



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DE EFLUENTE BRUTO E PROPOSTA DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES EM INDÚSTRIA CERVEJEIRA DO
VALE DO TAQUARI**

Letícia Carolina da Cunha

Lajeado, novembro de 2019

Letícia Carolina da Cunha

**ANÁLISE DE EFLUENTE BRUTO E PROPOSTA DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES EM INDÚSTRIA CERVEJEIRA DO
VALE DO TAQUARI**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II do Curso de Engenharia Química da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, para fins de obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Professor Orientador: Dr. Daniel Lehn

Lajeado, novembro de 2019

RESUMO

Mundialmente conhecida, a cerveja é uma bebida alcoólica que tem conquistado espaço no mercado, sendo o Brasil o terceiro maior produtor mundial. Indústrias do ramo cervejeiro buscam melhorias e aumento de volume de produção, o que acarreta em geração de resíduos da fabricação, e o tratamento e descarte correto destes são essenciais para redução dos impactos ambientais. Legislações específicas foram criadas para determinar padrões de lançamentos de efluentes nos corpos receptores. O presente trabalho realizou o estudo do processo produtivo de cerveja Pilsen em uma indústria do Vale do Taquari, caracterizando o efluente gerado através de análises físico-químicas, e verificando a performance do sistema de tratamento de efluentes atual da indústria. A partir da caracterização, foi realizado teste de tratamento preliminar do efluente e dimensionamento do processo de lodo ativado. Para a caracterização do efluente, foram feitas três campanhas de amostragem em três pontos do sistema de tratamento atual da fábrica e as determinações analíticas se deram em efluentes provenientes da etapa de produção da cerveja Pilsen e da etapa de limpeza da fábrica, sendo analisados teores de DBO_5 , DQO, sólidos sedimentáveis, pH, turbidez, fósforo total e nitrogênio total Kjeldahl. Para avaliar a eficiência de remoção de parte dos poluentes do efluente, testou-se a floculação a partir de ensaios de Jar Test, onde o efluente clarificado mostrou reduções expressivas de cor e turbidez e redução de DQO, indicando contribuição da floculação para alcançar os padrões de lançamento exigidos. O sistema de lodo ativado dimensionado a partir da caracterização do efluente bruto é composto de reator aeróbio de $56,23 \text{ m}^3$, com tempo de retenção hidráulico de 4,32 dias, composto por sistema de aeração mecânica com dois aeradores superficiais. O decantador secundário dimensionado possui área superficial de $1,64 \text{ m}^2$ e volume de $4,93 \text{ m}^3$. Com este dimensionamento, estima-se que o sistema possa reduzir o valor de DBO_5 inicial do efluente para $124,86 \text{ mg/L}$, que juntamente com ajustes no tratamento preliminar da empresa e a etapa de floculação, torna possível o atendimento dos padrões de lançamento exigidos pela legislação vigente.

Palavras-chave: Cerveja. Processo produtivo. Tratamento de efluentes. Determinações analíticas. Teste de floculação. Sistema de lodos ativados.

ABSTRACT

Known worldwide, beer is an alcoholic beverage that has conquered space in the market, being Brazil the third largest producer. Brewing industries are looking for improvements and increased production volume, which leads to the generation of manufacturing waste, and their proper treatment and disposal are essential for reducing environmental impacts. Specific legislation was created to determine patterns of effluent discharges into recipient bodies. The present work carried out the study of the production process of Pilsen beer in a Taquari Valley industry, characterizing the effluent generated through physicochemical analysis, and verifying the performance of the current effluent treatment system of the industry. From the characterization, a preliminary effluent treatment test and sizing of the activated sludge process was performed. To characterize the effluent, three sampling campaigns were carried out at three points of the current treatment system of the factory and the analytical determinations were made in effluents from the Pilsen beer production stage and the cleaning stage of the factory. BOD₅, COD, sedimentable solids, pH, turbidity, total phosphorus and total nitrogen Kjeldahl. To evaluate the efficiency of removal of part of the effluent pollutants, flocculation was tested from Jar Test assays, where the clarified effluent showed significant color and turbidity reductions and COD reduction, indicating flocculation contribution to reach the standards. release requirements. The activated sludge system dimensioned from the characterization of the raw effluent is composed of 56.23 m³ aerobic reactor, with hydraulic retention time of 4.32 days, composed by mechanical aeration system with two superficial aerators. The secondary decanter has a surface area of 1.64 m² and a volume of 4.93 m³. With this sizing, it is estimated that the system can reduce the initial effluent BOD₅ value to 124.86 mg / L, which together with adjustments to the company's preliminary treatment and flocculation step, makes it possible to meet the release standards. required by applicable law.

Keywords: Beer. Production process. Effluent treatment. Analytical determinations. Flocculation test. Activated sludge system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Total de cervejarias por ano no Brasil.....	16
Figura 02 - Processo produtivo cervejeiro.....	18
Figura 03 - Peneira estática	27
Figura 04 - Caixa de areia retangular com fluxo horizontal.....	28
Figura 05 - Esquema de funcionamento do decantador retangular.....	33
Figura 06 - Esquema de funcionamento do decantador circular	33
Figura 07 - Esquema de funcionamento de um reator UASB.....	37
Figura 08 - Filtro biológico percolador	38
Figura 9 - Esquema de lagoa facultativa	43
Figura 10 - Valores médios de DQO e DBO da 1ª coleta, etapa de produção	63
Figura 11 - Valores médios de DQO e DBO da 2ª coleta, etapa de produção	64
Figura 12 - Valores médios de DQO e DBO da 3ª coleta, etapa de produção	64
Figura 13 - Valores médios de DQO e DBO da 1ª coleta, etapa de limpeza.....	68
Figura 14 - Valores médios de DQO e DBO da 2ª coleta, etapa de limpeza.....	68
Figura 15 - Valores médios de DQO e DBO da 3ª coleta, etapa de limpeza.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Cervejarias por estado	17
Quadro 02 - Dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Características do efluente proveniente de cervejaria.....	21
Tabela 02 - Valores de concentrações e eficiência dos parâmetros	24
Tabela 03 - Frequência de monitoramento dos ensaios de toxicidade	25
Tabela 04 - Espaçamento entre as barras	26
Tabela 05 - Eficiência de remoção de DBO	67
Tabela 06 - Eficiência de remoção de DQO	67
Tabela 07 - Eficiência de remoção de DBO	70
Tabela 08 - Eficiência de remoção de DQO	70
Tabela 09 - Determinações físicas e químicas da etapa de produção	72
Tabela 10 - Determinações físicas e químicas da etapa de limpeza.....	75
Tabela 11 - Resultados do teste de floculação.....	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 Objetivos	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Origem da cerveja	14
3.2 Produção da indústria cervejeira.....	15
3.3 Processo produtivo da cerveja	17
3.4 Efluentes provenientes da produção de cervejas	20
3.5 Legislação ambiental – efluentes líquidos.....	23
3.6 Tratamentos de efluentes	25
3.6.1 Tratamento preliminar.....	25
3.6.1.1 Gradeamento	26
3.6.1.2 Peneiramento.....	27
3.6.1.3 Remoção de areia.....	28
3.6.1.4 Equalização.....	29
3.6.2 Tratamento primário.....	29
3.6.2.1 Coagulação e floculação	30
3.6.2.2 Sedimentação/decantação	31
3.6.2.3 Flotação.....	34
3.6.2.4 Filtração	34

3.6.3 Tratamento secundário	35
3.6.3.1 Reatores anaeróbios	36
3.6.3.2 Filtração biológica.....	38
3.6.3.3 Lodos ativados	39
3.6.3.4 Lagoas de estabilização	41
3.7 Trabalhos publicados em tratamento de efluentes de cervejaria	44
4 MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1 Material.....	47
4.2 Métodos.....	49
4.2.1 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO ₅).....	49
4.2.2 Demanda química de oxigênio (DQO)	50
4.2.3 Fósforo total	50
4.2.4 Nitrogênio total Kjeldahl	50
4.2.5 pH	51
4.2.6 Sólidos sedimentáveis.....	51
4.2.7 Turbidez	51
4.2.8 Tempo de retenção hidráulico e eficiência de remoção de carga orgânica	52
4.2.9 Teste de floculação	52
4.2.10 Dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados	54
4.2.10.1 Fator de biodegradabilidade	54
4.2.10.2 Sistema de lodos ativados – Reator aeróbio	54
4.2.10.2.1 Volume do reator	55
4.2.10.2.2 Tempo de retenção hidráulico	56
4.2.10.2.3 Relação alimento/microrganismo	56
4.2.10.2.4 Remoção de lodo excedente	57
4.2.10.2.5 Sistema de aeração mecânico	58
4.2.10.2.6 Requisitos de nutrientes.....	58
4.2.10.3 Dimensionamento do decantador secundário.....	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1 Caracterização do efluente bruto.....	63

5.1.1 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) e demanda química de oxigênio (DQO).....	63
5.1.2 Outras determinações físicas e químicas	71
5.2 Teste de floculação	76
5.3 Dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados	77
6 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS.....	81
ANEXO	88
ANEXO A - Memorial de cálculo do dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados	89

1 INTRODUÇÃO

A cerveja faz parte da vida das pessoas há séculos, e é caracterizada como uma bebida obtida de forma geral, pelo cozimento do mosto, sendo este o produto gerado a partir do malte provindo de cereais, água e lúpulo, e pela fermentação de leveduras (SENAI, 2014). As indústrias cervejeiras cada vez mais têm ganhado espaço no mercado, ocasionando em um aumento nas variedades das bebidas, havendo também, grande interesse pelas cervejas feitas artesanalmente (CARVALHO; ROSA, 2015).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CERVBRASIL), o setor cervejeiro é um dos que mais gera empregos, empregando cerca de 2,7 milhões de pessoas em 2017, e tendo 107 bilhões de reais faturados. Responsáveis por 1,6% do PIB brasileiro, as indústrias cervejeiras contribuem com R\$ 23 bilhões de reais em impostos ao ano, sendo o Brasil o terceiro maior país produtor de cerveja do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos e da China (CERVBRASIL, 2018; BRASIL, 2017).

O processo de produção da cerveja inicia-se a partir da moagem do malte, sendo este solubilizado em água no tanque de mostura, local onde ocorrem reações com enzimas. Acabada a etapa enzimática, ocorre a filtragem do composto, no qual separa-se o líquido dos sólidos, mosto e bagaço respectivamente. O mosto resultante é cozido e adicionado lúpulo, sendo posteriormente resfriado em um trocador de calor, geralmente do tipo placas. Após resfriado, o mosto é direcionado à tanques de fermentação e maturação, onde ocorre a adição de leveduras que irão realizar a

conversão dos açúcares fermentativos em álcool e gás carbônico, havendo também o desenvolvimento das características sensoriais da cerveja. Por fim a cerveja é filtrada novamente e acondicionada em tanques, onde está pronta para o envase e posterior consumo (CERVESIA, 2017).

Dentre os resíduos gerados durante o processo de fabricação se encontram as águas residuais com agentes contaminantes, rejeitos de malte, lúpulo, levedura, resíduos provenientes da etapa de filtração e envasamento (KUNZE, 2006). Desta forma, é imprescindível o tratamento adequado dos resíduos. Em agosto de 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305, que visa melhorias nos tratamentos e disposições dos resíduos sólidos, como também a conscientização dos fabricantes e consumidores sobre os impactos causados pelo tratamento inadequado, incentivando hábitos de consumo sustentáveis (BRASIL, 2010).

Com relação à proteção de recursos hídricos no Brasil, o Código das Águas de 1934 foi o primeiro a abordar o assunto, criando o decreto nº 24.643, que define a qualidade das águas que serão receptoras dos efluentes (BRASIL, 1934). Parâmetros para lançamento direto em corpo receptor foram determinados através da Resolução 357/2005 e foi complementada parcialmente pela Resolução 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Conforme Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) 355/2017, são estabelecidos padrões de lançamentos de efluentes líquidos de fontes poluidoras, como temperatura de até 40°C, pH com variações de 6,0 a 9,0, livre de odor desagradável e não devem conferir mudança de coloração ao corpo hídrico receptor (BRASIL, 2011, 2017).

Dentre os principais tratamentos de efluentes da indústria cervejeira, tanto físicos como químicos, destacam-se o gradeamento/peneiramento, decantação, flotação, equalização, coagulação e floculação, neutralização de pH e cloração, além dos processos biológicos para remoção de carga orgânica. Na etapa biológica geralmente usa-se reator anaeróbio, sistemas de lodos ativados, sistema de aeração e desnitrificação (GEREMIAS, 2017).

Os efluentes oriundos de indústrias cervejeiras podem ser caracterizados a partir do estudo do tipo de processo produtivo e produtos utilizados, e determinações analíticas. Por possuírem características como: altas quantidades de açúcares, pH

alcalino e elevada carga de origem orgânica, requerem um tratamento mais complexo, podendo chegar a etapas terciárias antes de serem lançados nos corpos receptores (FILHO et al., 2013).

Dado o exposto, o presente trabalho propõe-se a estudar a geração de efluentes de uma indústria cervejeira localizada na cidade de Bom Retiro do Sul/RS, região do Vale do Taquari, caracterizando a carga poluidora para definir uma estratégia de tratamento adequado para o efluente líquido, propondo dimensionamento de sistema de lodos ativados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar a caracterização físico-química de efluentes oriundos dos processos de produção da cerveja para proposta de tratamento, dimensionando operações de um processo de lodo ativado.

2.2 Objetivos específicos

- a) Estudo do processo de produção da cerveja Pilsen, determinando os pontos principais de geração do efluente da indústria;
- b) Caracterização de amostra representativa do efluente gerado, através de análises físico-químicas;
- c) Verificação do desempenho do tratamento de efluentes atual da indústria;
- d) Teste de tratamento preliminar a partir da caracterização do efluente;
- e) Dimensionamento de operações de processo de lodo ativado para o efluente em estudo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Origem da cerveja

Não existe registro de data exata de quando se obteve o primeiro conhecimento sobre a cerveja e suas matérias-primas, porém têm-se registros de que cerca de 9 a 10 milênios atrás, nas regiões da Mesopotâmia e China ocorreu o primeiro contato com o cereal, através do cultivo por povos de origem nômade. Cerca de 4.300 a.C., nas regiões da Babilônia, bebidas à base de cereal eram produzidas a fim de saciar a sede e para a realização de oferenda a deuses (HAMPSON, 2014). De acordo com Kunze (2006), o contato mais antigo com a bebida se dá em 2.800 a. C. na Mesopotâmia, onde trabalhadores bebiam um líquido a base de cereais juntamente com pão.

Registros decifrados no ano de 1913 comprovam que os sumérios ingeriam bebidas denominadas *sikaru*, sendo estas compostas de líquidos fermentados a base de cereais. Já o monumento Blau, objeto histórico sumérico, comprova que a bebida era usada em oferendas à deusa Nin-Harra, relatando que cerca de 40% dos cereais eram destinados à produção de cerveja na época (GIORGI; JÚNIOR, 2016). De grande importância para o crescimento de civilizações, a cerveja é um símbolo da cultura germânica, onde há elevado consumo da bebida (SOUZA, 2004).

