de dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂) e acetato. As vias bioquímicas responsáveis por essa fermentação, bem como o tipo

de ácido volátil gerado, variam de acordo com o tipo de substrato disponível e a pressão parcial de hidrogênio (CHERNICHARO, 2005).

3.3.3 Acetogênese

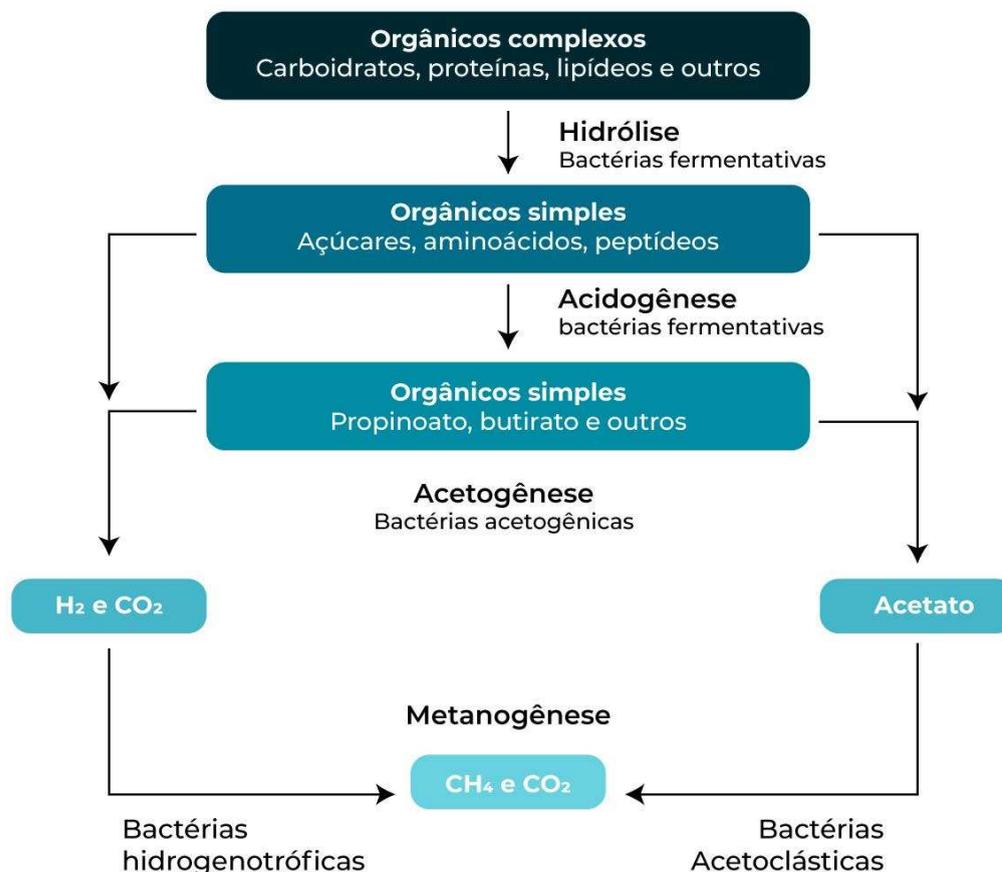
As bactérias acetogênicas desempenham um papel crucial no processo de transição entre a acidogênese e a metanogênese. Segundo Chernicharo (2005), essas bactérias produtoras de hidrogênio têm a capacidade de converter ácidos graxos que possuem mais de dois átomos de carbono em ácido acético, CO_2 e H_2 , que são, por sua vez, utilizados como substratos pelas bactérias metanogênicas.

3.3.4 Metanogênese

As bactérias metanogênicas representam a fase final do processo de decomposição anaeróbia da biomassa, em que o metano é o produto final da mineralização na digestão anaeróbia. Diferentemente das bactérias aeróbias, que oxidam polímeros em gás carbônico (CO_2) e água (H_2O), as metanogênicas utilizam ácido fórmico, ácido acético, metanol, metilamina, hidrogênio e CO_2 para produzir metano. Segundo Chernicharo (2005), cerca de 70% do metano gerado por essas bactérias deriva do acetato. O acetato presente no efluente pode ser diretamente metabolizado pelas bactérias metanogênicas, sem necessidade de interações catabólicas com outras bactérias. As reações bioquímicas conduzidas por este grupo bacteriano também ajudam a reduzir a pressão parcial de hidrogênio, o que facilita as etapas anteriores do processo de degradação anaeróbia.

Uma visão geral do processo e de suas distintas etapas é proporcionada pela Figura 8, a seguir:

Figura 8 - Fluxograma do processo de digestão de matéria orgânica no reator UASB



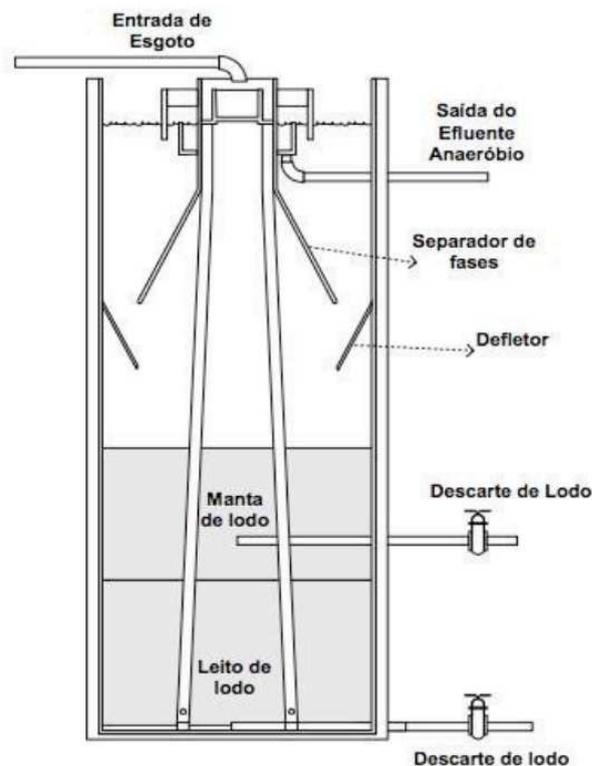
Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de SILVEIRA et al., 2012

Localizada em uma planta industrial no município de Caucaia, na Região Metropolitana de Fortaleza, a estação de tratamento está submetida a um clima essencialmente semi-árido, com temperaturas que variam entre 27°C e 33°C. A elevada temperatura média da região favorece significativamente o desempenho do reator anaeróbico de fluxo ascendente, pois temperaturas mais altas aceleram a atividade microbiológica e aumentam a taxa de degradação da matéria orgânica (LETTINGA et al., 1993). Esse fator climático melhora a estabilidade do processo e potencializa a remoção de carga orgânica, tornando a digestão anaeróbia mais eficiente em comparação com regiões de clima frio, onde a atividade biológica pode ser limitada.

Apesar de apresentar baixa demanda operacional, não exigindo mão de obra altamente especializada para sua manutenção e controle, o reator anaeróbico enfrenta, quando aplicado isolado, desafios na remoção de poluentes a níveis que

atendam consistentemente aos padrões legais. Esse problema se intensifica quando há cargas orgânicas elevadas no afluente, uma vez que a eficiência do tratamento anaeróbio isolado pode não ser suficiente para reduzir parâmetros como DBO e nitrogênio a níveis aceitáveis, exigindo processos complementares para garantir o tratamento adequado.

