

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TAMIRIS PINZON SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

PORTO ALEGRE - RS
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TAMIRIS PINZON SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheiro de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Záchia Ayub

PORTO ALEGRE - RS
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

TAMIRIS PINZON SILVA

Aprovada em: ___/___/_____.

Comissão Examinadora

Professor Dr. Marco Antônio Záchia Ayub
Orientador – UFRGS

Professor Dr. Rafael da Costa Rodrigues
Departamento de Tecnologia de Alimentos
UFRGS

Professor Dr. Vitor Manfroi
Departamento de Tecnologia de Alimentos
UFRGS

RESUMO

As indústrias de bebidas geram volumes expressivos de efluentes líquidos, que precisam receber tratamento adequado antes de serem lançados nos corpos hídricos. O sistema de tratamento de efluentes misto é uma alternativa interessante para o tratamento deste tipo de rejeito pois é altamente eficiente na remoção de poluentes. Este sistema remove a carga orgânica por vias anaeróbias e aeróbias. Os processos se complementam, conferindo ao efluente tratado aspecto agradável e parâmetros de acordo com os padrões de lançamento previstos em legislação. O objetivo deste estudo foi avaliar as etapas do sistema de tratamento de efluentes e os resultados analíticos da ETE de uma indústria de bebidas localizada no Rio Grande do Sul no período de março de 2021. Verificou-se que o sistema é eficaz no tratamento de efluente pois atendeu aos parâmetros regulamentados pelos órgãos ambientais competentes e apresentou eficiência de $98,5 \pm 1,2\%$ de remoção de carga orgânica poluidora. No entanto, mesmo o efluente atendendo aos padrões de lançamento, foram propostas melhorias para estabelecer condições operacionais favoráveis.

Palavras-chave: Efluentes, Sistema de tratamento de efluentes, Estação de tratamento de efluentes, Reatores anaeróbios, Lodo ativado.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Fluxograma genérico de um sistema de tratamento de efluente..... | 12 |
| Figura 3.2: Esquema de sistema de lodo ativado com operação contínua | 16 |
| Figura 3.3: Esquema de sistema de lodo ativado com operação intermitente | 17 |
| Figura 3.4: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia | 18 |
| Figura 3.5: Representação esquemática de um reator UASB..... | 20 |
| Figura 3.6: Representação esquemática de um reator IC..... | 21 |
| Figura 5.2: Volume de controle CSO..... | 31 |
| Figura 5.3: Volume de controle tanque de equalização | 32 |
| Figura 5.4: Volume de controle dos pontos de neutralização..... | 34 |
| Figura 5.5: Volume de controle do reator UASB | 35 |
| Figura 5.6: Volume de controle do reator IC | 36 |
| Figura 5.7: Volume de controle do lodo ativado | 41 |
| Figura 5.8: Volume de controle dos espessadores | 43 |
| Figura 5.9: Volume de controle da centrífuga..... | 44 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1: Tipos de efluente na indústria | 28 |
| Tabela 5.2: Resultados analíticos do efluente bruto..... | 31 |
| Tabela 5.3: Resultados analíticos de entrada e saída no tanque de equalização..... | 33 |
| Tabela 5.4: Resultados analíticos da etapa anaeróbia..... | 37 |
| Tabela 5.5: Resultados analíticos de entrada e saída dos reatores anaeróbios | 38 |
| Tabela 5.6: Resultados analíticos da etapa aeróbia..... | 40 |
| Tabela 5.7: Resultados analíticos do efluente tratado e padrões legais de emissão | 42 |
| Tabela 5.8: Eficiência do sistema de tratamento de efluentes | 43 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------------------|---|
| AME | Atividade Metanogênica Específica |
| CIP | Clean in place |
| CO | Carga Orgânica |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONSEMA | Conselho Estadual do Meio Ambiente |
| CSO | Caixa Separadora de Óleos |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluente |
| FEPAM | Fundação Estadual de Proteção Ambiental |
| F/M | <i>Food-to-microorganism ratio</i> |
| IC | <i>Internal Circulation Reactor</i> |
| IVL | Índice Volumétrico de Lodo |
| kg DQO/dia | Quilogramas de DQO por dia |
| L | Litros |
| LO | Licença de Operação |
| mg | Miligrama |
| mg/L | Miligrama por litro |
| mL/L | Mililitros por litro |
| m ³ | Metro cúbico |
| m ³ /h | Metro cúbico por hora |
| PAC | Policloreto de Alumínio |
| PET | Polietileno Tereftalato |

| | |
|------|--|
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| STE | Sistema de Tratamento de Efluentes |
| T | Temperatura |
| UASB | <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i> |
| UV | Ultravioleta |
| °C | Graus Celsius |
| %R | Percentual de remoção |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 OBJETIVOS..... | 10 |
| 2.1 Objetivo Geral | 10 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 10 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 11 |
| 3.1 Efluente industrial..... | 11 |
| 3.2 Regulamentação | 11 |
| 3.3 Sistema de tratamento de efluente..... | 11 |
| 3.3.1 Tratamento preliminar | 12 |
| 3.3.2 Tratamento primário..... | 13 |
| 3.3.3 Tratamento secundário | 15 |
| 3.3.4 Tratamento terciário..... | 22 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 23 |
| 4.1 Instrumentação..... | 23 |
| 4.2 Monitoramento analítico | 24 |
| 4.3 Cálculos | 26 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 5.1 Elevatórias | 30 |
| 5.2 Recebimento do efluente bruto..... | 30 |
| 5.3 Tanque de Equalização..... | 32 |
| 5.4 Neutralização | 33 |
| 5.5 Tratamento Anaeróbio..... | 34 |
| 5.5.1 Reator UASB | 35 |
| 5.5.2 Reator IC | 35 |
| 5.5.3 Resultados analíticos da etapa anaeróbia..... | 36 |
| 5.6 Gasômetro | 39 |
| 5.7 Tratamento aeróbio | 39 |
| 5.8 Efluente tratado..... | 41 |
| 5.8 Espessador | 43 |
| 5.9 Centrífuga | 44 |
| 6 CONCLUSÃO | 46 |
| 6.1 Oportunidades..... | 46 |
| 6.1.1 Efluente bruto | 46 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 6.1.2 Equalização | 46 |
| 6.1.3 Gasômetro | 47 |
| 6.1.4 Tratamento aeróbio..... | 47 |
| 6.1.5 Condicionamento do lodo | 47 |
| REFERÊNCIAS..... | 49 |

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de bebidas constituem um importante setor da indústria de transformação. No Brasil, em 2019 o setor obteve faturamento de R\$ 137 bilhões, que equivalem a 1,9% do PIB do ano. Dentre as bebidas não alcoólicas, o refrigerante tem grande destaque pois correspondeu a 71,6% das vendas em volume nesse período (BANCO DO NORDESTE, 2020).

Para atender a tamanha demanda, é necessária produção em larga escala. Em 2019 foram produzidos 12.654.484 m³ de refrigerantes no Brasil. Embora no período de 2020 a 2021 tenha havido queda no consumo, a estimativa para os próximos anos é de incremento na absorção do produto: é esperado consumo de 9.824.000 m³ deste tipo de bebida, com expectativa de crescimento para os anos seguintes (BANCO DO NORDESTE, 2020). Considerando o gasto médio de 1,5 L de água por litro produzido (ABIR, 2020), estima-se que em 2022 haja a geração de 4.952.000 m³ de efluente no país.

Essa atividade industrial tem grande relevância econômica e social, uma vez que gera empregos e renda e contribui para o desenvolvimento econômico do país. Por outro lado, ainda que haja avanço no desempenho da gestão hídrica, essas empresas precisam ter preocupação ambiental, pois possuem potencial poluidor devido ao volume de efluente gerado.

Para minimizar os impactos ao meio ambiente, a Estação de Tratamento de Efluente (ETE) deve ser desenhada de acordo com a capacidade produtiva da unidade fabril, pois a estação precisa ser capaz de tratar o efluente gerado em todas as etapas do processo de fabricação e áreas de apoio.

Para tanto, é necessário conhecer as características do efluente, suas possíveis fontes e o volume gerado. Esses aspectos devem ser considerados na fase de projeto da ETE, atentando-se ao fluxo de processos e ao dimensionamento dos equipamentos em cada etapa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Neste estudo, o objetivo geral foi realizar a análise global do sistema de tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas refrigerantes.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar do fluxo de processamento;
- Avaliar o dimensionamento dos equipamentos;
- Levantar e discutir os resultados analíticos;
- Propor melhorias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Efluente industrial

Qualquer atividade industrial que envolva a utilização ou o tratamento de água é capaz de gerar resíduo líquido, denominado efluente. Este resíduo pode apresentar diferentes características, a depender da fonte geradora. Por isso, é importante avaliar os processos e operações que utilizam a água tanto como matéria-prima quanto como produto auxiliar (STEIN, 2014).

3.2 Regulamentação

O descarte de efluentes é regido por legislações ambientais. O efluente somente pode ser lançado no corpo receptor após o devido tratamento e desde que atenda às exigências legais.

A Resolução Nº 430/2011 do CONAMA dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para lançamento de efluentes em corpos d'água (BRASIL, 2011). De forma complementar, está vigente a Resolução Nº 355/2017 do CONSEMA, mais restrita que a diretriz nacional e que estabelece padrões de emissão em função da vazão de despejo (RIO GRANDE DO SUL, 2017).

No Rio Grande do Sul, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (Fepam) é o órgão técnico do Sistema Estadual de Proteção Ambiental responsável pela fiscalização, licenciamento, desenvolvimento de estudos e pesquisas e execução de programas e projetos que assegurem a proteção e preservação do meio ambiente. Estabelecimentos potencialmente causadores de impactos ambientais devem ter licença ambiental de operação (LO) e precisam respeitar as diretrizes do órgão ambiental.

3.3 Sistema de tratamento de efluente

As características do processo de tratamento de efluentes dependem do tipo de efluente gerado. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma básico dos processos utilizados em uma ETE:

Figura 3.1: Fluxograma genérico de um sistema de tratamento de efluente



Fonte: Adaptado de Amorim et al (2014)

Cada etapa compreende operações pertinentes ao processo de tratamento de efluentes. A seguir, estão descritas algumas delas.

3.3.1 Tratamento preliminar

Ao tratar águas residuais é importante conhecer as características físico-químicas do despejo e a vazão de recebimento. Por isso, destaca-se a importância da existência de um elemento medidor de vazão de entrada. É recomendado que haja uma Calha Parshall no início do processo de tratamento. Neste tipo de medidor de vazão o líquido flui por gravidade em canal aberto, ocorrendo baixa perda de carga e podendo conter sólidos suspensos.