Na idade média, eram as mulheres responsáveis pela produção da cerveja, de forma caseira, onde toda a família degustava da bebida. Sendo um composto de cereais baratos, diferentemente do vinho, em mosteiros eram desenvolvidas técnicas e receitas para a produção. Os monges, por serem pessoas muito cultas, foram os

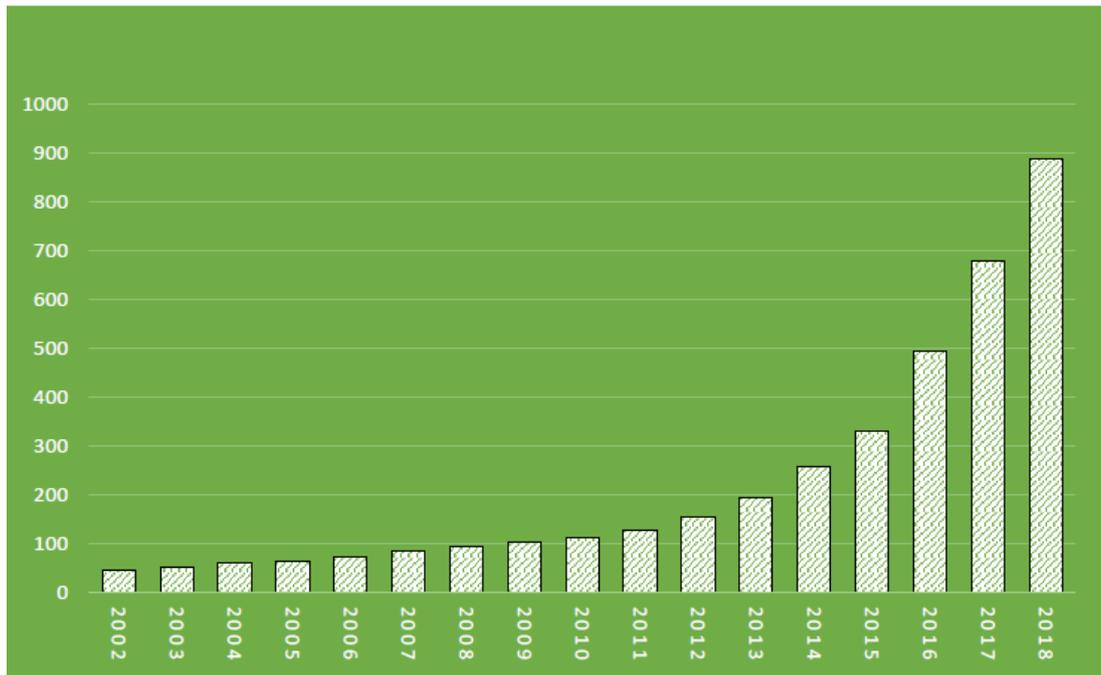
primeiros a estudar o processo produtivo, sendo também os primeiros a produzir cerveja em grande escala (SILVA et al., 2016). No ano de 1587, a primeira cerveja de milho foi produzida nos EUA, e em 1810 em Munique ocorreu um festival com fins de celebração do casamento do príncipe Ludwig, onde o evento ficou conhecido como *Ocktoberfest*. Já em meados da década de 1840, ocorreu a primeira produção da cerveja *Lager* clara, nas regiões da República Tcheca (HAMPSON, 2014). A cerveja chega ao Brasil juntamente com os europeus, onde deu-se início ao comércio da bebida, que na época não era tão conhecida no país. Em sua grande maioria, os colonizadores portugueses não eram consumidores de cerveja, então foi por meio da colonização holandesa que a bebida ganhou espaço no país. Em 1654, os povos holandeses deixaram o país, sendo a cerveja esquecida por mais de 100 anos, surgindo novamente no século XVIII, motivando o contrabando de cerveja antes de 1808. Na época houve influência da cultura holandesa sobre a portuguesa, sendo a maior produtora do líquido a base de malte. Desde então a cerveja ganhou cada vez mais espaço no mercado, resultando em aumento na produção da bebida (SANTOS, 2004; SILVA et al., 2016).

3.2 Produção da indústria cervejeira

O setor cervejeiro se destaca pela grande geração de empregos, empregando mais de 2 milhões de pessoas no ano de 2017, resultando em um faturamento de mais de 100 bilhões de reais. Este ramo de bebidas tornou-se responsável por 1,6% do PIB brasileiro, contribuindo de maneira expressiva nos impostos, cerca de 21 bilhões de reais ao ano (BRASIL, 2017; CERVBRASIL, 2018).

No ano de 2018, 210 novos estabelecimentos abriram suas portas, totalizando 889 cervejarias legalmente registradas no país. Na Figura 01 é possível observar a evolução entre os anos de 2002 a 2018, ocasionando em uma ampliação exponencial deste tipo de indústria, que ao longo dos anos, não diminui seu ritmo de crescimento (MAPA, 2019).

Figura 01 - Total de cervejarias por ano no Brasil



Fonte: MAPA (2019).

O Brasil está classificado como terceiro maior produtor de cerveja do mundo, sendo a bebida alcoólica mais consumida no país. Com o aumento do consumo e da exigência sensorial de cervejas, tanto da bebida produzida em larga escala como também das cervejas especiais, é previsto um avanço promissor na importação, visto que há um maior interesse em produtos diferenciados. A fim de obter novas experiências, apreciadores dos diferentes tipos da bebida estão com paladares mais aguçados. A produção brasileira anual de cerveja chega a 14,8 bilhões de litros, valor superado somente pelos Estados Unidos e pela China (CERVBRASIL, 2014; CERVESIA, 2011; DATAMARK, 2015).

Conforme Quadro 01, o Rio Grande do Sul se destaca pelo número de cervejarias existentes, em comparação a outros estados e regiões do Brasil.

Quadro 01 - Cervejarias por estado

Rio Grande do Sul	186
São Paulo	165
Minas Gerais	115
Santa Catarina	105
Paraná	93
Rio de Janeiro	62
Goiás	25
Pernambuco	18
Espírito Santo	19
Mato Grosso	13

Fonte: Adaptado pela autora com base em Brasil (2018).

No que diz respeito às cervejas especiais, denominadas cervejas artesanais, responsáveis por gosto e qualidade diferenciados se comparadas às cervejas industriais, estas são produzidas em escalas menores, sem haver incremento de aditivos em suas composições, como corantes, estabilizantes e aromatizantes. Possuindo atualmente uma parcela reduzida no mercado nacional, as cervejas especiais vêm conquistado consumidores, pois a renda *per capita* da população têm aumentado, juntamente com o interesse por cervejas de maior qualidade e valor agregado (CERVBRASIL, 2014; DATAMARK, 2015; FERREIRA et al., 2018; MELO, 2015; KLEBAN; NICKERSON, 2012).

3.3 Processo produtivo da cerveja

A Figura 02 apresenta o processo de produção da cerveja de forma geral.

Figura 02 - Processo produtivo cervejeiro



Fonte: Rosa e Afonso (2015).

O processo varia e é modificado de acordo com o tipo de cerveja que deseja-se fabricar, podendo haver processos simplificados e complexos. A indústria cervejeira é considerada uma fábrica com quantidades abrangentes de etapas, sendo o processo iniciado pela escolha do malte, um cereal originado a partir da germinação e dessecação do cereal, que em sua maioria é usada a cevada, por possuir grande produção e ser resistente ao acamamento se comparada a outros cereais, espigando mais tarde que os demais (BAMFORTH, 2011; VENTURINI FILHO, 2010).

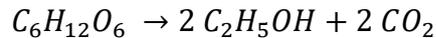
Entre outros cereais que podem ser usados na fabricação, faz-se também o uso de arroz, milho e trigo. Após escolha do tipo do malte, ocorre a seleção, limpeza, secagem e maceração dos grãos. A moagem do malte é realizada para que ocorra a liberação do amido, facilitando a ação das enzimas na etapa de mostura. A mosturação é a etapa onde ocorre a junção do malte com água, em temperatura controlada de até 72 °C para que não ocorra a inativação das enzimas durante o processo. O amido proveniente do malte será convertido em glicose, formando uma mistura açucarada, formulação base para a cerveja. O produto resultante é

posteriormente filtrado para eliminação dos sólidos provenientes do bagaço do malte, onde o resíduo também será lavado para que todo o açúcar produzido seja extraído (DUARTE, 2015; KUNZE, 2006; ROSA; AFONSO, 2015).

Após filtrado, o líquido derivado da mosturação é denominado mosto, sendo encaminhado para a etapa de fervura, onde irá ocorrer a adição do lúpulo, flor originária da planta da classe *Humulus lupulus*, que dá o gosto amargo característico à bebida, sendo um conservante natural, geralmente plantado em regiões da América, Ásia e Europa. Esta etapa visa, além da extração dos compostos do lúpulo para garantia de aroma e sabor, a inativação das enzimas antes necessárias na etapa de mostura, coagulação das proteínas e esterilização do mosto. Após fervido, o mosto contém particulados sólidos provindos das proteínas e extração dos constituintes do lúpulo, sendo este aglomerado de particulados denominado *trub* . O *trub* é removido através do processo *whirlpool* , na qual se faz necessário o uso da força centrípeta para que o resíduo sólido que acondicione no centro do tanque para posterior descarte (BAMFORTH, 2011; BRUNELLI et al., 2014; DUARTE, 2015; ROSA; AFONSO, 2015; SENAI, 2014).

O mosto então é direcionado a etapa de resfriamento, tendo em vista a diminuição da temperatura para que líquido esteja em condições ideais para inoculação da levedura na etapa seguinte, a fermentação. A levedura utilizada no processo é um fungo eucariota, sendo a *Saccharomyces cerevisae* comumente utilizada. Em sua maioria, cada fabricante possui sua levedura, variando o tipo de acordo com a cerveja que deseja ser produzida, que será determinante no processo de fermentação. No processo produtivo cervejeiro existem a alta e baixa fermentação. A alta fermentação se dá em temperaturas que variam de 14 a 20°C e o processo fermentativo ocorre na superfície do mosto. Já na baixa fermentação, as temperaturas de processo variam de 6 a 12°C, e a reação realiza-se no fundo do tanque. Na fermentação, maior objetivo é a conversão dos carboidratos fermentescíveis, principalmente da glicose e da maltose, em etanol e gás carbônico, através do consumo destes açúcares pelas leveduras, a conversão pode ser visualizada através da Reação 1 (BAMFORTH, 2011; BRUNELLI et al., 2014; DUARTE, 2015; ROSA; AFONSO, 2015; SENAI, 2014).

Reação 1 – Conversão da glicose em etanol e gás carbônico.



Além da formação de etanol e gás carbônico, durante a fermentação são produzidos outros subprodutos resultantes do metabolismo da levedura que influenciarão no sabor e aroma da bebida, sendo alguns indesejáveis. A formação dos compostos está relacionada com as matérias-primas utilizadas, como também pH, temperatura, pressão do tanque, duração do processo, dentre outras variáveis, sendo imprescindível um bom controle de processos (DUARTE; ROSA; AFONSO, 2015).

Após fermentada, a cerveja é encaminhada à etapa de maturação, sendo esta realizada em temperaturas próximas a 0°C. Chamada de fermentação secundária, a maturação é realizada para acentuar características sensoriais da bebida e clarificá-la, através da precipitação das leveduras e de outros particulados que causam turbidez. Terminada a etapa de maturação, a cerveja passa novamente por um processo de filtragem, visando a remoção dos resíduos resultantes das leveduras e de particulados insolúveis, sendo posteriormente encaminhada para os processos de carbonatação, pasteurização, e por fim, envase (DUARTE; ROSA; AFONSO, 2015).

Conforme bibliografia pesquisada, a etapa do processo produtivo em que há maior geração de efluentes líquidos é na produção do mosto (BORTOLI et al., 2013; KUNZE, 2006).

3.4 Efluentes provenientes da produção de cervejas

A indústria cervejeira abrange um gama de processos produtivos por sua extensa variedade de bebidas, acarretando na geração de efluentes com características diversas, provenientes tanto da produção da cerveja em si, como na limpeza de maquinário e processos de resfriamento (ARANTES, 2018; PORTES, 2016). Segundo Olajire (2012), para cada litro de cerveja produzida, são gerados de 3 a 10 litros de efluentes, onde a água residual necessita de tratamento para posterior descarte, tendo que atender os parâmetros exigidos pela legislação ambiental, caso contrário, pode acarretar em desequilíbrio e poluição de corpos receptores.

Na Tabela 01 são apresentadas as principais características dos efluentes gerados na cervejaria.

Tabela 01 - Características do efluente proveniente de cervejaria

Parâmetro	Valor	Referência	Valor	Referência
pH	3 – 12		3,3 - 5,1	
Temperatura	18 - 40 °C		-	
DQO	2000 - 6000 mg/L		-	
DBO	1200 - 3600 mg/L		1678 - 3267 mg/L	
Ácidos Graxos voláteis	1000 - 2500 mg/L		-	
Fósforo total	10 - 50 mg/L	RAO et al. (2006)	33,7 - 53,9 mg/L	CHOI (2016)
Nitrogênio total	25 - 80 mg/L		48,6 - 76,3 mg/L	
Sólidos totais	5100 - 8750 mg/L		-	
Sólidos suspensos	2901 - 3000 mg/L		1997 - 2865 mg/L	
Sólidos totais dissolvidos	2020 - 5940 mg/L		-	
Carbono orgânico dissolvido	-		2987 - 5864 mg/L	

Fonte: Adaptado pela autora com base em Choi (2016) e Rao et al. (2006).

De acordo com a Tabela 01, as cargas de compostos que caracterizam o efluente cervejeiro possuem uma extensa faixa de variação. Isso se deve aos processos envolvidos, natureza das matérias-primas, aditivos químicos, produtos utilizados na limpeza de maquinário, fluídos da etapa de resfriamento e quantidade de água usada nas operações, onde por consequência, são produzidos mais de um tipo de efluente (ARANTES, 2018; GEREMIAS, 2017; PORTES, 2016). A maior parte da carga orgânica encontrada nos efluentes provêm do processo produtivo, onde há a formação de açúcares através da conversão do amido, ácidos graxos e etanol. Os sólidos suspensos provêm principalmente de resíduos de cereais, leveduras e aditivos de origem inorgânica (ARANTES, 2018; OLAJIRE, 2012; SIMATE et al., 2011).

Nas etapas de limpeza e esterilização de equipamentos utiliza-se grandes volumes de água, ocasionando em maior diluição do efluente e concentração de sólidos dissolvidos, fazendo também com que haja maior variação dos valores de pH. As cargas de nitrogênio e fósforo estão relacionadas principalmente às matérias-primas e leveduras utilizadas durante o processo produtivo, entretanto, o processo de limpeza também contribui nas concentrações desses compostos, onde as

quantidades presentes dependem do volume de água e dos agentes de limpeza utilizados (OLAJIRE, 2012; SIMATE et al., 2011).

Dentre os parâmetros analisados nos efluentes, destacam-se: DBO, DQO, pH, nitrogênio, fósforo e sólidos suspensos. A DBO e DQO estão relacionadas à concentração de oxigênio necessária para estabilização da matéria orgânica presente no meio, sendo a DBO a fração de oxigênio consumida por microrganismos para realização da degradação da matéria orgânica, e a DQO a relação da porção de matéria de origem orgânica suscetível a oxidações químicas. Altas concentrações destes compostos acarretam na proliferação de microrganismos decompositores, dificultando a autodepuração do ambiente hídrico e conseqüentemente, na diminuição da concentração de oxigênio dissolvido no meio, necessário para a respiração e sobrevivência da biota aquática (BEM et al., 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

O pH é um indicador de basicidade e alcalinidade, e influencia em diversos parâmetros de origem física, química e biológica, podendo citar a alcalinidade para o crescimento de microrganismos responsáveis pela oxidação da matéria orgânica, processos de coagulação, e dureza da água. De maneira geral, valores de pH entre 6 e 9 são ideais para a existência de vida em corpos hídricos (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

Sólidos suspensos possuem uma relação com a turbidez, pois o excesso de concentrações de particulados sólidos em suspensão implica em um aspecto turvo ao meio, impedindo a passagem de luz solar, dificultando assim, a fotossíntese dos seres aquáticos. Já o nitrogênio e fósforo são nutrientes necessários para o desenvolvimento de algas, porém o crescimento exacerbado pode ocasionar na eutrofização dos corpos hídricos. O nitrogênio pode ser encontrado em diversas formas, conforme seu estado de oxidação, desta forma cita-se a amônia, sendo esta tóxica aos peixes e o nitrato, que pode influenciar no desenvolvimento de doenças como metemoglobinemia (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

3.5 Legislação ambiental – efluentes líquidos

Os órgãos regulamentadores são os que definem os padrões dos parâmetros de lançamento de efluentes em corpos receptores. O CONAMA é o órgão brasileiro responsável pela adoção de medidas ambientais ligado Sistema Nacional do Meio Ambiente, e em âmbito estadual, o órgão responsável pelas medidas ambientais é o Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA).

Conforme Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), são estabelecidos critérios e disposições referentes à classificação dos corpos hídricos, tal como seus enquadramentos, além de definir padrões relacionados ao lançamento de efluentes. A Resolução nº430/2011 complementa e altera parcialmente a Resolução nº 357/2005, conferindo condições e padrões de lançamento de efluentes, onde o Artigo nº16 desta resolução dispõe padrões e exigências referentes ao lançamento de efluentes em corpo receptor. Dentre os critérios abrangidos de maneira geral, destacam-se o pH, devendo manter valores na faixa de 5 a 9; temperatura do efluente, que não deve ultrapassar os 40°C, sem que exceda o valor de 3°C na variação de temperatura comparada ao corpo receptor; e remoção mínima de DBO de 60%, onde esse valor só poderá ser alterado através da comprovação da autodepuração do corpo hídrico estar em atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor (BRASIL, 2005, 2011).

