



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANA KATARINA VITÓRIA SAMPAIO DO NASCIMENTO

**INFLUÊNCIA DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO NA FORMAÇÃO
DE SUBPRODUTOS DA DESINFECÇÃO DURANTE O PROCESSO DE
CLORAÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO**

Recife
2025

ANA KATARINA VITÓRIA SAMPAIO DO NASCIMENTO

**INFLUÊNCIA DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO NA FORMAÇÃO
DE SUBPRODUTOS DA DESINFECÇÃO DURANTE O PROCESSO DE
CLORAÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.

Orientador (a): Prof. Dra. Daniella Carla Napoleão

Coorientador (a): Msc. Jéssica Camila do Nascimento Rocha

Recife

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Nascimento, Ana Katarina Vitória Sampaio do .

Influência do alquilbenzeno linear sulfonato na formação de subprodutos da desinfecção durante o processo de cloração de efluente doméstico / Ana Katarina Vitória Sampaio do Nascimento. - Recife, 2025.

61p. : il., tab.

Orientador(a): Daniella Carla Napoleão

Coorientador(a): Jéssica Camila do Nascimento Rocha

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Análises. 2. Cloro. 3. Oxidantes. 4. Tensoativos. 5. Trihalometanos . I. Napoleão, Daniella Carla. (Orientação). II. Rocha, Jéssica Camila do Nascimento. (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

ANA KATARINA VITÓRIA SAMPAIO DO NASCIMENTO

**INFLUÊNCIA DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO NA FORMAÇÃO DE
SUBPRODUTOS DA DESINFECÇÃO DURANTE O PROCESSO DE CLORAÇÃO
DE EFLUENTE DOMÉSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 12/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

 DANIELLA CARLA NAPOLEAO
Data: 18/08/2025 09:23:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Daniella Carla Napoleão (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente

 MARTA MARIA MENEZES BEZERRA DUARTE
Data: 18/08/2025 14:01:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Marta Maria Menezes Bezerra Duarte (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente

 ROSANA CASOTI
Data: 18/08/2025 13:29:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Rosana Casoti (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À Deus, soberano e misericordioso, dedico minha mais profunda gratidão. Foi Ele quem me sustentou nos momentos de dúvida, acalmou meu coração diante dos desafios e iluminou meu caminho quando tudo parecia incerto. Sua presença foi constante, mesmo quando não percebia, guiando cada passo dessa jornada acadêmica com amor, força e sabedoria.

Aos meus pais, Sônia e Manoel, que são minha base e inspiração constante. Pela educação, apoio incondicional, incentivo diário e amor sem medidas, minha eterna gratidão. Tudo que conquistei é reflexo da dedicação e dos valores que recebi de vocês.

À minha irmã, Fernanda Yasmin, minha confidente e companheira de vida, deixo um agradecimento cheio de carinho. Sua presença constante, palavras de incentivo e gestos de afeto foram um alívio nos dias difíceis e uma alegria nos momentos de conquista. Você esteve ao meu lado nos bastidores, compartilhando preocupações, comemorando vitórias e me lembrando de que eu era capaz, mesmo quando duvidava.

Ao Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), expresso minha sincera gratidão pela acolhida calorosa, pela infraestrutura disponibilizada e pelas valiosas oportunidades de aprendizado e desenvolvimento profissional. Agradeço também aos colegas e supervisores, cuja parceria e apoio contribuíram para um ambiente de pesquisa colaborativo e intelectualmente enriquecedor.

Aos meus professores, sou imensamente grata pelos ensinamentos transmitidos com dedicação, pela paciência ao longo dos semestres e pelo exemplo de profissionalismo e comprometimento. À minha orientadora, Daniella, agradeço pela orientação criteriosa, pelo incentivo constante e pela confiança depositada ao longo desta jornada. Sua expertise e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, Anna Beatriz, Marine, Gleybson, Josias, que me acompanharam nos dias bons e nos desafiadores, oferecendo companhia, escuta, leveza e risadas quando mais precisei. Vocês fizeram dessa jornada algo muito mais especial.

"Digo isto, não por causa da pobreza, porque aprendi a viver contente em toda e qualquer situação. Tanto sei estar humilhado como também ser honrado; de tudo e em todas as circunstâncias, já tenho experiência, tanto de fartura como de fome; assim de abundância como de escassez. Tudo posso naquele que me fortalece." (Filipenses 4:11-13, ARA)

RESUMO

O tratamento de esgoto doméstico é essencial para a proteção ambiental e a manutenção da saúde pública, especialmente em regiões com infraestrutura sanitária deficiente. Dentre as etapas desse processo, a desinfecção com cloro destaca-se por sua eficácia e viabilidade econômica. No entanto, sua aplicação pode resultar na formação de subprodutos de desinfecção (DBP), decorrentes da reação com compostos presentes na matéria orgânica, como o alquilbenzeno linear sulfonato (LAS), um tensoativo amplamente detectado em águas residuárias. A persistência do LAS em contextos exclusivamente anaeróbios e a geração de subprodutos de desinfecção (DBP) potencialmente tóxicos suscitam preocupações ambientais relevantes, impulsionando o aprimoramento de estratégias voltadas ao tratamento de efluentes. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a geração de DBP derivados do LAS, compreendendo os mecanismos que levam à sua formação e os fatores que influenciam nesse processo. A pesquisa foi conduzida na ETE Mangueira-PE com efluente tratado em Reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), com a realização de análises de parâmetros físico-químicos, como pH, demanda química de oxigênio (DQO) e série de nitrogênio, além de ensaios de desinfecção por cloração empregando distintos agentes oxidantes, a saber: hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio comercial e hipoclorito de sódio sintetizado *in loco*. Durante os experimentos, procedeu-se o monitoramento de parâmetros para a avaliação da eficiência do processo, como cloro residual (livre, total e combinado), concentração residual do LAS e a formação de DPB, como os trihalometanos (THM). Os resultados obtidos evidenciaram a predominância de cloro residual na forma combinada para todos os agentes desinfetantes avaliados, com concentrações de cloro residual livre inferiores a $0,05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Tal comportamento foi atribuído à presença de nitrogênio no efluente, a qual favorece a formação de cloraminas e, consequentemente, promete a eficácia imediata do processo de desinfecção. Embora o hipoclorito de cálcio tenha apresentado o maior teor de cloro total no efluente ($2,80 \pm 0,05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), o hipoclorito de sódio *in loco* demonstrou maior eficiência oxidativa, atribuída à geração eletrolítica do agente, uma vez que promoveu redução dos níveis de LAS e controle na formação de trihalometanos (THM).

Palavras-chave: Análises; Cloro; Oxidantes; Tensoativos; Trihalometanos.

ABSTRACT

Domestic wastewater treatment is essential for environmental protection and public health, particularly in regions with inadequate sanitation infrastructure. Among the stages of this process, chlorination stands out due to its effectiveness and economic feasibility. However, its application may lead to the formation of disinfection by-products (DBPs), resulting from reactions with compounds present in organic matter, such as linear alkylbenzene sulfonate (LAS), a surfactant widely detected in wastewater. The persistence of LAS under strictly anaerobic conditions and the generation of potentially toxic DBPs raise significant environmental concerns, driving the improvement of effluent treatment strategies. In this context, the present study aims to analyze the formation of LAS-derived DBPs, investigating the mechanisms behind their generation and the influencing factors. The research was conducted at the Mangueira Wastewater Treatment Plant (ETE Mangueira-PE), using effluent treated in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors. Physicochemical parameters such as pH, chemical oxygen demand (COD), and nitrogen series were analyzed, along with chlorination assays employing different oxidizing agents: calcium hypochlorite, commercial sodium hypochlorite, and sodium hypochlorite generated in situ. Throughout the experiments, parameters were monitored to assess process efficiency, including residual chlorine (free, total, and combined), residual LAS concentration, and DBP formation, particularly trihalomethanes (THMs). The results showed a predominance of combined residual chlorine for all disinfectants tested, with free chlorine concentrations below $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. This behavior was attributed to the presence of nitrogen in the effluent, which favors chloramine formation and consequently reduces immediate disinfection efficacy. Although calcium hypochlorite yielded the highest total chlorine concentration in the effluent ($2.80 \pm 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), in situ sodium hypochlorite demonstrated greater oxidative efficiency, attributed to its electrolytic generation, as it promoted LAS reduction and controlled THM formation.

Keywords: Analysis; Chlorine; Oxidants; Surfactants; Trihalomethanes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	A eficácia relativa do cloro contra diferentes tipos de microrganismos	17
Figura 2 –	Esquema básico do processo de cloração	18
Figura 3 –	Representação das partes hidrofóbica e hidrofílica de um surfactante	23
Figura 4 –	Tipos de surfactantes	25
Figura 5 –	Estrutura molecular do alquilbenzeno linear sulfonato (LAS)	26
Figura 6 –	Estrutura dos homólogos do alquilbenzeno linear sulfonato	27
Figura 7 –	Unidades de tratamento da ETE Mangueira	33
Figura 8 –	Esquema do filtro	34

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 –	Tipos de surfactantes, suas principais características e exemplos de aplicações	24
Quadro 2 –	Trihalometanos e os potenciais efeitos na saúde humana	31
Quadro 3 –	Ácidos haloacéticos e os potenciais efeitos na saúde humana.	33
Quadro 4 –	Parâmetros físico-químicos e microbiológicos e suas respectivas metodologias	35
Tabela 1 –	Fórmulas aplicadas para o cálculo do volume de cada agente clorante	37
Tabela 2 –	Parâmetros metodológicos para a identificação e quantificação dos homólogos do LAS por CLAE-UV-Vis	38
Tabela 3 –	Parâmetros analíticos para curva analítica dos trihalometanos	40
Tabela 4 –	Parâmetros físico-químicos analisados	42
Tabela 5 –	Cloro livre e total conforme os diferentes agentes clorados utilizados no processo	45
Tabela 6 –	Cloro ativo dos diferentes agentes de desinfecção utilizados no processo	46
Tabela 7 –	Concentração do homólogo da LAS presente no efluente UASB e após uso dos agentes clorantes	48
Tabela 8 –	Concentrações de THMs em efluente doméstico tratado por UASB sob diferentes estratégias de cloração	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSA	Ácido alquilbenzeno sulfônico linear
AHA	Ácido haloacéticos
BDCM	Bromodiclorometano
CLAE	Cromatografia líquida de alta eficiência
CG/EM	Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Halocloropicrinas
DBAA	Ácido dibromoacético
DBCM	Dibromoclorometano
DBP	Subprodutos de desinfecção halogenados
DCAA	Ácido dicloroacético
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DQO	Demanda química de oxigênio
EFOM	Matéria orgânica dos efluentes
EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
ETE	Estação de tratamento de efluente
HA	Haloacetonas
HAN	Halocetonitrilas
LAB	Alquilbenzeno linear
LAS	Alquilbenzeno linear sulfonato
LESS	Ácido lauril éter sulfato de sódio
LQ	Limite de Quantificação
MCAA	Monocloroacético
MTBE	Éter metil-terc-butílico
NTK	Nitrogênio total <i>Kjeldahl</i>
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
OECD	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PVC	Policloreto de vinila
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SDT	Sólidos dissolvidos totais
ST	Sólidos totais

TBM	Bromofórmio
TC	Tempo de contato
TCM	Clorofórmio
TDH	Tempo de detenção hidráulica
THM	Trihalometanos
UASB	Reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{Titulante}$	Volume do titulante tiosulfato de sódio
N	Normalidade
$V_{Clorante}$	Volume do agente clorante
$C_{Demandacl_2}$	Concentração da demanda de cloro empregada
$V_{Amostra}$	Volume da amostra
V_{Esgoto}	Volume do esgoto
V_{TeorCl_2}	Volume do teor de cloro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	DEINFECÇÃO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS	16
2.1.1	Tipos de desinfectantes	18
2.1.1.1	Cloro	19
2.1.1.2	Hipoclorito de cálcio	20
2.1.1.3	Hipoclorito de sódio	21
2.2	SURFACTANTES	23
2.2.1	Tipos de surfactantes	24
2.3	ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO	26
2.4	TRATAMENTOS PARA REMOÇÃO DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO	28
2.5	SUBPRODUTOS ORIGINADOS DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	COLETA NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	33
3.2	FILTRAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
3.3	MONITORAMENTO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	35
3.4	SANITIZANTES EMPREGADOS	36
3.5	PREPARAÇÃO DOS FRASCOS DE COLETA PÓS- CLORAÇÃO	36
3.6	ENSAIOS DE CLORAÇÃO	37
3.7	QUANTIFICAÇÃO DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO	38
3.8	QUANTIFICAÇÃO DOS TRIHALOMETANOS	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	MONITORAMENTO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	41
4.2	ENSAIOS DE CLORAÇÃO	45
4.3	QUANTIFICAÇÃO DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO	47

4.4	QUANTIFICAÇÃO DOS TRIHALOMETANOS	49
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto doméstico tem um papel fundamental para a saúde pública e a proteção ambiental, especialmente em locais com infraestrutura sanitária deficiente. Os impactos ambientais causados pelos lançamentos de efluentes domésticos não tratados em locais inapropriados, tornou-se um grande embate no século XXI. Para garantir a segurança dos corpos hídricos, é importante adotar métodos eficazes de tratamento, tendo destaque para a etapa de desinfecção, importante na eliminação de microrganismos patogênicos. Sendo assim, o uso do cloro como agente de desinfecção destaca-se nesse processo por sua eficácia, baixo custo e capacidade de manter ação residual, sendo amplamente adotado por sua viabilidade sanitária e econômica (Aljaberi *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2020).

Os efluentes domésticos apresentam uma diversidade de poluentes emergentes, definidos como substâncias químicas naturais ou sintéticas com potencial de causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. Entre esses contaminantes, destacam-se os tensoativos, compostos orgânicos caracterizados por sua estrutura anfifílica, composta por uma fração hidrofóbica (apolar) e uma fração hidrofílica (polar), o que lhes confere elevada capacidade de interação com fases aquosas e lipídicas. Essa dualidade permite que se adsorvam em interfaces e formem estruturas como micelas e vesículas. Tais propriedades conferem aos tensoativos ampla aplicabilidade em formulações industriais e comerciais, incluindo produtos de higiene pessoal, fármacos, agroquímicos e agentes dispersantes utilizados no controle de derramamentos de hidrocarbonetos (Mangelli, 2023).