O pré-tratamento é constituído por processos físicos. O objetivo é promover a remoção de poluentes grosseiros tais como areias, pedras, gordura e materiais indesejáveis através de operações como gradeamento e desarenação.

3.3.1.1 *Gradeamento*

A remoção de sólidos de maior dimensão é normalmente realizada por grades ou telas, nas quais ficam retidos os sólidos com medidas maiores do que o espaçamento entre as grades ou malha da tela.

3.3.1.2 *Caixa de areia e de gordura*

A redução de areia e gordura ocorrem em caixa de areia e caixa separadora de óleo, podendo estar acopladas.

As moléculas de gordura, por serem insolúveis em meios polares, tendem a se separar do meio, formando outra fase. A fração lipídica se separa com facilidade pois é menos densa e flutua. A desarenação ocorre por sedimentação: os grãos de areia se depositam no fundo da caixa devido à sua maior dimensão e densidade. O efluente permanece em suspensão, à altura intermediária entre o material decantando e aquele na superfície. Dessa forma, flui para as próximas etapas de tratamento.

3.3.2 Tratamento primário

Nesta fase há operações que dependem de transformações físicas ou físico-químicas. Os processos classificados como primários podem ser: coagulação e floculação, decantação primária, peneiramento, equalização da carga do efluente e neutralização.

3.3.2.1 *Coagulação e floculação*

Nesta operação são eliminadas impurezas como partículas finas, em suspensão ou dissolvidas, que não têm peso para sedimentar nas etapas iniciais. Para isso, faz-se uso de agentes coagulantes - geralmente sais de alumínio ou ferro. Estes agentes químicos em solução formam espécies hidrolisadas com carga positiva (VOLTAN, 2014).

No primeiro estágio, o produto químico é adicionado ao flocculador sob forte

agitação para promover interação entre o produto químico e o efluente. O coagulante neutraliza a carga elétrica superficial das impurezas, reduzindo forças de repulsão. Isso possibilita que haja aglutinação de partículas (KURITA, 1999).

No segundo estágio, a velocidade de agitação é reduzida para que ocorra a floculação. Os flocos são formados através de choque mecânico leve e agrupamento de colóides descarregados. Por ter tamanho de partícula e peso aumentado, o material pode ser removido através de operações unitárias como sedimentação ou filtração.

3.3.2.2 Decantação primária

A decantação primária ocorre através da sedimentação de sólidos finos após a floculação. Este processo ocorre em tanque decantador, no qual o efluente flui vagorosamente. Embora o objetivo seja remover os sólidos finos, esta operação impacta positivamente na redução da cor verdadeira, DBO e fósforo. (VOLTAN, 2014).

3.3.2.3 Flotação

É uma operação utilizada para separar misturas heterogêneas. É caracterizada pela adição de bolhas de gás - normalmente ar - à fase líquida. Essa operação unitária consiste na aderência das partículas em suspensão ao gás adicionado, de modo a obter uma espuma que é recolhida na superfície.

Tal processo apresenta a vantagem, em relação à sedimentação, de permitir a remoção de partículas leves em menor tempo a partir da força de empuxo combinada das moléculas e bolhas de gás, que provoca a ascensão das partículas à superfície. (METCALF & EDDY, 2003).

3.3.2.4 Equalização

A vazão e a carga orgânica, em processos industriais, podem flutuar drasticamente dependendo do ciclo de trabalho. Portanto, é conveniente equalizar o fluxo antes de alimentar as etapas seguintes do tratamento. O tanque de

equalização é projetado para amortecer os choques hidráulicos e de carga para processos a jusante.

O objetivo de equalizar o efluente é promover a neutralização através da mistura de despejos ácidos e alcalinos, minimizar variações de vazão e concentração de carga poluidora, diluir compostos tóxicos e fornecer alimentação contínua e o mais homogênea possível às etapas subsequentes.

3.3.2.5 Neutralização

Ainda que haja homogeneização do efluente em relação ao pH na etapa de equalização, pode ocorrer neutralização através da adição de ácidos ou bases em outros pontos do processo.

Pode ser interessante a correção de pH antes do despejo no corpo receptor, com o intuito de minimizar impactos ambientais ou antes de etapas que contemplem tratamento químico ou biológico, a fim de tornar a alimentação menos agressiva ao meio e melhorar a atividade e, conseqüentemente, a eficiência da operação.

3.3.3 Tratamento secundário

Esta etapa contempla processos biológicos de oxidação. O objetivo é consumir matéria orgânica biodegradável através de atividade microbiológica. Este processo ocorre naturalmente nos corpos receptores, porém a transformação é lenta. Portanto, tecnologias foram desenvolvidas para acelerar o processo de degradação da carga poluidora de águas residuárias.

Os processos biológicos se dividem em duas categorias: aeróbios e anaeróbios.

3.3.3.1 Aeróbios

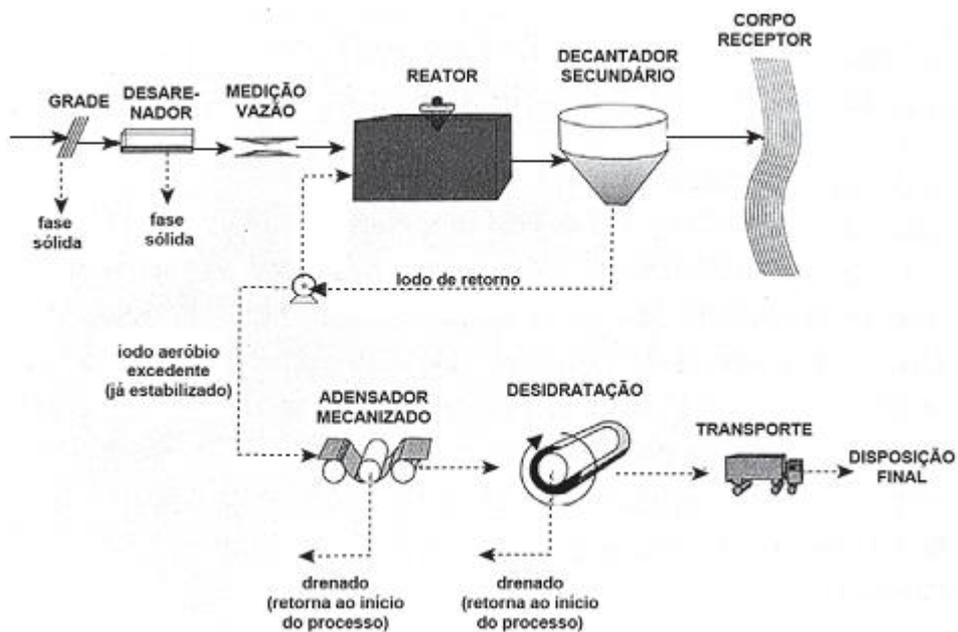
O princípio básico do processo de lodo ativado é a depuração da matéria orgânica por microrganismos aeróbios. Existem muitas variantes no processo de lodos ativados e os sistemas podem ser classificados de acordo com a idade do lodo,

com o fluxo (contínuo ou intermitente) ou ainda de acordo com objetivos do tratamento (VON SPERLING, 1997).

Os microrganismos aeróbios metabolizam a matéria orgânica do efluente, convertendo-a em gás carbônico, água e novas células.

O sistema de lodo ativado geralmente contempla decantador secundário, onde ocorre a clarificação do efluente e o retorno do lodo. A Figura 3.2 exemplifica esta situação.

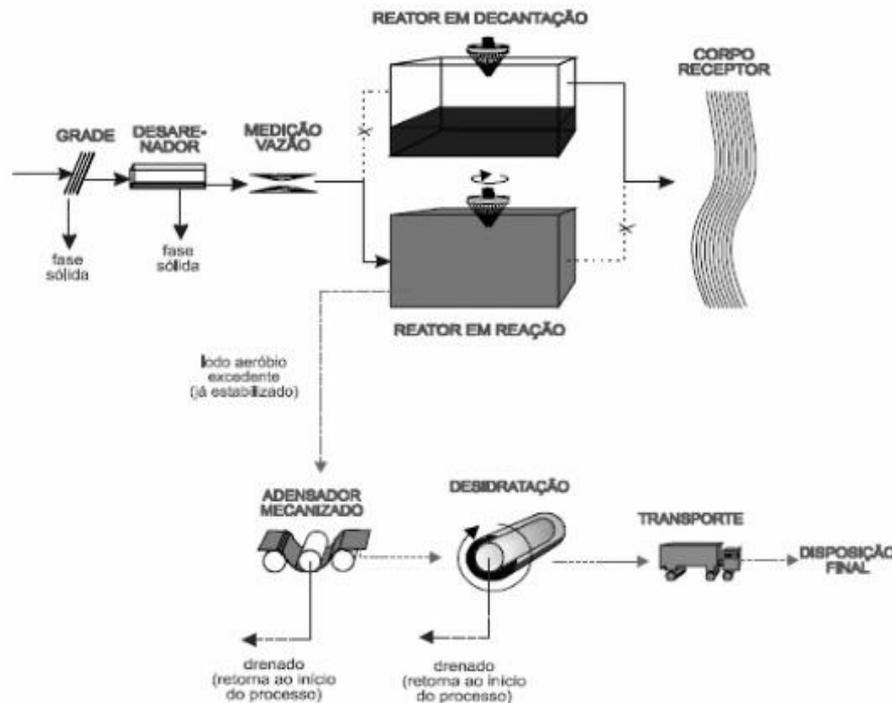
Figura 3.2: Esquema de sistema de lodo ativado com operação contínua



Fonte: Von Sperling (2002)

Nos casos em que os reatores aeróbios operam por batelada, o próprio reator em repouso opera como um decantador, conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3: Esquema de sistema de lodo ativado com operação intermitente



Fonte: Von Sperling (2002)

No tratamento com lodo ativado de fluxo intermitente é esperado um resultado de decantação melhor do que em modo contínuo, pois o sistema permanece totalmente estático durante a decantação, ao contrário do que ocorre em decantadores secundários que operam continuamente.

No final do processo, o lodo removido precisa passar por condicionamento. O lodo vai para adensadores ou espessadores onde a água é removida, aumentando assim o teor de sólidos do lodo. Desta etapa ele vai para o processo de desaguamento, feito por centrifugação. Após estas etapas, o lodo pode seguir para deposição final.