Em âmbito estadual, há a Resolução CONSEMA 355/2017, na qual são estabelecidos critérios e padrões de emissões de efluentes líquidos provindos de fontes poluidoras para lançamento em corpos hídricos superficiais localizados no estado do Rio Grande do Sul. Esta resolução exclui lançamentos em corpos receptores de outras origens, como águas de mares e injeções ao solo, que serão avaliados de forma independente pelo órgão ambiental, conforme Artigo nº 3 desta resolução. Para determinação dos parâmetros e padrões de emissões dos resíduos líquidos, o Artigo nº 6 cita que é de responsabilidade do empreendedor informar os possíveis compostos presentes nos resíduos gerados no empreendimento, tendo embasamento nas matérias-primas e insumos característicos da atividade da indústria. É determinado no Artigo nº10 os padrões de emissões dos efluentes líquidos de forma geral, sendo citado no Artigo nº11 que poderão ser estabelecidos outros

parâmetros específicos, mediante avaliação do órgão regulamentador competente (BRASIL, 2017).

A Tabela 2 apresenta os padrões de emissões estabelecidos no Artigo nº17, conforme a vazão de efluente da fonte poluidora.

Tabela 02 - Valores de concentrações e eficiência dos parâmetros

Faixa de vazão do efluente (mg/L)	DBO₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Fósforo total mg/L	Eficiência	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)
Q < 100	120	330	140	4	75%	20
100 ≤ Q < 500	110	330	125	3	75%	20
500 ≤ Q < 1.000	80	300	100	3	75%	20
1.000 ≤ Q < 3.000	70	260	80	2	75%	20
3.000 ≤ Q < 7.000	60	200	70	2	75%	20
7.000 ≤ Q < 10.000	50	180	60	2	75%	20
10.000 ≤ Q	40	150	50	1	75%	20

Fonte: Adaptado pela autora com base em Brasil (2017).

Na Tabela 02 é possível visualizar a diminuição da concentração dos parâmetros à medida que há aumento da vazão do lançamento dos efluentes. A diferença de valores leva em consideração a capacidade do corpo receptor para recebimento dos poluentes sem que haja o comprometimento da qualidade da água, visando também a autodepuração dos corpos hídricos, visto que cargas excessivas de compostos presentes nos efluentes podem implicar em efeitos danosos aos corpos receptores, conforme citado anteriormente no presente estudo (VON SPERLING, 2017).

No que diz respeito à toxicidade, em 2017 foi publicada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS (FEPAM), a Portaria nº66, que estabelece a frequência de monitoramento de toxicidade para empreendimentos que lançam seus resíduos em águas superficiais localizadas no estado do Rio Grande do Sul. O Artigo nº1 cita que devem ser realizadas análises de pelo menos dois níveis tróficos, sendo usados os critérios estabelecidos na Resolução Conama nº430/2011. Ressalta-se que é de responsabilidade do órgão ambiental competente determinar quais serão os métodos de análise do parâmetro e sua periodicidade. Conforme Artigo nº6 desta portaria, a frequência de monitoramento de acordo com a vazão de efluente gerada está apresentada na Tabela 03.

Tabela 03 - Frequência de monitoramento dos ensaios de toxicidade

Vazão de efluentes	Frequência de ensaios
$Q_{\text{máx efl}} \leq 100 \text{ m}^3/\text{dia}$	anual
$100 \text{ m}^3/\text{dia} < Q_{\text{máx efl}} \leq 5.000 \text{ m}^3/\text{dia}$	semestral
$5.000 \text{ m}^3/\text{dia} < Q_{\text{máx efl}}$	bimestral

Fonte: Adaptado pela autora com base em Brasil (2017).

Conforme Tabela 03, à medida que há aumento da vazão de efluente gerado, maior será a frequência de realização dos ensaios de toxicidade, isso se dá devido a possibilidade de acréscimo nas concentrações de compostos tóxicos nocivos a biota aquática do corpo receptor em despejos de efluentes de maior vazão.

3.6 Tratamentos de efluentes

A produção de cerveja gera grandes quantidades de águas residuais e resíduos sólidos, sendo imprescindível o descarte e tratamento correto dos mesmos, respeitando a legislação vigente. É estimado que para cada litro de cerveja que é produzido, cerca de dez litros de água são usados, sendo principalmente consumidos do processo de fabricação, limpeza e resfriamento. Normalmente o tratamento de efluentes líquidos compreende uma sequência que inclui operações unitárias divididas em tratamento preliminar, primário ou químico e secundário ou biológico (OLAJIRE, 2012).

Em indústrias cervejeiras, a caracterização do efluente para tratamento posterior varia com o processo produtivo e tecnologia utilizada, tendo enfoque no tratamento biológico, por este tipo de resíduo líquido apresentar elevada concentração de material orgânico, resultante dos insumos utilizados e fabricação da bebida.

3.6.1 Tratamento preliminar

Nesta etapa há a recepção do efluente e preparação para os tratamentos subsequentes, objetivando a homogeneização do resíduo, como também remoção de compostos que podem ser separados de maneira física do líquido, sendo estes, os sólidos grosseiros e em suspensão, decorrentes das matérias-primas utilizadas no

processo produtivo, incluindo material excedente de malte, lúpulo, trub, como também resíduos sólidos de embalagens e varrição da fábrica. Os processos comumente utilizados no tratamento preliminar são: gradeamento, peneiramento, remoção de areia e equalização (METCALF; EDDY, 2013; OLAJIRE, 2012).

3.6.1.1 Gradeamento

O gradeamento é constituído por grades com aberturas uniformes que servem para reter o material sólido presente no efluente, evitando contaminações de tubulações e danos nos equipamentos do restante do processo de tratamento. Para avaliação do tipo de grade que deverá ser utilizada, deve-se levar em consideração o tipo de sólido presente no efluente e a eficiência de remoção necessária para os tratamentos posteriores, sem que haja comprometimento de equipamentos e dos processos. O material com diâmetro maior que a abertura das grades será retido, sendo as grades classificadas em grossas, médias, finas, ultrafinas ou peneiras, conforme Tabela 04, que mostra a classificação das grades e seus espaçamentos (JORDÃO; PESSÔA, 2014; METCALF; EDDY, 2013; VON SPERLING, 2017).

Tabela 04 - Espaçamento entre as barras

Tipo de Grade	Milímetros
Grades grosseiras	40 a 100
Grades médias	20 a 40
Grades finas	10 a 20
Grades ultrafinas ou peneiras	3 a 10

Fonte: Adaptado pela autora com base em Jordão e Pessôa (2014).

As grades grosseiras servem para retenção de material mais grosseiro como entulhos, resíduos de embalagens, folhagens e pedras, sendo produzidas comumente por barras e cabos dispostos paralelamente. Já as grades mais finas retêm particulados menores, como resíduos de varrição e até mesmo resíduos de origem orgânica, sendo uma opção para remoção de parte da carga orgânica presente no efluente antes do seu tratamento específico, e estas são confeccionadas geralmente por placas perfuradas, malhas ou arames trançados com pequenas aberturas. Em efluentes industriais, é usual o uso de dois tipos de grades, uma grade grosseira

seguida de uma grade com diâmetro menor, sendo assim, a grade grosseira irá reter os sólidos de maiores diâmetros a fim de evitar possíveis danos em equipamentos e tubulações, protegendo também a grade fina, onde essa irá conseguir reter particulados menores, facilitando os tratamentos posteriores (JORDÃO; PESSÔA, 2014; METCALF; EDDY, 2013; VON SPERLING, 2017).

3.6.1.2 Peneiramento

Podendo também ser chamadas de grades ultrafinas, as peneiras possuem aberturas variando entre 3 e 10 mm, auxiliando na remoção de pequenas partículas, sendo uma operação geralmente utilizada na remoção de carga orgânica, o que gera diminuição de custos e área em tratamentos posteriores desse tipo de composto. As peneiras são classificadas em estáticas ou móveis, variando o tipo de remoção. Peneiras estáticas são confeccionadas de aço inoxidável e possuem espaçamento entre as barras que variam de 0,25 a 2,50 mm, sendo inclinadas e retraindo o material conforme o fluxo do efluente durante a operação, de acordo com a Figura 03.

Figura 03 - Peneira estática



Fonte: Jordão e Pessôa (2014).

Por promoverem a auto-limpeza e não possuírem partes móveis, são vantajosas por serem econômicas operacionalmente e por não necessitarem de manutenção frequente (GIORDANO, 2004; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

As peneiras móveis possuem as mesmas variações de espaçamento nas aberturas que a peneira estática, porém são formadas por barras de aço em formato cilíndrico e são giratórias, onde o efluente irá passar com fluxo axial ou tangencial, retendo as partículas sólidas, sendo o efluente coletado em canaletas acopladas abaixo dos cilindros (GIORDANO, 2004; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

3.6.1.3 Remoção de areia

Constituída por caixas de areia/desarenadores, esta operação unitária visa a remoção de pequenas partículas arenosas com diâmetros entre 0,1 e 0,4 mm, onde há a retenção dos sólidos a uma velocidade de escoamento que promove a separação do resíduo líquido, sendo os pesos moleculares e velocidades de sedimentação destas partículas superiores aos materiais de origem orgânica. Esse processo é utilizado a fim de evitar obstrução, entupimento e abrasão de equipamentos da estação de tratamento, comprometendo as eficiências dos processos a jusante. Na Figura 4 é mostrado um esquema de caixa de areia com formato retangular e fluxo horizontal (JORDÃO; PESSÔA, 2014; METCALF; EDDY, 2013; VON SPERLING, 2017).

Figura 04 - Caixa de areia retangular com fluxo horizontal



Fonte: Von Sperling (2017).

As caixas de areia podem possuir formatos retangulares, quadrados ou cilíndricos, com métodos de retenção por meio de gravidade (com ou sem presença de aeração) ou centrifugação, possuindo limpeza manual ou mecanizada (JORDÃO; PESSÔA, 2014; METCALF; EDDY, 2013; VON SPERLING, 2017).

3.6.1.4 Equalização

A equalização é usada para homogeneizar o efluente, o tornando mais semelhante em composição e mais constante em vazão, antes de começar o tratamento efetivo. A vazão do efluente normalmente sofre oscilações ao longo de um dia de operação, além do resíduo ser encaminhado à estação de tratamento com cargas variáveis de compostos, sendo assim, é feito o uso que um tanque de equalização para que a vazão do resíduo líquido se torne constante para as operações unitárias a jusante, onde trabalharão com a vazão média de escoamento, além de realizar a homogeneização da carga de constituintes do efluente (GEREMIAS; VON SPERLING, 2017; MARCON, 2018).

Os processos de equalização possuem métodos de agitação e mistura para que ocorra a melhor homogeneização do líquido sem que haja a decantação dos particulados presentes, evitando assim, a atividade de microrganismos anaeróbios. Os sistemas de agitação podem ser superficiais ou submersos, podendo os superficiais ser aeradores. Na equalização podem ser realizados também ajustes de pH e adição de nutrientes, conforme necessidade nas etapas posteriores. Ressalta-se a importância do controle de nível na equalização, para que seja mantida a constância da vazão de saída do efluente e funcionamento dos agitadores (VON SPERLING, 2017).

3.6.2 Tratamento primário

Constituído pela junção de operações unitárias físicas e químicas, o tratamento primário é usado majoritariamente para remoção de sólidos suspensos, poluentes de origem inorgânica e metais. Os processos usualmente utilizados nesta etapa são:

coagulação, floculação, sedimentação/decantação, flotação e filtração (METCALF; EDDY, 2013, VON SPERLING, 2017).

3.6.2.1 Coagulação e floculação

Esta é uma operação unitária que pode ser utilizada antes do tratamento biológico. Com tendência ao aumento da biodegradabilidade do efluente, a coagulação consiste na desestabilização de partículas coloidais de baixa velocidade de sedimentação com dimensões na ordem de 0,01 a 1 μm , com o auxílio de aditivos químicos, objetivando a formação de aglomerados de particulados, que juntamente com a floculação, facilitarão o processo de remoção nas etapas posteriores, como: decantação, flotação e filtração. Os colóides presentes nos efluentes geralmente apresentam cargas negativas, sendo suas propriedades elétricas causadoras de forças repulsivas, o que impede a junção das partículas, fazendo com que o efluente apresente cor e turbidez (JORDÃO; PESSÔA, 2014; METCALF; EDDY, 2013; RIBEIRO, 2018).

Na etapa de coagulação, eletrólitos de cargas opostas às cargas elétricas dos colóides são adicionados através de produtos químicos, sendo o sulfato de alumínio e o cloreto férrico comumente utilizados, visando a neutralização das cargas superficiais das partículas e redução e/ou anulação das forças de repulsão, ocasionando a desestabilização coloidal, havendo a junção e formando coágulos. Neste processo, é requerida uma velocidade de agitação elevada, com gradientes entre 800 e 1500 s^{-1} , para que ocorra melhor dispersão do coagulante. Para haver a mistura rápida, pode ser adotado sistema hidráulico, sendo comumente utilizada a Calha Parshall, ou misturadores mecânicos, onde o tempo de detenção do efluente não pode ser superior a 10 segundos (ALVES, 2010; JORDÃO; PESSÔA, 2014; LIBÂNIO, 2010; RIBEIRO, 2018).

Para a operação atuar de forma eficiente, deve ser levado em consideração as propriedades do coagulante, dosagem do produto, pH e agitação da mistura. Para determinação das condições do processo, ensaios em *Jar-test* podem ser utilizados, a fim de saber qual coagulante melhor se enquadra conforme características do

efluente, concentração necessária e pH ideal de operação (JORDÃO; PESSÔA, 2014; RIBEIRO, 2018).

Após coagulação, o efluente segue para a etapa de floculação, onde as partículas desestabilizadas e parte aglutinadas irão sofrer colisões através da atração das mesmas, em etapa de mistura lenta, com gradiente de velocidade inferior à coagulação, na ordem de 70 a 110 s⁻¹, ocasionando na formação de flocos maiores, com maior peso específico, elevando capacidade de sedimentação e remoção. Faz-se o uso de uma menor velocidade no processo, pois à medida que há aumento na velocidade, maior será o choque entre os particulados, o que poderá ocasionar em rompimento dos flocos (ALVES, 2010; JORDÃO; PESSÔA, 2014; LIBÂNIO, 2010; RIBEIRO, 2018; SILVA et al., 2019).

Na floculação, pode haver ou não a adição de agentes floculantes, sendo o uso dependente das propriedades dos flocos formados e etapas posteriores de remoção, onde a adição de floculantes é realizada visando o aumento da velocidade da reação e peso do floco formado. Os mecanismos de mistura lenta podem ser hidráulicos, com adição de chicanas, ou mecânicos, com uso de pás rotativas acondicionadas paralelamente ou perpendicularmente ao eixo (ALVES; LIBÂNIO, 2010; JORDÃO; PESSÔA, 2014; RIBEIRO, 2018).