Figura 9 – Estrutura básica de um reator UASB.



Fonte: VERONEZ, 2001

Processos metabólicos de fermentação e respiração proporcionam a degradação da matéria orgânica sem a utilização de oxigênio. Para que esses processos metabólicos sejam efetivos, é imperativo que o meio proporcione condições requeridas para que a conversão da matéria orgânica em suspensão seja a máxima possível.

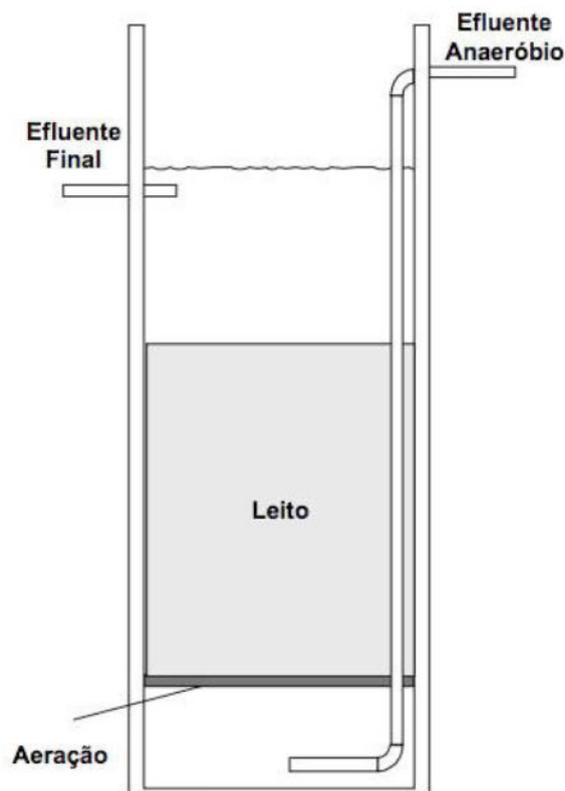
Segundo Veronez (2001), o processo anaeróbio realizado no reator UASB, no entanto, promove apenas a degradação de até 60% da COV (Carga Orgânica Volumétrica) de entrada, sendo desse modo, necessária a adição de etapas subsequentes de tratamento a fim de atingir um nível de carga orgânica dentro do

regulamentado.

3.4 Reator Aeróbio de Lodo Ativado (RAFA)

O Reator Aeróbio de Lodo Ativado, Reator Aeróbio de Fluxo Ascendente ou Filtro Submerso Aerado (FSA), desempenha um papel essencial na remoção da matéria orgânica remanescente e na oxigenação do efluente antes de sua passagem para as etapas finais de tratamento. Como ilustrado na Figura 10, o sistema recebe o efluente anaeróbico na parte superior e o conduz através do leito filtrante, onde ocorre a degradação biológica.

Figura 10 - Estrutura simplificada do reator aeróbio de fluxo ascendente



Fonte: Adaptado de SILVEIRA et al, 2012

A aeração é promovida por um sistema localizado na base do filtro, garantindo uma concentração de oxigênio dissolvido entre 1,5 e 2,0 mg/L, faixa ideal para a manutenção da atividade microbológica no processo aeróbio. A oxigenação do meio ocorre por meio de duas bombas idênticas localizadas na casa de bombas

da ETE, que operam de forma alternada, proporcionando estabilidade ao sistema e prevenindo sobrecarga mecânica. Esse processo favorece a redução dos Sólidos em Suspensão no Tanque de Aeração (SSTA) e melhora a qualidade final do efluente tratado.

Além da oxigenação controlada, a configuração do sistema favorece a retenção de sólidos biológicos no leito filtrante, o que contribui para a melhoria da eficiência no tratamento. Segundo Tilche e Vieira (1991), o sistema em estudo apresenta elevada retenção de sólidos, permitindo a manutenção de um lodo biologicamente ativo que potencializa a degradação da matéria orgânica. Como demonstrado na Figura 10, o efluente tratado sai na parte superior do filtro, onde já sofreu significativa remoção de carga poluidora.

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), os filtros submersos aerados operam em três fases principais:

- Fase sólida: é composta pelo meio-suporte, onde se desenvolvem as colônias de microrganismos de crescimento aderido, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica;
- Fase líquida: envolve o fluxo contínuo do efluente através do meio poroso, promovendo o contato entre os contaminantes e a biomassa aderida;
- Fase gasosa: consiste na aeração artificial, fundamental para manter a condição aeróbia e garantir a eficiência do tratamento.

Entretanto, conforme destacado na Figura 10, o FSA apresenta limitações quando aplicado isoladamente, especialmente em sistemas com altas cargas orgânicas, demandando um grande volume de reator para garantir resultados satisfatórios.

A necessidade de um material suporte adequado, ilustrado na Figura 11, também é um fator determinante para a eficiência do sistema, visto que influencia diretamente a retenção da biomassa e a taxa de degradação da matéria orgânica.

Figura 11: Exemplo do meio suporte presente no filtro aerado submerso



Fonte: Autoria própria

3.5 Tanque de decantação

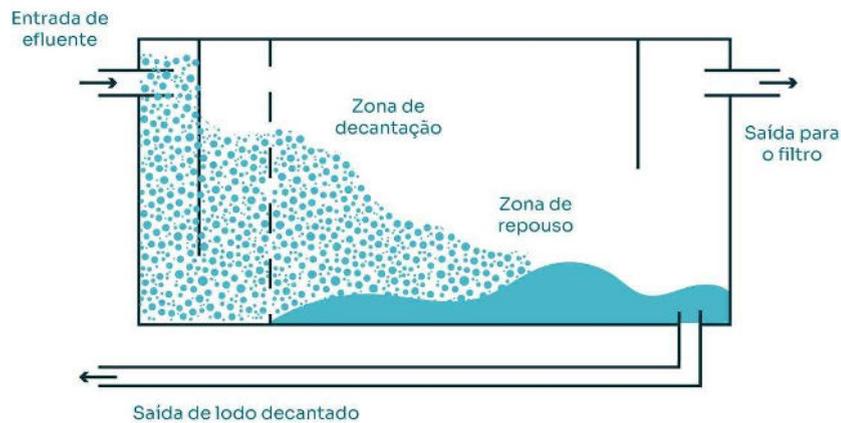
O tanque de decantação na ETE em estudo desempenha um papel crucial na remoção final de sólidos sedimentáveis antes da etapa de desinfecção. Sendo a penúltima etapa do tratamento, sua principal função é separar partículas remanescentes do processo biológico, evitando que essas impurezas sigam para o tanque de contato.

A eficiência dessa unidade depende de fatores como tempo de detenção hidráulica (TDH), taxa de escoamento e características do efluente tratado, garantindo que os sólidos se depositem no fundo do tanque, formando o lodo sedimentado. Esse lodo deve ser periodicamente removido para evitar acúmulo e perda de eficiência no processo. Dessa forma, o tanque de decantação otimiza a qualidade final do efluente, reduzindo a carga de sólidos e matéria orgânica remanescente que poderia interferir na etapa de desinfecção, além de minimizar a formação de subprodutos indesejáveis no tanque de contato.