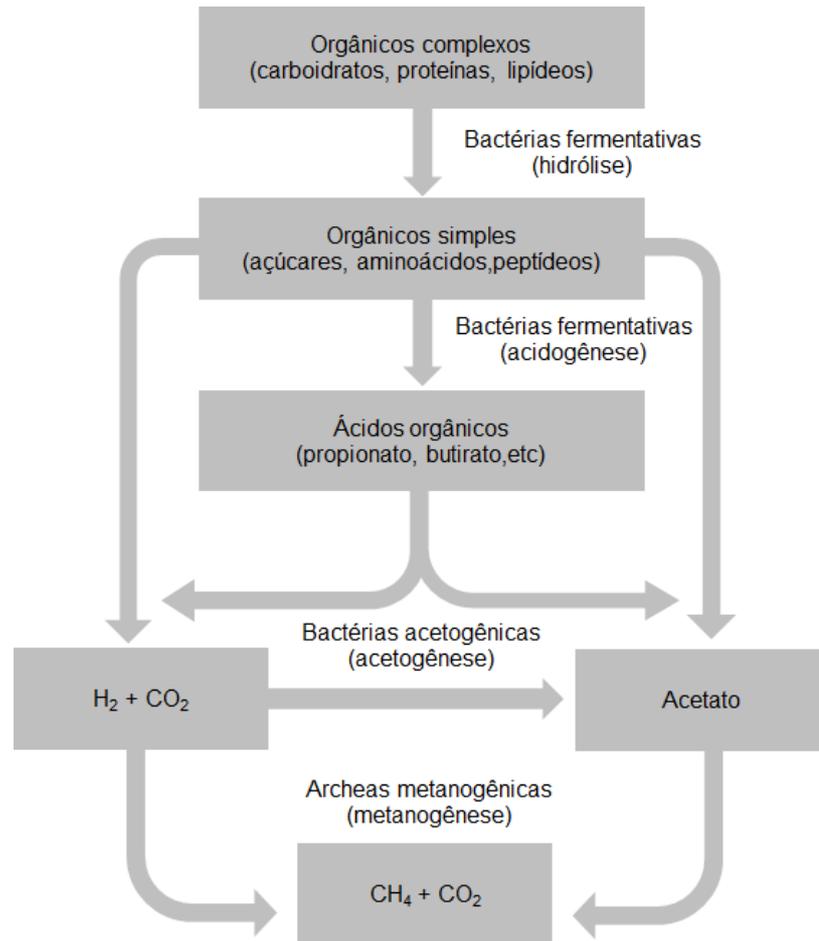
3.3.3.2 Anaeróbios

Na oxidação da matéria orgânica em anaerobiose ocorrem processos metabólicos de fermentação e respiração. Para isso, é necessária a atividade de pelo menos três grupos de microrganismos: bactérias fermentativas (acidogênicas), acetogênicas e metanogênicas.

As etapas da digestão anaeróbia, os grupos de microrganismos responsáveis

por cada transformação e os produtos gerados são apresentados na Figura 3.4.

Figura 3.4: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



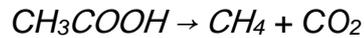
Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Uma produção elevada de biogás representa alta taxa de degradação de carga orgânica. Esta é uma das vantagens deste tipo de processo, pois é um tratamento com alta eficiência na redução de DQO, com baixa produção de biomassa e com geração de biogás.

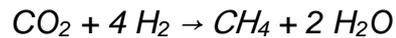
Conforme as vias metabólicas demonstram, podem ser formados gás carbônico e metano. É preferível a produção de metano, uma vez que o gás é insolúvel no efluente, o que facilita sua remoção do sistema.

O metano pode ser formado por duas vias:

- Na ausência de hidrogênio, a decomposição do ácido acético pela ação das metanogênicas acetoclásticas resulta na formação de metano e gás carbônico, conforme a reação:



- Na presença de hidrogênio o metano é formado pela redução do gás carbônico através do metabolismo das arqueas metanogênicas hidrogenotróficas.



A tecnologia de digestão anaeróbia apresenta vantagens do ponto de vista operacional e econômico. Os reatores anaeróbios não precisam de áreas extensas para sua instalação. Além disso, demandam baixo consumo energético. Portanto são considerados de baixo custo de implantação e operação.

Adicionalmente, têm baixa produção de sólidos, toleram alta carga orgânica e podem operar com alto tempo de retenção de sólidos e baixo tempo de retenção hidráulica. Ainda, apresentam alta taxa de conversão de carga orgânica em biogás, que, por sua vez, pode ser consumido pela própria indústria para geração de energia.

Por outro lado, é produzido efluente com aspecto desagradável e que, muitas vezes, não atende aos parâmetros estabelecidos nas legislações ambientais para despejo em corpos d'água. Outro ponto desfavorável é que esta tecnologia não é eficaz quanto à remoção de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, e à inativação de microrganismos patogênicos. Por isso, seu emprego precisa ser associado a tratamentos subsequentes.

Os sistemas anaeróbios de tratamento podem ser:

- Convencionais: tanques sépticos e lagoas anaeróbias;
- Sistema de alta taxa: reatores com crescimento bacteriano aderido ou disperso.

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*), em português se chama RAFA (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente) é um tipo de leito granular expandido com crescimento bacteriano disperso.

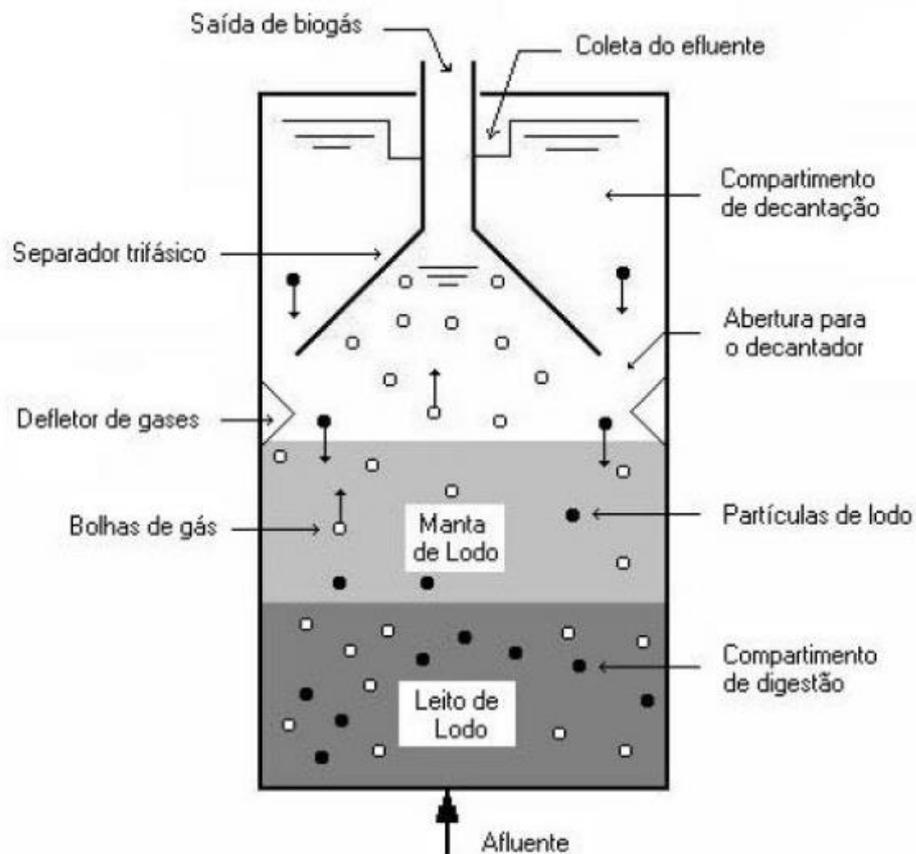
Sua alimentação se dá pela seção inferior e a saída de efluente e coleta de biogás acontecem no topo. O afluente percorre o leito de lodo denso e de elevada atividade microbológica. A estabilização da matéria orgânica ocorre nas zonas de leito de lodo (região mais densa) e na manta (lodo mais leve e disperso), onde há formação de biogás.

Os gases metano, carbônico e sulfídrico potencializam o fluxo ascensional de

efluentes ao longo do reator. O efluente deixa o reator pelo compartimento de decantação. O dispositivo de separação gás-sólido evita que partículas da manta de lodo sejam carregadas para fora do sistema.

A Figura 3.5 ilustra as regiões de reator tipo UASB.

Figura 3.5: Representação esquemática de um reator UASB



Fonte: Chernicharo (1997)

Outro exemplo de sistema de tratamento com crescimento bacteriano disperso é o reator IC - reator anaeróbico de fluxo ascendente com leito de lodo com circulação interna. Este reator opera como se houvesse dois reatores UASB em série.

De forma semelhante ao UASB, a alimentação ocorre próximo à base do reator e a saída de efluente e coleta de biogás pelo topo, conforme ilustração.

Figura 3.6: Representação esquemática de um reator IC



Fonte: Adaptado de DEDINI

O sistema de distribuição promove a mistura entre o afluente, o lodo e o efluente. No primeiro compartimento encontra-se o leito expandido de lodo granulado, onde a maior parte da DQO é transformada em biogás.

O gás coletado no primeiro separador impulsiona água e lodo para cima. No segundo separador, o gás deixa a mistura efluente-lodo. A fase aquosa retorna para o compartimento inferior, resultando em um fluxo de circulação interna.

A circulação interna dilui e condiciona o afluente. A fluidização do leito é gerada pelo fluxo ascendente de entrada, recirculação e produção de biogás. A taxa de recirculação depende da DQO do afluente e, portanto, é autorregulável: quanto maior a DQO de entrada, maior o fluxo de gás, o que gera turbulência, elevando a taxa de recirculação. Dessa forma o afluente é diluído sem a necessidade de acionamento de bombas.

3.3.4 Tratamento terciário

Esta etapa é também conhecida como polimento. O objetivo é reduzir ainda mais os resíduos orgânicos, nutrientes, cor, turbidez e patógenos remanescentes no efluente.

São caracterizadas como tratamento de polimento as seguintes operações:

- Filtração e adsorção em carvão ativado para reduzir turbidez, cor e odor;
- Adsorção em resina de troca iônica para remoção de metais;
- Cloração, ozonização ou exposição à radiação UV para inativação de patógenos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na ETE de uma indústria engarrafadora de bebidas refrigerantes no mês de março de 2021. Foram levantadas as variações na composição do efluente gerado em decorrência do tipo de atividade desenvolvida na planta. Além disso, avaliou-se o dimensionamento dos elementos que compõem o fluxograma de processo.