3.6.2.2 Sedimentação/decantação

Etapa responsável pela retirada de particulados em suspensão, na qual apresentam maior densidade em comparação a água, ocasionando na sedimentação por ação da gravidade. O processo de sedimentação pode ser dividido em: sedimentação discreta, floculenta ou em massa. A sedimentação discreta é referida a partículas na forma individual, que mantêm suas características de forma, volume e densidade, onde estas não formarão aglomerados ou flocos com outras partículas, sendo que a velocidade de sedimentação não irá depender da concentração da matéria presente. A sedimentação floculenta se detém a partículas que sofrem aglomeração, formando flocos, aumentando a velocidade de sedimentação a partir do aumento dos flocos, nas quais irão modificar além da velocidade de sedimentação, suas propriedades de forma, volume e densidade. Já na sedimentação em massa,

altas concentrações de particulados em suspensão sofrem sedimentação em uma massa só, ocorrendo a separação do clarificado e o material sedimentado, sendo este, o lodo (ALVES, 2010; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Tendo em vista o tratamento primário, se faz o uso de decantadores primários, sendo comumente utilizados na etapa que antecede o tratamento biológico. Objetivando a remoção de sólidos de fácil sedimentação e floculados, sendo parte destes sólidos constituídos por material orgânico, Metcalf e Eddy (2013) afirmam que se operados de maneira eficiente, os decantadores podem remover de 25 a 40% da carga de DBO, e 50 a 70% de sólidos suspensos (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

O princípio de funcionamento se dá a partir do escoamento do efluente através dos decantadores e retenção do lodo gerado a partir da sedimentação das partículas de densidade superior ao do fluido no fundo do recipiente. De maneira geral, os decantadores podem ser circulares ou retangulares, com processo de limpeza mecanizado ou manual através da pressão hidráulica, e com escoamento do fluido de forma horizontal ou vertical (LIBÂNIO, 2010; METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

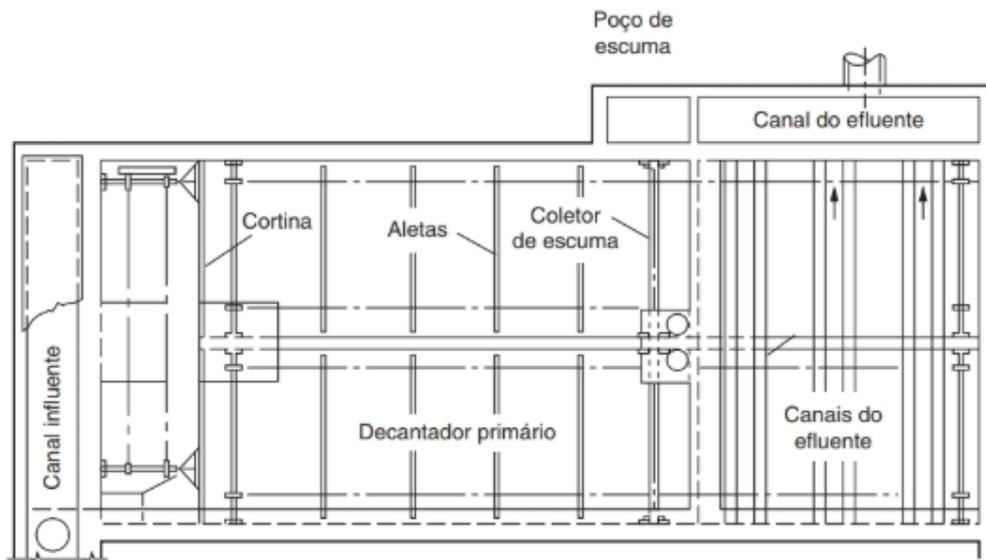
Quanto ao uso de tanques de decantação retangulares, estes necessitam de uma menor área de construção quando comparados aos tanques circulares, possuem menor taxa de arraste de lodo sedimentado, obtendo um adensamento mais eficiente, e requerem menor custo de implantação, porém acabam por dispor de maiores manutenções, apresentam eficiência reduzida em altas concentrações de sólidos, e dispõem de maior tempo de detenção de lodo. Nos decantadores retangulares, o efluente é escoado horizontalmente, e a coleta do lodo é dada através de correntes ou pontes móveis (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Nos tanques de decantação circulares, o escoamento do efluente é radial, possuindo uma alimentação que é realizada principalmente pelo centro do dispositivo com fluxo ascendente, sendo na maioria dos casos usado mais de um decantador para realização do processo de sedimentação. O lodo resultante é acondicionado temporariamente em compartimentos e removido através de bombeamento para tratamento e disposição final. Dentre as vantagens de implementação de

decantadores circulares, destacam-se o menor tempo de remoção do lodo adensado e menor frequência de manutenção, e as desvantagens estão na distribuição uniforme do lodo no dispositivo de coleta e maior taxa de arraste das partículas sedimentadas (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

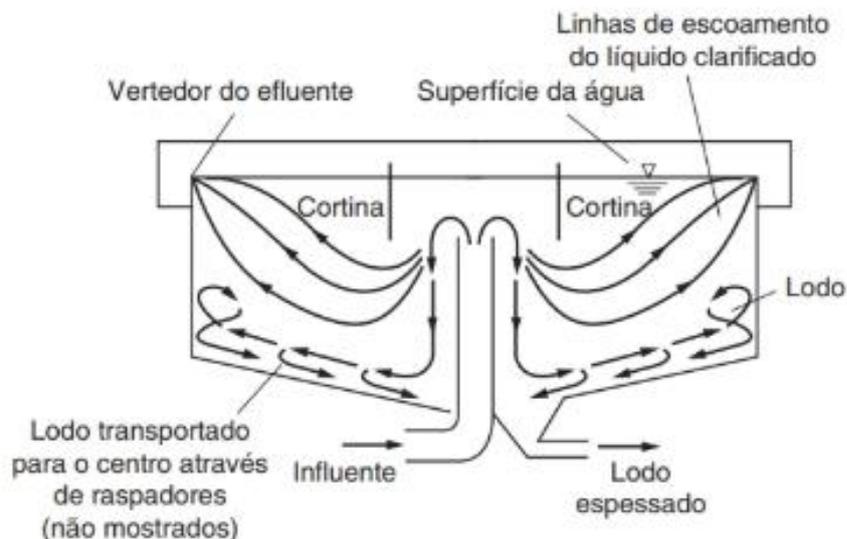
Nas Figuras 05 e 06 é possível a visualização dos esquemas de funcionamento de decantação circular e retangular.

Figura 05 - Esquema de funcionamento do decantador retangular



Fonte: Metcalf e Eddy (2013).

Figura 06 - Esquema de funcionamento do decantador circular



Fonte: Metcalf e Eddy (2013).

3.6.2.3 Flotação

A flotação tem por principal finalidade a retirada de particulado suspenso através de inserção de microbolhas de gás, na maioria dos casos ar, no efluente, fazendo com que as bolhas se unam às partículas, onde a junção destas com ar gera uma força de empuxo que transportará o material até a superfície do líquido, sendo o lodo retirado por meio de raspadores. Quando comparada a sedimentação, o processo de flotação se torna mais vantajoso na remoção de sólidos pequenos e leves, obtendo melhor taxa de remoção em menor espaço de tempo. O gás para realização da operação pode ser aderido por injeção no líquido sob pressão; ar dissolvido, onde há liberação da pressão; e por ar disperso, onde ocorre aeração do efluente com pressão atmosférica (METCALF; EDDY, 2013; LEGNER, 2015; SILVESTRE, 2018).

O meio mais utilizado para tratamento de águas residuais é a flotação por ar dissolvido, consistindo na diminuição da densidade das partículas presentes no efluente através da injeção de microbolhas de ar sob pressão, sendo após a pressão liberada à pressão atmosférica, ocasionando no arraste do material particulado até superfície e removido através de raspagem. A flotação por ar dissolvido tem como vantagens: necessidade de pequena área para implementação, alta taxa de remoção de carga orgânica, menor formação de lodo e operação em sistema contínuo (CALIJURI; CUNHA; METCALF; EDDY, 2013; LEGNER, 2015; SILVESTRE, 2018).

3.6.2.4 Filtração

É a operação unitária que tem como objetivo a remoção de partículas suspensas que não foram retiradas nas etapas anteriores de tratamento, auxiliando na diminuição da turbidez, cor, concentração de micropoluentes e microrganismos patogênicos. O princípio da filtragem consiste na percolação do efluente por um meio filtrante poroso com fluxo ascendente ou descendente, sendo a eficiência dependente principalmente das propriedades do material filtrante e do efluente, velocidade de escoamento, área superficial de contato e método de operação do filtro. A composição do material filtrante se dá majoritariamente por areia, sendo usados também outros materiais granulares como antracito e carvão ativado, por possuírem elevadas

capacidades adsorptivas, podendo o recheio dos filtros ser formado por uma ou mais camadas de material (ALVES; LIBÂNIO, 2010; LIMA et al., 2014; ANDRADE, 2015).

Dentre os tipos de filtração, podem ser classificados de maneira geral por filtração rápida ou lenta. A filtração lenta é recomendada para fluídos com baixas concentrações de material suspenso, e conseqüentemente, baixa turbidez. O efluente escoava lentamente através do material filtrante de pequena granulometria, gerando durante o processo um biofilme denso formado por microrganismos que irão auxiliar no processo de degradação da matéria, aumentando a eficiência da etapa. A periodicidade de limpeza do filtro é controlada a partir da queda de pressão do leito e taxa de remoção da turbidez, sendo geralmente realizada de forma manual (ALVES, 2010; TEIXEIRA; BRANDÃO, 2016).

O sistema de filtração rápida é comumente usado após os tratamentos de coagulação/floculação e decantação. O meio filtrante é percolado pelo efluente em velocidades elevadas, onde os sólidos normalmente são separados do fluído através da retenção dos particulados com diâmetros maiores do que as aberturas do material filtrante ou por adsorção, sendo usado para remoção de cargas em maiores concentrações. Para o seu funcionamento, se faz o uso de mais equipamentos, necessitando de mão-de-obra reduzida, sendo requerido menor área de implantação se comparado ao sistema de filtração lenta, e menor custo de operação. No que diz respeito à limpeza, essa se dá por retrolavagem, que consiste na passagem de água pelo filtro no sentido contrário ao fluxo (ALVES, 2010; CARVALHO, 2015).

3.6.3 Tratamento secundário

Os tratamentos secundários, ditos tratamentos biológicos, visam principalmente a remoção e/ou diminuição da carga de sólidos suspensos e dissolvidos, sendo constituintes da matéria orgânica, como também compostos tóxicos e nutrientes (nitrogênio e fósforo), remanescentes dos tratamentos anteriores. Os processos podem ser aeróbios, com a presença de oxigênio e anaeróbios, com a ausência de oxigênio. Nesta etapa haverá a atuação de microrganismos sobre os compostos, ocasionando a degradação da matéria orgânica, convertendo o material em produto clarificado, gás carbônico, resíduos resultantes das atividades

microbianas de crescimento e reprodução, e em meios anaeróbios, metano. Em dimensionamentos de estações de tratamento, pode-se fazer uso ou não de tratamento primário antes da etapa biológica, porém torna-se imprescindível o tratamento preliminar, visto que o efluente necessita estar em condições adequadas para ação dos microrganismos e obtenção de uma boa eficiência no processo (CALIJURI; CUNHA; METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

O tratamento secundário abrange uma gama de processos, no qual a escolha do tipo de tratamento irá depender dos constituintes do efluente, eficiência de remoção, disponibilidade de área, viabilidade econômica e condições climáticas da região. Dentre os dispositivos existentes na etapa secundária, os comumente utilizados são: reatores anaeróbios, filtração biológica, lodos ativados e lagoas de estabilização (FARRUGIA, 2012; VON SPERLING, 2017).

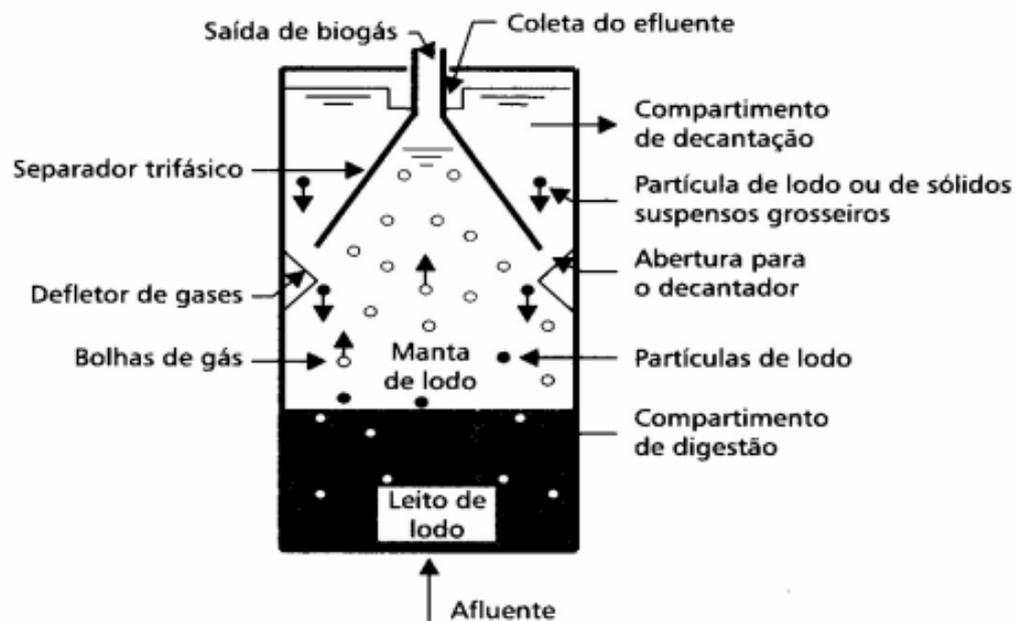
3.6.3.1 Reatores anaeróbios

O tratamento anaeróbio há muitos anos vem sendo utilizado para estabilização de lodo, porém é recente os estudos e aplicações desse processo em efluentes líquidos. Nos dispositivos anaeróbios o período de residência da biomassa de microrganismos é maior que o tempo de detenção hidráulica do equipamento, fazendo com que haja uma melhor estabilização do lodo, e a atividade da biomassa apresente maior efetividade (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

O processo mais conhecido e utilizado em unidades de tratamento de efluentes é o Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), sendo usado para efluentes que apresentam baixas concentrações de sólidos suspensos. O mecanismo consiste na entrada do efluente pela parte inferior do reator, passando através de um leito de lodo denso e manta de lodo, onde parte da matéria orgânica irá ficar retida junto a biomassa de elevada atividade para degradação e parte irá se unir a moléculas de gases (gás metano e gás carbônico) resultantes da digestão dos microrganismos, dispersando no meio líquido seguindo um fluxo ascendente até o topo do dispositivo. O topo do reator geralmente possui formato cônico e neste há um separador trifásico, no qual as

moléculas de gases aderidas ao lodo irão se desprender, sendo deslocadas para a fase gasosa do reator, o lodo decantará na parte superior, deslizando pelas paredes do equipamento e retornando à área de transição (manto de lodo) e digestão (leito de lodo), sendo posteriormente estabilizado pela biomassa, e o efluente clarificado sairá do reator pela superfície (CALIJURI; CUNHA; METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2017). A representação esquemática do processo pode ser visualizada através da Figura 07.

Figura 07 - Esquema de funcionamento de um reator UASB



Fonte: Chernicharo (2016).

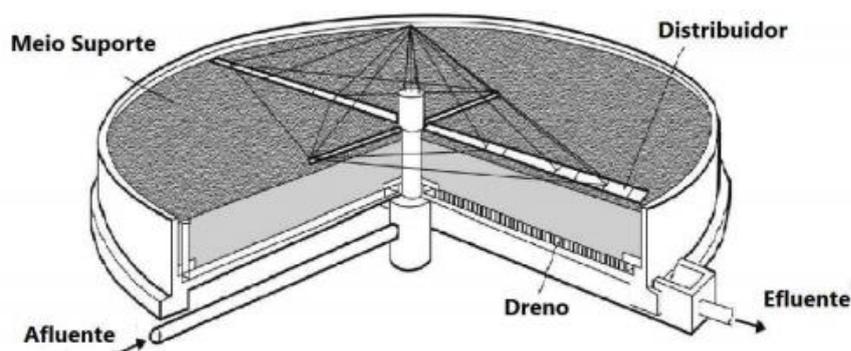
Durante o processo há o acúmulo de grandes quantidades de sólidos, dessa forma, para que ocorra a estabilização completa do lodo, o tempo de residência da biomassa acaba sendo maior que o tempo de detenção hidráulica (faixa de 6 a 10 horas). Em termos de eficiência, os reatores UASB apresentam uma remoção próxima a 65% para DQO e 70% para DBO, sendo comumente feito o uso de tratamentos posteriores para a remoção da carga orgânica restante no efluente, como por exemplo a utilização de reator UASB antes do tratamento aeróbio de lodos ativados (CALIJURI; CUNHA; METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

3.6.3.2 Filtração biológica

Diferentemente do nome empregado ao tratamento, a etapa de filtração biológica não tem por objetivo a filtração de particulados, mas sim a oxidação bioquímica da matéria orgânica contida no efluente através do contato com a biomassa que se encontra aderida a um meio suporte. Os filtros biológicos podem ser divididos em: filtros biológicos percoladores, biodiscos e biofiltros aerados submersos (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

Filtros biológicos percoladores: esses tipos de filtro têm como princípio de funcionamento a distribuição do efluente de forma contínua por meio de distribuidores rotativos em compartimento preenchido com material de alta superfície de contato, sendo a remoção do efluente clarificado realizada por meio de drenos localizados na parte inferior do filtro (FIGURA 08). O resíduo irá percolar através do meio suporte do dispositivo ocasionando no crescimento de biofilme, onde este irá reter a matéria orgânica por adsorção, realizando a degradação através de oxidações bioquímicas, sendo a demanda de oxigênio necessária para a reação provinda da circulação de ar entre as aberturas do meio suporte do filtro. A biomassa presente no material suporte irá crescer ao longo do processo, ocasionando na diminuição dos espaços vazios para percolação do efluente, o que irá aumentar a velocidade de escoamento, provocando uma tensão de cisalhamento e fazendo com que o biofilme se desprenda, sendo posteriormente removido por decantador secundário. O meio suporte pode ser constituído de diversos tipos de materiais, sendo os cascalhos, pedras britadas e materiais sintéticos, os mais utilizados (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2017).