Durante a sedimentação, microrganismos ativos provenientes do tanque de aeração podem ser separados do efluente tratado e, ao invés de serem descartados junto ao lodo excedente, podem ser reaproveitados no reator aeróbio, como representado na Figura 12. Esse processo permite manter uma alta concentração de biomassa ativa, otimizando a degradação da matéria orgânica e reduzindo a

necessidade de inoculação de novos micro-organismos (VON SPERLING, 2012).

Figura 12: Representação estrutural de um tanque de decantação



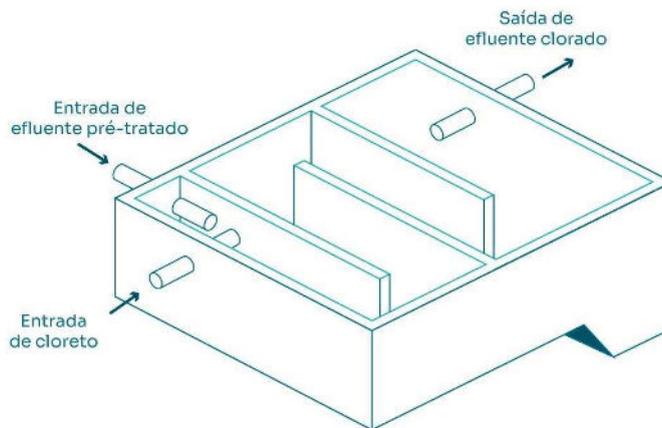
Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de ORTIZ, 2013

A recirculação da biomassa também melhora a estabilidade do sistema, tornando o tratamento mais resiliente a variações de carga orgânica e hidráulica. Além disso, a reutilização da biomassa reduz a produção de lodo residual, minimizando os custos e impactos ambientais associados ao descarte. Para que essa prática seja eficiente, é essencial um monitoramento constante da qualidade do lodo recuperado, garantindo que apenas a biomassa viável seja redirecionada ao reator aeróbio, evitando o acúmulo de material inerte e possíveis interferências no desempenho do tratamento.

3.6 Tanque de contato

O tanque de contato representa a etapa final e puramente química do tratamento de efluentes na ETE em estudo, sendo responsável pela desinfecção do efluente tratado antes do seu descarte ou reuso. Neste processo, o efluente já submetido às etapas anteriores recebe a dosagem controlada de cloro como agente desinfetante, para a eliminação de microrganismos patogênicos. A eficiência do sistema depende do tempo de contato entre o desinfetante e o efluente, garantindo que a ação biocida ocorra de maneira adequada.

Figura 13: Representação estrutural do tanque de cloração



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de ORTIZ, 2013

A geometria do tanque de contato (Figura 13), de aproximadamente $0,150\text{m}^3$ de volume, é projetada para maximizar a eficiência da desinfecção, garantindo que o efluente permaneça no sistema pelo tempo necessário para que o desinfetante atue de maneira eficaz. Esse tempo de retenção hidráulica (TRH) é essencial para assegurar a completa interação entre o desinfetante e os compostos presentes no efluente. Além disso, a configuração do tanque evita curtos-circuitos hidráulicos, promovendo uma distribuição homogênea do agente desinfetante.

O processo de cloração ocorre de maneira controlada, com a dosagem ajustada conforme as características do efluente, garantindo um tratamento eficaz. A eficiência do tanque de contato também pode ser otimizada por meio do controle operacional de parâmetros como a concentração do desinfetante e a vazão do efluente.

4 RESULTADOS E OTIMIZAÇÕES PROPOSTAS

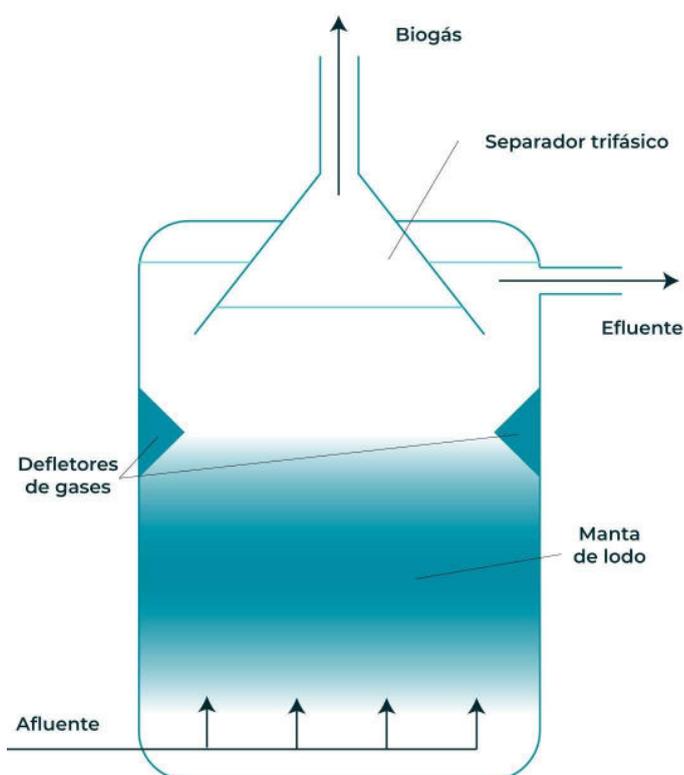
4.1 Resultados da análise de riscos e impactos

4.1.1 Reator UASB

O reator UASB transforma sistematicamente matéria orgânica em energia e tem, como subprodutos desse processo, a geração de uma gama de gases como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), alguns dos gases com conhecidas contribuições para o agravamento do efeito estufa e o aquecimento global (CAMPOS, 2005).

A Figura 14 demonstra o mecanismo de captação dessa jusante de biogás no reator UASB, parte estrutural do equipamento e necessária para a separação das fases líquida/sólida e gasosa.

Figura 14 - Mecanismo de captação de biogás em no reator UASB



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de MENDONÇA, 2021

De maneira geral, o biogás é definido como a mistura de gases gerados durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica. Sua composição típica inclui metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e vapor de água, embora esses componentes possam variar conforme o tipo de substrato utilizado, as condições de operação e o tipo de reator anaeróbio empregado. (ECKERT *et al*, 2015).

Os três principais gases responsáveis pelo efeito estufa atualmente, em ordem de relevância, são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Além desses, segundo Eckert (2015), outros gases como os clorofluorcarbonetos (CFCs), hidrofluorcarbonetos (HCFCs), hexafluoreto de enxofre (SF₆), fluoreto de sulfúrio (SO₂F₆) e trifluoreto de nitrogênio (NF₃) também contribuem para o efeito estufa, embora em menor escala.

Embora o dióxido de carbono tenha um impacto menor por unidade na intensificação do aquecimento global, sua alta concentração na atmosfera o torna o principal responsável pelo efeito estufa (SCHIMIDT & SILVA, 2023), por isso, os cientistas utilizam o CO₂ como referência para avaliar o impacto dos demais gases. Além de aumentar as temperaturas atmosféricas, o dióxido de carbono também contribui para a acidificação dos oceanos devido à sua alta solubilidade em água.