Cada etapa foi estudada separadamente quanto à sua função e eficiência na remoção de carga orgânica – quando pertinente. Também foi avaliado o fluxo de operações. Foram levantados resultados analíticos de monitoramento da ETE para avaliar a eficiência do sistema tratamento de efluentes e observar o desempenho das etapas do processo.

4.1 Instrumentação

Os controles de nível realizados na ETE ocorrem pela ação de boias instaladas nos tanques. Em alguns pontos, ao sensor detectar nível alto no tanque, há acionamento automático de bombas para transporte do efluente. Em outras situações, como no caso de etapa que opera em batelada, é função do operador observar a alimentação dos tanques para evitar transbordo.

Os medidores de vazão operam apenas como indicadores. Não há um sistema de controle que responda a oscilação de leitura. Os medidores existentes estão situados na entrada dos reatores anaeróbios e no ponto de despejo de efluente tratado.

Parâmetros como temperatura e pH são monitorados ao longo de todo o sistema de tratamento, pois é preciso evitar choques térmicos e químicos em todas as etapas. Além disso, objetiva-se operar em faixas ótimas de atividade microbológica. Para isso, são feitas medições diretas empregando peagâmetro Digimed DM-22 de bancada com sensor de temperatura incluso, além de sensores de temperatura e pH *online*.

4.2 Monitoramento analítico

- DQO

O controle de DQO é importante para proteger as etapas biológicas do processo, para avaliar a eficiência de cada estágio e, principalmente, para assegurar a qualidade do efluente tratado. Para esta análise utiliza-se solução digestora Nanocolor DQO Macherey-Nagel. A reação ocorre no digestor Nanocolor Vario C2 Macherey-Nagel a 160°C por 30 minutos. Ao concluir esta etapa, a amostra é resfriada e tem sua leitura feita em espectrofotômetro Nanocolor Vis II.

- Acidez e alcalinidade

O controle da alcalinidade do leito dos reatores anaeróbios garante a formação de efeito tampão o suficiente para evitar quedas bruscas de pH em caso de desequilíbrio. O método consiste em filtrar a amostra e titular 100 ml com H₂SO₄ 0,1 N até obter pH igual a 4,0. Com o volume de ácido consumido, obtém-se a alcalinidade total em mg de CaCO₃ por litro de amostra através da equação:

$$\text{Alcalinidade total} = [(V_{\text{ácido}} \cdot N_{\text{ácido}} \cdot 50.000) / (V_{\text{amostra}})]$$

Ao finalizar o ensaio de determinação da alcalinidade, o pH da amostra é corrigido para 3,3 para destruição dos íons bicarbonato. Desta forma, pode-se prosseguir com a análise de ácidos voláteis.

A amostra acidificada é aquecida sob agitação. Após iniciar a fervura, são cronometrados 3 minutos para remoção de ácido carbônico. Transcorrido este tempo, a amostra é resfriada e seu pH é corrigido até 4,0 com solução NaOH 0,1 N. A amostra é titulada até pH 7,0.

A determinação da acidez referente a ácidos voláteis é calculada através da equação:

$$\text{Alcalinidade total} = [(V_{\text{soda}} \cdot N_{\text{soda}} \cdot 60.000) / (V_{\text{amostra}})]$$

- Oxigênio dissolvido

O monitoramento da concentração de oxigênio dissolvido é importante nas etapas de tratamento aeróbio, para garantir a aeração necessária à atividade microbiológica. A determinação de oxigênio dissolvido no efluente nesses pontos

ocorre através de medição direta, efetuada com sonda acoplada a um oxímetro.

- Sedimentação

No sistema de lodo ativado é importante monitorar a biomassa formada, pois grandes volumes são gerados e demandam remoção do material sedimentado do tanque. Um ensaio que proporciona ao operador avaliar as condições de sedimentação do lodo e acompanhar o crescimento da biomassa é o SD30. Através desta análise é possível obter a concentração do teor de sólidos (teor de lodo) (IZQUIERDO, 2006).

Para esta análise, é coletado 1 litro da mistura lodo-efluente sob agitação. A amostra é transferida para uma proveta de 1000 ml, onde permanece em repouso por 30 minutos. Transcorrido este tempo, é observado o volume de lodo sedimentado e a qualidade dos flocos formados.

Algumas análises são terceirizadas: DBO, fósforo total, nitrogênio total e óleos e graxas minerais. São coletadas amostras de efluente bruto e tratado. Os resultados são úteis para avaliar a taxa de remoção de nutrientes e são necessários para garantir os padrões de qualidade do efluente tratado, exigidos pela legislação.

Segundo o laboratório prestador dos serviços, os métodos de análise de DBO, fósforo total, nitrogênio total e óleos e graxas minerais são: SMEWW 23^a Ed 2017 Método 5210 B; SMEWW 23^o ed., 2017. Método 3030 B, 3030 E, 3120 B; SMEWW 23^o ed., 2017. Método 4500-Norg B e D e 4500-NH3 C; Manual Infracal TOG Analyzer. POP-QO006, Espectrofotometria (IR), respectivamente.

As análises de AME e de versatilidade do lodo também são realizadas em laboratório externo.

O ensaio de Atividade Metanogênica Específica (AME) visa avaliar a capacidade das bactérias anaeróbias em converter substratos orgânicos em metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂). O resultado é um indicativo da eficiência da população metanogênica no reator. Portanto, é uma ferramenta importante para o controle operacional dos reatores.

É simulado um reator anaeróbio, que é incubado sob condição mesófila de 33 ± 2 °C. Para leitura do volume de biogás utiliza-se o aparato de Eudiômetro. O método segue as diretrizes da norma alemã para digestão anaeróbia (VDI 4630, 2016; DIN 38414-8, 1985).

A versatilidade é um indicativo da diversidade microbiológica no meio. É calculada através da razão entre o volume teórico de produção de metano e o volume real.

4.3 Cálculos

- Tempo de detenção hidráulica (TDH)

É o tempo médio em que efluentes permanecem em uma unidade ou sistema. De posse dos dados de volume útil dos reatores (V) e das vazões aplicadas (Q), o tempo de detenção hidráulico pode ser calculado através da equação:

$$TDH = V / Q$$

- Quantidade de nutrientes de eficiência de remoção

A quantidade de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, é calculada a partir da equação:

$$\text{Nutriente} = [(\text{conc. Nutriente} \cdot \text{Volume}) / 1000]$$

A expressão abaixo demonstra a forma genérica de calcular o percentual de remoção de nutrientes:

$$\%R = \{ [(\text{Nutriente}_{ENTRADA} - \text{Nutriente}_{SAÍDA}) / \text{Nutriente}_{ENTRADA}] \cdot 100 \}$$

Por fim, o resultado das análises de DQO são utilizados para calcular a carga orgânica (CO):

$$CO = [(\text{Volume} \cdot DQO) / 1000]$$

Os resultados de carga orgânica são empregados no cálculo da eficiência de cada etapa do processo.

A expressão abaixo demonstra a forma genérica de calcular o rendimento:

$$E = \{ [(CO_{ENTRADA} - CO_{SAÍDA}) / CO_{ENTRADA}] \cdot 100 \}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A indústria de bebidas estudada possui linhas de envase em garrafa PET, lata e garrafas retornáveis. Cada embalagem apresenta especificidades no momento do envase. Enquanto as latas são higienizadas através de ar ionizante, as embalagens retornáveis precisam passar por uma lavadora. Este processo consome volumes consideráveis de água e, conseqüentemente, gera efluente cáustico. As garrafas PET também contribuem com o volume de efluente gerado, pois são enxaguadas com jatos de água clorada.

As xaroparias também são fonte de geração de efluentes. Estes setores têm atividades inerentes ao processo de produção que geram grandes volumes de efluente, como retrolavagem de filtros, regeneração de resinas de troca iônica e CIP de equipamentos e de linhas de produção.

Além disso, as etapas de envase de produto também resultam em geração de efluentes, pois é preciso que o produto apresente sempre a mesma qualidade sensorial, garantindo assim a concentração de açúcar e acidez no produto acabado. Produtos não conformes, seja durante o processamento ou após o envase, também são descartados e enviados à ETE via ralo.

Outras áreas representam uma parcela menos significativa da geração de efluente, como refeitório, sanitários, utilidades, limpeza de instalações e lavagem de veículos. Devido às diferentes fontes de efluente, o produto a ser tratado na ETE pode ter características variáveis. A Tabela 5.1 apresenta alguns exemplos:

Tabela 5.1: Tipos de efluente na indústria

| Tipo | Possíveis fontes | Características | |
|--|--|-------------------------|--------------|
| Efluente com alta concentração de bebida ou xarope | A cada início ou final de produção | Alta carga orgânica | |
| | Descarte de produto não conforme | pH baixo a neutro | |
| | Vazamentos | Cor acentuada | |
| Efluente cáustico | Purga da lavadora de embalagens retornáveis | Baixa carga orgânica | |
| | Descartes da central de CIP | pH alcalino | |
| | Vazamentos | Incolor | |
| Efluente diluído | Sanitização de equipamentos e linhas de produção | Carga orgânica moderada | |
| | Retrolavagem de filtros | | |
| | Limpeza de pisos e instalações | pH neutro a alcalino | |
| | Lavagem da frota de caminhões | | |
| | Refeitório | | Cor moderada |
| | Prédios administrativos | | |
| Vestiários e sanitários | | | |

Fonte: Autora (2021)