Figura 08 - Filtro biológico percolador



Fonte: Von Sperling (2017).

Biodiscos: recomendado para pequenas vazões de efluente, o sistema é dotado de discos espaçados produzidos de material polimérico dispostos horizontalmente, onde irão rotacionar lentamente (1 a 2 rpm), sendo parcialmente submersos no efluente localizado em um compartimento abaixo dos discos. O contato dos discos com o efluente formará uma película de biomassa sobre o material, que em função da rotação irá reter parte do efluente em sua superfície, realizando a oxidação bioquímica da matéria orgânica pela camada de biomassa, e a oxigenação é realizada por meio da exposição dos discos ao ar. Quando o biofilme atinge a camada limite, este se desprende juntando-se ao efluente, onde irá continuar realizando a degradação da matéria orgânica, tendo assim, uma maior eficiência do sistema. O processo pode alcançar uma eficiência de remoção de carga orgânica de mais de 90%, porém apresenta custo elevado para implantação (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2017).

Biofiltros aerados submersos: o processo acontece através de um leito fluidizado com inserção de bolhas de ar, no qual possui recheio ou material flutuante granular de elevada superfície de contato. O efluente irá passar pelo leito com fluxo ascendente ou descendente, formando uma camada de biofilme no material de enchimento, que em contato com o resíduo líquido irá degradar a matéria orgânica. A limpeza do material do recheio se dá por meio de lavagem em contracorrente, podendo ser usado o próprio efluente para lavagem. Esta operação possui elevada eficiência e não necessita de grandes áreas de implantação, devido ao material de enchimento ser leve, podendo ser dimensionados leitos de maior altura (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2017).

3.6.3.3 Lodos ativados

Sendo mundialmente conhecido, o sistema de lodos ativados é usado em casos que se visa elevada remoção orgânica, sendo possível também haver a remoção de compostos específicos como nitrogênio e fósforo. Geralmente utilizado após tratamento anaeróbio, esta operação unitária consegue tratar grandes quantidades de efluentes em áreas reduzidas, porém apresenta uma elevada complexidade, sendo

imprescindível um bom controle de processo, além de ser um tratamento que demanda de alto nível de mecanização, tendo por consequência, um maior consumo energético (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2005, 2017).

O processo consiste na adição do efluente em um tanque geralmente construído de concreto com aeração provindo de agitadores mecânicos ou sistema de ar difuso, sendo o segundo método de aeração indicado para estações de tratamento de efluentes com elevadas vazões de resíduos líquidos. A aeração faz com que os sólidos presentes (biomassa e matéria orgânica) permaneçam em suspensão, ocasionando na interação das bactérias com o alimento, que irão consumir a matéria orgânica para realização dos processos de metabolização, degradando-a. Ao sair do compartimento de lodos ativados, o efluente é direcionado ao decantador secundário, onde irá acontecer a decantação dos particulados anteriormente em suspensão, onde parte do lodo decantado ainda contém microrganismos ativos e recircula no sistema, ocasionando num aumento da biomassa presente no processo e atividade microbiana, obtendo assim, um tratamento mais efetivo, podendo atingir taxas de eficiências de remoção de até 95% para DBO. O lodo excedente é direcionado a etapas de tratamento de adensamento e estabilização, sendo encaminhado à disposição final (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2005, 2017).

Lodos ativados convencionais: o volume requerido para tratamento no sistema convencional é reduzido, isso se dá devido ao pouco tempo de detenção hidráulica do efluente, estando este na faixa de 6 a 8 horas. A idade do lodo (4 a 10 dias) nas unidades de lodos ativados convencionais é maior que o tempo de detenção hidráulica, o que garante uma boa eficiência do processo, visto que a massa microbiana consegue estabilizar quase toda a quantidade de lodo presente no dispositivo, porém o lodo resultante ainda necessita de tratamento posterior para completa estabilização (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2005, 2017).

Lodos ativados de aeração prolongada: neste tipo de tratamento o lodo irá permanecer no reator por um intervalo de tempo maior se comparado ao sistema de lodos ativados convencionais, estando na ordem de 18 a 30 dias, conseqüentemente

o tempo de detenção hidráulica do efluente também será elevado, estando na faixa de 16 a 24 horas, havendo assim, maior proliferação de bactérias presentes no efluente. O reator recebe a mesma quantidade de compostos orgânicos que no processo convencional, porém há maior concentração de microrganismos no sistema, gerando desta forma, uma limitação de alimento para biomassa. Após os microrganismos consumirem todo alimento presente no meio, começarão a consumir de suas próprias células a matéria orgânica necessária para efetuar a metabolização, resultando na estabilização do lodo no próprio reator, não sendo necessário nesses casos, etapas posteriores de tratamento do lodo, porém haverá maior consumo energético devida a estabilização do lodo ser feita de forma aeróbia (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2005, 2017).

Lodos ativados com fluxo intermitente: todas as operações constituintes do sistema de lodos ativados irá acontecer em uma única unidade, através de mudanças dos processos pelo tempo, o que resulta em uma simplificação do sistema. A sequência de etapas é dada pelo enchimento do tanque, aeração/mistura do efluente juntamente com oxidações bioquímicas por microrganismos, sedimentação, retirada do clarificado, e por fim remoção do lodo excedente. Neste tipo de operação, normalmente se faz o uso da aeração prolongada, que como comentado anteriormente, há a estabilização do lodo no próprio reator, descartando as etapas subsequentes de tratamento de lodo (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; CHERNICHARO, 2016; VON SPERLING, 2005, 2017).

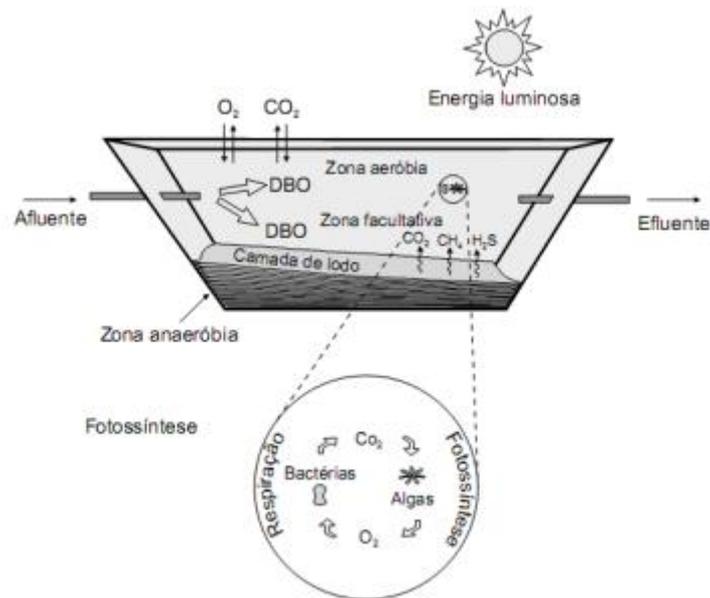
3.6.3.4 Lagoas de estabilização

Os sistemas de lagoas de estabilização podem ser de origem natural ou artificial, no qual apresentam simplicidade de processo, baixo custo de operação e manutenção, porém requerem grandes áreas para implementação. Objetivando a estabilização da matéria orgânica presente através de oxidação de microrganismos e fotossíntese de algas, o processo envolve etapas físicas, químicas biológicas, favorecendo a autodepuração. Sendo dependentes das condições climáticas, a relação entre o clima predominante da região afeta os processos biológicos presentes,

como a atividade fotossintética das algas e metabolismo dos microrganismos, apresentando maior eficiência em climas quentes/tropicais. As lagoas de estabilização conseguem remover não só a carga orgânica, como também outros compostos, podendo apresentar taxas de remoção de até 85% para DBO, 99,99% para coliformes, e 80% para amônia livre (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

Lagoas facultativas: possuem uma sistemática simples e são dependentes exclusivamente de ações naturais. O sistema é constituído por uma área aeróbia localizada na parte superior da lagoa, região anaeróbia na parte inferior e entre elas, localiza-se a zona facultativa. Na região aeróbia, os sólidos suspensos não sedimentáveis e os sólidos dissolvidos são degradados por microrganismos aeróbios e a demanda de oxigênio necessária para a respiração celular se dá através da fotossíntese realizada por algas presentes no sistema. No fundo da lagoa realiza-se a fermentação anaeróbia de sólidos suspensos sedimentáveis, e na região intermediária, dita facultativa, são realizados os processos de oxigenação aeróbia e fotossintética. As lagoas facultativas podem ser utilizadas como etapas únicas de tratamento, sendo denominadas lagoas primárias, ou podem ser uma complementação sequencial de uma lagoa anaeróbia, sendo assim chamadas de lagoas secundárias. Geralmente este tipo de lagoa é projetada com uma profundidade entre 1,5 e 2 metros, necessitando de uma extensa área de implantação para eficiência da fotossíntese das algas através do uso de energia solar. Em relação ao tempo de detenção hidráulica, este aproxima-se a 20 dias, visto que por ser um processo natural, a estabilização da matéria orgânica se dá em taxas mais lentas (PAIXÃO FILHO, 2012; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017). O esquema de funcionamento de uma lagoa facultativa pode ser visualizado através da Figura 9.

Figura 9 - Esquema de lagoa facultativa



Fonte: Von Sperling (2017).

Lagoas anaeróbicas: a estabilização da matéria orgânica ocorre na ausência de oxigênio, através da digestão ácida e a fermentação metânica. Em primeiro momento, bactérias acidogênicas irão realizar a conversão de matéria orgânica complexa em compostos simples, como ácidos orgânicos, não havendo nesta etapa a remoção de DBO e DQO. Na etapa sequencial de fermentação metânica, bactérias metanogênicas irão transformar os ácidos provindos da digestão ácida em metano e gás carbônico, ocasionando a redução da carga orgânica. Lagoas anaeróbicas removem parcialmente a matéria orgânica presente, possuindo uma eficiência de remoção na faixa de 50 a 60% de DBO, onde o processo é comumente complementado por uma lagoa facultativa a fim de maior remoção de carga orgânica. O tempo de detenção hidráulica geralmente adotado é de 2 a 5 dias, tempo necessário para o desenvolvimento de bactérias anaeróbicas de crescimento rápido. Para o dimensionamento das lagoas, estas são projetadas com profundidades de 3 a 4 metros, objetivando principalmente o equilíbrio térmico do meio aquoso, reduzindo a influência de mudanças climáticas sobre o efluente que podem levar a introdução de oxigênio no meio, afetando o processo metânico, considerando também que lagoas com maiores profundidades retém melhor o calor, sendo este necessário para a digestão dos microrganismos (PAIXÃO FILHO, 2012; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

Lagoas aeróbias: sendo denominadas de lagoas aeradas de mistura completa, o princípio de funcionamento destas lagoas é o fornecimento de oxigênio necessário para as atividades metabólicas dos microrganismos aeróbios através de aeradores mecânicos, provendo a agitação do líquido e introduzindo oxigênio ao meio, fazendo com que todos os sólidos presentes permaneçam suspensos, juntamente com as bactérias, favorecendo o maior contato entre os compostos orgânicos e os microrganismos. Desta forma, a decomposição orgânica ocorre de maneira mais rápida e eficiente, se comparada a lagoas facultativas, diminuindo o tempo de detenção hidráulica (de 2 a 4 dias) e necessitando de menores áreas de implantação. Porém, uma das desvantagens desse processo é a saída de biomassa em suspensão junto com o efluente, prejudicando a qualidade do corpo receptor. Desta forma, faz-se o uso de decantador a jusante da lagoa, tendo por finalidade a sedimentação dos sólidos suspensos, separando a matéria orgânica do efluente clarificado (CALIJURI; CUNHA, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

Lagoas de polimento: esse sistema tem por objetivo o polimento do efluente provindo de outros tratamentos a montante, através da remoção de microrganismos de origem patogênica, uma parcela da carga de amônia e carga orgânica. As lagoas de polimento são comumente utilizadas em etapas em que a taxa de remoção da matéria orgânica não é elevada, geralmente como etapa posterior ao tratamento anaeróbio (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017).

3.7 Trabalhos publicados em tratamento de efluentes de cervejaria

Rocha et al. (2017a) realizaram o dimensionamento de dois tipos de tratamentos para efluentes oriundos de processo produtivo cervejeiro a partir da caracterização do resíduo líquido. Amostras de efluentes foram coletadas de uma cervejaria, onde foram realizadas determinações dos teores de DBO, DQO e série de sólidos, sendo comprovado que a empresa apresentava concentrações dos compostos analisados acima dos exigidos na legislação ambiental para lançamento em corpo receptor. A partir da caracterização do efluente, o primeiro tratamento foi dimensionado somente com lodos ativados, e o segundo com lodos ativados precedido de tratamento físico-químico, onde as duas alternativas de tratamento

apresentaram valores relevantes na remoção de carga orgânica, porém a opção que continha tratamento físico-químico se mostrou mais eficiente na remoção de sólidos suspensos totais, além de haver pouca variação de área requerida de um sistema para outro, devida a baixa quantidade de lodo gerado no tratamento físico-químico.

Rocha et al. (2017b) caracterizaram o efluente de uma cervejaria artesanal e a partir dos resultados obtidos dimensionaram quatro tipo de unidades de tratamento. Para a caracterização do efluente foram realizadas determinações de DBO, DQO, Nitrogênio Amoniacal e série de sólidos, e as unidades de tratamento dimensionadas foram: lodos ativados, lodos ativados com tratamento físico-químico, reator UASB precedido de filtro biológico percolador e reator UASB seguido de lodos ativados. Com base nas eficiências obtidas a partir cálculos de dimensionamento para cada unidade, pode-se concluir que a alternativa que apresentou melhor remoção dos compostos foi o tratamento com reator UASB seguido de sistema de lodos ativados, atendendo aos padrões de descarte.

Arruda et al. (2015) realizaram testes em efluente de uma cervejaria para tratamento aeróbio seguido de etapa físico-química com adição de coagulante natural. O efluente coletado foi caracterizado a fim de conhecimento dos compostos presentes, e os testes foram feitos com dispositivos em escala piloto em laboratório. Para o experimento, fez-se o uso de um reator aeróbio de lodos ativados com meio suporte de anéis de plástico e equipamento para ensaios de Jar Test objetivando determinar a quantidade necessária de coagulante, sendo este provindo de sementes de *Moringa Oleifera*. A partir dos testes realizados, chegou-se à conclusão de que o tratamento de lodos ativados e posterior tratamento físico-químico com adição de coagulante natural apresentou elevada eficiência de remoção de compostos orgânicos e nitrogênio, estando em atendimento à legislação e apresentando melhores resultados se comparado ao uso do tratamento aeróbio somente.

Borgo et al. (2019) avaliaram a capacidade coagulante da semente de *Moringa Oleifera* para clarificação de efluentes provenientes da lavagem do biodiesel e processo de brassagem de uma indústria artesanal. A capacidade coagulante foi testada através da adição na forma moída e na forma de extrato da semente de *Moringa Oleifera* em amostras dos efluentes coletados, nas quais após adição, sofreram agitação e em seguida, foram mantidas em repouso para decantação dos

particulados, sendo posteriormente realizadas determinações de pH, turbidez e absorvância nos resíduos clarificados. Para os testes foram estipulados valores de concentração do coagulante a ser adicionado em cada amostra e tempo de decantação. O estudo comprovou o elevado potencial de clarificação do coagulante natural utilizado, apresentando alta remoção de turbidez, principalmente nas amostras testadas com a semente de *Moringa Oleifera* moída, chegando a valores de eficiência de até 93,99%.

Filho et al. (2013) estudaram a eficiência de uma estação de tratamento de efluentes em escala real de uma indústria produtora de cervejas e refrigerantes. A estação é composta por etapas de tratamento preliminar, primário e secundário, fazendo o uso de reator anaeróbio de circulação interna seguido de lagoas de aeração e polimento para remoção de carga orgânica e compostos específicos. No estudo foram realizadas determinações analíticas e analisada a eficiência do sistema através do percentual de remoção das concentrações de DBO e DQO presentes no efluente. Por meio do estudo de caso, constatou-se a elevada eficiência média (atingindo valores de até 96%) do sistema na remoção dos compostos orgânicos, onde a água residual gerada atende os padrões de lançamento exigidos pelo órgão ambiental vigente.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Para realização do estudo, o material analisado foi o efluente bruto de uma cervejaria localizada na cidade de Bom Retiro do Sul/RS. O procedimento de amostragens foi definido a partir de visitas técnicas realizadas no empreendimento, sendo feito um acompanhamento do processo produtivo cervejeiro e funcionamento do sistema de tratamento de efluentes atual da fábrica.