Nos reatores UASB, como o estudado na planta analisada, o biogás produzido geralmente contém entre 70% e 80% de metano (CHERNICHARO, 2007; MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017). Além disso, pode haver pequenas quantidades de nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e amônia (NH₃). A composição usual do biogás gerado por reatores UASB que tratam esgoto doméstico é detalhada na Tabela 3. Além desses gases, o biogás também é caracterizado por uma alta saturação de água, com umidade relativa variando de 80% a 90%.

Tabela 3 - Principais componentes do biogás produzido em um reator UASB de ETE

Gás componente	Unidade	Teores limites (%)	Referência
Metano (CH ₄)	% em vol	54 - 77	(CABRAL et. al., 2015; Ministério das Cidades, 2017)
Gás Carbônico (CO ₂)	% em vol	14 - 34	

Gás Sulfídrico (H ₂ S)	ppmv	0,004 - 0,9	(Ministério das Cidades, 2017)
Gás Oxigênio (O ₂)	% em vol	0 - 2	
Gás Nitrogênio (N ₂)	% em vol	0 - 9	
Gás Hidrogênio (H ₂)	% em vol	0 - 11	

Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de MENDONÇA, 2021

Como demonstra a Tabela 3, o metano constitui, geralmente, a maior parcela do biogás produzido no equipamento, o que corrobora para que a importância da integridade operacional do processo seja alta, de modo que não haja vazamentos de gases ou o descarte intencional incorreto sob o ponto de vista ecológico.

Caso não haja um sistema adequado de captura, armazenamento e aproveitamento do biogás, os gases gerados no processo anaeróbio podem ser liberados diretamente na atmosfera, contribuindo significativamente para o agravamento do efeito estufa e das mudanças climáticas. O metano (CH₄), principal componente do biogás, possui um potencial de aquecimento global cerca de 28 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO₂) em um período de 100 anos, o que torna sua emissão descontrolada uma preocupação ambiental séria (VERONEZ, 2001). Além disso, a liberação desordenada desses gases pode gerar odores desagradáveis, reduzir a qualidade do ar e representar riscos de explosão em ambientes confinados.

Na ETE em estudo, o sistema de captação de biogás foi projetado para coletar e direcionar os gases gerados no Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) de forma controlada e segura. O biogás é captado por meio de um sistema de tubulações que impede sua dispersão na atmosfera, reduzindo os impactos ambientais

Diferente de algumas unidades que utilizam o biogás para geração de energia, na ETE analisada não há aproveitamento de seu potencial calorífico. Em vez disso, o biogás captado é direcionado sistematicamente para uma empresa terceirizada, responsável pelo seu tratamento e possível reaproveitamento em processos industriais específicos. Embora essa abordagem seja segura e ambientalmente responsável, um aspecto a ser considerado é a perda do potencial energético do biogás dentro da própria ETE. O metano, componente majoritário do

biogás e de grande potencial energético, que poderia ser utilizado para a geração de energia térmica ou elétrica, não é aproveitado na unidade, o que representa uma oportunidade desperdiçada de redução de custos operacionais e maior eficiência energética.

Ademais, apesar de proporcionar uma boa eficiência para a remoção de matéria orgânica, segundo Von Sperling (2005), o reator anaeróbio não apresenta resultados satisfatórios quanto à remoção de Nitrogênio (N) e Fósforo (P). Embora esses elementos sejam essenciais para o crescimento de plantas e organismos aquáticos, sua presença em excesso no efluente tratado pode levar a sérios problemas ambientais.

Quando não adequadamente removidos, o nitrogênio e o fósforo, ao entrar em contato com o meio ambiente, pode contribuir para a eutrofização de corpos d'água receptores. Esse processo ocorre quando um corpo hídrico recebe uma carga excessiva de nutrientes, promovendo um crescimento descontrolado de algas e plantas aquáticas (Figura 15), o que pode resultar em uma série de desequilíbrios ecológicos. (BARCELLOS, 2024).

Figura 15: Exemplo de corpo d'água vítima de um processo de eutrofização



Fonte: Biologia Net, 2023

De acordo com Beusekom (2018), a eutrofização é considerada uma das maiores ameaças para os ecossistemas costeiros e, alimentada pela presença elevada de nitrogênio e fósforo, pode causar impactos graves, como a diminuição da

qualidade da água, redução da biodiversidade e criação de zonas mortas devido à depleção de oxigênio. O excesso de algas, por exemplo, pode bloquear a luz solar necessária para outras plantas aquáticas, enquanto a decomposição da biomassa vegetal pode consumir grandes quantidades de oxigênio dissolvido, levando à morte de peixes e outros organismos aquáticos.

Além disso, algumas algas podem produzir toxinas nocivas, afetando tanto a vida aquática quanto a saúde humana. Portanto, a falha na remoção eficiente desses nutrientes em uma ETE representa um risco ambiental significativo, exigindo soluções de tratamento mais avançadas para mitigar esses impactos negativos.

A hipótese de que efluentes urbanos tratados, especificamente por meio de um sistema de lodo ativado, provocam alterações na qualidade da água de ambientes aquáticos foi examinada no Arroio Vieira, localizado em Rio Grande, RS, conforme estudo de Santos et al., 2008.

De acordo com o autor, amostras de água foram coletadas tanto a montante quanto a jusante dos pontos de descarga de uma estação de tratamento de esgoto. Os resultados mostraram que os níveis de oxigênio, material em suspensão e pH não apresentaram variações significativas ao longo do trecho analisado. No entanto, observou-se que os valores de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, bem como a demanda bioquímica de oxigênio, foram substancialmente maiores a jusante dos pontos de lançamento dos efluentes. Além disso, verificou-se um aumento nas concentrações de nitrato em áreas mais distantes a jusante, o que pode ser atribuído à nitrificação do nitrogênio amoniacal, à remineralização da matéria orgânica ou à presença de outras fontes de aporte não identificadas.

4.1.2 Reator Aeróbio de Lodo Ativado

Embora seja um método eficaz para a remoção de poluentes, o Reator Aeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), fração aeróbia do processo, gera uma quantidade significativa de lodo biológico como subproduto. Esse lodo, composto principalmente por biomassa microbiana e material inerte, precisa ser periodicamente removido para manter a eficiência do sistema e evitar problemas operacionais, como o aumento da concentração de sólidos no reator e a sobrecarga do sistema de aeração. (VON SPERLING, 2005)

Segundo Von Sperling (2005), a remoção periódica do lodo é essencial para o

equilíbrio do processo de tratamento. Caso o excesso de biomassa não seja removido de maneira regular, a concentração de sólidos suspensos no reator aumenta, o que pode reduzir a eficiência da transferência de oxigênio e, conseqüentemente, diminuir a taxa de degradação da matéria orgânica.

Além disso, a acumulação excessiva de lodo pode levar à formação de lodo velho, que possui menor atividade biológica e reduzida capacidade de tratamento. O lodo velho, ao não ser eficientemente degradado, pode resultar em um efluente de qualidade inferior, comprometendo o cumprimento dos padrões ambientais estabelecidos.