Dentre os tensoativos mais estudados nesse contexto, destaca-se o alquilbenzeno linear sulfonato (LAS), um composto aniónico amplamente utilizado em formulações de detergentes sintéticos devido a sua excelente propriedade detergente e o seu baixo custo, sendo o principal tensoativo utilizado pelos fabricantes de produtos de limpeza. O LAS comercial consiste em uma mistura de mais de 20 isômeros homólogos, estruturalmente semelhantes, derivados da sulfonação de alquilbenzenos lineares com diferentes comprimentos e ramificações na cadeia alquila. Sua estrutura química é composta por uma cadeia de alquil benzeno (parte hidrofóbica) ligada a um grupo sulfonato (parte hidrofílica), o que lhe confere propriedades anfifílicas (Silva, 2024).

A persistência ambiental de compostos como o alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) está diretamente relacionada à sua baixa biodegradabilidade em sistemas de tratamento exclusivamente anaeróbios. Essa resistência compromete a eficiência dos processos de remoção, uma vez que o LAS apresenta estrutura molecular estável e baixa suscetibilidade à transformação sob essas condições redutoras típicas desses ambientes. Sob essas circunstâncias, esses compostos são classificados como recalcitrantes, uma vez que apresentam uma dificuldade de ruptura por processos físicos e químicos tradicionais, limitando sua remoção em configurações anaeróbias de tratamento (Santos *et al.*, 2021).

Durante o processo de cloração de efluentes na presença de compostos como o alquilbenzeno linear sulfonato (LAS), há formação de subprodutos de desinfecção halogenados (DBP), que representam uma preocupação crescente na área de tratamento de esgoto. O LAS, ao reagir com o cloro residual e com a matéria orgânica natural presente no meio, pode atuar como precursor na geração de compostos secundários potencialmente tóxicos. Entre os DBP mais relevantes estão os trihalometanos (THM), como o clorofórmio e seus derivados bromados, amplamente estudados devido à sua carcinogenicidade e bioacumulação (Rocha, 2023).

Diante dos potenciais impactos ecotoxicológicos do LAS, novas estratégias para sua remoção em efluentes têm sido intensamente investigadas e implementadas. Os métodos predominantes envolvem a biodegradação mediada por consórcios microbianos, considerada a abordagem mais eficiente e ambientalmente adequada, além da adsorção por sólidos suspensos ou sedimentos, que contribui para a separação físico-química do surfactante. Complementarmente, técnicas de tratamento avançado, como processos oxidativos com ozônio, radiação ultravioleta (UV) e filtração por carvão ativado, vêm sendo avaliadas quanto à sua eficácia (Luo *et al.*, 2020; Ogawa; Kawase, 2021; Silva, 2024).

Sob a perspectiva desse contexto, este trabalho visa investigar a formação de subprodutos da desinfecção (DBP) derivados do LAS, elucidando os mecanismos e os fatores que influenciam sua geração. Foram conduzidos ensaios comparativos com três agentes clorantes: hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio e hipoclorito de sódio gerado *in loco*. A análise abrange diferentes matrizes de amostras contendo LAS, avaliando impactos ambientais dos DBP e na proposição de estratégias mais eficientes para sua mitigação em sistemas de tratamento de efluentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados os principais pontos teóricos que fundamentam a elaboração deste trabalho, com ênfase nas propriedades e no comportamento do LAS no contexto do tratamento de efluentes. A discussão contempla os mecanismos de atuação deste tensoativo na desinfecção, os processos químicos que levam à formação de subprodutos durante sua aplicação e os potenciais impactos ambientais decorrentes desses compostos.

Além disso, são apresentados referenciais teóricos sobre a legislação ambiental pertinente, as tecnologias de tratamento envolvidas e os estudos anteriores que embasam a relevância da investigação proposta. Esses elementos formam a base conceitual necessária para compreender a problemática e direcionar as análises ao longo do desenvolvimento do trabalho.

2.1 DESINFECÇÃO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

O tratamento de esgoto é composto por uma série de processos que visam remover impurezas das águas residuais antes de seu retorno ao meio ambiente ou reaproveitamento. Divide-se em etapas principais: o tratamento preliminar, que retém sólidos grosseiros e areia; o primário, que separa sólidos sedimentáveis por decantação; o secundário, baseado em processos biológicos para degradação da matéria orgânica; e o terciário, que pode incluir filtração, remoção de nutrientes e desinfecção (Pastre *et al.*, 2023).

A desinfecção é um processo essencial para garantir a segurança sanitária do efluente tratado, seja para descarte ambiental ou reúso não potável, uma vez que é responsável por inativar agentes patogênicos, como bactérias e seus esporos, vírus, protozoários, vermes e larvas, prevenindo a contaminação de corpos hídricos. Sua ampla aplicação se deve à eficácia microbiológica, ao baixo custo e à decomposição que gera poucos resíduos. No entanto, sua eficiência depende dos mecanismos de inativação envolvidos, cuja compreensão é fundamental para superar limitações cinéticas e aprimorar estratégias nos sistemas de tratamento (Azuma; Hayashi, 2021; Gelete *et al.*, 2020).

Muitas técnicas de desinfecção de esgoto são comumente utilizadas em todo o mundo, apresentando vantagens e desvantagens. Os métodos de desinfecção mais

comumente utilizados no tratamento de esgoto incluem a desinfecção física (por exemplo, radiação ultravioleta e filtração por membranas) e a desinfecção química (por exemplo, cloro, ozônio, hipoclorito de sódio e dióxido de cloro). No Brasil, o hipoclorito de sódio, o cloro gasoso, o dióxido de cloro, o ozônio (O_3), a radiação ultravioleta (UV) e o ácido peracético são os desinfetantes mais utilizados (Srivastav *et al.*, 2020; Gelete *et al.*, 2020; Kovalski *et al.*, 2020; BRASIL, 2025).

A desinfecção não deve ser confundida com esterilização, uma vez que a segunda é a destruição completa de todos os microrganismos vivos, e a primeira objetiva controlar organismos causadores de doenças, sendo suficiente para proteger a saúde pública (AWWA, 2006). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) (1999), os três principais mecanismos de inativação de patógenos são: 1) destruir ou prejudicar a organização estrutural celular atacando os principais constituintes celulares, como destruir a parede celular ou prejudicar as funções das membranas semipermeáveis; 2) interferir no metabolismo produtor de energia através de substratos enzimáticos em combinação com grupos prostéticos de enzimas, tornando as enzimas não funcionais e 3) intervir na biossíntese e no crescimento, impedindo a síntese de proteínas normais, ácidos nucléicos, coenzimas ou da parede celular. A eficácia do cloro contra diferentes tipos de microrganismos é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – A eficácia relativa do cloro contra diferentes tipos de microrganismos

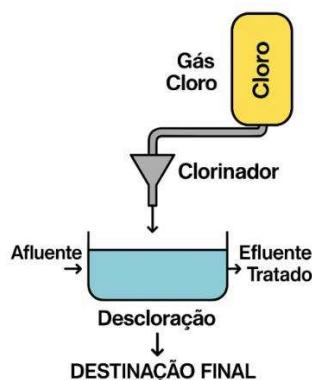


Fonte: WHO (2017)

De acordo com Metcalf (2016), o desempenho dos processos de desinfecção pode ser afetado pelos seguintes fatores: tempo de contato e eficiência de mistura nas câmaras de contato; concentração do agente de desinfecção; intensidade e natureza do agente físico; temperatura e pH; tipos de organismos a serem inativados; características do efluente a ser tratado (efluente secundário filtrado ou não filtrado) e unidades de pré-tratamento. O tempo de contato (TC) entre o agente desinfetante e

os organismos presentes no efluente é uma variável fundamental no processo de desinfecção. Em geral, para uma determinada concentração do desinfetante, a eficiência na eliminação dos patógenos aumenta proporcionalmente ao tempo de exposição. Os reatores de desinfecção são projetados para garantir que essa interação seja suficiente para atingir o nível desejado de inativação microbiológica, assegurando a qualidade do efluente tratado (Rocha, 2023).

Figura 2 – Esquema básico do processo de cloração



Fonte: a autora (2025)

A cloração, como ilustrada na Figura 2, é amplamente empregada como método de desinfecção de efluentes devido à sua eficácia na remoção de contaminantes e ao seu custo acessível. Nesse processo, o cloro adicionado ou um de seus subprodutos reage com a água para formar ácido hipocloroso e íons hipoclorito. Ele é um desinfetante de água fortemente oxidante. Entretanto, há desvantagens no processo de cloração, como a ineficácia contra ovos e cistos de protozoários e a formação de diversos subprodutos de desinfecção, estimados entre 600 e 700 compostos distintos. Entre esses produtos, destacam-se os trihalometanos (THM), que apresenta potenciais riscos à saúde humana, incluindo citotoxicidade, mutagenicidade, teratogenicidade e carcinogenicidade. Em geral, os níveis mais elevados de inativação de patógenos em processos de desinfecção são obtidos por meio da otimização de diversos parâmetros operacionais. (Srivastav; Patel; Chaudhary, 2020; Gelete *et al.*, 2020; Rocha, 2023).

2.1.1 Tipos de desinfectantes

A eficiência dos diversos tipos de agentes desinfetantes é influenciada pela natureza e condições dos microrganismos. Por exemplo, as células bacterianas viáveis são eliminadas facilmente, enquanto os esporos de bactérias são extremamente resistentes, sendo que a maioria dos desinfetantes normalmente utilizados tem pouco ou nenhum efeito sobre estes. A concentração de organismos no efluente também influencia o processo de desinfecção, uma vez que, quanto mais elevado o número inicial de organismos, maior será o tempo requerido para se conseguir a eliminação deles. Durante a escolha do melhor tratamento é necessário levar em consideração que cada agente apresenta vantagens e desvantagens, em que, alguns parâmetros devem ser previamente analisados antes da sua escolha, como, por exemplo: efetividade de remoção dos patógenos, custos, estabilidade do desinfetante, segurança durante o manuseio do produto, grau de periculosidade ao ambiente e os subprodutos gerados (Koga, 2019).

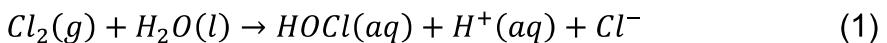
2.1.1.1 Cloro

A descoberta do cloro remonta a 1774, quando o farmacêutico sueco Carl William Scheele obteve um gás esverdeado ao reagir ácido clorídrico (HCl) com dióxido de manganês, acreditando tratar-se de um composto contendo oxigênio. Lavoisier nomeou a substância de ácido oximuriático. Em 1809, Gay-Lussac e Thénard tentaram decompor o gás com carbono incandescente, sem sucesso. Somente em 1810, o químico inglês Humphry Davy comprovou que se tratava de um elemento, batizando-o como cloro por causa de sua coloração (Silva, 2024).

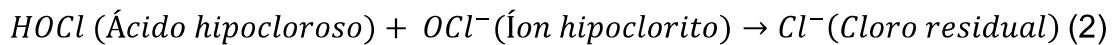
Estima-se que o cloro represente 0,15% da crosta terrestre na forma de cloreto solúveis, como sal comum (NaCl), carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e silvita (KCl). Na natureza, ele existe apenas como o íon cloreto negativo com valência de -1. A partir de 1974 descobriu-se que o cloro em combinação com os compostos orgânicos presentes na água, promoviam a geração dos compostos orgânicos halogenados, principalmente o clorofórmio e a partir de então, diversos estudos começaram investigar as possíveis associações do cloro com tais compostos (Koga, 2019).

Segundo Pianowski; Janissek (2003), embora a utilização de cloro seja recorrente em Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), a sua utilização em estações de tratamento de efluentes (ETE) tem uma grande importância, uma vez que são responsáveis pela inativação de organismos patogênicos. O cloro e seus

derivados apresentam elevada capacidade oxidante, sendo amplamente utilizados em processos de desinfecção. De modo geral, sua reatividade tende a diminuir com o aumento do pH da solução, enquanto a velocidade das reações envolvendo cloro é intensificada com a elevação da temperatura.



A Equação 1 mostra o que acontece com a adição do cloro gasoso ao efluente, ou seja, a formação de íons de hidrogênio (H^+) e íons cloreto (Cl^-), além da formação do ácido hipocloroso que é o principal agente desinfetante na reação. Ele ajuda a destruir microrganismos patogênicos. O cloro presente na água na forma de ácido hipocloroso e íon hipoclorito é denominado de cloro residual livre (Equação 2), em que, ambos são oxidantes não específicos que reagem com a matéria orgânica dissolvida e particulada (Santos, 2020; Hidrogeron, 2019).

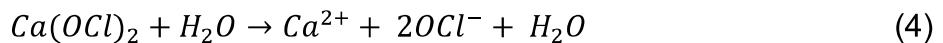


2.1.1.2 Hipoclorito de cálcio

O hipoclorito de cálcio ($Ca(ClO)_2$) é um composto químico sólido, altamente oxidante, amplamente utilizado como agente desinfetante e alvejante em diversas aplicações industriais e sanitárias. Sua forma sólida, geralmente apresentada em grânulos ou tabletes, oferece vantagens logísticas importantes, como maior estabilidade durante o armazenamento e facilidade de transporte, além de permitir a liberação controlada de cloro ativo quando dissolvido em água. Essa característica o torna especialmente eficaz no tratamento de água potável, efluentes sanitários, piscinas e em processos de higienização em indústrias alimentícias, siderúrgicas e lavanderias industriais (Azevedo, et al., 2024).

Historicamente, esse produto serviu de grande impulso para a indústria têxtil, além de se consolidar como uma das bases da química industrial. Muitos dos fundamentos da engenharia química moderna têm origem nos esforços iniciais para converter substâncias como carbonato de sódio, soda cáustica e cloro em pó de branqueamento utilizado na limpeza de tecidos (Black & Veatch Corporation, 2010).