O processo produtivo do presente estudo é constituído de diversas etapas, abrangendo de forma geral os seguintes processos: seleção das matérias-primas (água; malte, lúpulo, e levedura - *Saccharomyces cerevisiae*); mostura, onde há a mistura do malte com a água em temperatura controlada; adição de água de lavagem, visando a diluição do fluído para posterior filtragem; filtragem em filtro de fundo falso para separação do mosto e os resíduos de cereais; fervura, onde há a adição do lúpulo; separação sólido-líquido através de centrifugação; resfriamento do mosto; fermentação, a partir da adição de leveduras; maturação; clarificação, mediante uso de clarificantes e filtração; carbonatação; pasteurização e por fim, envase.

Os maiores volumes de geração de efluentes líquidos ocorrem por limpeza ou separação de fases, como segue:

Moagem: emprega água para lavagem;

Mistura e mostura: emprega água para lavagem;

Filtração: separação sólido-líquido, emprega água para lavagem;

Fervura: emprega água para lavagem;

Centrifugação: separação sólido-líquido, emprega água para lavagem.

Para caracterização do efluente, foram utilizadas amostras dos rejeitos líquidos provenientes da produção da cerveja Pilsen e limpeza do maquinário da fábrica, sendo caracterizados de forma individual com o intuito de observar a diferença da composição dos dois tipos de efluentes. Três campanhas de amostragem foram realizadas ao longo do período de trabalho, e cada campanha de amostragem contou com dois dias de coleta, um dia sendo destinado às coletas do efluente da produção da cerveja e outro para coletas do efluente da etapa de limpeza.

A escolha dos pontos de coleta se deu a partir da análise do sistema de tratamento de efluentes atual da empresa, que conta com um sistema composto de tanque de recebimento do efluente com presença de grade fina para retenção de sólidos mais grosseiros, seguido de tanque de equalização, etapa responsável pela homogeneização do efluente. Após equalização há o tratamento biológico formado por dois biorreatores recheados com meio suporte constituído de conduíte corrugado, visando a degradação da matéria orgânica. Para depuração final do efluente, este é direcionado ao sistema de *Wetlands*.

Para entendimento do sistema atual de tratamento da empresa, as coletas se deram em três pontos localizados ao longo da estação, sendo estes: recepção do efluente (grade), biorreator primário e biorreator secundário. Devido ao acesso dificultado, não foi possível coletar no sistema de *Wetlands*, impossibilitando a análise da eficiência global do tratamento. As amostras foram coletadas em três horários diferentes, sendo as quantidades provenientes de cada ponto homogeneizadas e retiradas destas, uma amostra representativa.

Visando a caracterização dos efluentes e análise da atual situação da estação de tratamento da fábrica em frente ao lançamento dos efluentes em corpo receptor, realizou-se determinações de pH, sólidos sedimentáveis, DBO₅, DQO, nitrogênio total Kjeldahl, fósforo total e turbidez. As amostras foram fracionadas, sendo parte destas acondicionadas em frascos de polipropileno contendo preservante para

encaminhamento em laboratório credenciado para análise de fósforo total. O restante das amostras foi analisado no laboratório de biorreatores da Univates, sendo as determinações de pH, turbidez, sólidos sedimentáveis e DBO₅, realizadas logo após coleta, garantindo melhor precisão na quantificação dos compostos, conforme metodologias usadas.

Para análises de nitrogênio total Kjeldhal e DQO, as amostras sofreram acidificação até atingirem pH com valor próximo a 2, sendo mantidas em refrigeração até o momento da análise. Já as porções de efluentes destinadas a determinações de carbono orgânico total e carbono inorgânico, estas foram submetidas ao mesmo processo de acidificação das amostras anteriores, porém foram congeladas para análise posterior. Vale frisar que todas as amostras respeitaram o período de acondicionamento para análises, conforme Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da Agência Nacional das Águas (ANA, 2011).

Tendo em vista a remoção de parte da carga poluidora que constitui os efluentes da cervejaria, testou-se tratamento primário de coagulação/floculação a partir de ensaios de Jar Test com amostra de efluente bruto proveniente de uma única coleta do ponto da grade do sistema atual da empresa, sendo o teste realizado logo após obtenção da amostra. Para avaliar a eficiência do teste, o efluente bruto e as amostras clarificadas pós floculação foram submetidas a análises para determinação de DQO, cor e turbidez.

4.2 Métodos

4.2.1 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅)

De acordo com Valente et al. (1997), a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) provém da quantidade de oxigênio requerido para degradação biológica da matéria orgânica por processo oxidativo, onde a DBO₅ será a taxa de oxigênio consumido por microrganismos no período de 5 dias em temperatura controlada de 20°C. As análises foram realizadas em triplicatas com o aparelho Oxitop, da marca WTW, seguindo recomendações de preparação do equipamento, determinando a quantidade de

oxigênio consumido por microrganismos para degradação da matéria orgânica, com leitura de DBO_5 na faixa de 0 a 4000 mg/L.

4.2.2 Demanda química de oxigênio (DQO)

Indica quantidade de oxigênio necessária para decomposição da matéria orgânica através da oxidação química (VALENTE et al., 1997). A determinação do parâmetro foi realizada em triplicatas conforme o método titulométrico de refluxo fechado (5220 D) do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, que consistiu na digestão das amostras em sistema fechado e posterior detecção através de titulação (APHA, 2012).

4.2.3 Fósforo total

É um composto essencial para desenvolvimento dos processos de origem biológica, porém em quantidades excessivas nos efluentes pode causar o fenômeno de eutrofização, onde há o crescimento excessivo das algas e com isso a diminuição do oxigênio necessário para a sobrevivência de seres aquáticos (JORDÃO; PESSÔA, 2014). As amostras foram encaminhadas para análise em laboratório credenciado, sendo o teor de nitrogênio total determinado por meio dos seguintes métodos: SMWW, 23ª Edição, Método 3030E e 3120B/EPA Método 3015 A - 2007 e 6010 D - 201/PO-091.

4.2.4 Nitrogênio total Kjeldahl

Sendo uma caracterização indireta de proteínas presentes no meio, o método foi desenvolvido primeiramente por Kjeldahl em 1883 e adaptado desde então (EMBRAPA, 2006). A determinação do nitrogênio (duplicatas) se deu por meio do método 4500 N C Semi-Micro-Kjeldahl, do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, que consistiu na digestão das amostras seguida de destilação por arraste de vapor, finalizando com titulação do destilado (APHA, 2012).

4.2.5 pH

O pHmetro tem como funcionalidade um eletrodo conectado a um potenciômetro, onde há a conversão dos valores do eletrodo (milivolts) em escalas de pH (SPLABOR, 2017). Para análise de pH em triplicatas das amostras de efluente, foi utilizado o pHmetro de bancada da marca DIGIMED, modelo DM-22. Através do método potenciométrico e potencial hidrogeniônico, o equipamento tem por função medir o pH, identificar se a amostra analisada é ácida, básica ou neutra, como também realiza medições de temperatura (DIGIMED, 2019).

4.2.6 Sólidos sedimentáveis

É determinado a partir da capacidade de sedimentação dos particulados sólidos antes em suspensão (JORDÃO; PESSÔA, 2014). O teor de sólidos sedimentáveis das amostras foi obtido através do método 2540 F Cone Imhoff do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Para análise, um litro de cada amostra foi homogeneizado e transferido para o cone imhoff, onde houve a sedimentação dos sólidos durante 45 minutos, seguida de leve agitação para desprendimento das partículas que ficaram retidas na parede do cone e decantação por mais 15 minutos (APHA, 2012).

4.2.7 Turbidez

A principal causa da existência de turbidez do efluente é a presença de partículas sólidas no meio, podendo ser indicador de poluentes, dificultando também, a visualização do efluente (METCALF; EDDY, 2013). Os índices de turbidez das amostras de efluentes foram determinados em triplicatas com Turbidímetro Portátil da marca DIGIMED, modelo DM-TU, com faixa de medição de 0 a 1000 NTU (DIGIMED, 2019).

4.2.8 Tempo de retenção hidráulico e eficiência de remoção de carga orgânica

Como parte da análise do tratamento de efluentes atual da indústria do presente estudo, calculou-se o tempo de retenção hidráulico dos filtros biológicos (biorreatores) que constituem o sistema e eficiência de remoção da carga orgânica do efluente (DBO e DQO) ao longo da estação.

O tempo de retenção hidráulico é o tempo necessário para passagem da vazão de efluente no equipamento de determinado volume, sendo expresso pela Equação 1 (VON SPERLING, 2005).

$$TRH = \frac{\text{Volume do reator}}{\text{Vazão do efluente}} \quad (1)$$

Onde:

THR = tempo de retenção hidráulico

Para cálculo da eficiência de remoção de DBO e DQO na estação de tratamento de efluentes, adotou-se a Equação 2 citada por Colares e Sandri (2013). A obtenção do valor de eficiência está relacionada com o cálculo das diferenças de concentrações dos compostos na saída e no início do tratamento, sendo o valor resultante dividido pela concentração do parâmetro na entrada e por fim o resultado obtido é multiplicado por 100 para obtenção do valor em porcentagem.

$$E = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

E = eficiência

C_e = concentração na entrada

C_s = concentração na saída

4.2.9 Teste de floculação

Com o intuito de avaliar a remoção de parte dos compostos com grau poluidor contidos nos efluentes cervejeiros, foi executado o teste de floculação, que consistiu

em ensaios de Jar Test, fazendo uso do equipamento de floculação FLOC CONTROL, da marca POLICONTROL. Os ensaios foram realizados usando o método descrito a seguir.

Inicialmente colocou-se em uma cuba de Jar Test a quantidade de um litro de efluente bruto, com valor de pH de 4,5, proveniente da etapa do gradeamento da estação de tratamento da fábrica, sendo posteriormente adicionado 1 mL do coagulante sulfato de alumínio 1% ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e aguardado alguns minutos para verificação do comportamento das partículas. Em seguida, foram sendo incrementadas quantidades de 1 mL de coagulante por vez até a visualização da formação dos flocos no efluente, totalizando o uso de 20 mL de sulfato de alumínio para obtenção dos flocos.

Determinada a quantidade de coagulante, deu-se início a segunda parte do teste, onde duas amostras de um litro de efluente bruto foram acondicionadas nas cubas de Jar Test, havendo a adição de 20 mL de sulfato de alumínio sob agitação rápida a 100 rpm durante 2 minutos para dispersão do coagulante, seguida de agitação lenta a 30 rpm durante 20 minutos para colisão das partículas desestabilizadas e formação dos flocos. Posterior à agitação lenta, os efluentes ficaram em repouso durante 1h para realização da sedimentação dos particulados no fundo das cubas.

Finalizada a decantação, coletou-se 50 mL do líquido sobrenadante de cada amostra com o auxílio de um pipetador automático para análises dos teores de DQO, cor e turbidez das amostras clarificadas, juntamente com a determinação dos mesmos parâmetros no efluente bruto para obtenção de análise comparativa da eficiência do tratamento com coagulante. Os métodos de determinação de DQO e turbidez foram os mesmos utilizados para caracterização do efluente conforme já citado no presente estudo, e o parâmetro cor aparente foi quantificado através Colorímetro da marca DIGIMED, modelo DM-COR.

4.2.10 Dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados

4.2.10.1 Fator de biodegradabilidade

Ao se escolher o tipo de tratamento a ser utilizado conforme características do efluente, primeiramente deve-se considerar o fator de biodegradabilidade, que é a capacidade do resíduo em se decompor por via biológica. Dimensionamentos de sistemas biológicos não são realizados com baixa biodegradabilidade, de modo que se possa otimizar a remoção de carga orgânica, visando reduzir a concentração de DBO na saída do tratamento biológico (CLAAS; MAIA, 1994).

Conforme Claas e Maia (1994), o fator de biodegradabilidade pode ser verificado através de cálculo obtido por meio da Equação 3.

$$fb = \frac{DBO_5}{0,65 \times DQO} \quad (3)$$

Onde:

fb = fator de biodegradabilidade

DBO₅ = demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias

DQO = demanda química de oxigênio

4.2.10.2 Sistema de lodos ativados – Reator aeróbio

Para o tipo de efluente da empresa estudada, foi realizado o dimensionamento de um sistema de lodos ativados, que visa elevada remoção de carga orgânica devido à alta eficiência de processo. Para tal tratamento, deve ser considerada a carga de poluente e a capacidade do sistema biológico em assimilar a DBO₅, que depende da carga aplicada por metro cúbico do reator, teor de sólidos suspensos ativos (biomassa ativa), idade do lodo adotada e tempo de retenção hidráulico (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

O sistema de lodos ativados é composto por reator aeróbio e por decantador secundário. O primeiro promove a degradação da carga de poluente, enquanto o segundo responde pela retenção/decantação da biomassa, que é retornada em parte

para o reator aeróbio. O dimensionamento é constituído por sistema de lodos ativados de aeração prolongada, operando com vazão contínua de efluentes, sendo adotada a idade do lodo de 20 dias, havendo maior tempo de residência dos microrganismos ativos, favorecendo uma maior estabilização da carga orgânica. Na literatura são citadas eficiências de remoção na faixa de 95-98% de DBO (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2005).

4.2.10.2.1 Volume do reator

Para cálculo do volume requerido para o reator, antes deve-se saber a carga de DBO₅ removida na etapa biológica (S_r), conforme Equação 4 citada por Von Sperling (2005).

$$S_r = Q \times (S_o - S)/1000 \quad (4)$$

Onde:

S_r = carga de DBO₅ removida na etapa biológica (kgDBO₅/d)

Q = vazão média de afluyente (m³/d)

S_o = DBO₅ total afluyente (mg/L)

S = DBO solúvel efluyente (mg/L)

Tendo conhecimento da carga de DBO₅ removida, parte-se para o cálculo do volume do reator aeróbio, sendo expresso pela Equação 5 (VON SPERLING, 2005).

$$V = \frac{Y \times \theta_c \times S_r \times 1000}{X_v \times (1 + f_b \times K_d \times \theta_c)} \quad (5)$$

Onde:

V = volume do reator aeróbio (m³)

Y = coeficiente de produção celular (gSSV/gDBO₅)

θ_c = idade do lodo (dias)

S_r = carga de DBO₅ removida na etapa biológica (kgDBO₅/d)

X_v = concentração de sólidos suspensos voláteis no reator (gSSVTA/m³)

f_b = fração biodegradável dos sólidos suspensos voláteis (kgSS_b/kgSSV)

$K_d = \text{coeficiente de respiração endógena (d}^{-1}\text{)}$

4.2.10.2.2 Tempo de retenção hidráulico

A partir do volume do reator calculado, consegue-se obter o tempo de retenção hidráulico do reator, sendo a relação do volume do reator calculado pela vazão média de efluente diária, indicando em quanto tempo, em dias, que a vazão de efluente passará pelo reator de determinado volume (EQUAÇÃO 6) (VON SPERLING, 2005).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

Sendo:

$TRH = \text{tempo de retenção hidráulico (d)}$

$V = \text{volume do reator (m}^3\text{)}$

$Q = \text{vazão média de afluente (m}^3\text{/d)}$

4.2.10.2.3 Relação alimento/microrganismo

A relação microrganismo/alimento baseia-se na quantidade de substrato que estará disponível como alimento para os microrganismos realizarem suas atividades metabólicas. Por meio da Equação 7 é possível obter a quantidade de alimento que estará disponível no sistema por unidade de massa de microrganismos (VON SPERLING, 2005).