O manejo do lodo biológico gerado no reator aeróbio não se limita apenas à sua remoção, mas também envolve seu tratamento e disposição final. O lodo retirado do sistema ainda contém matéria orgânica, potenciais patógenos e compostos tóxicos que podem representar riscos ambientais se não forem tratados adequadamente. De fato, o descarte do lodo biológico constitui um dos grandes desafios da operação de uma estação de tratamento, pois, como resíduo do tratamento de esgoto, o lodo representa uma aglomeração de poluentes originalmente presentes nesse efluente.

Em função de salientar os riscos à saúde pública e ao meio ambiente referentes ao descarte inadequado desse resíduo, identificam-se, na Tabela 3, os cenários de exposição e seus riscos relacionados:

Tabela 4: Principais vias de contaminação associadas ao descarte incorreto do lodo de esgoto

Água superficial	Contaminação da fauna e da flora
Águas subterrâneas	Contaminação por lixiviação de água para uso humano
Animais/humanos	Contaminação por ingestão de particulados
Animais/humanos	Contaminação por inalação de poeira
Animais/humanos	Contaminação por ingestão de plantas que tiveram contato com o lodo
Solo	Contaminação por infiltração de chorume
Solo	Lixiviação de nitrogênio

Fonte: Adaptado de EPA, 1991(a)

A formação do lodo de esgoto, crucial para a efetividade do tratamento, envolve a proliferação de uma gama de microrganismos, tais como: helmintos,

protozoários, fungos, vírus e bactérias. O manuseio e o emprego de lodo de esgoto de origem doméstica, sem prévio tratamento, podem possibilitar a infecção de homens e animais por tais agentes potencialmente patogênicos nele presentes. O contato direto com lodo e a inalação expõem a maior risco os trabalhadores da ETE, agricultores, e trabalhadores que manuseiam produtos líquidos, secos ou pastosos derivados do lodo (FEITOSA, 2009).

Quando o lodo não tratado é depositado, os microrganismos patogênicos depositam-se no solo, nos vegetais e das superfícies, e seus tempos de sobrevivência variam conforme as suas próprias resistências a incidência de luz solar, pH da superfície, temperatura ambiente, capacidade de retenção de água e fauna microbiana da superfície (SANTOS et al., 2004).

Algumas das bactérias cuja presença pode ser verificada no lodo de esgoto sanitário são listados na Tabela 5:

Tabela 5: Bactérias cuja presença pode ser verificada no lodo biológico de esgoto sanitário doméstico

Organismo	Doença	Reservatório
<i>Salmonella paratyphi A, B, C</i>	Febre paratífóide	Mamíferos, aves, tartarugas
<i>Salmonella typhi</i>	Febre tifóide	Mamíferos e aves
<i>Salmonella spp</i>	Salmonelose	Bovinos
<i>Shigella sonnei, S. flexneri</i>	Disenteria	
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenterite	Mamíferos, aves
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite	Animais domésticos
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenterite	Animais domésticos
<i>Leptospira spp</i>	Leptospirose	Mamíferos, ratos

Fonte: EPA (b), 1992; FEITOSA, 2009

Além de patógenos de caráter biológico, o lodo produzido carrega também metais pesados que, uma vez que contaminam os organismos de forma cumulativa e não biodegradável, representam um perigo também cumulativo.

Na ETE do estudo, convencionou-se realizar a extração do excesso de lodo com uma periodicidade de 6 a 9 meses, período estimado para que a concentração

de lodo sedimentado passe a interferir negativamente no processo de transferência de gás oxigênio, o que pode promover mortandade dos microrganismos e desarranjo da biota presente no reator, ou para que a camada de lodo biológico ascenda até o topo do reator e permeie etapas seguintes do processo.

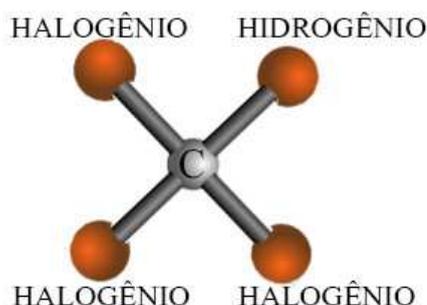
Para tal descarte, a empresa direciona o excesso de lodo descartado para deposição em aterros sanitários, em obediência ao Art. 47 da Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, conforme determina o que define destinos adequados para esse resíduo.

4.1.3 Tanque de Contato

Um dos principais desafios referentes ao tanque de contato, onde ocorre a desinfecção do efluente previamente tratado por cloração, está na formação de trihalometanos (THMs) (Figura 16), subprodutos resultantes da reação entre o cloro utilizado na desinfecção e a matéria orgânica residual presente no efluente. Os THMs são compostos orgânicos voláteis amplamente estudados devido ao seu potencial carcinogênico e aos riscos associados à exposição prolongada, seja por ingestão, inalação ou contato dérmico (MEYER, 1994).

Além das questões de saúde pública, o acúmulo desses compostos pode gerar impactos ambientais significativos, uma vez que sua liberação em corpos d'água pode comprometer a qualidade da água e afetar a biota aquática e vicinal a esses corpos hídricos.

Figura 16: Representação de um molécula de trihalometano (THM)



Fonte: Pure Aqua, 2018

Além da formação de trihalometanos, a volatilização do cloro no tanque de contato representa outro desafio, uma vez que pode reduzir a eficiência do processo de desinfecção. Fatores como tempo de retenção insuficiente, temperatura elevada e turbulência excessiva favorecem a perda do desinfetante para a atmosfera, exigindo dosagens mais elevadas para garantir a eliminação de patógenos. Esse aumento no consumo de cloro não apenas eleva os custos operacionais, mas também pode potencializar a formação desses subprodutos indesejáveis.

4.2 Otimizações propostas

4.2.1 Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA ou UASB)

Uma das principais oportunidades de otimização do Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB) está no aproveitamento energético do biogás produzido durante o processo de digestão anaeróbia. O biogás, composto majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), possui um alto poder calorífico e pode ser utilizado para geração de energia térmica ou elétrica, reduzindo os custos operacionais da ETE e diminuindo sua pegada de carbono.

No Brasil, o biogás já é especialmente relevante em termos de geração potencial em aterros sanitários, no tratamento de efluentes domésticos e industriais, e no processamento de resíduos agropecuários (SANTOS et al., 2019).

A implementação de um sistema de aproveitamento do biogás pode ser feita por meio da instalação de um biodigestor pressurizado, direcionando o gás gerado para caldeiras industriais, microturbinas ou sistemas de cogeração de energia elétrica. Essa abordagem não só mitiga a liberação de gases de efeito estufa na atmosfera, mas também transforma um subproduto do tratamento em uma fonte renovável de energia, aumentando a sustentabilidade da planta (CHERNICHARO, 2007).