O mecanismo de ação do hipoclorito de cálcio quando em solução, é apresentado na Equação 3 (Koga, 2019).



A reação do hipoclorito de cálcio ocorre principalmente em meio aquoso, liberando cloro ativo na forma de ácido hipocloroso (HOCl), que é o responsável pela ação desinfetante. O HOCl é altamente eficaz contra microrganismos, pois penetra nas células e oxida proteínas, enzimas e DNA. O Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio) contribui para elevar o pH da solução, o que pode influenciar a forma predominante do cloro ativo (HOCl ou OCl⁻). Este por sua vez, é largamente empregado na desinfecção de piscinas, spas e sistemas de tratamento de água e esgoto. Devido à sua eficácia e estabilidade, costuma ser adotado como referência em testes comparativos com outros agentes químicos de higienização. Se caracteriza por ser um agente antimicrobiano de largo espectro, com ação rápida, apresentando facilidade de uso, solubilidade em água e estabilidade relativa (Zhang *et al.*, 2023).

2.1.1.3 Hipoclorito de sódio

O hipoclorito de sódio (NaClO) é um composto químico inorgânico amplamente utilizado como agente desinfetante, alvejante e oxidante, especialmente em soluções aquosas conhecidas comercialmente como água sanitária. Sua ação antimicrobiana se deve à liberação de ácido hipocloroso (HClO) em meio aquoso, o qual possui elevada eficácia na inativação de bactérias, vírus e fungos. Por ser altamente solúvel em água e relativamente fácil de produzir, o hipoclorito de sódio é empregado em larga escala no tratamento de água potável, na desinfecção de ambientes hospitalares e industriais, na limpeza doméstica e em processos de branqueamento na indústria têxtil e de papel (Zhang *et al.*, 2023).

É amplamente comercializado no varejo sob o nome de alvejante ou água sanitária, geralmente em concentrações que variam entre 2,0% e 2,5% de cloro ativo. Nessa faixa, o produto apresenta estabilidade química adequada para uso doméstico e institucional, com baixa taxa de degradação ao longo do tempo. No entanto, em concentrações superiores a 16%, sua estabilidade torna-se significativamente comprometida, especialmente quando armazenado à temperatura ambiente e exposto

à luz ou ao contato com metais. Estudos recentes demonstram que uma solução a 18% pode perder até 50% de sua concentração de cloro ativo em apenas 60 dias, mesmo sob condições controladas (Sá et al., 2024). O mecanismo de ação do hipoclorito de sódio quando em solução, é apresentado na Equação 4 (Koga, 2019).



A reação do hipoclorito de sódio em meio aquoso é fundamental para sua ação como desinfetante. Quando dissolvido em água, ele se transforma em ácido hipocloroso (HOCl) e hidróxido de sódio (NaOH). O HOCl é o agente ativo mais eficaz, pois ele penetra facilmente nas membranas celulares dos microrganismos e oxida proteínas, enzimas e ácidos nucleicos, levando à inativação microbiana. O hipoclorito de sódio é considerado uma boa opção para sistemas de cloração simplificados e de pequeno porte, principalmente por sua facilidade de dosagem em baixas vazões, baixo risco associado ao manuseio e à estocagem e custo operacional reduzido relacionado ao hipoclorito de cálcio (Sá et al., 2024). No entanto, quando o cloro presente no hipoclorito de sódio reage com compostos orgânicos presentes em surfactantes, pode ocorrer a formação de trihalometanos, que são subprodutos potencialmente tóxicos e carcinogênicos.

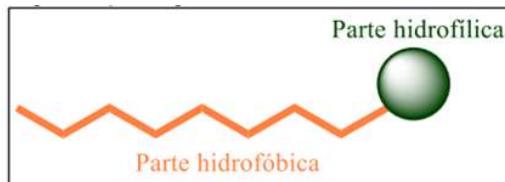
A cloração por meio de geradores *in loco* envolve a produção de hipoclorito de sódio diretamente na unidade de tratamento, a partir da eletrólise de salmoura. Segundo Henrimar (2019), essa tecnologia apresenta um ótimo custo-benefício, pois permite que o desinfetante seja produzido no próprio local, com consumo energético reduzido, o que contribui para minimizar os custos operacionais e de manutenção. Além disso, garante abastecimento contínuo e eficiente de água potável, mesmo para populações de grande porte.

Ao passar uma corrente contínua através de eletrodos (especificações com segredo industrial) dentro de uma célula eletrolítica, usando sais como eletrólitos, será gerado cloro oxidado, comumente conhecido como hipoclorito de sódio gerado no local (Tontu; Bilgili; Sahin, 2021). A aplicação da água eletroativada é considerada segura, pois não exige cuidados especiais de manuseio e, nos níveis de hipoclorito que produz, é classificada como não perigosa. Além disso, sua geração no próprio local elimina a necessidade de infraestrutura para transporte ou armazenamento (Abreu Neto, 2025).

2.2 SURFACTANTES

Os tensoativos (Figura 3) são compostos orgânicos caracterizados por uma estrutura anfifílica, na qual a porção hidrofóbica geralmente consiste em cadeias alquílicas ou alquilfenílicas com 10 a 18 átomos de carbono, enquanto a fração hidrofílica apresenta grupos funcionais iônicos ou não-iônicos ligados à cadeia principal. Essa dualidade estrutural permite que os tensoativos se posicionem na interface entre diferentes fases, promovendo a redução da tensão superficial e facilitando processos como emulsificação, solubilização e dispersão. Essas propriedades sustentam diversas aplicações, incluindo formulações de agroquímicos, produtos farmacêuticos, cosméticos e até no controle de derramamentos de petróleo. Quanto à carga da cabeça hidrofílica, os tensoativos são classificados como aniônicos, catiônicos, não-iônicos ou zwitter-iônicos (Silva, 2024).

Figura 3 - Representação das partes hidrofóbica e hidrofílica de um surfactante



Fonte: Silva (2024)

A interação entre o processo de cloração e poluentes emergentes, como fármacos, pesticidas, surfactantes e compostos hormonais, pode gerar DBP, com potenciais riscos à saúde e ao meio ambiente. Com o avanço industrial e analítico, contaminantes como os surfactantes passaram a receber maior atenção quanto à exposição, toxicidade e risco ambiental. Ao atingirem os corpos hídricos, esses compostos podem afetar microrganismos essenciais à autodepuração, comprometendo a qualidade da água conforme sua classe e concentração (Silva, 2024).

As águas superficiais são fundamentais para o abastecimento público e a agricultura, mas frequentemente recebem efluentes sem tratamento adequado. Entre os poluentes mais recorrentes estão os surfactantes, amplamente utilizados em produtos de limpeza, cuja presença contribui significativamente para a degradação desses ambientes aquáticos. O impacto mais visível é a formação de espumas em

rios e lagos, como ocorreu no Rio Tietê, em Pirapora do Bom Jesus (SP), com imagens amplamente divulgadas pela mídia nacional. Essas espumas podem conter compostos tóxicos, como gás sulfídrico e metano, gerados pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica, agravada pela baixa oxigenação da água. Além disso, funcionam como vetores de microrganismos patogênicos, facilitando a dispersão de vírus e bactérias para áreas distantes da fonte de contaminação (Silva *et al.*, 2025).

2.2.1 Tipos de surfactantes

Os surfactantes sintéticos são agrupados em classes conforme a carga elétrica presente na porção hidrofílica de suas moléculas: aniônicos, catiônicos, não iônicos e anfotéricos. Essa classificação é fundamental para compreender o comportamento desses compostos. Cada tipo apresenta propriedades distintas quanto à solubilidade interação com outras substâncias. O Quadro 1 reúne as principais características de cada classe (Silva *et al.*, 2024).

Quadro 1 – Tipos de surfactantes, suas principais características e exemplos de aplicações

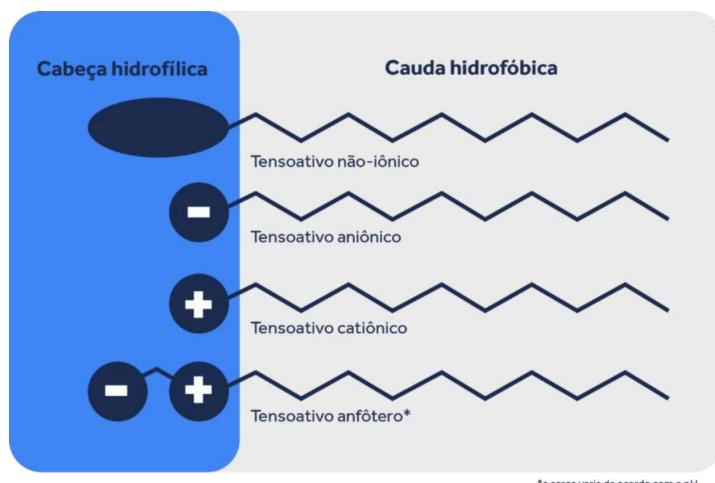
Informações relevantes	TENSOATIVOS			
	Aniônicos	Não-Iônicos	Catiônicos	Anfóteros
Características	Região polar apresenta carga negativa.	Não apresentam cargas verdadeiras.	Região polar apresenta carga positiva.	Dependendo do pH da solução, se comportam como aniônicos ou catiônicos.
Mercado brasileiro	Subsegmento de tensoativos mais utilizados (volume e vendas).	Forte expansão em cosméticos e cuidados pessoais; destaque para origem vegetal.	Crescimento contínuo; foco em amaciadores com menor impacto ambiental	Ganha espaço em formulações suaves e infantis; foco em biodegradabilidade.
Principais produtos	Alquilbenzeno linear sulfonato (LAS) Lauril éter sulfato de sódio (LESS)	Polietileno-glicóis, álcoois, alquilfenóis e aminas etoxiladas.	Sais quaternários de amônio e derivados de plantas.	Betainas e derivados de aminoácidos
Principais produtos consumidos	Sabões em pó para roupas, detergentes para louças e xampus.	Detergentes, produtos de limpeza, outras aplicações industriais.	Limpeza industrial e institucional, amaciadores e detergentes.	Xampus infantis, sabonetes líquidos, produtos dermatológicos.

Fonte: a autora (2025)

Os tensoativos catiônicos, como os sais quaternários de amônio halogenados, geram íons positivos ao se dissolverem em água e são amplamente empregados em produtos antimicrobianos e cosméticos capilares. Já os tensoativos não iônicos, como nonilfenóis, amidas e ácidos graxos etoxilados, não se ionizam em meio aquoso, apresentando menor interferência ambiental. Os anfôteros, por sua vez, possuem simultaneamente grupos ácido (carboxila) e básico (amônio quaternário), podendo atuar como cátions ou ânions conforme o pH. Essa adaptabilidade os torna valiosos na formulação de cosméticos suaves, como xampus infantis, onde funcionam como agentes de limpeza, estabilizadores de espuma e emolientes (Garcia et al., 2024).

Os tensoativos aniônicos, amplamente empregados em produtos de limpeza, higiene pessoal e cosméticos, possuem uma extremidade hidrofílica com carga negativa, favorecendo a solubilidade em água e a formação de espuma estável. Sua estrutura, composta por uma cauda hidrofóbica e uma cabeça aniônica, permite a interação simultânea com gordura e água, promovendo emulsificação e remoção de sujeiras (Garcia et al., 2024; Tran et al., 2018). A Figura 4 apresenta as estruturas químicas dos principais tipos de tensoativos.

Figura 4 – Tipos de surfactantes



Fonte: Macler Produtos Químicos Ltda (2024)

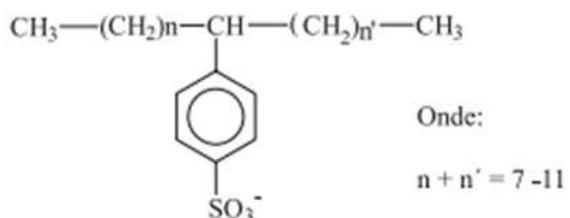
Estima-se que o consumo global anual de LAS ultrapasse 3 milhões de toneladas, com destaque para mercados como China, Estados Unidos, Índia e Brasil. Essa substância representa aproximadamente 60% a 70% de todos os tensoativos aniônicos utilizados mundialmente, consolidando-se como o principal agente de limpeza sintético em formulações comerciais. No Brasil, o consumo anual gira em

torno de 150 a 200 mil toneladas, o que posiciona o país como um dos maiores consumidores da América Latina. A ampla aceitação do LAS se deve à sua eficácia na remoção de sujeira, estabilidade em diferentes faixas de pH e custo relativamente baixo, embora preocupações ambientais estejam impulsionando pesquisas por alternativas mais biodegradáveis (Barreto; Almeida; Medeiros, 2024).

2.3 ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO

O LAS comercial é uma mistura de mais de 20 componentes, que são isômeros e homólogos intimamente relacionados, com diferentes comprimentos de cadeia alquílica e várias posições de anel benzênico ao longo da cadeia alquílica linear, variando de C₁₀ a C₁₆ com predominância de C₁₀ a C₁₃. O grupo fenila do LAS pode apresentar substituição em todas as posições dos átomos de carbono da cadeia linear, exceto a posição do carbono 1, podendo formar 26 moléculas diferentes. A fórmula estrutural do LAS está apresentada na Figura 5 (Tran et al., 2018).