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \times S_o}{V \times X_p} \quad (7)$$

Onde:

$\frac{A}{M} = \text{relação microrganismo/alimento (kgDBO}_5\text{/kgSSV.d)}$

$Q = \text{vazão média afluente (m}^3\text{/d)}$

$S_o = \text{DBO}_5 \text{ total afluente (kg/m}^3\text{)}$

$V = \text{volume do reator (m}^3\text{)}$

X_v = concentração de sólidos em suspensão no reator ($kgSSV/m^3$)

4.2.10.2.4 Remoção de lodo excedente

O controle o teor de sólidos suspensos voláteis no reator é um importante indicativo da idade do lodo, adotada em 20 dias, e que permite inferir sobre o volume de lodo a descartar rotineiramente. A remoção do lodo ocorrerá diretamente no reator aeróbio, sendo a concepção mais simples de operar. Para simplificar o descarte de lodo excedente, será considerado para efeito de cálculo o descarte de $\frac{1}{20}$ do volume do reator aeróbio (EQUAÇÃO 8), tendo em vista que se trata de uma idade de lodo de 20 dias, ou seja, a cada 20 dias a biomassa foi descartada para manter a idade de lodo prevista. Na prática este descarte começará a acontecer assim que o reator atingir o teor de sólidos suspensos voláteis previstos em projeto. Assim, para garantir a correta operação do reator, será preciso monitorar a quantidade de sólidos suspensos voláteis presentes no licor misto contido no reator aeróbio (VON SPERLING, 2005).

$$Q_{exc} = \frac{V}{\theta_c} \quad (8)$$

Onde:

Q_{exc} = vazão excedente de lodo a ser removido (m^3/d)

V = volume do reator aeróbio m^3

θ_c = idade do lodo (d)

O adensamento do lodo excedente deverá ser realizado em caixa de material impermeável, onde a quantidade de efluente com lodo retirada por dia do reator aeróbio será acondicionada. O tempo de retenção hidráulico da caixa de adensamento deverá ser de 24 horas, conforme Class e Maia (1994), a fim de garantir melhor sedimentação do lodo. Após adensamento, o líquido sobrenadante retorna ao reator aeróbio e o lodo excedente será posteriormente destinado.

4.2.10.2.5 Sistema de aeração mecânico

O sistema de aeração dimensionado permitirá o fornecimento de oxigênio necessário para a decomposição aeróbia da matéria orgânica (DBO_5) e mistura do efluente, fazendo com que a biomassa se mantenha em suspensão no sistema. Para o projeto, será utilizado mecanismo de aeração mecânica via aerador superficial, tendo em vista que é o equipamento de aeração que mais se adequa para a baixa vazão de efluentes da fábrica (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Com base na Equação 9, de Von Sperling (2005), é possível determinar a quantidade de potência que será requerida para aeração do sistema, e conseqüentemente a quantidade de aeradores que serão necessários conforme volume do reator aeróbio.

$$DP = \frac{P}{V} \quad (9)$$

Sendo:

$DP =$ densidade de potência (W/m^3)

$P =$ potência introduzida (W)

$V =$ volume do reator (m^3)

4.2.10.2.6 Requisitos de nutrientes

Von Sperling (2005) cita que para realização das atividades metabólicas dos microrganismos, os mesmos necessitam de nutrientes, em especial nitrogênio e fósforo. Para que ocorra a decomposição da matéria orgânica, as cargas de DBO no sistema devem ser limitadas, porém as concentrações do restante dos nutrientes necessitam estar acima das quantidades requeridas pelos microrganismos. Com o intuito de verificar se os nutrientes presentes nos efluentes analisados estão atendendo a demanda dos microrganismos do sistema, foi elaborada uma relação dos requisitos mínimos de nutrientes de acordo com a carga de DBO_5 , tendo embasamento na literatura, fazendo uma comparação com os valores obtidos nas amostragens realizadas na empresa. Sendo assim, será possível determinar também a necessidade adição ou remoção de algum nutriente.

4.2.10.3 Dimensionamento do decantador secundário

O dimensionamento do decantador secundário inicia-se admitindo-se condições médias e máximas da vazão do efluente. A vazão média é a vazão produzida de efluente por hora em condições normais da indústria, e a vazão máxima (Equação 10) é a vazão adotada com coeficiente de pico determinado em caso de ocorrência de aumento de vazão. As duas vazões devem ser consideradas a fim de que o decantador consiga comportar as cargas demandadas em condições normais e críticas de processo (VON SPERLING, 2017).

$$Q_{m\acute{a}x} = Q \times K \quad (10)$$

Onde:

$Q_{m\acute{a}x}$ = vazão máxima do efluente (m^3/h)

Q = vazão média do efluente (m^3/h)

K = coeficiente de pico

Outro fator importante é o retorno do lodo do decantador para o reator aeróbio, que é essencial para garantir a idade de lodo prevista em projeto, sendo adotado valor da razão de recirculação recomendado pela literatura. A vazão de reciclo do lodo pode ser determinada a partir da Equação 11, de Von Sperling (2005).

$$Q_r = R \times Q \quad (11)$$

Onde:

Q_r = vazão de reciclo do lodo (m^3/h)

Q = vazão média do efluente (m^3/h)

R = razão de recirculação

Tendo conhecimento das vazões média, máxima e de reciclo do lodo, parte-se para o cálculo das áreas superficiais do decantador (EQUAÇÕES 12 e 13) com base nas taxas de aplicação hidráulica determinadas em literatura (VON SPERLING, 2005).

Para $Q_{méd}$:

$$A = \frac{Q}{TAH} \quad (12)$$

Onde:

A = área superficial (m^2)

Q = vazão média do efluente (m^3/h)

TAH = taxa de aplicação hidráulica (m^3/m^2h)

Para $Q_{m\acute{a}x}$:

$$A = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{TAH} \quad (13)$$

Onde:

A = área superficial (m^2)

$Q_{m\acute{a}x}$ = vazão máxima do efluente (m^3/h)

TAH = taxa de aplicação hidráulica (m^3/m^2h)

Calculadas as áreas superficiais relacionadas com a taxa de aplicação hidráulica, segue-se para o cálculo das áreas superficiais baseadas nas taxas de aplicação de sólidos. Para os cálculos, necessita-se saber a concentração de sólidos suspensos totais no reator, dessa forma, faz-se o uso da Equação 14, de Von Sperling (2005).

$$SSTA = \frac{SSVTA}{Rela\c{c}\tilde{a}o_{SSV/SS}} \quad (14)$$

Onde:

$SSTA$ = sólidos suspensos totais no reator (g/m^3)

$SSVTA$ = sólidos suspensos voláteis no reator (g/m^3)

$Rela\c{c}\tilde{a}o_{SSV/SS}$ = $gSSV/gSS$ ao gerar sólidos

Encontrado o valor de sólidos suspensos totais no reator, com as Equações 15 e 16, de Von Sperling (2005), consegue-se calcular as áreas superficiais do decantador com base nas taxas de aplicação de sólidos, considerando vazões média e máxima de efluente.

Para $Q_{m\acute{e}d}$:

$$A = \frac{(Q+Q_r) \times X}{1000 \times TAS} \quad (15)$$

Onde:

A = área superficial (m^2)

Q = vazão do efluente (m^3/h)

Q_r = vazão de reciclo do lodo (m^3/h)

X = concentração de sólidos suspensos no reator ($gSSTA/m^3$)

TAS = taxa de aplicação de sólidos ($kg/m^2 \cdot h$)

Para $Q_{máx}$:

$$A = \frac{(Q_{máx}+Q_r) \times X}{1000 \times TAS} \quad (16)$$

Onde:

A = área superficial (m^2)

$Q_{máx}$ = vazão máxima do efluente (m^3/h)

Q_r = vazão de reciclo do lodo (m^3/h)

X = concentração de sólidos no reator ($gSSTA/m^3$)

TAS = taxa de aplicação de sólidos ($kg/m^2 \cdot h$)

De acordo com Von Sperling (2005), a área superficial a ser adotada para o dimensionamento do decantador deverá ser o maior valor dentre os quatro valores obtidos através dos cálculos de áreas superficiais. Dessa forma, frisa-se a importância do dimensionamento considerando tanto a taxa de aplicação hidráulica, como também a taxa de aplicação de sólidos.

A partir da área superficial obtida, por meio da Equação 17 é possível calcular o diâmetro do decantador (VON SPERLING, 2005).

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (17)$$

Onde:

D = diâmetro do decantador (m)

A = área superficial do decantador (m^2)

Com o valor de diâmetro calculado para o decantador, juntamente com o valor de altura adotado conforme recomendado pela literatura, consegue-se calcular o volume requerido para o decantador por meio da Equação 18, de Von Sperling (2005).

$$V = A \times H \quad (18)$$

Onde:

$V = \text{volume do decantador (m}^3\text{)}$

$A = \text{área do decantador (m}^2\text{)}$

$H = \text{altura do decantador (m)}$

Por fim, são calculados tempos de detenção hidráulica para vazão média com recirculação e para vazão máxima com recirculação (Equações 19 e 20) (VON SPERLING, 2005).

Para $Q_{\text{méd}}$ com recirculação:

$$t = \frac{V}{(Q+Q_r)} \quad (19)$$

Onde:

$t = \text{tempo de detenção hidráulica (h)}$

$V = \text{volume do decantador (m}^3\text{)}$

$Q = \text{vazão do efluente (m}^3\text{/h)}$

$Q_r = \text{vazão de reciclo do lodo (m}^3\text{/h)}$

Para $Q_{\text{máx}}$ com recirculação:

$$t = \frac{V}{(Q_{\text{máx}}+Q_r)} \quad (20)$$

Onde:

$t = \text{tempo de detenção hidráulica (h)}$

$V = \text{volume do decantador (m}^3\text{)}$

$Q_{\text{máx}} = \text{vazão máxima do efluente (m}^3\text{/h)}$

$Q_r = \text{vazão de reciclo do lodo (m}^3\text{/h)}$

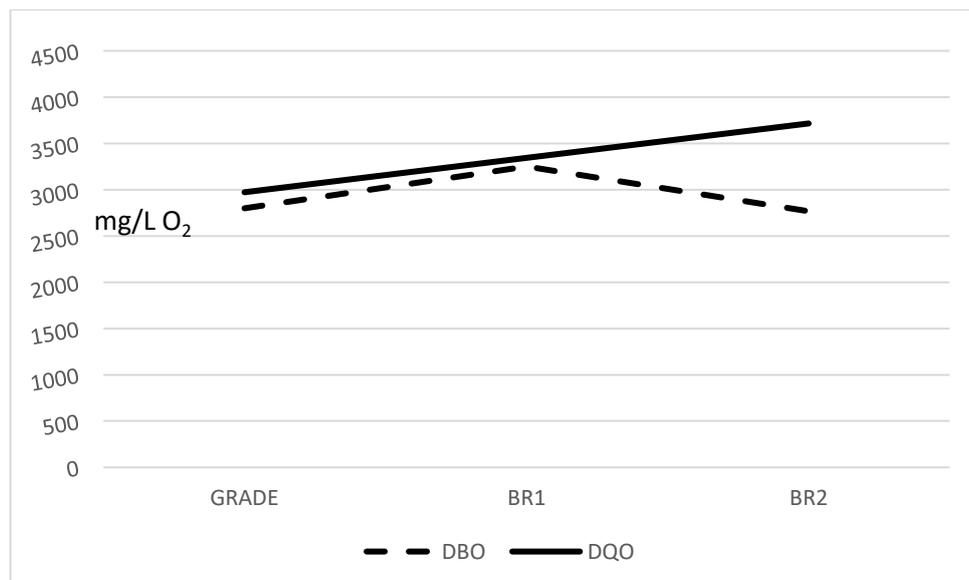
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do efluente bruto

5.1.1 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) e demanda química de oxigênio (DQO)

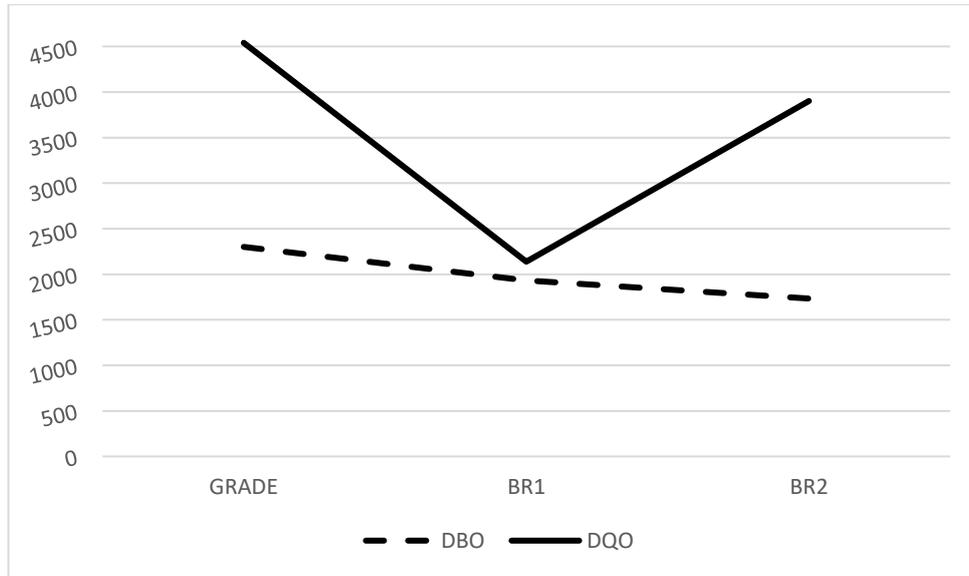
Nas Figuras 10, 11 e 12 é possível visualizar as concentrações de DBO₅ e DQO encontradas na 1^a, 2^a e 3^a campanha de amostragem do efluente proveniente da produção respectivamente, nos três pontos da ETE coletados.

Figura 10 - Valores médios de DQO e DBO da 1^a coleta, etapa de produção



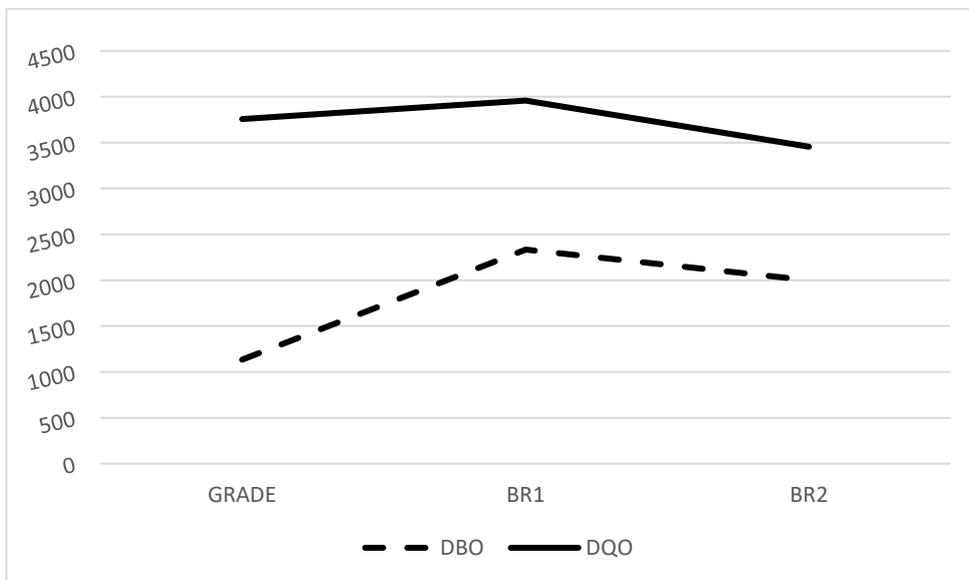
Fonte: Da autora (2019).

Figura 11 - Valores médios de DQO e DBO da 2ª coleta, etapa de produção



Fonte: Da autora (2019).

Figura 12 - Valores médios de DQO e DBO da 3ª coleta, etapa de produção



Fonte: Da autora (2019).

Os resultados apresentados denotam a grande variação da carga orgânica ao longo do sistema de tratamento atual. É possível perceber que os valores apresentam não somente redução, mas aumento em alguns casos. Este comportamento sugere que na operação do sistema de tratamento não há controle preciso, visto que muitas variáveis podem influenciar na performance do sistema, como vazão do efluente,

temperatura ambiente, carga orgânica inicial, tempo de retenção em cada etapa, bem como a periodicidade de limpeza e manutenção do sistema.

Porém alguns valores se aproximam dos dados citados em Rao et al. (2006), para efluentes brutos de cervejarias. Na faixa de valores, que variou de 1133,33 a 3250 mg O₂/L para DBO₅ e 2137,74 a 4539,94 mg O₂/L de DQO, onde mais compostos presentes no efluente são quimicamente oxidáveis em relação aos biologicamente oxidáveis (METCALF; EDDY, 2013).