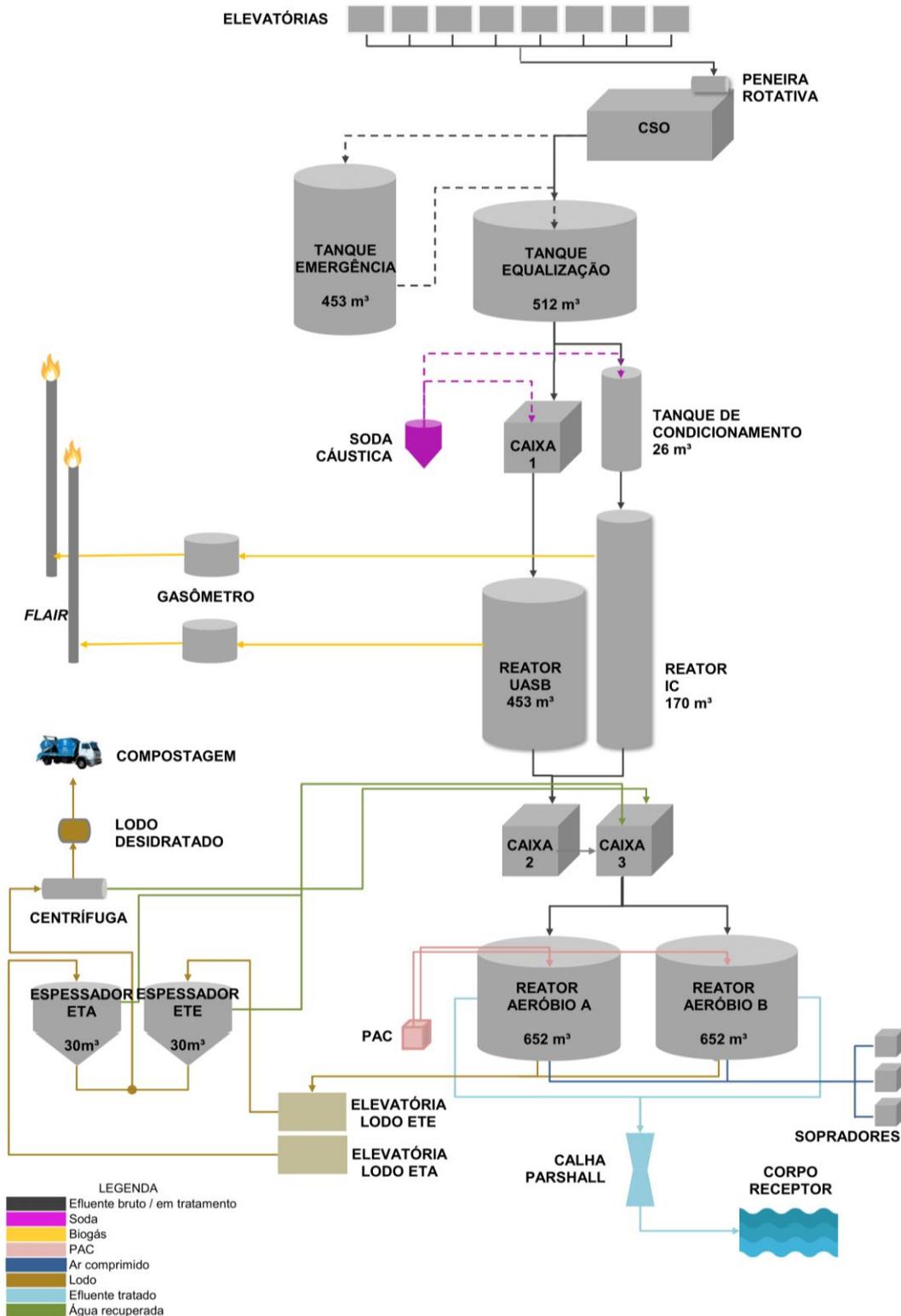
Tendo vista a heterogeneidade do efluente gerado, algumas medidas são adotadas para proteger a ETE e garantir a eficácia do tratamento. Para isso são realizadas as análises de parâmetros importantes do processo em pontos chave. Também é controlado o nível de tanques e a vazão de alimentação de reatores e de despejo.

Não há medidor de vazão no recebimento de efluente bruto, tampouco no tanque de equalização. Portanto, o volume de efluente recebido na ETE é desconhecido. O valor é estimado através da soma das vazões de alimentação dos reatores anaeróbios. Ou seja, através de uma aproximação, assume-se que não há acúmulo na CSO e no tanque de equalização para fins de cálculo da carga orgânica

nas etapas iniciais.

No período estudado, o volume total de efluente tratado foi de 23.909 m³, com média de descarte de 771 m³ por dia, respeitando o limite estabelecido na LO.

Figura 5.1: Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes



Fonte: Autora (2021)

5.1 Elevatórias

Os poços distribuídos pela empresa recebem o efluente das áreas. Os principais pontos de atenção são os poços instalados na unidade fabril, que podem receber produto não conforme, concentrado de extrato vegetal, xarope açucarado e produtos químicos como soda, ácido peracético e sabões.

Nas linhas de produção e xaroparias há calhas e ralos instalados no piso a fim de escoar descarte de produtos e águas residuais de limpeza. Nesses elementos há grades acopladas a fim de evitar o acúmulo de materiais sólidos nas elevatórias.

Os poços possuem bombas que transferem o efluente até a entrada da ETE. Na elevatória da linha de retornáveis o sistema de bombeamento possui filtros com a finalidade de reter canudos, tampas, lacres e demais materiais sólidos que possam escoar da lavadora até o poço.

5.2 Recebimento do efluente bruto

A CSO é o primeiro elemento que se encontra nas dependências físicas da ETE. Na entrada desta etapa, há uma peneira rotativa para a remoção de sólidos que possam ter sido bombeados junto ao efluente.

Na sequência, o efluente flui lenta e horizontalmente por caixas que promovem a separação da fração lipídica da aquosa por diferença de densidade. Os produtos fabricados na unidade não possuem lipídios em sua composição. A pequena fração lipídica que compõe o efluente pode sofrer hidrólise alcalina, já que muitas vezes é submetida a elevado pH.

Os resultados analíticos de temperatura, pH e DQO desta etapa são críticos para a decisão da destinação do efluente, que pode seguir o processamento por duas vias: tanque de equalização ou tanque de emergência.

Caso as análises apresentem resultados como alta carga poluidora ou variações bruscas de pH há possibilidade de desvio da corrente de entrada para o tanque de emergência.

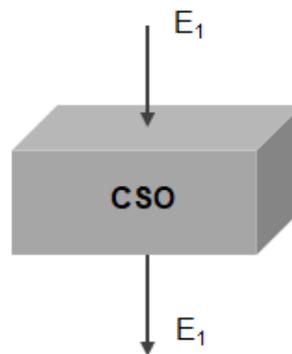
Esta medida é adotada para proteger as etapas biológicas do processo, que são sensíveis a agentes de desinfecção e variações bruscas de temperatura e pH. A vantagem desta manobra é que, posteriormente, o tanque de emergência pode ser

drenado a uma vazão controlada, menor que a de recebimento, e em momento oportuno.

Os resultados de DQO obtidos, além de serem importantes para tomada de decisões operacionais, servem para compor o cálculo da eficiência de remoção de carga poluidora do processo.

A Figura 5.2 representa o recebimento de efluente bruto. O monitoramento da saída desta etapa não se justifica, pois historicamente não foram observadas variações nos parâmetros medidos.

Figura 5.2: Volume de controle CSO



Fonte: Autora (2021)

A tabela a seguir apresenta os resultados das análises referentes ao efluente bruto.

Tabela 5.2: Resultados analíticos do efluente bruto

| Corrente | Parâmetro | Resultado | Mínimo | Máximo |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| E ₁ | Temperatura | 28,5 ± 2,2°C | 20°C | 42°C |
| | pH | 10,49 ± 1,81 | 4,73 | 12,69 |
| | DQO | 5.348 ± 2.342 mg/L | 1.353 mg/L | 11.459 mg/L |
| | DBO | 671 ± 241 mg/L | 457 mg/L | 955 mg/L |
| | Fósforo total | 7,21 ± 7,54 mg/L | 1,36 mg/L | 17,33 mg/L |
| | Nitrogênio total | 7,44 ± 2,82 mg/L | 5,00 mg/L | 10,11 mg/L |
| | Óleos e Graxas Minerais | < 10 mg/L | - | - |
| | Carga orgânica | 3.500 ± 1.750 kgDQO/dia | 1.115 kgDQO/dia | 9.087 kgDQO/dia |

Fonte: Autora (2021)

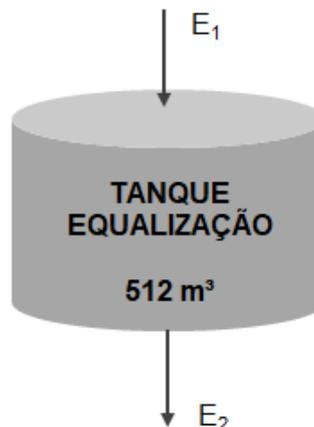
Os resultados refletem a heterogeneidade do efluente gerado, visto a amplitude das medições.

5.3 Tanque de Equalização

O tanque existente possui volume útil de 512 m³. É alimentado através de bombeamento. Há bombas que transferem o fluido para as etapas subsequentes e há também sistema de homogeneização do efluente através bombas de recirculação e de difusores localizados na base.

A figura a seguir evidencia as correntes de entrada (E₁) e de saída (E₂) do efluente no tanque de equalização.

Figura 5.3: Volume de controle tanque de equalização



Fonte: Autora (2021)

Nesta etapa são monitorados pH, temperatura, DQO e nível do tanque.

O nível médio observado no período foi de $72 \pm 9,5\%$ da capacidade total. Porém, no período, o tanque de emergência foi acionado diversas vezes, tanto para desviar efluente com alta carga orgânica, quanto para evitar transbordo do tanque de equalização. A ocorrência dessas manobras é indicativa de que a capacidade do tanque de equalização está aquém da necessidade da fábrica.

Tabela 5.3: Resultados analíticos de entrada e saída no tanque de equalização

| Corrente | Parâmetro | Resultado | Mínimo | Máximo |
|--|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| E₁ (entrada) | Temperatura | 28,5 ± 2,2°C | 20°C | 42°C |
| | pH | 10,49 ± 1,81 | 4,73 | 12,69 |
| | DQO | 5.348 ± 2.342 mg/L | 1.353 mg/L | 11.459 mg/L |
| | DBO | 671 ± 241 mg/L | 457 mg/L | 955 mg/L |
| | Fósforo total | 7,21 ± 7,54 mg/L | 1,36 mg/L | 17,33 mg/L |
| | Nitrogênio total | 7,44 ± 2,82 mg/L | 5,00 mg/L | 10,11 mg/L |
| | Óleos e Graxas Minerais | < 10 mg/L | - | - |
| | Carga orgânica | 3.500 ± 1.750 kgDQO/dia | 1.000 kgDQO/dia | 6.967 kgDQO/dia |
| E₂ (saída) | Temperatura | 29,7 ± 1,9°C | 25,0°C | 39,0°C |
| | pH | 5,46 ± 0,70 | 3,96 | 7,39 |
| | DQO | 4.940 ± 1295 mg/L | 2.429 mg/L | 7.417 mg/L |
| | Carga orgânica | 3.102 ± 761 kgDQO/dia | 1.514 kgDQO/dia | 4.359 kgDQO/dia |

Fonte: Autora (2021)

Foi observada variação brusca do pH de entrada e saída desta etapa. Esta é uma evidência de que, da forma como opera, no próprio tanque iniciam precocemente as reações de hidrólise e acidogênese. Essas reações iniciam tipicamente na etapa secundária de tratamento de efluentes, em anaerobiose. A antecipação deste fenômeno é favorável ao tratamento de efluentes. Por outro lado, deve-se atentar à corrosão e desgaste nos aparatos metálicos do tanque.