Figura 5 - Estrutura molecular do alquilbenzeno linear sulfonato (LAS)

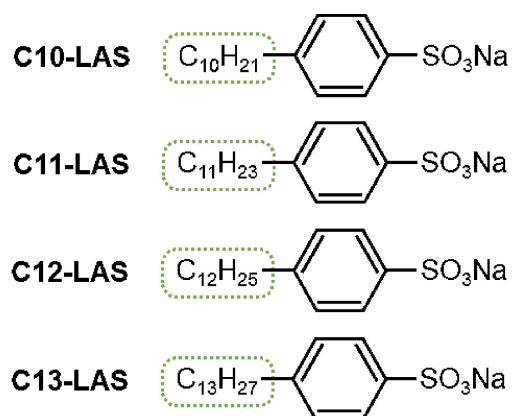


Fonte: Penteado (2006)

A escolha das cadeias de carbono entre C₁₀ e C₁₃ (Figura 6) é resultado de um equilíbrio entre desempenho e biodegradabilidade: essas cadeias oferecem boa solubilidade e ação detergente, enquanto mantêm uma estrutura linear que favorece a degradação biológica. Comparados a seus predecessores de cadeia ramificada, os LAS lineares são significativamente mais biodegradáveis, atendendo às exigências ambientais de órgãos como a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) e sendo preferidos em regiões com legislação ambiental mais rigorosa. Apesar da boa biodegradabilidade, os LAS ainda representam uma preocupação ambiental quando descartados em grandes volumes e tratados em ambiente anaeróbios, podendo causar toxicidade aquática e exigir processos

específicos de remoção em estações de tratamento de efluentes. Seu amplo uso, no entanto, continua devido ao excelente custo-benefício e à eficácia comprovada em diversas superfícies e tipos de sujidade.

Figura 6 - Estrutura dos homólogos do alquilbenzeno linear sulfonato



Fonte: a autora (2025)

O ácido alquilbenzeno sulfônico linear (ABSA) é um intermediário químico essencial na produção de tensoativos, obtido pela sulfonação do alquilbenzeno linear (LAB) com trióxido de enxofre, oleum ou ácido sulfúrico em reatores tubulares de filme descendente. Esse processo é amplamente utilizado na indústria química e no refino de combustíveis, devido à alta reatividade do grupo sulfônico, que confere propriedades ácidas e permite a modificação de compostos aromáticos. Derivados como o ácido poli(estirenossulfônico), empregado como floculante e agente de reologia, e o próprio ABSA, utilizado como matéria-prima de detergentes, ilustram sua relevância comercial. A reação de sulfonação é fortemente exotérmica, e o estudo de sua cinética é fundamental para otimizar a produção em escala industrial (Wang *et. al.*, 2024).

O LAS já foi detectado em esgoto, águas superficiais e água do mar, com concentrações que variam de $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ a $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, levantando preocupações crescentes sobre os efeitos no ambiente aquático. As concentrações de LAS em águas residuais domésticas normalmente variam de 1 a 10 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, atingindo 83 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ em águas residuais industriais em todo o mundo. O LAS é ingerido por humanos em concentrações que variam de 5 g a 1 kg por dia através da água potável, alimentos e contato dérmico. Embora o LAS seja biodegradável, devido à sua bioacumulação e persistência, é

perigoso para organismos aquáticos e humanos. Concentrações de LAS em esgoto têm sido associadas ao câncer em células do cólon, por meio da proliferação celular. Ele induz crescimento agudo, efeitos tóxicos reprodutivos, neurológicos e de biologia molecular em organismos (Jolliet *et al.*, 2020; Freeling *et al.*, 2019; Siyal *et al.*, 2020; Choque-Quispe *et al.*, 2021).

A presença de detergentes na água causa toxicidade para organismos aquáticos e animais selvagens. O LAS reduz a reprodução e os processos de crescimento dos organismos aquáticos, bem como causa efeitos fisiológicos, bioquímicos e patológicos. As cadeias de carbono do LAS contêm extremidades hidrofóbicas que determinam potências tóxicas, e a sua toxicidade aumenta com o comprimento da cadeia de carbono. Os perigos dos efeitos crônicos devido à exposição prolongada desse contaminante são de grande preocupação no desenvolvimento de padrões de qualidade da água e na avaliação dos riscos ambientais (Ogawa; Kawase, 2021).

2.4 TRATAMENTOS PARA REMOÇÃO DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO

Apesar dos avanços tecnológicos no tratamento de efluentes, alguns processos biológicos ainda são pouco eficientes, resultando no descarte de compostos nocivos nos corpos receptores e gerando riscos ambientais e à saúde pública. Embora o LAS seja amplamente removido em estações de tratamento de esgoto, concentrações relevantes ainda são encontradas em águas residuais industriais e domésticas, atingindo ambientes naturais. A remoção do LAS pode ocorrer por biodegradação, adsorção ou precipitação química. Esta última utiliza sais metálicos, como cloreto de alumínio e sulfato de ferro, que reagem com o LAS formando compostos insolúveis removidos por sedimentação. Apesar da eficácia, o método exige controle preciso das condições químicas e enfrenta desafios como a geração de lodo residual, exigindo avaliação criteriosa para garantir sua viabilidade (Oliveira *et al.*, 2024).

A remoção do alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) por adsorção ocorre por meio de interações eletrostáticas e hidrofóbicas entre o composto e a superfície do adsorvente, promovendo sua separação do meio líquido com boa eficiência. Os adsorventes mais utilizados incluem carvão ativado, argilas modificadas e materiais poliméricos, devido à sua alta área superficial e capacidade de retenção molecular.

Estudos demonstram que parâmetros operacionais como pH, temperatura e tempo de contato influenciam significativamente a eficiência do processo, permitindo sua otimização por meio do ajuste dessas variáveis. A regeneração dos adsorventes, por sua vez, representa uma estratégia viável para redução de custos operacionais e aumento da sustentabilidade do sistema de tratamento. (Luo *et al.*, 2022).

A biodegradação do LAS é um processo biocatalítico no qual microrganismos, como bactérias e fungos, transformam esse surfactante aniónico por meio de reações enzimáticas, reduzindo sua concentração em corpos hídricos e efluentes. Esse processo pode ocorrer em ambientes aeróbios e anaeróbios, sendo que a via aeróbia apresenta maior eficiência cinética devido à presença de oxigênio molecular, que atua como acceptor final de elétrons, facilitando a oxidação da cadeia alquil e do anel aromático. A remoção do LAS por sistemas biológicos aeróbios, como lodos ativados e biofilmes, tem sido amplamente documentada. Contudo, tais tecnologias exigem investimentos em infraestrutura, controle operacional e consumo energético, o que representa um desafio para países em desenvolvimento, como o Brasil, onde limitações institucionais dificultam a implementação de soluções de tratamento. No entanto, mesmo com algumas limitações, ainda caracteriza-se por ser o método de menor custo relacionado a outros métodos avançados (Kim *et al.*, 2021; Cui *et al.*, 2022).

Tecnologias anaeróbias seguidas de um tratamento aeróbios (lagoa de polimento) no tratamento de efluentes, como os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), têm sido amplamente utilizadas em diferentes países, tanto para o tratamento de efluentes domésticos quanto industriais. Essa ampla aplicação pode ser atribuída à eficiência satisfatória de remoção de matéria orgânica, simplicidade operacional, baixo custo de implantação, operação e manutenção, além da produção de metano (CH_4), que pode ser utilizado como fonte de energia (calor e eletricidade). Entretanto, sistemas exclusivamente anaeróbios para a remoção do LAS podem ser limitados pela formação de intermediários que dificultam sua completa degradação, a necessidade de adoção de tempos de detenção hidráulica (TDH) relativamente longos, 12 a 24 h comumente, podendo chegar até 48 h, especialmente atribuída à recalcitrância química dos alguns compostos químicos. Esse elevado TDH é incompatível com o projeto de reatores UASB em países de clima quente como o Brasil para o tratamento de esgoto sanitário, onde são adotados TDH da ordem de 6 a 8 h com base na vazão média afluente (Rocha *et al.*, 2023).

Estudos indicam que a biodegradação de compostos surfactantes pode aumentar com a adição de fontes de carbono prontamente degradáveis como etanol e sacarose, dependendo da comunidade microbiana envolvida na degradação do composto químico. Co-substratos como álcoois alifáticos, aldeídos e ácidos carboxílicos como acetato e lactato são importantes mecanismos de reativação da atividade microbiana. Além disso, pode ser aprimorada por meio da adaptação de microrganismos específicos e da otimização de parâmetros como pH, temperatura e tempo de retenção. A combinação de processos anaeróbios e aeróbios pode aumentar a eficiência da remoção, garantindo uma menor persistência do LAS no meio ambiente. Nesse último caso, consegue-se obter uma remoção de 44 a 99% do LAS de efluentes domésticos (Motteran *et al.*, 2020).

2.5 SUBPRODUTOS ORIGINADOS DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO

Durante o processo de cloração de efluentes, ocorre a formação de DBP, especialmente na presença de surfactantes aniónicos como o LAS. Comumente presente em efluentes domésticos e industriais, o LAS atua como precursor reativo, promovendo reações entre compostos orgânicos e agentes clorantes, resultando na geração de trihalometanos (THM), reconhecidos por sua relevância ecotoxicológica e potencial carcinogênico. Em ambientes salinos, a presença de íons brometo intensifica a produção de DBPs bromados, os quais apresentam maior estabilidade química e toxicidade. A gestão adequada desses compostos é fundamental para assegurar a eficácia da desinfecção, minimizando riscos à saúde humana e impactos ambientais adversos (Gong *et al.*, 2016).

Durante a cloração de efluentes, o cloro reage com a matéria orgânica dos efluentes (EFOM) e com alguns íons inorgânicos (por exemplo, íons brometo) para formar DBP halogenados, que são agentes químicos formados através da cloração do efluente. Como os LAS são um importante grupo de componentes do EFOM, alguns DBP halogenados resultantes do LAS podem ser formados durante a cloração de efluentes de águas residuais. Quando esses DBP halogenados são despejados no corpo d'água receptor, eles podem ter efeitos negativos para os organismos aquáticos (Silva, 2024).

Os subprodutos principais, são divididos em três grupos: subprodutos inorgânicos, subprodutos da oxidação orgânica e subprodutos orgânicos

halogenados. Os subprodutos inorgânicos são o clorato, clorito, brometo, iodato, peróxido de hidrogênio e amônia. Os subprodutos da oxidação orgânica são os aldeídos, ácidos carboxílicos e carbono orgânico assimilável. Os subprodutos orgânicos halogenados são os trihalometanos, ácidos haloacéticos, halocetonas, halocetonitrilas, hidrato de cloral, cloropicrina, entre outros (Rocha, 2023).

Espécies de DBP são formadas durante a cloração do efluente, e entre elas as de maiores proporções ainda conhecidas são os trihalometanos (THM) e os ácidos haloacéticos (AHA), e já em menores proporções podem encontrar-se as halocetonitrilas (HAN), as haloacetonas (HA) e as halocloropicrinas (CP). Os trihalometanos são compostos organohalogenados formados durante o processo de desinfecção da água, especialmente pela reação do cloro com matéria orgânica presente no meio aquático. Eles são derivados do metano (CH_4), no qual três dos quatro átomos de hidrogênio são substituídos por halogênios, como cloro, bromo ou iodo. Os principais THM incluem clorofórmio, bromodíclorometano, dibromoclormetano e bromofórmio, sendo que o triclorometano (clorofórmio) é o mais comum no efluente. Os quatro tipos de THM são tóxicos para o homem e podem ter diversos efeitos na saúde humana segundo a Agência de Proteção Ambiental (EPA). Alguns dos efeitos nocivos estão apresentados no Quadro 2 (Koga, 2019).

Quadro 2 - Trihalometanos e os potenciais efeitos na saúde humana.

Trihalometanos (THM)	Potenciais efeitos a saúde humana
Clorofórmio	Provoca câncer, afetar o sistema nervoso, o fígado e o reprodutivo.
Bromodíclorometano	Provoca câncer, afetar o sistema nervoso, o fígado e o reprodutivo.
Dibromoclormetano	Afeta o sistema nervoso, o fígado, o rim e o sistema reprodutivo.
Bromofórmio	Provoca câncer, afetar o sistema nervoso, o fígado e o rim.

Fonte: a autora (2025)

Por outro lado, os ácidos haloacéticos constituem uma classe de compostos orgânicos derivados do ácido acético (CH_3COOH), nos quais um ou mais átomos de hidrogênio ligados ao carbono são substituídos por halogênios como cloro, bromo, flúor ou iodo. Existem nove espécies de AHA, incluindo ácido monocloroacético (MCAA), ácido dicloroacético (DCAA) e ácido dibromoacético (DBAA). Os potenciais

efeitos que esses compostos podem causar a saúde humana estão apresentados no Quadro 3 (Silva, 2024).

Quadro 3 – Ácidos haloacéticos e os potenciais efeitos na saúde humana.

Ácidos haloacéticos	Potenciais efeitos a saúde humana
Monocloroacético (MCAA)	Provoca dor abdominal, vômitos, diarreia, convulsões e até colapso circulatório. Pode afetar o metabolismo, causar acidose metabólica e falência de múltiplos órgãos.
Dicloroacético (DCAA)	Pode provocar danos ao fígado e alterações metabólicas. Estudos indicam possível relação com câncer em animais, embora não haja confirmação em humanos.
Ácido dibromoacético (DBAA)	Pode afetar o sistema nervoso central, causando inflamação cerebral e estresse oxidativo. Exposição prolongada pode comprometer a qualidade do esperma e atrasar o desenvolvimento puberal.

Fonte: a autora (2025)

A formação dos DBP durante a fase da cloração do efluente é complexa e envolve diversas variáveis. Dos diversos fatores que influenciam a sua formação destacam-se (Rocha, 2023): matéria orgânica dissolvida; pH do esgoto a ser desinfectada; dose do cloro aplicada na desinfecção; concentração do íon brometo no efluente; tempo de contato ou reação do cloro e temperatura a que se encontra o efluente.

3 METODOLOGIA

Os processos de desinfecção analisados foram conduzidos utilizando hipoclorito de sódio, hipoclorito de cálcio e uma solução oxidante gerada pelo Hidrogeron® GE-150, denominado hipoclorito *in loco*. Esses agentes foram aplicados em um efluente doméstico, proveniente da saída de reatores do tipo Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB) da estação de tratamento de efluentes (ETE) Mangueira, Recife-PE. Os experimentos foram conduzidos em bancada, garantindo condições controladas para a avaliação da eficiência dos diferentes desinfetantes.

3.1 COLETA NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A coleta de amostras foi realizada na saída do reator UASB da ETE Mangueira, operada pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), no Recife. Essa estação desempenha um papel fundamental no tratamento dos efluentes gerados no bairro da Mangueira, garantindo a remoção de matéria orgânica e outros contaminantes antes da etapa de desinfecção.