Além disso, no tocante ao potencial de remoção de matéria orgânica do reator, cujo desempenho não atende parâmetros regulatórios ao operar em grandes vazões de efluente, desenvolveram-se, por meio de estudos dedicados, diferentes configurações de reatores, visando melhorias nos processos de tratamento. Um

exemplo é o reator anaeróbio híbrido, em inglês *Upflow Anaerobic Hybrid Reactor* (UAHB), que apresenta uma manta de lodo (leito móvel) em sua porção inferior e um meio filtrante (leito fixo) em sua porção superior. Desta forma, há promoção da retenção de sólidos, maior da taxa de remoção de matéria orgânica e consequente polimento do efluente se comparado a um UASB tradicional (MOREIRA, 2022).

Além do aproveitamento energético, outras otimizações podem ser implementadas no reator UASB para aumentar sua eficiência no tratamento de efluentes. Entre elas, destaca-se a melhoria no sistema de retenção do lodo biológico, que pode ser feita pela instalação de defletores internos ou separadores trifásicos mais eficientes, permitindo maior tempo de contato entre o efluente e os microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica, assim como a manutenção do material biológico anaeróbio dentro dos limites do equipamento (ZEEMAN; LETTINGA, 1999).

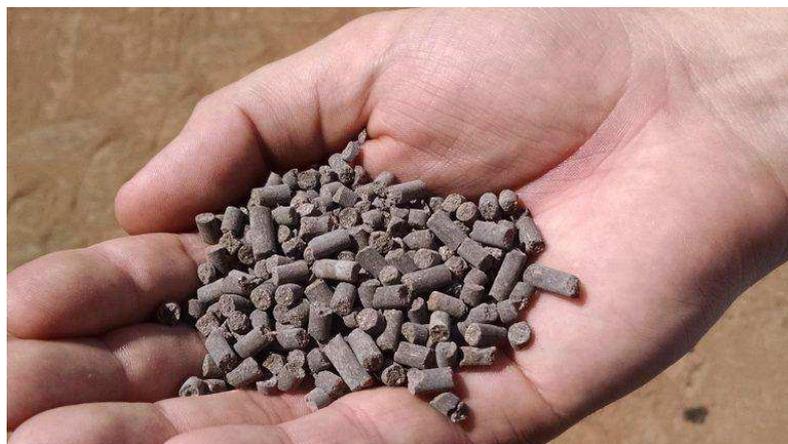
Outra estratégia é a recirculação parcial do efluente tratado, aumentando a concentração de biomassa ativa e potencializando a remoção de carga orgânica e sólidos suspensos. Além disso, o reator pode ser otimizado para melhorar a remoção de nitrogênio e fósforo, utilizando processos combinados, como a anammox (oxidação anaeróbia do amônio), reduzindo os impactos ambientais do efluente final sobre corpos hídricos receptores (VON SPERLING, 2005).

4.2.2 Reator Aeróbio de Lodo Ativado

Técnicas como a digestão anaeróbia, desidratação e estabilização são frequentemente utilizadas para reduzir o volume e a carga poluente do lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes antes de sua disposição final, que pode incluir a aplicação em solos agrícolas (cujos critérios e procedimentos são definidos pela resolução nº 375 do CONAMA, de agosto de 2006), a disposição em aterros sanitários ou a incineração. A escolha do método de disposição deve considerar os impactos ambientais, a viabilidade econômica e as regulamentações locais. (GOMES, 2019)

Além da alternativa supracitada na Figura 17, Gomes (2019) aponta o uso de lodo de depuração orgânica como uma possível matéria prima para a produção de tijolos cerâmicos e para a produção de cimento (Figura 18).

Figura 17: Fertilizante organomineral peletizado com base orgânica em lodo de esgoto higienizado



Fonte: GONÇALVES, 2013

A Estação de Tratamento de Esgoto de Fishwater Flats, Port Elizabeth, na África do Sul, é a mais antiga que se tem conhecimento sobre a fabricação de tijolos utilizando lodo proveniente do tratamento de esgoto. Desde 1979, uma olaria distante 15 km da ETE, produziu mais de 120 milhões de tijolos a partir de uma mistura de 30% de lodo com argila, em volume, para tijolos comuns, e 5 a 8% para tijolos de acabamento (SLIM; WAKEFIELD, 1991 apud WERTHER; OGADA, 1999).

Figura 18 - Torta de lodo proveniente do processo de tratamento de água



Fonte: Comunica UFU, 2023

As tortas de lodo misturadas à argila são moídas formando uma massa

homogênea, que recebe água tendo sua umidade ajustada em 20%. A massa é extrudada e os tijolos cortados. A etapa seguinte é a secagem em ambiente coberto a temperatura ambiente por duas semanas, ou em estufas por dois dias, numa temperatura entre 60 e 65°C. Após a secagem, os tijolos seguem para a queima, resfriamento e estocagem.

Para inserir lodo como componente na fabricação da indústria de cerâmica, alguns fatores como resistência do produto final e isolamento térmico devem ser considerados. Nesse aspecto, os tijolos produzidos com a adição de lodo possuem porosidade que contribui na ligação da argamassa e valores de resistência a compressão satisfatórios, comparados a tijolos produzidos de forma tradicional na região. (SLIM & WAKEFIELD, 1991).

4.2.3 Tanque de contato

Para minimizar os impactos da cloração, tais como a formação de organoclorados como os trihalometanos, podem ser adotadas tecnologias complementares ou substitutas, tais como: desinfecção por ozônio e o uso de biossurfactantes.

O ozônio (O_3), como apontado por Ribeiro (2015), é um gás com um alto potencial de oxidação, que degrada compostos orgânicos e elimina microrganismos patogênicos (como bactérias e vírus) sem formar subprodutos nocivos. Com seu uso, é possível ter água sem gosto ou cheiro químico. Além disso, de acordo com o Messer Group GmbH, gigante da comercialização internacional do agente, o ozônio é 1,5 vezes mais eficiente que o cloro na desativação de material orgânico e eficaz também contra outros contaminantes, como ferro, cobre e manganês, ao oxidar esses elementos e formar partículas sólidas que podem ser facilmente filtradas.

Um dos parâmetros importantes para o bom funcionamento de um sistema de desinfecção por ozonólise é o coeficiente CxL , definido pela Portaria nº 888/2021, do Ministério da Saúde, que define padrões de potabilidade de água. O parâmetro CL calcula a concentração de ozônio aplicada (C) pelo tempo de contato (T) na câmara de ozonização, como demonstrado na Figura 19:

Figura 19 : Definição do parâmetro de concentração de ozônio no processo de ozonólise

$$\mathbf{Fator}_{CT} = C \times T$$

Onde,

CT é o fator, em mg/L.min;

C é a concentração de ozônio aplicada, em mg/L; e

T é o tempo de contato no tanque, em minutos.