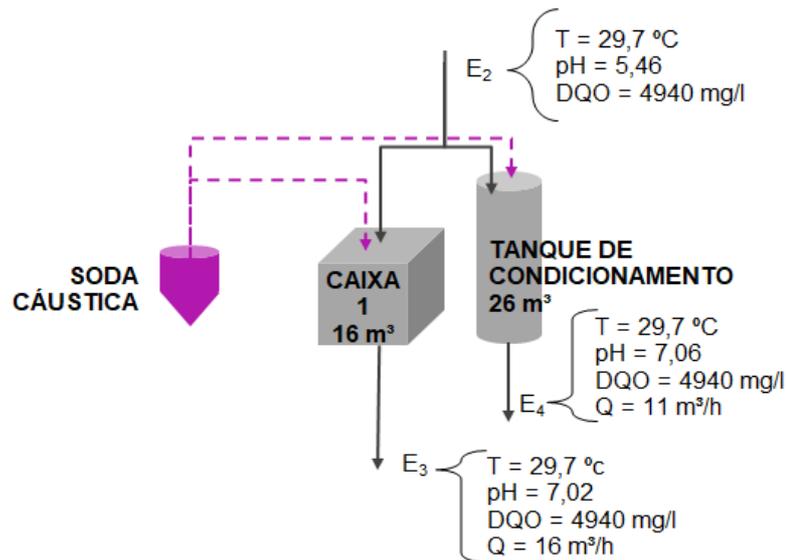
Isso é possível devido à alta concentração de carboidratos, característica da indústria de refrigerantes (SEREJO, 2019). As bactérias naturalmente presentes no ambiente de descarte atuam sobre o substrato, iniciando as etapas biológicas de tratamento.

5.4 Neutralização

Esta etapa antecede o sistema de tratamento secundário. O fluxo se divide

entre o tanque de condicionamento e a caixa 1, que são os pontos do processo em que ocorre a neutralização do efluente através da adição de hidróxido de sódio à corrente E₂.

Figura 5.4: Volume de controle dos pontos de neutralização



Fonte: Autora (2021)

A adição do alcalinizante se dá de forma automatizada. A soda é bombeada até os tanques de neutralização de acordo com as medições de pH realizadas por eletrodos instalados no local. O sistema de controle estabelece a faixa de pH entre 6,90 e 7,20.

As correntes de saída E₃ e E₄ têm medidores de pH e de vazão em linha. Não há medições laboratoriais nesta etapa; apenas monitoramento e ajuste das variáveis de controle automatizado.

Esta operação não implica em variações bruscas na temperatura ou DQO. Sendo assim, não foram consideradas alterações nestes parâmetros nesta etapa.

5.5 Tratamento Anaeróbio

A etapa biológica inicia pela digestão anaeróbia de matéria orgânica biodegradável. Após o tanque de equalização o fluxo se divide entre os pontos de neutralização: caixa 1 e condicionamento. Destes, o efluente segue para os reatores UASB e IC, respectivamente.

O efluente ingressa nos reatores à temperatura próxima a 30°C, a um pH neutro

e DQO de 4.940 mg/L, em média. Segundo Chernicharo (1997), estas são condições interessantes para obter boa conversão da matéria orgânica em biogás.

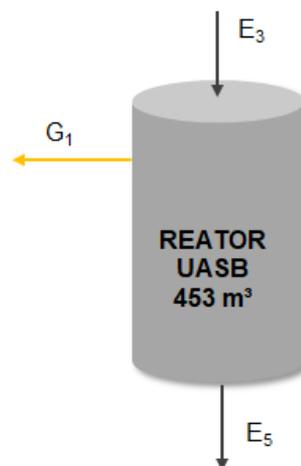
A vazão média estabelecida nos reatores no período estudado é resultado de decisões operacionais baseadas em resultados analíticos, tanto das condições de alimentação, quanto de operação do reator.

5.5.1 Reator UASB

O reator tem formato cilíndrico, mede 7 m de altura e seu volume útil é de 453 m³. É alimentado através de bombeamento na linha de efluente e possui sistema de recirculação de acionamento por bombas.

O sistema de operação é contínuo. O reator foi dimensionado para receber até 40 m³/h, dos quais 30 m³/h seriam referentes a efluente equalizado e 10 m³/h à recirculação. A vazão média observada no período estudado foi de 16 m³/h.

Figura 5.5: Volume de controle do reator UASB



Fonte: Autora (2021)

5.5.2 Reator IC

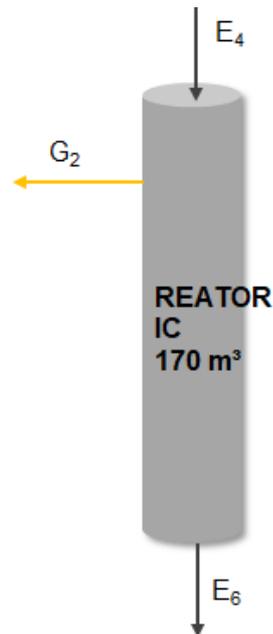
O reator tem formato cilíndrico, mede 24,7 m de altura e possui volume útil de 170 m³. Este reator foi instalado em período posterior ao projeto inicial da ETE, que contemplava apenas reatores UASB. Algumas mudanças ocorreram na manufatura desde o início da operação da planta, como a implantação de novas linhas de

produção.

Por isso, neste projeto a vazão de efluente equalizado foi considerada maior, 37,5 m³/h. Portanto, o reator foi projetado para operar a até 50 m³/h, sendo 37,5 m³/h a vazão de alimentação e 12,5 m³/h correspondentes a recirculação de efluente.

A vazão média observada no período estudado foi de 11 m³/h.

Figura 5.6: Volume de controle do reator IC



Fonte: Autor (2021)

5.5.3 Resultados analíticos da etapa anaeróbia

São realizadas análises no leito do reator para garantir um ambiente favorável à atividade microbológica. Neste caso, foram acompanhadas medições de temperatura, pH, atividade metanogênica específica e versatilidade do lodo.

Na saída do reator foram analisados DQO, acidez volátil, alcalinidade total, temperatura e pH do efluente gerado a fim de atestar a eficiência do processo e condições dos reatores.

A Tabela 5.4 contempla os resultados referentes às condições do lodo, ao tempo de detenção hidráulico e à atividade tamponante dos biorreatores anaeróbios.

Tabela 5.4: Resultados analíticos da etapa anaeróbia

| Parâmetro | Resultados | |
|------------------------|---|---|
| | UASB | IC |
| TDH | 28 horas | 15 horas |
| pH do leito | 6,70 ± 0,18 | 6,91 ± 0,15 |
| Temperatura do leito | 29,3 ± 1,6 °C | 29,3 ± 1,7 °C |
| Atividade metanogênica | 0,1184 gDQOCH ₄ /gSVT•dia | 0,3160 gDQOCH ₄ /gSVT•dia |
| Versatilidade do lodo | 48% | 50% |
| Acidez volátil | 169 ± 130 mg/L | 94 ± 78 mg/L |
| Alcalinidade total | 1.070 ± 170 mg/L | 1.244 ± 239 mg/L |

Fonte: Autora (2021)

Segundo Chernicharo (1997), microrganismos produtores de metano têm crescimento ótimo em pH de 6,6 a 7,4. A taxa máxima de crescimento bacteriano cai 11% a cada 1°C a temperaturas abaixo de 30 °C. Sendo assim, as condições físico-químicas do leito dos dois reatores foi considerada satisfatória.

Os valores esperados para AME e versatilidade do lodo eram de 0,5000 gDQOCH₄/gSVT·d e 80%, respectivamente. Portanto, os resultados obtidos indicam baixa conversão da matéria orgânica em biogás.

Para o reator IC, é esperada AME cerca de duas vezes maior do que no reator UASB devido à maior eficiência de contato entre biomassa e efluente. Esta hipótese foi confirmada.

Os valores de referência para acidez e alcalinidade do leito são:

- Acidez volátil: até 200 mg/L;
- Alcalinidade: entre 1000 e 5000 mg/L em CaCO₃.

Sendo assim, os resultados indicam que os reatores são capazes de manter o efeito tampão.

Na Tabela 5.5 estão descritos os resultados das correntes de entrada e saída dos reatores UASB e IC.

Tabela 5.5: Resultados analíticos de entrada e saída dos reatores anaeróbios

| Corrente | Parâmetro | Resultado | Mínimo | Máximo |
|---|----------------|-----------------------|---------------|-----------------|
| E₃ (Entrada UASB) | Temperatura | 29,7 ± 1,9°C | 25,0°C | 39,0°C |
| | pH | 7,02 ± 0,10 | 6,90 | 7,16 |
| | DQO | 4.940 ± 1295 mg/L | 2.429 mg/L | 7.417 mg/L |
| | Carga orgânica | 1.879 ± 564 kgDQO/dia | 786 kgDQO/dia | 2.802 kgDQO/dia |
| E₄ (Entrada IC) | Temperatura | 29,7 ± 1,9°C | 25,0°C | 39,0°C |
| | pH | 7,06 ± 0,12 | 6,91 | 7,25 |
| | DQO | 4.940 ± 1295 mg/L | 2.429 mg/L | 7.417 mg/L |
| | Carga orgânica | 1.223 ± 237 kgDQO/dia | 673 kgDQO/dia | 1.557 kgDQO/dia |
| E₅ (Saída UASB) | Temperatura | 28,8 ± 1,8°C | 24,0°C | 37,0°C |
| | pH | 7,17 ± 0,20 | 6,27 | 7,85 |
| | DQO | 507 ± 294 mg/L | 241 mg/L | 1.672 mg/L |
| | Carga orgânica | 184 ± 73 kgDQO/dia | 55 kgDQO/dia | 360 kgDQO/dia |
| E₆ (Saída IC) | Temperatura | 28,7 ± 1,7°C | 25,0°C | 34,0°C |
| | pH | 7,22 ± 0,16 | 6,86 | 7,72 |
| | DQO | 390 ± 298 mg/L | 191 mg/L | 1.689 mg/L |
| | Carga orgânica | 92 ± 46 kgDQO/dia | 44 kgDQO/dia | 257 kgDQO/dia |

Fonte: Autora (2021)

A temperatura e o pH médio em cada reator estão de acordo com as faixas adequadas.