Figura 7 – Unidades de tratamento da ETE Mangueira



(a) Estação elevatória. (b) Caixa de areia. (c) Reatores UASB. (d) Leitos de secagem. (e) Lagoa de polimento. Fonte: Google Earth (2025).

A estação de tratamento de esgoto (Figura 7) é composta por uma estação elevatória, uma calha Parshall, uma grade de barras, duas caixas de areia em série e um reator anaeróbio do tipo UASB, dividido em oito células dispostas em paralelo. Como etapa de pós-tratamento, a estação conta com uma lagoa de polimento e oito

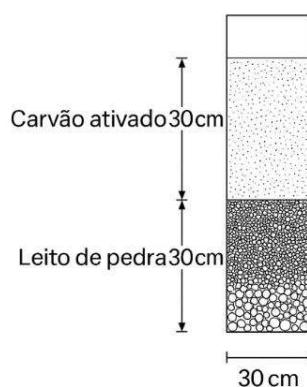
leitos de secagem. O efluente utilizado nos ensaios foi coletado na saída dos reatores UASB.

Para garantir a representatividade das amostras, foram seguidos protocolos de coleta e transporte, evitando interferências externas. As amostras foram armazenadas em recipientes específicos para efluentes, preservando os parâmetros físico-químicos e evitando contaminação cruzada. Essas medidas foram essenciais para manter a integridade dos compostos e permitir uma avaliação confiável dos efeitos dos desinfetantes aplicados.

3.2 FILTRAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a coleta, as amostras passaram por um processo de filtração com o objetivo de eliminar partículas sólidas de maior dimensão, reduzindo interferências durante a etapa de cloração. Essa etapa foi conduzida com o propósito de avaliação preliminar visando a possível implementação de unidade de filtração na ETE, subsequente ao reator UASB. O dispositivo utilizado (Figura 8) foi confeccionado com tubo de cloreto de polivinila (PVC), medindo 10 cm de diâmetro e 70 cm de altura total. Era composto por uma camada de 30 cm de leito de pedra, 30 cm de carvão ativado e bordo livre de 10 cm. Seu fluxo era descendente e a vazão foi de $7,7 \text{ mL.s}^{-1}$

Figura 8 – Esquema do filtro.



Fonte: adaptado de Rocha (2023)

3.3 MONITORAMENTO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Para avaliar o efluente previamente tratado em reator UASB, foram realizadas análises laboratoriais físico-químicas detalhadas, contemplando parâmetros essenciais para caracterização da qualidade do esgoto. Esses dados serviram como base para entender a eficiência do processo aplicado, além de fornecer subsídios para a etapa subsequente de cloração e avaliação da formação de subprodutos de desinfecção. Foram monitorados os seguintes parâmetros: potencial hidrogeniônico (pH), temperatura, condutividade, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal, nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e sólidos totais, conforme indicado no Quadro 4. A análise de cloro residual foi feita pós desinfecção. As análises foram feitas de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

Quadro 4 - Parâmetros físico-químicos e microbiológicos e suas respectivas metodologias, conforme APHA (2017)

Parâmetro	Metodologia ou equipamento utilizado	Equipamento/Procedimento
Condutividade	Condutivímetro	Jumo 202710/30
pH Temperatura	pHmetro	Hanna Instruments HI3222 pH/ORP/ISE
Turbidez	Nefelométrico	Macherey-Nagel® NANOCOLOR VIS II
Fósforo total	Colorimétrico	4500 P C –Molibdato-Vanadato, Método Colorimétrico
DQO	Colorimétrico	5220 COD D – Closed Reflux, Método Colorimétrico
Nitrogênio amoniacal	Titulométrico	4500 NH ₃ C –Método Titulométrico
NTK	Titulométrico	4500 N _{org} B – Método Macro-Kjeldahl
Sólidos totais	Gravimétrico	2540 TSS D – Sólidos Totais
Cloro residual	Colorimétrico	4500 Cl G – DPD, Método Colorimétrico

Fonte: a autora (2025)

3.4 SANITIZANTES EMPREGADOS

Foram testados três agentes com propriedades oxidantes distintas: hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio e hipoclorito de sódio gerado in loco, com o objetivo de avaliar a redução da concentração de alquilbenzeno sulfonato linear no efluente tratado e a formação de subprodutos da desinfecção.

O hipoclorito de sódio in loco foi produzido a partir do gerador estático Hidrogeron® GE-150, sendo a solução preparada com a adição de 150 L de água, posterior adição de 6 kg de cloreto de sódio sem iodo (NaCl) e homogeneização da solução de salmoura. Em seguida, o reator foi fechado e conectado à fonte de energia elétrica, que desligava automaticamente após 24 h. Segundo a fabricante, a água eletroativada gerada no local através da eletrólise da salmoura deve conter teor de cloro ativo de aproximadamente 0,65%.

Os experimentos foram conduzidos sob temperatura ambiente para verificar a efetividade dos desinfetantes na degradação do LAS. O tempo de contato e a concentração de cloro aplicada foram analisados para determinar quais condições resultam na maior remoção do surfactante e minimizam a formação de subprodutos tóxicos. O tempo de contato dos desinfetantes com o efluente foi estabelecido em 30 min, com base no trabalho de Rocha et al. (2023).

3.5 PREPARAÇÃO DOS FRASCOS DE COLETA PÓS-CLORAÇÃO

Para garantir a integridade das amostras após o processo de cloração, foram adicionados preservantes específicos a cada frasco, de acordo com os parâmetros a serem investigados, que estão descritos a seguir, bem como, um agente de descloração. Na quantificação do LAS, foram adicionados formaldeído na proporção 1% (V/V) da amostra e tiossulfato de sódio (solução 1 N) em quantidade suficiente para neutralizar o cloro residual, utilizando-se a relação estequiométrica de 0,556 mg de tiossulfato para cada 1 mg.L⁻¹ de cloro residual presente na amostra. Para a análise de THM, as amostras receberam 1 g de agente tampão fosfato por 60 mL de amostra, preparado a partir de fosfato de sódio dibásico e fosfato de potássio monobásico na proporção 1:99 (p/p). Além disso, foi adicionado 1 mg de cloreto de amônio para cada 10 mL de amostra. Embora o cloreto de amônio não seja considerado um agente descolorante convencional, trata-se do agente recomendado no método EPA 551.1.

3.6 ENSAIOS DE CLORAÇÃO

A dosagem de cloro utilizada para todos os agentes de desinfecção no processo de desinfecção do efluente foi estabelecida em 10 mg.L^{-1} , enquanto o tempo de contato foi de 30 min, conforme resultados obtidos por Rocha *et al.* (2023). Os ensaios foram efetuados em um equipamento *Jar Test* e o volume de amostra foi de 2,0 L. A agitação do equipamento foi de 100 rpm, que corresponde ao gradiente médio de velocidade de 100 s^{-1} . Em seguida, as amostras foram identificadas e preservadas conforme as recomendações do APHA (2017) e da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 1995), descritos no tópico 3.5. A determinação do cloro livre e total após a cloração foi realizada por meio do método DPD (N,N-dietil-p-fenilenodiamina), que é uma técnica colorimétrica amplamente utilizada para monitorar a eficiência da desinfecção em sistemas de tratamento de efluentes. O teor de cloro residual combinado foi obtido pela diferença entre o total e o livre.

Os sanitizantes utilizados foram hipoclorito de sódio, hipoclorito de cálcio e hipoclorito de sódio *in loco*. Devido à volatilidade do cloro, o teor de cloro ativo de cada desinfetante foi determinado imediatamente antes da realização dos ensaios. Na Tabela 1, têm-se as fórmulas utilizadas para determinar o volume necessário de cada agente clorante para o tratamento proposto.

Tabela 1 – Fórmulas aplicadas para o cálculo do volume de cada agente clorante

Parâmetros	Fórmula aplicada
% Teor de Cl_2	$\% \text{ Teor de } \text{Cl}_2 = \frac{V_{\text{Titulante}} * N * 35,45}{V_{\text{Amostra}}}$
V_{Clorante}	$V_{\text{Clorante}} = \frac{C_{\text{Demandaci2}} * V_{\text{Esgoto}}}{V_{\text{TeorCl2}}}$

Fonte: a autora (2025)

O método iodométrico foi utilizado para determinar o teor de cloro ativo presente nas soluções aplicadas durante o processo de desinfecção. Para tal, foram adicionados 5 mL de ácido acético na amostra de modo a reduzir o pH para uma faixa entre 3 e 4 uma vez que a reação não é estequiométrica em pH neutro devido à oxidação parcial do tiossulfato a sulfato. Além disso, foi utilizado 1g de iodeto de

potássio (KI) em cristais. A titulação foi realizada com a solução padrão de tiossulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) com amido como indicador, conforme descrito no APHA (2017).

3.7 QUANTIFICAÇÃO DO ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO

As amostras de esgoto foram conduzidas a um evaporador centrífugo (SP Scientific GeneVac) e concentradas 30 vezes. Esse processo permitiu a redução do volume líquido e o aumento da concentração dos analitos, sem comprometer sua integridade química. Após a evaporação, o resíduo foi redissolvido em solução metanol:água (7:13 V/V) para posterior injeção no cromatógrafo.

A quantificação do LAS foi realizada por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) (Agilent series 1100), utilizando injetor de amostras automático, Compartilhamento termostatizado aplicado à coluna com autodetectores de fluorescência, a fase móvel foi composta por acetonitrila e solução aquosa de ácido etanoico e trietilamina, operando em gradiente de eluição e coluna analítica Agilent Chrom-Sep C18 SS (250 mm x 4,6 mm x 5 μm) conforme descrito por Silva et al. (2017) (Tabela 2). As condições cromatográficas foram ajustadas para garantir a separação dos quatro principais homólogos do LAS (de C_{10} a C_{13}) e de seus isômeros de posição. A detecção foi realizada com excitação/emissão de 230/290 nm.

Tabela 2 – Parâmetros metodológicos para a identificação e quantificação dos homólogos do LAS por CLAE-UV-Vis (continua).

Parâmetros analíticos	Valores
Volume de injeção	100 μL
Fluxo da fase móvel	1 mL. min^{-1}
Temperatura do compartimento da coluna	40°C
Coeficiente de determinação (R^2)	0,99
Comprimento de onda do detector UV	230 nm
Solvente A	Água + 5 mmol.L^{-1} ácido acético e 5 mmol.L^{-1} trietilamina
Solvente B	Acetonitrila

Fonte: Silva et al. (2017)

Tabela 2 – Parâmetros metodológicos para a identificação e quantificação dos homólogos do LAS por CLAE-UV-Vis (continuação).

Gradiente da fase móvel	
Tempo (min)	Solvente A; Solvente B (V;V)
0	70;30
20	40;60
33	40;60
34	70;30
40	70;30

Fonte: Silva *et al.* (2017)

3.8 QUANTIFICAÇÃO DOS TRIHALOMETANOS

Os quatro tipos mais comuns de THM denominado THM_{total} ou THM₄ foram avaliados neste estudo: clorofórmio (TCM), bromodíclorometano (BDCM), dibromoclorometano (DBCM) e bromofórmio (TBM).

A quantificação dos THM foi realizada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM) em replicata autêntica após uma etapa de extração líquido-líquido com éter metil-terc-butílico (MTBE). Todos os padrões de THM possuíam grau de pureza cromatográfica e rastreabilidade internacional (TraceCERT®, Sigma Aldrich®). As condições analíticas, bem como o procedimento de extração, seguiram as descrições apresentadas por Franco *et al.* (2018).

Os experimentos de extração líquido-líquido contaram com o uso de reagentes de alta pureza, como metanol, éter metil-terc-butílico e sulfato de sódio (todos fornecidos pela Sigma Aldrich®), garantindo confiabilidade e reproduzibilidade nos processos analíticos. Para a extração dos compostos, foram utilizados 50 mL da amostra, e o procedimento foi realizado no próprio frasco de coleta, conforme as recomendações da USEPA (1995), com o objetivo de minimizar perdas dos analitos por volatilização durante a transferência. Em seguida, se adicionaram 50 µL de fluorobenzeno diluído (surrogate, com concentração final de 200 µg·L⁻¹), 4 mL de éter metil-terc-butílico (MTBE) e aproximadamente 1 g de sulfato de sódio anidro, utilizado como agente secante da fase orgânica. As amostras foram agitadas vigorosamente

por 5 min e, em seguida, submetidas à refrigeração a - 4 °C por 3 min para facilitar a separação de fases.

Após esse procedimento, formaram-se duas fases distintas: a superior contendo o extrato orgânico e a inferior com a fase aquosa. A porção orgânica (~1,5 mL) foi cuidadosamente coletada e transferida para frascos do tipo *vial* âmbar de 2 mL. A configuração do cromatógrafo era com injeção de 2,5 µL da amostra em modo *splitless pulsado*, empregando a coluna capilar ZEBRON ZB - 5MS 30 m x 0,25 mm d x 0,25 µm Fase G27 – 5% Fenil Arileno e 95% Dimetilpolisiloxano. A temperatura do injetor foi ajustada para 200 °C e o gás de arraste utilizado foi o hélio, com grau de pureza de 99,99%, em fluxo constante de 1,0 mL·min⁻¹.

A programação do forno seguiu um perfil específico, em que iniciou-se isotermicamente em 35 °C por 1 min, seguido de incremento para 40 °C à taxa de 1 °C·min⁻¹ (mantido por 1 min) e, por fim, aumento rápido até 200 °C à taxa de 30 °C·min⁻¹. A temperatura do analisador de massas do tipo troca iônica foi mantida a 180 °C e da linha de transferência a 200 °C, assegurando as condições para separação e detecção dos analitos. A curva analítica dos trihalometanos (TCM, BDCM, DBCM e TBM) foi construída tendo suas características analíticas descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros analíticos para curva analítica dos trihalometanos

Parâmetros analíticos	TCM	BDCM	DBCM	TBM
Curva analítica	1 a 60 µg·L ⁻¹			
Coeficiente de determinação (R^2)	0,934	0,932	0,971	0,943

Fonte: a autora (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais realizados ao longo da pesquisa. Inicialmente, são descritas as características físico-químicas da amostra, que fornecem subsídios fundamentais para a interpretação dos processos envolvidos na desinfecção e na formação de subprodutos.