Fonte: Piscinas Litro a Litro, 2017

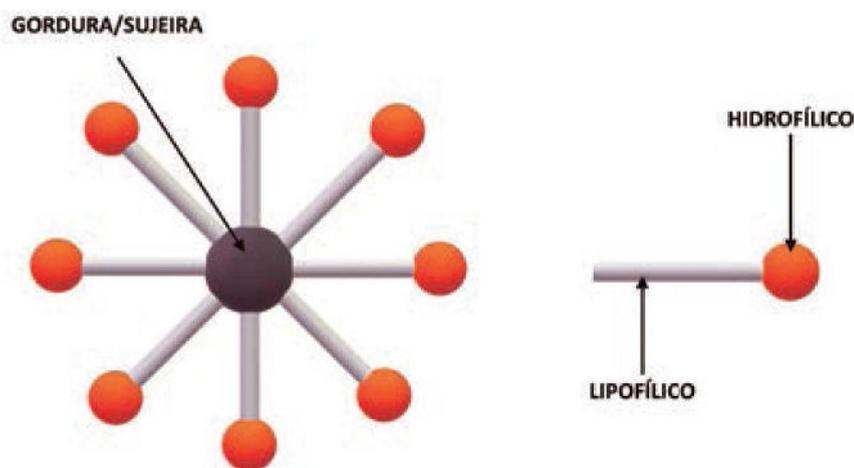
O valor ideal para esse parâmetro é de 0,34mg/L.min para temperatura média da água igual a 15,0 °C, mas esse valor pode ser adequado para diferentes temperaturas de efluente dividindo por 2 o valor de CT a cada acréscimo de 10°C.

O uso de biossurfactantes também se apresenta como uma alternativa para tornar o processo de desinfecção mais sustentável. Biossurfactantes de origem microbiana podem atuar na desestabilização da membrana celular de microrganismos, aumentando a eficiência do processo de desinfecção e reduzindo a dependência de produtos químicos, como aponta Mulligan (2005).

Os surfactantes constituem uma classe importante de compostos químicos amplamente utilizados em diversos setores industriais. Devido à presença simultânea de grupos hidrofílicos e hidrofóbicos em sua estrutura molecular (Figura 20), os surfactantes tendem a se posicionar nas interfaces entre fases fluidas de polaridade distinta, como óleo/água ou água/óleo.

Quando esses compostos possuem origem microbiana e apresentam a capacidade de reduzir a tensão superficial e formar emulsões estáveis, são chamados de biossurfactantes. Esses agentes tensoativos são produzidos como subprodutos metabólicos por diversos microrganismos, incluindo bactérias, fungos e leveduras (NITSCHKE, 2002).

Figura 20: Representação morfológica de um composto surfactante



Fonte: Química.com.br

Sua capacidade antimicrobiana se deve à interação com membranas celulares de microrganismos patogênicos, resultando na desestabilização estrutural e consequente lise celular. Além disso, ao contrário dos compostos clorados, que podem formar subprodutos tóxicos como os trihalometanos, os biossurfactantes são biodegradáveis e apresentam baixa toxicidade, reduzindo os impactos ambientais associados ao tratamento de efluentes.

A aplicação de biossurfactantes na desinfecção de efluentes pode ser vantajosa não apenas pela sua eficiência antimicrobiana, mas também por sua compatibilidade com sistemas de tratamento biológico. Alguns desses compostos possuem atividade sinérgica com microrganismos benéficos, favorecendo a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, como aponta Mulligan (2005).

Dessa forma, a adoção de biossurfactantes no tratamento de águas residuais representa um avanço na busca por alternativas sustentáveis, eliminando a necessidade de compostos químicos agressivos e mitigando os riscos de contaminação ambiental.

5 CONCLUSÃO

A análise dos impactos ambientais da ETE estudada evidenciou a importância de uma gestão eficiente em todas as etapas do processo, desde o tratamento anaeróbio até o descarte final do efluente. Os resultados demonstraram que, embora o sistema remova até 95% da carga orgânica, desafios como a remoção insuficiente de nutrientes e a subutilização do biogás gerado comprometem sua eficiência e sustentabilidade. A eutrofização e a emissão de gases de efeito estufa foram identificadas como os principais impactos socioambientais, reforçando a necessidade de otimizações contínuas.

Para superar esses desafios, sugere-se a adoção de tecnologias como o aproveitamento do biogás para geração de energia, a valorização do lodo por meio de reaproveitamento agrícola ou energético, e a implementação de sistemas de reuso de água. Essas medidas não apenas reduziram custos operacionais, mas também alinhariam a ETE aos princípios da economia circular, servindo como modelo para outras indústrias siderúrgicas. Além disso, a gestão do lodo, atualmente destinado a aterros sanitários, poderia ser otimizada com práticas que agreguem valor ao resíduo e minimizem impactos ambientais.

Este estudo contribui para o campo da gestão de efluentes industriais ao destacar a importância de investimentos em tecnologias sustentáveis e na integração de práticas de economia circular. Os resultados obtidos podem orientar políticas públicas e práticas industriais, especialmente em regiões com desafios similares de gestão hídrica e ambiental.

Futuras pesquisas podem focar na avaliação de tecnologias avançadas de remoção de nutrientes, como *wetlands* construídos e biofiltros, e na otimização energética das ETEs, com ênfase no aproveitamento do biogás para geração de energia. Além disso, investigações sobre o impacto do efluente tratado na biodiversidade aquática podem fornecer subsídios para políticas ambientais mais eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇO BRASIL. **Anuário do Aço Brasil 2019**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/AcoBrasil_Mini_anuario_2019.pdf. Acesso em: 1 mai. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/atlas-esgotos>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ÁGUAS CLARAS ENGENHARIA. **Estação elevatória de esgoto (EEE)**. 2023 Disponível em: <https://www.aguasclarasengenharia.com.br/estacao-elevatoria-de-esgoto/>. Acesso em 10 jun. 2024.

ASSIS GOMES, L. et al. **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto e a relação com o meio ambiente**. 2019.

BARCELLOS, B. S. de C. **Imobilização de microalgas em polímeros orgânicos e inorgânicos para remoção de nutrientes**. 2024.

BEUSEKOM, J. EE. V. **Eutrophication. Handbook on marine environment protection: science, impacts and sustainable management**, p. 429-445, 2018.

BRASIL. **Alvará de 10 de maio de 1808. Cria a Intendência Geral de Polícia da Corte e do Estado do Brasil**. Rio de Janeiro, 1808. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lim/LIM1808-05-10.htm. Acesso em: 14 jan. 2025.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação**. Brasília, DF, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 14 jan. 2025.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**. Ministério do

Desenvolvimento Regional. Brasília: MDR, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>. Acesso em: 18 jan. 2025.

CAMPOS, C. M. M. et al. **Avaliação do potencial de produção de biogás e da eficiência de tratamento do reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) alimentado com dejetos de suínos**. Ciência e Agrotecnologia, v. 29, p. 848-856, 2005.

CISTERNA, C. **Estação Elevatória Compacta de Esgoto**, 2024. Disponível em: <https://www.casadacisterna.com.br/ajms-motobomba-autoaspirante-em-inox-p88>. Acesso em 02 mar de 2025.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic reactors**. IWA publishing, 2007.

CHERNICHARO, Carlos A. GONÇALVES, Ricardo Franci; ARAÚJO, Vera L.; **Tratamento secundário de esgoto sanitário através da associação em série de reatores UASB e biofiltros aerados submersos**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 1997. p. 450-61.

COMUNICA UFU, Portal de Notícias da UFU, 2023. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2018/09/cientistas-da-ufu-produzem-fertilizante-com-lodo-de-esgoto>

ECKERT, Caroline Thaís et al. **Construção De Biodigestores De Batelada Para Escala Laboratorial**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, p. 65-82, 2015.