Os resultados médios de DQO evidenciam a remoção de carga poluidora pelo sistema de tratamento anaeróbio. Apesar da redução drástica, é nítida a ocorrência de desvios, o que impacta diretamente na carga orgânica diária.

Os valores elevados de DQO de saída dos reatores anaeróbios estão relacionados a um evento: a acidez do leito de ambos os reatores ultrapassou o limite de 200 mg/L. No reator UASB a acidez chegou a 632 mg/L e no IC a 370 mg/L. Este desvio foi resultado de falha no sistema de dosagem de soda nos pontos de neutralização.

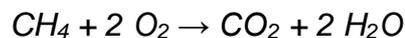
Os valores de carga orgânica calculados representam a aplicação de

determinada carga a cada reator e o resultado de seu processo de digestão.

A eficiência de remoção desta etapa, calculada a partir dos resultados de carga orgânica de entrada e saída nos reatores UASB e IC foi de $90,2 \pm 4,2\%$ e $92,5 \pm 4,2\%$, respectivamente. Este resultado é excelente, visto que se busca eficiência de processo acima de 90%.

5.6 Gasômetro

O biogás gerado é transferido até o gasômetro e, de lá, é pressurizado para que sofra queima em *flare* (queimador). Por haver metano em sua composição a queima é recomendada, pois a combustão deste gás resulta em dióxido de carbono e água, conforme a reação:



Ambos, CH_4 e CO_2 , os gases são considerados agressivos à camada de ozônio. No entanto, o metano representa uma ameaça muito maior ao meio ambiente do que o dióxido de carbono.

Não há medidor de vazão nas linhas de gás. Portanto, não é conhecido o volume gerado.

5.7 Tratamento aeróbio

O processo aeróbio, neste caso, complementa o tratamento anaeróbio de efluentes. Dessa forma, considera-se que o sistema de tratamento de efluentes é misto.

Apesar da visível redução de carga orgânica nas etapas anteriores, para que atenda à legislação, é necessário obter resultados de DQO menores do que 260 mg/L. Além disso, o efluente tratado precisa ser límpido e não conter odores desagradáveis, ser microbiologicamente estável e não apresentar alto teor de nutrientes como nitrogênio e fósforo, por exemplo, pois podem gerar desequilíbrio ecológico no corpo d'água receptor. O sistema de lodo ativado é considerado eficaz no atendimento a essas necessidades.

O metabolismo dos microrganismos presentes no lodo promove oxidação microbológica e síntese celular. Por este motivo o tempo de detenção de sólidos neste tipo de reator é menor do que em reatores anaeróbios: a biomassa tem seu volume aumentado consideravelmente. Portanto, neste estágio é necessária a remoção de lodo do tanque.

Na unidade, o tratamento aeróbio ocorre em dois tanques de aeração de 652 m³ de volume útil cada, que operam por batelada, em paralelo - enquanto um tanque está em repouso, o outro sob agitação e aeração.

Neste sistema ocorrem as reações pertinentes a um processo convencional de lodo ativado. Porém, adicionalmente, ocorrem etapas consideradas de tratamento terciário, como polimento através de floculação e decantação no tanque em repouso. Nesta etapa é adicionado coagulante PAC às bateladas durante a agitação.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados das medições realizadas nos tanques A e B.

Tabela 5.6: Resultados analíticos da etapa aeróbia

| Parâmetro | Resultados | |
|---------------------|------------------|------------------|
| | Tanque A | Tanque B |
| Temperatura | 28,1 ± 2,8 °C | 28,4 ± 2,5 °C |
| pH | 7,57 ± 0,31 | 7,58 ± 0,26 |
| Oxigênio dissolvido | 6,02 ± 1,73 mg/L | 6,19 ± 1,54 mg/L |
| Decantação (SD30) | 561 ± 89 mL/L | 469 ± 84 mL/L |

Fonte: Autora (2021)

A temperatura e o pH medidos estão adequados. A faixa ideal de pH é entre 7,0 e 8,5. Havendo desequilíbrio:

- Em meio ácido - pode ocorrer crescimento de fungos no consórcio microbológico;
- Em meio alcalino - a eficiência pode reduzir drasticamente e o sistema pode colapsar.

O sistema de aeração deveria ter a taxa de fornecimento de oxigênio reduzida pois, os dispositivos incorporadores de oxigênio deveriam garantir uma

concentração de oxigênio dissolvido em uma faixa de 1,0 a 3,0 mg/L (SÊNA, 2012).

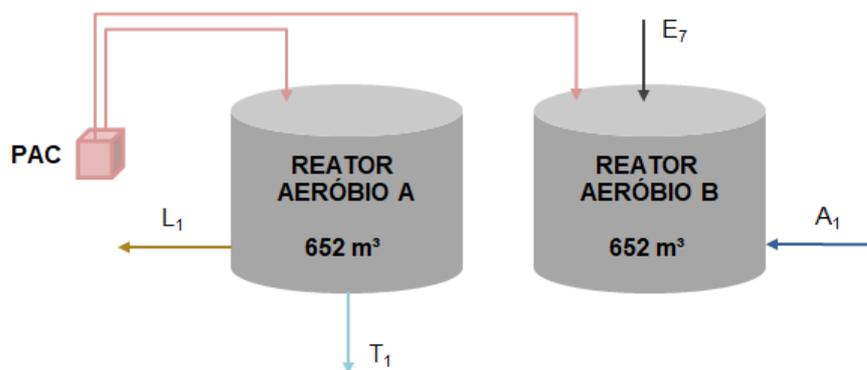
Os resultados de SD30 também apresentaram altos índices. Este efeito pode comprometer a retirada de clarificado da decantação, prejudicando o descarte de efluente tratado.

A alimentação dos reatores aeróbios ocorre através da corrente E_7 , que resulta das correntes de saída dos anaeróbios (E_5 e E_6). A carga orgânica de entrada nesta etapa foi de 274 ± 104 kgDQO/dia.

A remoção de lodo está representada pela corrente L_1 . O destino deste material é o tanque espessador.

Após a conclusão da remoção de lodo, inicia-se a retirada de efluente tratado, que é enviado via calha Parshall pela linha T_1 ao corpo hídrico receptor.

Figura 5.7: Volume de controle do lodo ativado



Fonte: Autora (2021)

No tratamento por lodo ativado não é usual o sistema de operação intermitente. Em geral, a aeração e a decantação secundária são de operação contínua. Neste caso, apesar da literatura apontar o sistema de lodo ativado em bateladas como viável e de melhor resultado de decantação em comparação com o sistema contínuo, os resultados obtidos indicam o oposto.

5.8 Efluente tratado

Ao concluir a batelada nos tanques de aeração, o efluente tratado é recolhido através de mangueira acoplada à boia de nível. No controlador, é estabelecido o nível do tanque em que a retirada de clarificado deve cessar (altura de transição).

Dessa forma, garante-se que o efluente tratado não contenha sólidos.

A vazão de despejo é medida em calha Parshall. Na calha, há sistema de dosagem de solução de hipoclorito de cálcio para desinfecção do efluente. O equipamento é regulado para dosar 0,5 mg/L de cloro.

A cada batelada de descarte de efluente são realizadas análises de monitoramento interno e coletas de amostras compostas para envio ao laboratório externo.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados analíticos do efluente tratado e as especificações legais para lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Tabela 5.7: Resultados analíticos do efluente tratado e padrões legais de emissão

| Corrente | Parâmetro | Resultado | Limite |
|----------------|----------------------------|-----------------------|-----------|
| T ₁ | Temperatura | 28,3 ± 1,9°C | 40°C |
| | pH | 7,60 ± 0,25 | 6,0 - 8,5 |
| | DQO | 81,0 ± 37,8 mg/L | 260 mg/L |
| | DBO | 10,2 ± 10,3 mg/L | 70 mg/L |
| | Fósforo total | 1,52 ± 1,19 mg/L | 2 mg/L |
| | Nitrogênio total | 5,80 ± 0,98 mg/L | - |
| | Óleos e Graxas Minerais | < 10 mg/L | 10 mg/L |
| | Carga orgânica | 62,3 ± 32,2 kgDQO/dia | - |

Fonte: Autora (2021); FEPAM (2019)

Os resultados atendem à legislação vigente e à LO concedida.

Foi calculada a redução da massa dos nutrientes fósforo total e nitrogênio total pelo sistema: 75% e 7% de remoção, respectivamente. Embora o sistema de tratamento aeróbio seja referência na remoção destes nutrientes, não se pode afirmar que a redução significativa do fósforo, por exemplo, tenha ocorrido nesta etapa. Pois as amostras analisadas eram de efluente bruto e tratado.

A partir dos valores obtidos, pode-se calcular a eficiência da etapa aeróbia e do sistema de tratamento como um todo. Os resultados foram 77,4% e 98,2%, respectivamente.

A Tabela 5.8 resume a eficiência de cada etapa do sistema de tratamento de

efluentes e a eficiência global do sistema.

Tabela 5.8: Eficiência do sistema de tratamento de efluentes

| Etapa | Eficiência |
|-------------------|---------------------|
| Reator UASB | 90,2 ± 4,2 % |
| Reator IC | 92,5 ± 4,2 % |
| Reatores aeróbios | 77,4 ± 6,0 % |
| STE | 98,2 ± 2,1 % |

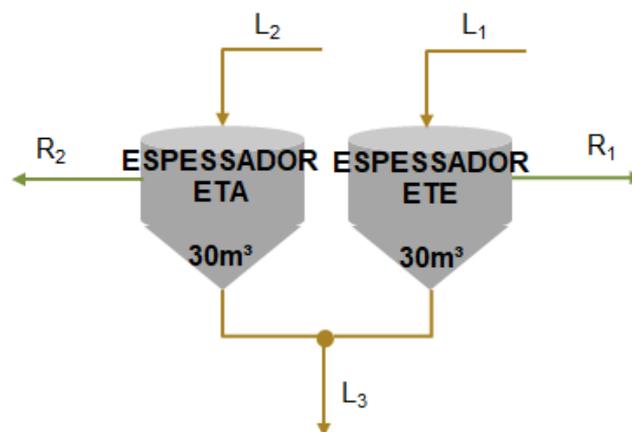
Fonte: Autora (2021)

5.8 Espessador

Existem dois tanques espessadores de base cônica de 30 m³ instalados no sistema de condicionamento do lodo: um para o lodo resultante do processo aeróbio de tratamento de efluentes e outro para o lodo removido dos floculadores do sistema de tratamento de água da empresa.

A alimentação dos espessadores de lodo da ETE e da ETA é representada pelas correntes L₁ e L₂, respectivamente.