Em seguida, são abordados os ensaios de cloração aplicados ao efluente tratado, com o objetivo de avaliar sua eficácia microbiológica e química. A partir dessas etapas, procede-se à quantificação do alquilbenzeno linear sulfonato (LAS), principal surfactante aniquilado no processo, e cuja presença influencia diretamente na dinâmica de formação de subprodutos halogenados. Por fim, são apresentados os resultados da quantificação dos trihalometanos (THM), compostos resultantes da reação do cloro com matéria orgânica, cujos perfis de toxicidade e persistência ambiental tornam sua análise essencial para uma avaliação crítica da segurança sanitária e ambiental do processo.

4.1 MONITORAMENTO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas realizadas constituem a base para a compreensão do comportamento do efluente. Com base nisso, foram monitorados na amostra bruta parâmetros como pH, temperatura, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), condutividade elétrica, sólidos totais, série de nitrogênio e fósforo total, visando avaliar as condições iniciais do sistema. Estes dados (Tabela 4) são essenciais para interpretar tanto o comportamento do LAS quanto os potenciais riscos relacionados à formação de subprodutos de desinfecção, como trihalometanos.

Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos analisados

Parâmetros	Efluente coletado (UASB)	Resolução ambiental dos parâmetros
DQO (mg.O ₂ .L ⁻¹)	47,1 ± 5,0	DQO < 120 mg.L ⁻¹ considerado aceitável por licenciamentos ambientais para lançamento direto, embora a resolução não estabeleça um limite.
Fósforo total (mg.L ⁻¹)	2,8 ± 0,4	Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece 0,05 mg.L ⁻¹ para corpos d'água classe 2 e 0,15 mg.L ⁻¹ para classe 3.
Nitrogênio amoniacal (mg.L ⁻¹)	13,9 ± 0,7	A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece o limite de 20 mg.L ⁻¹ de nitrogênio amoniacal.
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	22,9 ± 0,6	Não há limite específico para NTK. Resoluções estaduais adotam o parâmetro de nitrogênio amoniacal como referência.
pH	6,8 ± 0,1	Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece entre 5,0 e 9,0.
Temperatura (°C)	24,7 ± 1,3	Resolução CONAMA nº 430/2011, a temperatura do efluente deve ser inferior a 40°C.
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	776,0 ± 1,0	Conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005, não há limite específico para condutividade elétrica em corpos d'água.
Turbidez (NTU)	13,6 ± 0,9	A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que a turbidez máxima permitida varia conforme a classe da água, indo de 40 NTU (classe 1) a até 100 NTU (classes 2 e 3).
Sólidos totais (mg ST.L ⁻¹)	451,6 ± 166,7	As resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 não estabelecem limite específico para sólidos totais.

Fonte: a autora (2025)

A DQO expressa a quantidade de oxigênio necessário para oxidar matéria orgânica e inorgânica em amostras de efluentes, sendo um indicador importante de carga poluente. O valor obtido expressa carga orgânica baixa e boa eficiência do tratamento anaeróbico com reator UASB, já que a faixa típica varia entre 50 e 150 mg.L⁻¹. No geral, valores de DQO abaixo da média indicam operação estável ou

baixa carga orgânica afluente, e embora a Resolução CONAMA nº 357/2005 não estabeleça limites específicos para lançamentos diretos, o resultado obtido está abaixo dos níveis normalmente, sendo considerado compatível com os padrões de qualidade quando associado a baixos teores de DBO, sólidos e nutrientes.

O fósforo total representa a soma de todas as suas formas presentes na amostra, como ortofosfatos, polifosfatos e compostos orgânicos. Por meio do resultado obtido, observou-se baixa eficiência na remoção de fósforo, como já esperado para esse tipo de processo anaeróbico. Apesar da eficiência na remoção de matéria orgânica, os reatores UASB não são projetados para eliminar nutrientes, como o fósforo. O valor de fósforo total excede os limites, como apresentado na Tabela 4. Entretanto, os limites legais não se aplicam diretamente ao efluente isolado, mas sim ao resultado da diluição, devendo-se considerar em conjunto as propriedades do efluente e do corpo receptor. Fatores como pH, carga orgânica e tempo de detenção hidráulica também influenciam na eficiência da remoção (Lima Neto; Toné, 2020; Liu *et al.*, 2022).

O nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), gerado pela degradação da matéria orgânica, apresentou concentração inferior ao limite estabelecido pela legislação, conforme apresentado na Tabela 4. No entanto, sua remoção foi limitada, com valores próximos ao permitido, comportamento típico de sistemas anaeróbios, que não realizam nitrificação. A permanência de amônia no efluente, somada aos altos níveis de fósforo total, eleva o risco de eutrofização, agravado sob pH elevado, que favorece a formação de amônia livre, mais tóxica. Além disso, o sistema apresentou NTK elevado (Tabela 4), indicando acúmulo de formas reduzidas de nitrogênio, como amônia e nitrogênio orgânico. Para mitigar esses impactos e atender aos padrões ambientais, recomenda-se a adoção de tratamento complementar (Oliveira, 2024).

Observa-se pela literatura que sistemas de tratamento biológico operam idealmente com pH entre 6,5 e 8,5, faixa que favorece o desenvolvimento e a atividade dos microrganismos responsáveis pela degradação dos poluentes (APHA, 2017). Dando continuidade à análise da Tabela 4, o valor de pH obtido indica que o sistema está operando dentro dos limites adequados para a eficiência microbiológica e compatível com o lançamento em corpos hídricos, conforme os padrões ambientais.

O pH ligeiramente ácido, abaixo de 7, é típico de sistemas anaeróbios devido à produção de ácidos voláteis durante a degradação da matéria orgânica. Apesar disso, o resultado mostra estabilidade operacional, o que favorece a atividade

microbiológica e evita oscilações que possam comprometer a qualidade do efluente (Miranda, 2020). Essa faixa de pH contribui para a eficiência microbiológica do tratamento e influencia diretamente processos como cloração, já que o ácido hipocloroso (HOCl), forma mais eficaz do cloro, predomina em pH abaixo de 7,5.

A temperatura observada na Tabela 4 está dentro da faixa ideal para atividade microbiana ($20^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$), favorecendo a degradação da matéria orgânica e indicando condições adequadas para o funcionamento do sistema biológico (Mendonça, 2024). A baixa variação entre amostras revela estabilidade térmica, compatível com o desempenho do reator UASB e alinhada aos resultados de DQO. Além disso, a manutenção dessa faixa contribui para reduzir o risco de toxicidade da amônia livre, especialmente em conjunto com os valores de pH, fósforo e nitrogênio amoniacal, reforçando a importância do controle operacional na mitigação de impactos ambientais.

A condutividade elétrica observada (Tabela 4) indica uma moderada concentração de íons dissolvidos, condizente com os valores típicos de efluentes domésticos tratados ($500\text{--}1500 \mu\text{S.cm}^{-1}$). Embora a resolução ambiental não estabeleça limite específico, ele serve como indicador indireto da presença de sólidos dissolvidos totais (SDT) e sinaliza potenciais impactos ambientais, especialmente em corpos receptores de baixa vazão (Oliveira, 2024).

O valor de turbidez registrado indica uma concentração moderada de partículas em suspensão, reflexo dos reatores UASB na retenção de sólidos coloidais. Apesar de estar abaixo do limite máximo permitido para lançamento em corpos hídricos de classes 2 e 3 (100 NTU, conforme CONAMA 430/2011), a turbidez, associada às concentrações elevadas de fósforo total e nitrogênio amoniacal, contribui para o risco de eutrofização e reduz a penetração de luz, afetando processos fotossintéticos e o equilíbrio ecológico.

Por fim, o valor de sólidos totais evidencia carga significativa de matéria dissolvida e suspensa, incluindo sais, matéria orgânica e partículas coloidais, resultado esperado da natureza do processo UASB. Apesar de não haver limite específico, concentrações elevadas de ST comprometem a transparência da água e a oxigenação, interferindo na fotossíntese e afetando diretamente a biota aquática, especialmente quando associadas à turbidez acima de 13 NTU, fósforo total elevado e nitrogênio amoniacal residual, que juntos ampliam o risco de eutrofização. A estabilidade operacional observada nos parâmetros de pH, temperatura e

condutividade indica controle adequado do sistema, mas não suficiente para atender a exigências de reúso ou lançamento em corpos sensíveis.

A análise dos parâmetros revela que o efluente tratado por reatores UASB apresenta eficiência restrita na remoção de poluentes, conforme previsto na literatura, razão pela qual é comum sua associação com processos aeróbios complementares. Embora o pH, a temperatura, condutividade e a DQO permaneçam estáveis e favoráveis à atividade microbólica, a turbidez elevada, o nitrogênio amoniacal residual e o excesso de fósforo total comprometem a qualidade final do efluente, favorecendo processos de eutrofização. Os sólidos totais reforçam a presença de matéria dissolvida e suspensa, com potencial impacto ambiental, especialmente em contextos de reúso ou lançamento em corpos hídricos sensíveis. Os resultados demonstram que o tratamento secundário isolado é insuficiente, sendo necessária sua complementação por meio da lagoa de polimento já existente na ETE ou pela adoção de novas metodologias adicionais de tratamento.

4.2 ENSAIOS DE CLORAÇÃO

Os ensaios de cloração com hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio e hipoclorito de sódio *in loco* foram fundamentais para avaliar a eficiência da desinfecção do efluente proveniente de um tratamento secundário da ETE Mangueira. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para cloro residual livre, combinado e total, discriminados conforme os diferentes tipos de agentes clorados utilizados no processo.

Tabela 5 – Cloro livre e total conforme os diferentes agentes clorados utilizados no processo

Agentes clorantes	Cloro residual livre (mg.L⁻¹)	Cloro total (mg.L⁻¹)
Hipoclorito de cálcio	< LQ	5,6 ± 0,1
Hipoclorito de sódio	< LQ	3,8 ± 0,1
Hipoclorito de sódio <i>in loco</i>	< LQ	3,3 ± 0,1

<LQ: menor que o limite de quantificação 0,05 mg.L⁻¹. Fonte: a autora (2025)

Os ensaios de cloração com os desinfetantes hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio comercial e hipoclorito de sódio gerado *in loco* foram conduzidos visando à avaliação da eficiência da desinfecção do efluente coletado, por meio da aplicação de agentes oxidantes. Através do método iodométrico, foram determinados os volumes de cada agente utilizado no *Jar Test* para 2L de efluente, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Cloro ativo dos diferentes agentes de desinfecção utilizados no processo

Agentes corantes	Amostra analisada do desinfetante	Teor de cloro ativo (mg.L⁻¹)	Volume no Jar Test (mL)
	(mL)		
Hipoclorito de cálcio	50,0	440,0	45,4
Hipoclorito de sódio	100,0	649,0	31,0
Hipoclorito de sódio <i>in loco</i>	50,0	957,0	21,0

Fonte: a autora (2025)

A partir da Tabela 6, observa-se que os valores de cloro livre permaneceram abaixo da curva esperada para todos os agentes desinfetantes, sugerindo consumo imediato pelo efluente ou subdosagem do oxidante. Esse comportamento é típico em efluentes com elevada carga nitrogenada, nos quais a formação rápida de cloraminas reduz a disponibilidade de cloro livre, comprometendo a eficiência da desinfecção.

Em relação a formação de cloro total, todos os agentes apresentaram concentrações, demonstrando a presença significativa de cloraminas (Tabela 6). Como o efluente tratado por UASB contém nitrogênio amoniacal, é comum a formação de cloro combinado (Rocha, 2023). Como o teor de cloro residual livre foi abaixo ao limite de quantificação do método, inferiu-se que o teor de cloro residual combinado foi igual ao total. Embora o cloro combinado seja menos potente que o cloro livre, sua concentração está dentro dos limites recomendados para garantir a segurança microbiológica.

Apesar de apresentarem no experimento teor equivalente de cloro ativo, o hipoclorito de sódio exibiu menor concentração de cloro total em comparação ao hipoclorito de cálcio, devido à sua menor estabilidade frente à luz, temperatura e tempo de armazenamento, fatores que aceleram sua degradação antes ou durante a aplicação. Além disso, o hipoclorito de cálcio detém maior estabilidade frente a

variações, o que contribui para a manutenção da concentração de cloro ativo até o momento da aplicação e sua formulação sólida também reduz perdas por volatilização e facilita o transporte e armazenamento em ambientes com infraestrutura limitada. No entanto, pode apresentar desafios operacionais, como maior risco de incrustações e necessidade de controle rigoroso da dosagem para evitar excesso de resíduos sólidos no sistema. O pH elevado do NaClO favorece a predominância de íons hipoclorito (ClO^-), menos eficientes na desinfecção que o ácido hipocloroso (HOCl), predominante em pH inferior a 7,5 (Ogawa; Kawase, 2021). Ainda assim, o hipoclorito de sódio pode ser eficaz, conforme as condições operacionais e as características do efluente.

Em relação ao hipoclorito de sódio gerado *in loco*, os valores obtidos foram inferiores aos registrados para os demais agentes desinfetantes (hipoclorito de sódio e de cálcio), indicando que a dosagem aplicada pode não ter sido suficiente para atender à demanda de cloro do efluente. A menor eficiência observada provavelmente se deve à baixa concentração, condições operacionais subótimas e dosagem insuficiente frente à demanda de cloro do efluente. Para melhorar o desempenho, seria necessário recalibrar a dosagem, monitorar o cloro residual livre e ajustar os parâmetros de geração e aplicação (Rocha, 2023).

Concluindo, observa-se que a cloração com hipoclorito de sódio gerado *in loco* resultou em menores concentrações de cloro total, em comparação aos demais agentes, devido à influência de variáveis operacionais. O hipoclorito de cálcio apresenta maior teor de cloro ativo, assegurando melhor disponibilidade após o preparo. Já o hipoclorito de sódio comercial, embora com concentração inferior ao de cálcio, possui teor superior ao produto *in loco*, obtido por eletrólise de salmoura.