EIB PROJECTS DIRECTORATE. **Wastewater as a resource - May 2022**. Disponível em: <https://reliefweb.int/report/world/wastewater-resource-may-2022>. Acesso em 10 jun. 2024.

EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **Standards for the Usage or Disposal of Sewage Sludge**, part 2. 40 CFR Part 257 et al. 1991.

a

EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **Environmental regulations and technology: use and disposal of municipal wastewater sludge**. Washington, D.C.: Office of Research and Development, 1991.
b

FEITOSA, M. C. A. et al. **Lodo de esgoto: Algumas aplicações em Engenharia**. 2009.

GOMES, Daniele Rodrigues et al. **Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L.** Cerne, v. 19, p. 123-131, 2013.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Disseminação de doenças relacionadas ao saneamento inadequado**. Revista de Saúde Pública, v. 39, n. 3, p. 123-130, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística **Contas econômicas e ambientais da água: Brasil 2013 - 2017** Coordenação de contas nacionais, Agência Nacional de Águas, 2017

LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. **Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment**. Water Science and Technology, v. 27, n. 2, p. 1-8, 1993.

LIMA, M. V. **Avaliação técnica e ambiental da eficiência de ETE em condomínio no Porto das Dunas - Fortaleza**. 2017. Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2001. p.399-423. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

MAPA DE CONFLITOS DA JUSTIÇA AMBIENTAL. **Conflito: MA - Indústria Guseira: Contaminação da água, falta de segurança e condições impróprias à vida e à saúde dos moradores do Distrito Industrial de Pequiá, Açailândia**. Disponível em: <https://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/conflito/ma-industria-guseira-contaminacao-da-agua-falta-de-seguranca-e-condicoes-improprias-a-vida-e-a-saude-dos-moradores-do-distrito-industrial-de-pequia-acailandia/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

MENDONÇA, H. V. et al. **Tratamento de água residuária da bovinocultura com reator UASB operado à temperatura mesófila: novas abordagens para o setor de bioenergia**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 17, n. 2, p. e11994-e11994,

2024.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MESSER Gases for Life - **Processo de tratamento de água com ozônio: como funciona essa prática**, 2022. Disponível em <https://www.messer-br.com/blog/processo-de-tratamento-de-agua-com-ozonio/>. Acesso em 03 fev. 2025.

MEYER, J. A. **Trihalometanos na água potável e seus efeitos na saúde humana**. Revista Brasileira de Saúde Pública, v. 28, n. 2, p. 151-158, 1994.

MOREIRA, Y. C. et al. **Ciliate communities respond via their traits to a wastewater treatment plant with a combined UASB–activated sludge system**. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, p. 903984, 2022.

MULLIGAN, C. N. **Environmental applications for biosurfactants**. *Environmental pollution*, v. 133, n. 2, p. 183-198, 2005.

MULTIRIO. História do Brasil. **A vida na corte e as transformações na cidade do Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://multirio.rio.rj.gov.br/index.php/historia-do-brasil/brasil-monarquico/88-a-corte-no-rio-de-janeiro/8854-a-vida-na-corte-e-as-transforma%C3%A7%C3%B5es-na-cidade-do-rio-de-janeiro> Acesso em: 14 jan. 2025.

MULLIGAN, C. N. **Environmental applications for biosurfactants**. *Environmental Pollution*, v. 133, n. 2, p. 183-198, 2005.

NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. **Biossurfactantes: propriedades e aplicações**. *Química Nova*, v. 25, n. 5, p. 772-776, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000500013>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ORTIZ, C. C. A. et al. **Clorador de passagem artesanal: Caracterização, eficiência e custos**. *Ciência e Tecnologia dos Alimentos* Volume 8, p. 74, 2013

PEREIRA, P. S. **Avaliação da influência do fósforo e do nitrogênio no processo de**

eutrofização de grandes reservatórios: estudo de caso: Usina Hidrelétrica Foz do Areia. 2010. Disponível em: <http://dev.siteworks.com.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2387/1/Paulo%20Sergio%20Pereira.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2024.

PISCINAS, L. L. **Qual a importância do fator CT?**, 2017

PURE AQUA, **Como Remover Trihalometanos da Água Potável**, 2018. Disponível em: <https://pt.pureaqua.com/como-remover-trihalometanos-da-agua-potavel/> Acesso em 04 mar 2025

QUÍMICA.COM.BR. **Biossurfactantes são a primeira classe ecologicamente correta** , 202. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/biossurfactantes-sao-a-primeira-classe-ecologicamente-correta/> Acesso em 04 mar 2025

RIBEIRO, G. H. **Desinfecção de efluente anaeróbio com o uso de ozônio/cloro.** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia de Bauru, 2015

RODOINSIDE. **História do saneamento básico na Idade Antiga.** Disponível em: <https://www.rodoinside.com.br/historia-saneamento-basico-na-idade-antiga/>. Acesso em: 10 jun. 2024.

SANTOS, I. F. S.; SOARES, M. P.; AMORIM, S. R. **Sobrevivência de microrganismos no lodo de esgoto tratado.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 9, n. 4, p. 317-324, 2004.

SANTOS, P. H. V. et al. **Dimensionamento hidráulico de uma estação de tratamento de água de Ciclo Completo com sistemas de mistura rápida e floculação constituídos de trechos de canalizações em conduto forçado.** 2019.

SCHMIDT, N. S.; SILVA, C L; **Análise do plano de agricultura de baixo carbono (ABC) no Brasil: resultados e perspectivas.** Revista Universidad y Sociedad, v. 15, n. 6, p. 279-291, 2023.

SÉCULO DIÁRIO. **Documentário alerta sobre o impacto da siderurgia no Brasil e na Itália.** Disponível em: <https://www.seculodiario.com.br/meio-ambiente/documentario-alerta-sobre-impacto-da-siderurgia-no-brasil-e-na-italia>. Acesso em 15/04/2024

SILVEIRA, M. A et al. **Energia renovável: biogás e biodiesel.** 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2023.** Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2024. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SLIM, JA* & WAKEFIELD, R. W. **The utilisation of sewage sludge in the manufacture of clay bricks.** Water Sa, v. 17, n. 3, p. 197-202, 1991.

TILCHE, A.; VIEIRA, S. M. M. **Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors: a review of their development and performance.** Water Science and Technology, v. 24, n. 8, p. 1-29, 1991.

VAN HAANDEL, A. et al. **Excess sludge discharge frequency for UASB reactors.** Water Science and Technology, v. 40, n. 8, p. 211-219, 1999.

VERONEZ, F A. **Desempenho de um reator UASB tratando esgoto sanitário e realizando concomitantemente o adensamento e a digestão do lodo de descarte de biofiltros aerados submersos.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, DESA-UFMG, UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Editora UFMG, 1996.

WERTHER, J.; OGADA, Ti. **Sewage sludge combustion.** Progress in energy and combustion science, v. 25, n. 1, p. 55-116, 1999.

ZANITH, Caroline Christine. **Análise Química de Efluentes Líquidos Industriais**.
Graduação em Química. São João del-Rei-MG. UFSJ, 2016.

ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. **The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level**, Water Science and Technology, Volume 39, Issue 5, 1999