Figura 5.8: Volume de controle dos espessadores



Fonte: Autora (2021)

O fundo do tanque é drenado por acionamento de bomba que direciona o lodo concentrado através da corrente L₃ à centrífuga, onde ocorre sua desidratação.

Não há medidor de vazão no sistema de remoção de lodo da ETE. No entanto,

é perceptível que a capacidade projetada para a situação da planta no passado não atenda à demanda por retirada de lodo atual. O espessador opera em tempo integral e, ainda assim, representa um gargalo no processo de tratamento de efluentes.

A linha de descarte de lodo da ETA possui medidor de vazão. No período estudado, foram descartados 11.686,2 m³ de lodo (L₂). Esse valor corresponde a uma vazão média de descarte de 15,7 m³/h e tempo de detenção de 115 minutos.

As correntes representadas como R₁ e R₂ são a porção de água recuperada no espessamento. Esse material transborda intencionalmente para a caixa 3, que é a caixa de passagem que abastece a etapa aeróbia (Figura 5.1).

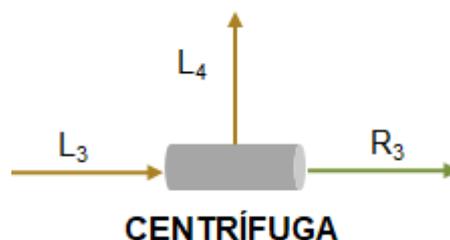
5.9 Centrífuga

Ao ser removido do espessador, o lodo é encaminhado ao processo de secagem. Para facilitar a centrifugação, é adicionado polímero catiônico à corrente de entrada. Sua ação promove melhor separação entre as fases sólida e líquida.

A centrífuga tem capacidade para tratar 6 m³ de lodo por hora. No entanto, não há mecanismos que permitam confirmar sua vazão de operação.

O lodo ingressa no equipamento através da linha L₃, recebe adição de polímero catiônico e, sob elevada velocidade de rotação, é separado em frações sólidas e líquidas, representadas pelas correntes L₄ e R₃, respectivamente.

Figura 5.9: Volume de controle da centrífuga



Fonte: Autora (2021)

O efluente recuperado (R₃) retorna para a caixa 3, como as correntes R₁ e R₂, de onde são enviados ao tratamento aeróbio.

A corrente L₄ representa o lodo desidratado, depositado em caçambas, destinado a compostagem. A massa de lodo desidratado retirado do processo no período estudado foi de 123,9 toneladas. Visualmente, o material obtido apresenta

aspecto intumescido, mesmo após a centrifugação.

6 CONCLUSÃO

Na avaliação global, o sistema misto se mostrou eficaz no tratamento de efluentes da indústria de bebidas. A eficiência de $98,2 \pm 2,1\%$ foi plenamente satisfatória. Isso se deve, em grande parte, ao desempenho dos reatores da fase anaeróbia na remoção de carga orgânica. Por outro lado, apenas o tratamento anaeróbio não seria capaz de gerar efluente tratado de acordo com os padrões previstos em legislação.

O estudo demonstrou que o monitoramento e controle de cada etapa é fundamental para a obtenção de bons resultados; e não apenas o monitoramento dos pontos de entrada e saída do processo. Ao mapear e acompanhar os parâmetros de cada fase, pode-se diagnosticar possíveis desvios no processo e estabelecer condições operacionais favoráveis, garantindo a qualidade do efluente tratado e redução de custos de operação.

6.1 Oportunidades

6.1.1 Efluente bruto

É importante que se conheça a composição e o volume do efluente a ser tratado. Por isso, é necessário que as áreas que compõem a manufatura sejam conscientes da influência que têm sobre o tratamento de efluentes. A comunicação entre os setores é uma ferramenta valiosa para proteção do sistema de tratamento e do meio ambiente.

Além disso, é recomendada a substituição da CSO por outro canal de recebimento de efluente, como uma Calha Parshall, por exemplo, através da qual seja possível medir a vazão de recebimento.

6.1.2 Equalização

Embora haja indicador de nível que possibilita observar o acúmulo neste ponto, salienta-se a importância da instalação de medidores de vazão em algumas posições estratégicas, como na entrada do tanque, nas saídas e na linha de recirculação.

6.1.3 Gasômetro

No sistema de biogás também é recomendada a instalação de medidores de vazão, pois não é conhecida a quantidade de gás gerado na digestão anaeróbia. A partir da medição da capacidade de geração de biogás, seria possível avaliar se os reatores recebem nutrientes em excesso - especialmente carbono.

Além disso, poderia ser estudada a viabilidade de instalação de um sistema de aproveitamento do biogás gerado (subproduto) como combustível na própria empresa. Esta ação reduziria o consumo de óleos combustíveis e eletricidade, diminuindo custos e impactos causados ao meio ambiente.

6.1.4 Tratamento aeróbio

O volume de lodo sedimentado permaneceu elevado no período estudado. Este resultado pode ser efeito de diversos fenômenos, como possível desequilíbrio na relação F/M, excesso de fornecimento de oxigênio, cisalhamento causado por turbulência hidráulica e restrições na retirada de lodo.

O sistema de lodo ativado tem oportunidades de estudo. Sugere-se o levantamento de dados referentes à biomassa gerada nos reatores e cálculo de índices como a relação F/M e índice volumétrico de lodo (IVL).

A partir de estudos complementares, poderia ser considerada a instalação de um terceiro reator para somar ao sistema de operação intermitente, compondo três estágios: em alimentação - em decantação - em descarte; ou a substituição do sistema atual por um modelo de operação contínua, seguido por decantador secundário circular.

6.1.5 Condicionamento do lodo

Os tanques espessadores de lodo da ETA e da ETE são pequenos, de 30 m³ cada. Não é possível calcular o tempo de detenção do lodo no espessador da ETE, pois não há medidor de vazão de retirada de lodo do reator. Ainda assim, estima-se que seja baixo, já que o tempo de detenção no espessador da ETA é de apenas 115 minutos, comprometendo a separação das fases.

Isso interfere na etapa subsequente: desidratação do lodo. Além de a

centrífuga instalada para desidratação do lodo oriundo dos processos da ETA e da ETE também ser de pequeno porte, ainda recebe o lodo bastante intumescido.

As etapas de condicionamento e desidratação do lodo têm oportunidades de estudo para obtenção de informações acerca da taxa de separação e secagem do lodo, aplicação de diferentes torques e testes em dosagem de polímero. Melhorias nestas operações podem acarretar redução de custos no transporte e destinação do lodo desidratado.

Apesar de o sistema de tratamento de efluentes ter oportunidades de estudo e de melhoria, é extremamente eficiente. Além de reduzir drasticamente a carga orgânica, todos os parâmetros do efluente tratado tiveram seus níveis reduzidos, atendendo aos rigorosos padrões da legislação ambiental.

REFERÊNCIAS

ABIR. Bebidas Não Alcoólicas: A cadeia de produção e distribuição que movimenta a economia do país. 2020. Disponível em: <<https://abir.org.br/abir/wp-content/uploads/2020/03/revista-abir-2020.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2021.

AMORIM, L. L. G.; VARGAS, K. P.; JESUS, E. H. A. análise de eficiência do sistema de lodo ativado no tratamento de efluentes de um curtume na cidade de Uberlândia – MG. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte/MG – 2014.

AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; SANTOS, M. L. F.; MONTEGGIA, L. Metodologias para determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) em lodos anaeróbios. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

AYUB, M. A. Z. Apostila Tratamento de efluentes. Curso Engenharia de Alimentos e Meio Ambiente. UFRGS.

BANCO DO NORDESTE. Indústria de bebidas não alcoólicas. 2020. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/documents/80223/7517365/2020_CDS_120.pdf/beae83f4-37e2-2fe0-9a5f-48575813c1cc>. Acesso em: 30 abr. 2021.

BRASIL. Resolução Nº 430/2011. 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

CHERNICHARO, C. A. L., Reatores Anaeróbios. 2ª Edição. Volume 5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

DEDINI. Manual técnico: Sistema de tratamento de efluentes Methax-Biopaq. 2015.

FEPAM. Licença de Operação. 2019.

FILHO, J. A. S. Tratamento de efluentes da indústria de bebidas em reator anaeróbio de circulação interna (IC). Revista Internacional de Ciências, v.3, n.1, 2013. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/viewFile/7065/5072>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

HENZE, M., HARREMOËS, P., Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors - A literature review. Journal Water Science and Technology, v. 15, p. 1-101, 1983.

HOYOS, N. L. M. Análise comparativa do desempenho de reator anaeróbio híbrido e reator de manto de lodo de fluxo ascendente (UASB) aplicados ao tratamento de esgoto sanitário. 2016.

IZQUIERDO, B. K. H., Estudo do comportamento de um sistema de lodos ativados com reator de leito móvel (MBBR). 2006.

KURITA. HANDBOOK OF WATER TREATMENT. [S.I.]: Tokyo. Kurita Water

Industries Ltda, 1999.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. McGraw Hill Brasil, 2015.

NUNES, G. F. M. Apostila Tratamento primário de efluentes. Disponível em: <http://www.tecquimica.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/Tratamento_Primary_de_Efluentes_-_Gisele_-_Cefet_2015.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2021.

PIVELI, R. P. Curso Qualidade de águas e poluição: aspectos físico-químicos. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%206%20-%20Alcalinidade%20e%20Acidez.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2021.

RIO GRANDE DO SUL. Resolução Nº 355/2017. 2017. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201707/19110149-355-2017-criterios-e-padrees-de-emissao-de-efluentes-liquidos.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SÊNA, J. R. D. Tratamento de efluentes em indústria de bebidas. 2012. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/6049/1/Julia%20Rodrigues%20Dib%20S%C3%AAna.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2021.

SEREJO, M. L. et al. Tratamento anaeróbio de efluentes de acidificação rápida usando calcário como agente tamponante. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v. 12, n. 1, p. 93 - 103, 2019.

SOARES, C. M. T. et al. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. Nativa, Sinop, v.5, esp., p.509-514, dez. 2017.

STEIN, R. T. Caracterização e avaliação do sistema de tratamento de efluentes de uma indústria alimentícia, visando o reuso. 2014. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/430/1/RoneiStein.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2021.

VOLTAN, P. E. N. Remoção de diuron e hexazinona por meio de adsorção em carvão ativado, oxidação e tratamento em ciclo completo. Universidade de São Paulo, 2014.

VON SPERLING, M. Lodos Ativados. 2ª Edição. Volume 4. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.