4.3 QUANTIFICAÇÃO DO ALQUIBENZENO LINEAR SULFONATO

A quantificação do alquilbenzeno linear sulfonato presente no efluente tratado por reator UASB e submetido à cloração com diferentes agentes oxidantes foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). A concentração total de LAS no efluente e nos agentes clorantes, distribuída entre os homólogos C₁₀, C₁₁, C₁₂ e C₁₃, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Concentração do homólogo da LAS presente no efluente UASB e após uso dos agentes clorantes

Homólogos - LAS	Concentração de LAS ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)			
	Efluente UASB	Uso de hipoclorito de cálcio	Uso de hipoclorito de sódio	Uso de hipoclorito <i>in loco</i>
C ₁₀	205 ± 35	185 ± 42	165 ± 30	195 ± 23
C ₁₁	516 ± 54	420 ± 58	450 ± 22	383 ± 11
C ₁₂	311 ± 56	242 ± 45	291 ± 24	227 ± 9
C ₁₃	108 ± 12	88 ± 28	124 ± 25	90 ± 4
Total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	1141	935	1031	895

Fonte: a autora (2025)

A Tabela 7 apresenta que o efluente na saída do reator UASB apresentou valores de concentração do LAS distribuído entre os homólogos. O C₁₁ foi o homólogo predominante, seguido por C₁₂, C₁₀ e C₁₃, o que está em consonância com a composição típica do LAS comercial e com a maior resistência de cadeias mais longas à degradação anaeróbia. A presença residual de alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) pode ocasionar impactos ambientais significativos quando não submetida a processos de tratamento eficientes. Devido ao seu potencial de bioacumulação, o LAS contribui para a formação persistente de espuma, redução da tensão superficial da água e elevação da toxicidade em ambientes aquáticos, afetando especialmente organismos sensíveis (Gong *et al.*, 2016).

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece um limite de 0,5 mg.L⁻¹ (500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) para tensoativos aniónicos em águas doces de classe 2, o que significa que o valor de C₁₁ isoladamente já estaria no limite permitido e a soma dos homólogos ultrapassa esse valor. Entretanto, no lançamento de efluentes, aplica-se a equação da mistura para avaliar a conformidade com os padrões de qualidade. Os valores estabelecidos na legislação não se aplicam diretamente ao efluente, mas sim ao resultado obtido após o cálculo que considera tanto as características do efluente quanto as do corpo receptor. Para mitigar os impactos, recomenda-se a aplicação de tratamento complementar.

O efluente clorado com hipoclorito de cálcio apresentou distribuição de LAS entre os homólogos conforme os valores médios da Tabela 7. Observou-se redução parcial das concentrações em relação ao efluente UASB, embora ainda persistam níveis significativos no final. O hipoclorito de cálcio, por seu alto teor de cloro ativo e maior estabilidade, favorece a degradação de compostos como o LAS (Alcântara, 2022). A maior redução foi observada no C₁₃, indicando maior suscetibilidade à oxidação, enquanto o C₁₁ manteve a maior concentração residual, possivelmente por maior resistência ou predominância na formulação original. Apesar da cloração, os valores continuam acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, indicando que o processo de desinfecção com hipoclorito de cálcio, embora eficaz, não promoveu uma boa remoção do LAS.

O efluente clorado com hipoclorito de sódio apresentou concentração total de LAS distribuída entre os homólogos conforme a Tabela 7. Houve redução parcial em relação ao efluente UASB, porém com menor eficiência comparada ao hipoclorito de cálcio. A eficácia do hipoclorito de sódio na degradação do LAS depende de fatores como teor de cloro ativo, tempo de contato, pH e interferência de matéria orgânica (Koga, 2019). O homólogo C₁₁ manteve a maior concentração residual, indicando maior resistência à oxidação, enquanto o C₁₃ apresentou maior redução, possivelmente pela maior reatividade da cadeia alquílica. A soma dos homólogos excede o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

O efluente tratado com hipoclorito de sódio produzido *in loco* apresentou concentração total de LAS, com distribuição entre os homólogos, havendo uma redução dos níveis de LAS em relação ao efluente UASB, com desempenho superior entre os agentes clorantes avaliados. O hipoclorito gerado por eletrólise de solução salina possui maior potencial oxidativo, favorecendo a degradação de compostos como o LAS (Rocha, 2023). O homólogo C₁₁ apresentou a maior concentração residual, compatível com sua predominância comercial e resistência à oxidação, enquanto o C₁₃ teve a maior redução proporcional. Apesar da redução, a soma dos homólogos excede o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005.

4.4 QUANTIFICAÇÃO DOS TRIHALOMETANOS

A formação de THM no efluente doméstico clorado foi avaliada por meio de análises cromatográficas, com foco nos compostos clorofórmio (TCM),

bromodiclorometano (BDCM), dibromoclorometano (DBCM) e bromofórmio (TBM). A quantificação seguiu a metodologia de Franco (2018), com amostragem pós-cloração e tempo de contato padronizado. Os dados obtidos (Tabela 8) foram correlacionados com parâmetros físico-químicos, concentração de cloro residual e do LAS.

Tabela 8 – Concentrações de THMs em efluente doméstico tratado por UASB sob diferentes estratégias de cloração

THM	Concentração de THM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)			
	Efluente UASB	Uso de hipoclorito de cálcio	Uso de hipoclorito de sódio	Uso de hipoclorito de sódio <i>in loco</i>
Clorofórmio (TCM)	< LQ	10 ± 4	8 ± 1	5 ± 3
Bromodiclorometano (BDCM)	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Dibromoclorometano (DBCM)	< LQ	2 ± 1	< LQ	< LQ
Bromofórmio (TBM)	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ

< LQ: menor que o limite de quantificação = $1\mu\text{g.L}^{-1}$. Fonte: a autora (2025)

O efluente doméstico tratado (sem a adição de agentes desinfetantes) apresentou níveis (Tabela 8) de trihalometanos (TCM, BDCM, DBCM e TBM) abaixo do limite de quantificação estabelecido pela metodologia analítica aplicada. Esse resultado indica que, embora haja possibilidade da presença desses compostos, suas concentrações são tão reduzidas que não podem ser detectadas com confiabilidade pelos instrumentos utilizados. A ausência de valores mensuráveis evidência que, na ausência agentes clorantes, o processo UASB não detém reações químicas secundárias que levam à formação desses contaminantes, o que é ser positivo do ponto de vista ambiental e sanitário, especialmente em sistemas de reuso agrícola ou não potável (Rodrigues, 2023).

No entanto, vale destacar que estar abaixo do LQ não significa ausência absoluta dos compostos, apenas que sua presença está em níveis extremamente baixos, o que exige atenção em etapas posteriores de desinfecção. Outro fator crítico

é a concentração de LAS que resiste à degradação em ambientes exclusivamente anaeróbios (UASB) que pode reagir com agentes oxidantes, favorecendo a formação de compostos halogenados como THM. Esse cenário reforça a importância de considerar o LAS como indicador indireto de risco químico nesses ambientes, exigindo medidas de pós-tratamento aeróbios para garantir segurança ambiental e sanitária, como já ocorre na ETE em que ocorreu a coleta.

Com base na Tabela 8, os resultados obtidos para os compostos BDCM, DBCM e TBM evidenciam variações importantes no comportamento desses THM em função do tipo de agente clorante aplicado ao efluente tratado por reator UASB. Em relação ao BDCM e TBM, observou-se que em todas as condições experimentais suas concentrações se mantiveram consistentemente abaixo do limite de quantificação (< LQ). Esse resultado sugere que, embora estes compostos possam ter sido formados em traços, suas concentrações não atingiram níveis quantificáveis pelo método empregado. Tal ocorrência pode estar relacionada a baixa disponibilidade de brometos e a predominância de homólogos do LAS com menor propensão à halogenação bromada, como o C₁₁, explicando a ausência de BDCM e TBM em níveis detectáveis (Gong *et al.*, 2016).

A menor reatividade desses compostos frente aos agentes oxidantes utilizados, como o hipoclorito de sódio e o hipoclorito de cálcio, contribui para sua não quantificação, uma vez que a formação de bromados exige condições específicas, como pH mais baixo (abaixo de 4) e presença significativa de brometos. Além disso, a velocidade de reação do cloro com compostos orgânicos bromados é menor em comparação com compostos clorados, especialmente em pH elevado (Rodrigues, 2023).

Por outro lado, o DBCM apresentou comportamento distinto quando utilizado hipoclorito de cálcio, registrando uma concentração quantificável. Esse dado reforça o potencial oxidativo desse agente, que favorece reações secundárias com formação expressiva de subprodutos halogenados. Esse resultado sugere que, mesmo diante da baixa disponibilidade de brometos, o ambiente reacional proporcionado pelo hipoclorito de cálcio favorece a incorporação do bromo na estrutura dos subprodutos halogenados. Nas demais condições, inclusive com o uso de hipoclorito de sódio, o DBCM manteve-se abaixo do limite de quantificação, reforçando que a formação desses compostos depende não apenas da composição do efluente, mas também do perfil reacional do oxidante utilizado. Nas demais condições, o DBCM também se

manteve abaixo do limite de quantificação, o que corrobora a hipótese de que a escolha do oxidante exerce influência direta sobre o perfil de formação de THM (Zhang *et al.*, 2023).

Ainda na Tabela 8, observa-se que o TCM foi o único THM que foi quantificado com valores médios sob diferentes condições de aplicação de agentes desinfetantes, revelando padrões distintos de formação conforme o tipo de hipoclorito utilizado, conforme foi observado no trabalho de Rocha (2023). No efluente tratado exclusivamente por reator UASB, sem qualquer adição de cloro, o TCM apresentou resultado abaixo do limite de quantificação (<LQ), o que indica que não houve contaminação cruzada entre os materiais utilizados na extração. Quando se aplicou hipoclorito de cálcio, observou-se a maior concentração de TCM, indicando que este agente possui maior capacidade de oxidar matéria orgânica e halogenada presente no efluente. Essa característica favorece reações com a matéria orgânica, incluindo o LAS, que atua como precursor indireto de THM. A presença de sólidos totais, turbidez elevada e pH favorável à cloração também contribui para a formação expressiva de TCM nessa condição, promovendo reações que geram concentrações elevadas de subprodutos (Oliveira; Silva; Brito, 2024).

O uso de hipoclorito de sódio comercial resultou em uma concentração intermediária de TCM. Por fim, o tratamento com hipoclorito de sódio produzido *in loco* apresentou a menor concentração média de TCM, o que demonstra um potencial controle na formação de subprodutos, relacionado à maior estabilidade operacional e à menor concentração efetiva do oxidante durante o processo.

Os dados demonstram que a formação de trihalometanos (THM), sobretudo o clorofórmio (TCM), está fortemente relacionada ao tipo de agente clorante e às condições de reação aplicadas. O tratamento com hipoclorito de cálcio gerou as maiores concentrações de TCM e DBCM, evidenciando maior potencial de formação de subprodutos halogenados com reconhecida toxicidade e risco carcinogênico. Em contrapartida, o hipoclorito de sódio produzido *in loco* revelou desempenho mais controlado, com menores teores desses contaminantes. Essa variação entre agentes oxidantes deve ser considerada no planejamento de estratégias de desinfecção, especialmente em sistemas que exigem rigor ambiental e controle de qualidade química, como reúso de água ou lançamento em corpos hídricos sensíveis. Assim, a escolha do desinfetante assume papel decisivo na mitigação dos riscos sanitários e ambientais associados aos THMs.

Por fim, com base nos resultados obtidos para LAS e THM, conclui-se que a metodologia experimental aplicada de forma pontual não apresentou desempenho superior em relação aos sistemas que incorporam pós-tratamento aeróbio. Os valores observados indicam limitações na eficiência de remoção de contaminantes orgânicos e na mitigação da formação de subprodutos halogenados em configurações que não utilizam lagoa de polimento. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de ajustes no processo, incluindo a otimização das condições operacionais e a escolha criteriosa de agentes desinfetantes para uma idealização de uma estação de tratamento compacta (sem lagoa de polimento). Tais modificações são essenciais para viabilizar a obtenção de resultados satisfatórios em estações compactas, garantindo conformidade com padrões de qualidade e segurança ambiental.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados das análises físico-químicas, dos ensaios de cloração e da quantificação dos homólogos do alquilbenzeno linear sulfonato (LAS), pode-se concluir que o efluente tratado por reator UASB apresentou características compatíveis com um sistema anaeróbio, evidenciando boa remoção da carga orgânica pH estável em torno de 6,88, e condutividade elétrica moderada, próxima de 775 µS/cm. No entanto, os valores de nitrogênio total, fósforo e de sólidos totais indicam presença significativa de nutrientes e matéria em suspensão, demonstrando a limitação do processo anaeróbio na remoção desses componentes.

A partir dos ensaios de cloração com hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio comercial e hipoclorito de sódio produzido *in loco*, aplicados ao efluente tratado, observou-se predominância de cloro residual combinado e ausência de cloro residual livre, típica de efluentes nitrogenados. Embora os valores de cloro residual total indiquem que a demanda foi atendida, a ausência de cloro residual livre pode comprometer a desinfecção microbiológica.

A aplicação dos diferentes agentes de cloração revelou que o hipoclorito de sódio *in loco* foi o mais eficiente na remoção dos homólogos do LAS, seguido pelo hipoclorito de cálcio, enquanto o hipoclorito de sódio comercial apresentou desempenho inferior. Ainda assim, os valores residuais de LAS após cloração permaneceram elevados, especialmente para o homólogo C₁₁, cuja persistência pode estar relacionada à sua maior concentração na formulação comercial e resistência à oxidação.

Os resultados evidenciados demonstram que a formação de trihalometanos (THM) no efluente tratado está relacionada à presença de precursores orgânicos e à escolha do agente desinfetante. Na ausência de cloração, os níveis de TCM, BDCM, DBCM e TBM ficaram abaixo do limite de quantificação, indicando a ausência desses compostos antes a etapa de desinfecção. O hipoclorito de cálcio apresentou maior potencial de geração de TCM e DBCM, enquanto o hipoclorito de sódio produzido *in loco* demonstrou melhor controle sobre esses compostos. Esses resultados destacam a importância da seleção criteriosa do agente clorante para reduzir impactos ambientais e sanitários, especialmente em sistemas com uso agrícola ou lançamento em corpos hídricos sensíveis.

Os dados demonstram que, embora o sistema UASB com cloração reduza parcialmente compostos orgânicos e tensoativos, sua eficiência é limitada frente às exigências ambientais. A formação de THM, especialmente TCM, reforça a necessidade de tratamentos complementares. Sendo assim, os resultados indicam que a metodologia aplicada não superou sistemas com pós-tratamento aeróbio, sobretudo em configurações sem lagoa de polimento. Isso evidencia a necessidade de ajustes operacionais, controle de parâmetros físico-químicos e seleção adequada de desinfetantes para viabilizar estações compactas (sem a lagoa de polimento) eficazes e ambientalmente seguras.

REFERÊNCIAS

- ABREU NETO, A. Q.; ROCHA, J. N.; MAGNUS, B. S.; KATO, M. T.; FLORENCIO, L. *Low formation of trihalomethanes in the disinfection of anaerobic effluent by electroactivated water.* **Environmental Technology**, p. 1–11, 2025.
- ALCÂNTARA, S. K. Estudo de estabilidade do hipoclorito de sódio a 2,5%. 2022. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia) – **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, Departamento de Farmácia, Natal, 2022.
- ALJABERI, F. Y.; ALARDHI, S. M.; AHMED, S. A.; SALMAN, A. D.; JUZSAKOVA, T.; CRETESCU, I.; NGUYEN, D. D. et al. *Can electrocoagulation technology be integrated with wastewater treatment systems to improve treatment efficiency?* **Environmental Research**, v. 214, p. 113890, 2022.
- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. [S.I.]: **American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation**, 2017.
- AWWA. Water Chlorination/Chloramination Practices and Principles. Denver, CO: **American Water Works Association**, 2006.
- AZEVEDO, F. M. G.; HELLGREN, A. J.; BIONDO, S. R.; GIRELLI, R. A.; FONTANA, A. C. D.; PALUDO, A. K.; TAUFER, C. Hipoclorito de cálcio como solução irrigadora na endodontia: revisão de literatura. **Revista de Ciências da Saúde – REVIVA**, v. 3, n. 2, 2024.
- AZUMA, T.; HAYASHI, T. *On-site chlorination responsible for effective disinfection of wastewater from hospital.* **Science of the Total Environment**, v. 776, p. 145951, 2021.
- BAIN & COMPANY; GAS ENERGY. Estudo do potencial de diversificação da indústria química brasileira: relatório final. São Paulo: **Bain & Company**, 2014. Disponível em: <https://developing-a-national-chemicals-strategy.pdf>. Acesso em: jul. 2025.
- BARRETO, Ó. S. C.; DOS SANTOS ALMEIDA, E.; MEDEIROS, D. L. *Life cycle assessment of biosurfactants: a critical analysis.* **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 1–18, 2024.
- BLACK & VEATCH CORPORATION. White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. 5. ed. Hoboken, NJ: **John Wiley & Sons, Inc.**, 2010.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH**: dados sobre qualidade da água e processos de desinfecção. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: Portal do SNIRH. Acesso em: 12 ago. 2025.

CHOQUE-QUISPE, D.; MASCO-ARRIOLA, M. L.; RAMOS-PACHECO, B. S.; LIGARDA-SAMANEZ, C. A.; SOLANO-REYNOSO, A. M.; CHOQUE-QUISPE, Y.; ALONZO-LANADO, J. F. Estudo da poluição por surfactantes em um rio de uma microbacia andina alta. **Dyna**, v. 88, n. 217, p. 9–12, 2021.

CUI, X.; REN, Q.; ZHANG, J.; ZHOU, Y. *Removal kinetics of linear alkylbenzene sulfonate in a batch-operated oxygen-based membrane biofilm reactor treating greywater: quantitative differentiation of adsorption and biodegradation*. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 150523, 2022.

GARBELINI, E.R. Avaliação da formação de trihalometanos em processos de cloração da água: efeito da natureza da matéria orgânica e de processos auxiliares de desinfecção. Curitiba: **Universidade Federal do Paraná**, 2017.

GARCIA, P. S. P.; JÚNIOR, J. G. M.; MACEDO, I. D. S. V.; TALACIMON, E. A. Aplicabilidade dos tensoativos em produtos cosméticos. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 79, p. 51–62, 2024.

GELETE, G.; GOKCEKUS, H.; OZSAHIN, D. U.; UZUN, B.; GICHAMO, T. Evaluating disinfection techniques of water treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 177, p. 408–415, 2020.

GONG, T.; ZHANG, X.; LI, Y.; XIAN, Q. *Formation and toxicity of halogenated disinfection byproducts resulting from linear alkylbenzene sulfonates*. **Chemosphere**, v. 149, p. 70–75, 2016.

GUEDES, A. P. Eficiência do uso de água ozonizada e hipoclorito de sódio no controle da microbiota da superfície de vegetais. Trabalho de Conclusão de Curso – **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, 2024.

HENRIMAR. **Você já ouviu falar no gerador de cloro?**. [S. l.: s. n.], 1 fev. 2019. Disponível em: <http://www.henrimar.com.br/gerador-de-cloro/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

HIDROGERON. Gerador de hipoclorito de sódio (cloro) in loco. Disponível em: <<https://hidrogeron.com/gerador-de-hipoclorito-de-sodio-cloro-in-loco-serie-gerador-estatico/>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

JOLLIET, O.; WANNAZ, C.; KILGALLON, J.; SPEIRS, L.; FRANCO, A.; LEHNER, B.; HODGES, J. *Spatial variability of ecosystem exposure to home and personal care chemicals in Asia*. **Environment International**, v. 134, p. 105260, 2020.

KIM, N. K.; LEE, S. H.; YOON, H.; JEONG, G.; JUNG, Y. J.; HUR, M.; PARK, H. D. *Microbiome degrading linear alkylbenzene sulfonate in activated sludge*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, p. 126365, 2021.

KOGA, A. Avaliação do uso do hipoclorito de sódio e ácido peracético na desinfecção de esgoto hospitalar sintético, 2019.

LU, P.; WANG, X.; TANG, Y.; DING, A.; YANG, H.; GUO, J.; LING, C. *Granular activated carbon assisted nitrate-dependent anaerobic methane oxidation-membrane bioreactor: Strengthening effect and mechanisms.* **Environment International**, v. 138, p. 105675, 2020.

LIMA NETO, I. E.; TONÉ, A. J. A. Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. **Revista DAE**, São Paulo, v. 68, n. 221, p. 142–156, jan./mar. 2020.

LIU, D.; BAI, L.; LI, X.; ZHANG, Y.; QIAO, Q.; LU, Z.; LIU, J. *Spatial characteristics and driving forces of anthropogenic phosphorus emissions in the Yangtze River Economic Belt, China.* **Resources, Conservation and Recycling**, v. 176, p. 105937, 2022.

LUO, J.; ZHANG, Q.; ZHAO, J.; WU, Y.; WU, L.; LI, H.; WANG, D. *Potential influences of exogenous pollutants occurred in waste activated sludge on anaerobic digestion: A review.* **Journal of Hazardous Materials**, v. 383, p. 121176, 2020.

MACLER PRODUTOS QUÍMICOS LTDA. Uma visão geral sobre tensão superficial e tensoativos. **Macler Academy**, 11 jun. 2024. Disponível em: <<https://www.maclar.com.br/post/2024/06/11/uma-visao-geral-sobre-tensao-superficial-e-tensoativos>>. Acesso em: jul. 2025.

MANGELLI, L. N. R. Estudo de poluentes orgânicos por GCXGC/TOFMS em lodo gerado em ETA por coagulação convencional e a utilização de um biopolímero à base de tanino. 2023. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – **Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2023.

METCALF, E. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: **AMGH Editora**, 2016.

MOTTERAN, F.; OKADA, D. Y.; DELFORNO, T. P.; VARESCHE, M. B. A. *Influence of cosubstrates for linear anionic sulfonated alkylbenzene degradation and methane production in anaerobic batch reactors.* **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 60–68, 2020.

OGAWA, T.; KAWASE, Y. Effect of solution pH on removal of SDBS. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 105928, 2021.

OLIVEIRA, D. K.; SILVA, L. Q.; BRITO, N. N. Monitoramento de trihalometanos (THMs) e da qualidade da água para abastecimento público da cidade de Cavalcante, Goiás. **Química Nova**, v. 47, n. 4, p. e-20230116, 2024.

OLIVEIRA, M. G.; QUEIROZ, G. A. R.; VASCONCELOS, S. R. F.; SANTOS, A. B. Efeito da microaeração e tempo de detenção hidráulica na remoção de alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) em reatores UASB. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – SILUBESA, 27., 2024, Recife. Anais [...]. Recife: **ABES**, 2024. p. 652.

PASTRE, F.; MAURICIO, C. R. M.; DECHECHI, E. C.; MUSSI, F. B. Evolução dos serviços de coleta e tratamento de esgoto no cenário brasileiro: uma análise para alcançar as metas do Novo Marco Legal do Saneamento Básico. In: SINGEP – Simpósio Internacional de Gestão, Projetos, Inovação e Sustentabilidade, São Paulo. **Institute of Knowlegde**, 2023. p. 1–15.

PIANOWSKI, E. H.; JANISSEK, P. R. Desinfecção de efluentes sanitários com uso de cloro: avaliação da formação de trihalometanos. **Sanare**, v. 20, n. 20, 2003.

PORTAL ESTADÃO. Espuma no rio Tietê em Pirapora do Bom Jesus. 2015. Disponível em: <<https://www.estadao.com.br>>. Acesso em: jun. 2025.

ROCHA, J. Desinfecção de efluente sanitário anaeróbio com cloro: formação de trihalometanos e inativação microbiana. 2023. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – **Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**, Recife, 2023.

ROCHA, J.; QUIRINO, A.; SAMPAIO, A. K.; MAGNUS, B. S.; KATO, M.; FLORENCIO, L. *Oxidation of Linear Alkylbenzene Sulfonate by Electroactivated Water Treatment*. In: **Seventh International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering**, 2023, Marseille. Proceedings 7th ISEBE. Mexico: IRD-ABIAER, 2023. v. 1. p. 1-1.

RODRIGUES, P. Fatores determinantes na formação de trihalometanos em água potável. São Paulo: **Centro de Pós-Graduação Oswaldo Cruz**, 2023.

SÁ, G. C.; BRAZ, M. E. B. Água sanitária: análise da concentração de cloro ativo e reações adversas do uso doméstico indevido. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Química) – **Etec Júlio de Mesquita**, Santo André, 2024.

SANTOS, C. T. C. Proposição alternativa para desinfecção de água no Campus Central da UFRN. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso – **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, Natal, 2020.

SANTOS, M. V. A. D.; MORAIS, J. C. D.; VERAS, S. T. S.; LEITE, W. R. M.; GAVAZZA, S.; FLORENCIO, L.; KATO, M. T. Reatores híbridos anaeróbio e aeróbio para remoção de matéria orgânica e nitrogênio em esgoto doméstico diluído. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 591–600, 2021.

SILVA, L. G.; FREITAS, D. M. S.; FONSECA, R. M.; LEITE, W. R. M.; KATO, M. T. Degradação dos homólogos do alquilbenzeno linear sulfonato. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 391–401, 2017b

SILVA, L. G. Determinação e remoção do alquilbenzeno linear sulfonado (LAS) de esgoto doméstico em reatores híbridos sequenciais anaeróbio e aeróbio. 2024. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – **Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**, Recife, 2024.

SILVA, L. G. da; VERAS, S. T. S.; NOGUEIRA, E. M. M.; BROCHADO, R. P. S.; MARINHO, I. da C.; FREITAS, D. M. da S.; MOTTERAN, F.; PAULO, P. L.; KATO, M. T. Surfactantes em esgoto sanitário e no meio ambiente: presença, remoção e toxicidade. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, n. 4, p. 37–51, 2025. Disponível em: abes-dn.org.br. Acesso em: 5 ago. 2025.

SILVA, Y. A.; DE SOUZA FERREIRA, H.; SARUBBO, L. A.; DE LUNA, J. M. Biosurfactantes: uma alternativa sustentável no combate à resistência antimicrobiana. In: SUSTENTABILIDADE, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE: tópicos atuais em pesquisa. Volume 4. São Paulo: **Editora Científica Digital**, p. 8–28, 2024.

SRIVASTAV, A. L.; PATEL, N.; CHAUDHARY, V. K. *Disinfection by-products in drinking water*. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115474, 2020.

SIYAL, A. A.; SHAMSUDDIN, M. R.; LOW, A.; RABAT, N. E. A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 254, p. 109797, 2020.

TONTU, M.; BILGILI, M.; SAHIN, B. *Thermo-economic analysis of chlor-alkali electrolysis for hydrogen production in the electrochlorination plant: Real case*. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 12, p. 8391–8400, fev. 2021.

TRAN, N. H.; REINHARD, M.; GIN, K. Y. H. Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions—a review. **Water Research**, v. 133, p. 182–207, 2018.

USEPA. **Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection**. Cincinnati, Ohio: [s.n.], 1999.

WANG, J.; JIAO, D.; YUAN, S.; CHEN, H.; DAI, J.; WANG, X.; QIU, D. Comparative analysis of microbial community under acclimation of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) surfactants and degradation mechanisms of functional strains. **Journal of Hazardous Materials**, v. 477, p. 135370, 2024.

WHO. *Principles and practices of drinking-water chlorination: a guide to strengthening chlorination practices in small-to medium sized water supplies*. Regional Office for South-East Asia: World Health Organization, 2017.

ZHANG, S.; LI, Y.; DONG, R.; LI, W.; QIAN, Z.; YANG, Y. All-in-one device for mapping the interactive effects of photodynamic therapy dosimetry in tumor gaseous microenvironment. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 239, p. 112645, 2023.