A variação observada provavelmente é decorrente do dimensionamento equivocado do sistema de tratamento atual, bem como da falta de cuidado na operação do mesmo. Segundo funcionários, em nenhum momento, desde o início das atividades da fábrica, foram realizadas análises dos efluentes, sendo a informação confirmada pela ausência de dados que embasassem os cálculos de dimensionamento do sistema. Avaliando-se o projeto do sistema atual, disponibilizado apenas para consulta interna, não houve qualquer menção da DBO relativa ao dimensionamento do filtro biológico, que tem a função de depurar a DBO. Não foi mencionado sequer o volume de efluentes a tratar na ETE, o que se constitui numa inconsistência técnica, justificando em parte a incoerência de valores de carga orgânica.

A grade localizada na recepção do efluente possui orifícios muito finos, acarretando em entupimento e conseqüente transbordamento do efluente no gradeamento, provocando maior carregamento de partículas para os biorreatores. Já no tanque de equalização, o rotor que provoca a mistura do efluente não encontra-se em condições de funcionamento, impossibilitando a homogeneização do efluente, no qual apresenta picos de cargas e oscilações nas concentrações de matéria orgânica, conforme a variedade dos resíduos destinados à estação dos diversos processos produtivos da indústria.

A discrepância dos teores de DBO e DQO encontrados também está relacionada ao tratamento biológico, sendo projetado para a utilização de um filtro biológico de alta taxa em série, com funcionamento aeróbio, seguido de decantador com funil de separação e recirculação de lodo, o que não condiz com a estrutura atual do tratamento, onde o sistema opera com dois biorreatores na ausência de sistema

de aeração, e sem sistema de decantação com recirculação de lodo. De acordo com Metcalf e Eddy (2013), torna-se necessário o uso de sistema de aeração em biorreatores aeróbios que operam com efluentes de elevada carga orgânica, garantindo a disponibilidade de oxigênio para os microrganismos realizarem as atividades metabólicas. Para o tipo de tratamento utilizado no empreendimento, deveria ser adotado sistema de recirculação do efluente, tendo em vista a uniformidade da vazão do efluente, equilíbrio da carga orgânica, manutenção do oxigênio dissolvido, como também o retorno e incremento da biomassa ativa para depuração da matéria orgânica, conforme citado por Jordão e Pessoa (2014).

Frisa-se que não é realizada a remoção do lodo excedente, como também não há periodicidade de limpeza dos meios filtrantes dos filtros biológicos, o que pode implicar na diminuição da área superficial disponível para a formação do biofilme e adsorção da matéria orgânica, diminuindo a eficiência do processo (GOMES, 2013). O efluente ao passar pelo meio suporte dos filtros biológicos forma um biofilme constituído de microrganismos que irão adsorver a matéria orgânica, que com o decorrer das atividades do equipamento irá aumentar até que atinja espessura crítica, o que impossibilita a passagem de oxigênio e nutrientes pelo filtro biológico. Desta forma, ocorre anaerobiose no sistema, fazendo com que o biofilme se desprenda do meio suporte, que juntamente com a falta de limpeza e ausência de decantador, os microrganismos acabam por ser arrastados juntamente com o efluente, aumentando assim a carga orgânica (METCALF; EDDY, 2013; JORDÃO; PESSOA, 2014; VON SPERLING, 2017).

Outro fator importante a ser analisado é o tempo de retenção hidráulico (TRH) dos filtros biológicos, sendo este o período de tempo necessário para passagem da vazão do efluente no equipamento de determinado volume. Considerando que a vazão média diária de efluentes gerados na indústria encontra-se na faixa de 13 m³ e que cada biorreator possui um volume de 15 m³, o tempo necessário para passagem de todo efluente por cada filtro biológico para degradação da matéria orgânica é equivalente a 1,15 dias. Contudo, os filtros biológicos atualmente operam com tempo de retenção hidráulico na faixa de 9 horas, acarretando em sobrecarga hidráulica e diminuição da eficiência (VON SPERLING, 2005).

Conforme já citado, diversos fatores influenciam na performance do sistema de tratamento de efluentes e sua eficiência, sendo assim, foram calculadas as eficiências de remoção de DQO e DBO da ETE da cervejaria. Os resultados obtidos para as eficiências de remoção de DQO e DBO no sistema atual do empreendimento desde a etapa de gradeamento até o segundo biorreator, podem ser visualizados através da Tabela 05 e da Tabela 06.

Tabela 05 - Eficiência de remoção de DBO

Campanhas de amostragens	Eficiência de remoção de DBO (%)
1ª coleta	1,19
2ª coleta	24,64
3ª coleta	-76,47

Fonte: Da autora (2019).

Tabela 06 - Eficiência de remoção de DQO

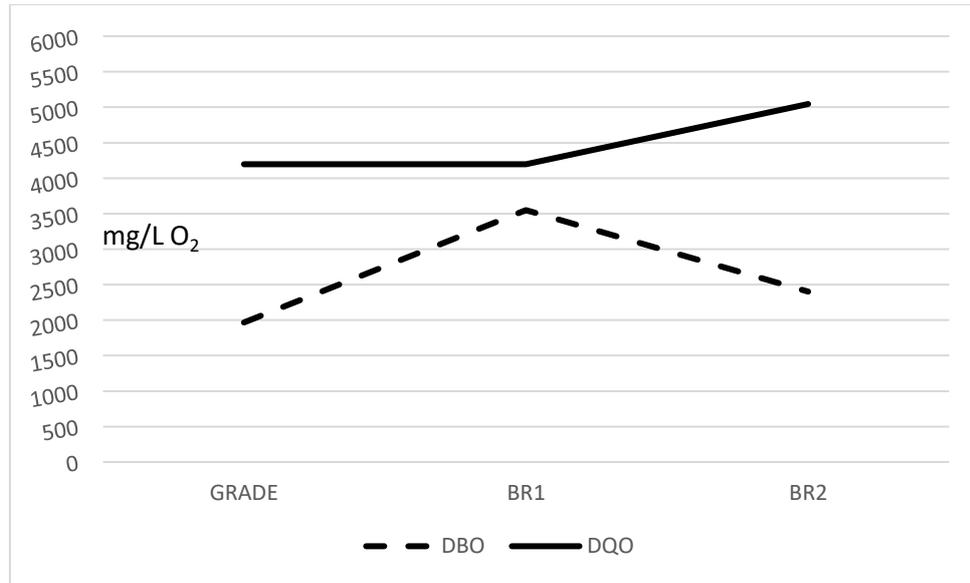
Campanhas de amostragens	Eficiência de remoção de DQO (%)
1ª coleta	-25,00
2ª coleta	14,08
3ª coleta	8,00

Fonte: Da autora (2019).

Nota-se que o tratamento atual apresenta elevada variação em relação a remoção da carga orgânica, com baixos valores de eficiências, e em alguns casos, apresentando maior concentração de matéria orgânica na saída do sistema em relação à concentração inicial (efluente bruto). Torna-se evidente que o sistema de tratamento está mal dimensionado para a demanda de efluente da cervejaria, que juntamente com a operação inadequada, pode acarretar no lançamento dos efluentes fora dos padrões permitidos pela legislação ambiental.

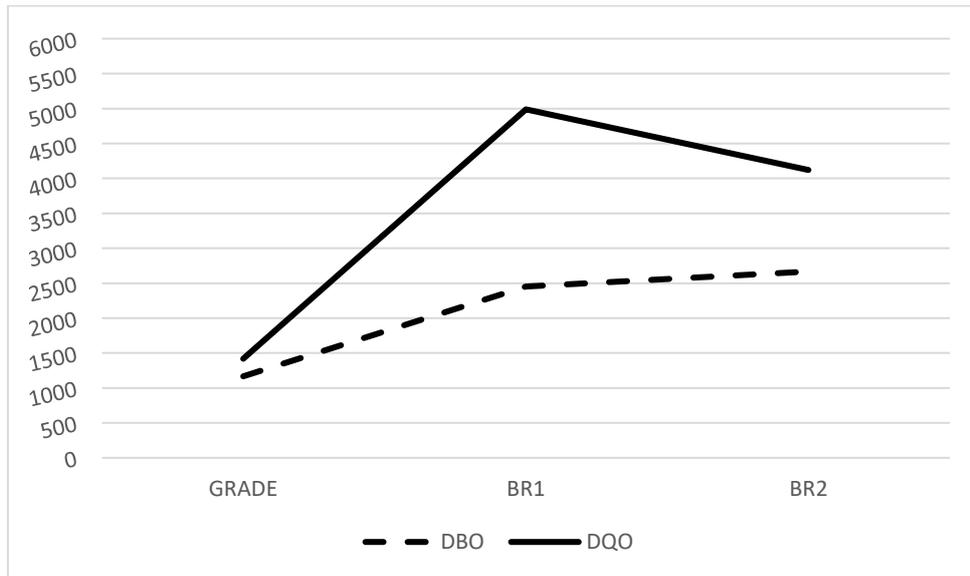
Nas Figuras 13, 14 e 15 é possível visualizar as concentrações de DBO₅ e DQO encontradas na 1ª, 2ª e 3ª campanha de amostragem do efluente proveniente da limpeza do maquinário da fábrica respectivamente, nos três pontos da ETE coletados.

Figura 13 - Valores médios de DQO e DBO da 1ª coleta, etapa de limpeza



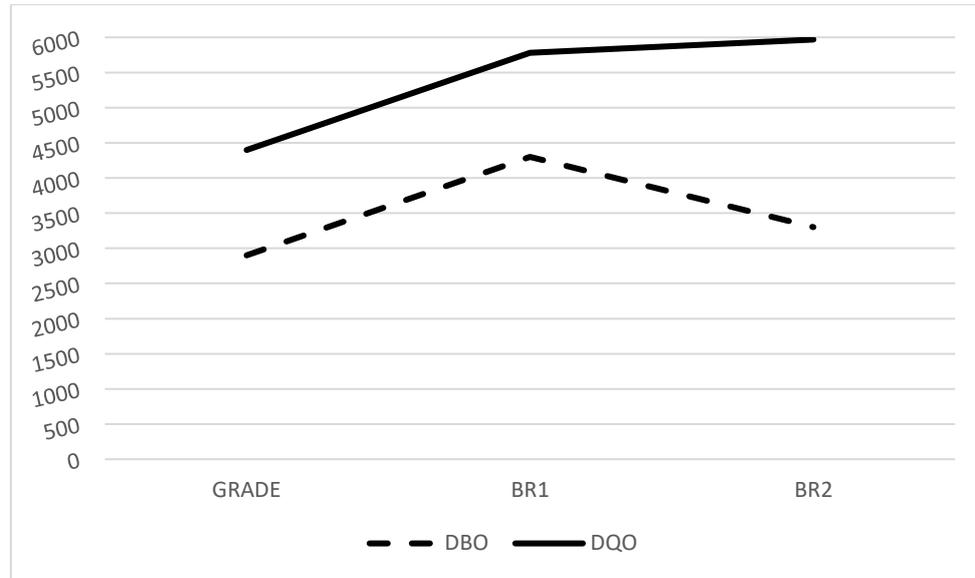
Fonte: Da autora (2019).

Figura 14 - Valores médios de DQO e DBO da 2ª coleta, etapa de limpeza



Fonte: Da autora (2019).

Figura 15 - Valores médios de DQO e DBO da 3ª coleta, etapa de limpeza



Fonte: Da autora (2019).

Os resultados apresentados nas Figuras 13, 14 e 15 expressam a elevada variação nos valores de carga orgânica ao longo da estação de tratamento atual, indicando comportamento semelhante ao efluente proveniente da produção.

Todavia, os efluentes da limpeza denotam maiores concentrações de DBO e DQO do que o efluente da produção, apresentando incoerência devido ao fato de que a maior parcela de carga orgânica encontrada no efluentes da indústria cervejeira são provenientes do processo produtivo, resultante de resíduos de cereais, açúcares provenientes das conversões dos amidos, ácidos graxos e etanol (SIMATE et al., 2011; OLAJIRE, 2012). No entanto, parte dos resíduos derivados da produção podem ter ficado retidos nos equipamentos, sofrendo arraste na etapa de limpeza, sendo considerada também a possibilidade de presença de águas residuais da etapa produtiva na estação de tratamento, que através de visitas técnicas, foi observado que em alguns dias eram realizadas etapas de limpeza subsequentes às etapas de produção, em função da falta de planejamento e organização das atividades da fábrica.

Em relação às características da matéria orgânica presente no efluente da limpeza, os valores se aproximam aos citados por Rao et al. (2006) e Simate et al. (2011) para efluentes brutos de cervejaria. Analisando as faixas de valores, é possível perceber que a DQO presente nos resíduos líquidos é superior a DBO, afirmando que

há mais compostos quimicamente oxidáveis do que compostos biologicamente oxidáveis (METCALF; EDDY, 2013).

Os valores de matéria orgânica crescem e decrescem ao longo do tratamento, que conforme já citado no presente estudo evidencia o dimensionamento incorreto do sistema de tratamento, que não foi projetado com base na composição do efluente e demanda da indústria, que aliado a falta de operação precisa da estação, podem comprometer a qualidade do residual que é lançado ao corpo receptor.

Nas Tabelas 07 e Tabela 08 são apresentadas as eficiências de remoção de matéria orgânica obtidas a partir do cálculo de eficiência citado por Colares e Sandri (2013).

Tabela 07 - Eficiência de remoção de DBO

Campanhas de amostragens	Eficiência de remoção de DBO (%)
1ª coleta	-22,03
2ª coleta	-128,57
3ª coleta	-13,79

Fonte: Da autora (2019).

Tabela 08 - Eficiência de remoção de DQO

Campanhas de amostragens	Eficiência de remoção de DQO (%)
1ª coleta	-20,22
2ª coleta	-190,63
3ª coleta	-35,71

Fonte: Da autora (2019).

Observa-se que o sistema de tratamento atual da fábrica não apresentou em nenhum momento eficiência na remoção de carga orgânica dos efluentes originários da limpeza, retratando um cenário crítico na estação de tratamento de efluentes atual, que possui maior concentração de DBO e DBO no final do sistema do que no início.

5.1.2 Outras determinações físicas e químicas

Na Tabela 09 são expostos os resultados de turbidez, pH, sólidos sedimentáveis, carbono orgânico total, carbono inorgânico, fósforo total e nitrogênio total Kjeldahl, obtidos nas amostras de efluentes provindos da produção cervejeira nas três campanhas de amostragem realizadas, para os três pontos de coleta.

Tabela 09 - Determinações físicas e químicas da etapa de produção

DETERMINAÇÕES	1ª Coleta			2ª Coleta			3ª Coleta		
	GRADE	BR 1	BR 2	GRADE	BR 1	BR 2	GRADE	BR 1	BR 2
Turbidez (NTU)	312,33±6,11	230,33±2,08	140,67±0,58	215,33±0,58	125,67±0,58	71,40±0,87	182,33±3,21	243,33±1,15	168,00±1
pH	6,33±0,03	4,85±0,01	4,72±0,03	8,75±0,01	5,82±0,03	5,16±0,01	11,72±0,02	4,73±0,02	4,33±0,02
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	3,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	1,90	0,10	0,10
Fósforo total (mg/L)	22,12±2,87	13,43±1,74	13,47±1,75	13,40±1,74	13,03±1,69	11,80±1,53	17,90±2,32	13,62±1,77	9,60±1,24
Nitrogênio total Kjeldahl (mg/L)	17,01±0,24	25,71±3,23	27,33±1,10	37,48	47,52	38,54±0,08	15,45±6,86	11,94±0,79	9,09±0,08

Valores: média ± desvio padrão. BR= biorreator.

Fonte: Da autora (2019).

Os valores encontrados para turbidez se mostram elevados quando comparados aos apresentados por Arruda et al. (2015) para efluente bruto de cervejaria, porém se assemelham aos obtidos por Fogaça (2016) para efluentes brutos provindos de indústria de bebidas. Os teores de turbidez estão relacionados à presença de sólidos suspensos no meio (JORDÃO; PESSÔA, 2014), sendo verificado que ao longo do sistema de tratamento houve redução gradativa do parâmetro, indicando remoção de sólidos suspensos antes presentes no efluente, com exceção da terceira campanha de amostragem, que no primeiro biorreator apresentou aumento da turbidez. A diminuição da turbidez possivelmente se deve a sedimentação dos particulados, como também aderência dos mesmos nos meios suportes dos biorreatores, identificando certa eficiência no processo. Já o aumento de turbidez identificado na terceira campanha de amostragem pode estar associado ao acúmulo de partículas no biorreator, ocasionado pela ausência de periodicidade de limpeza e remoção do lodo gerado ao decorrer do processo.

Em relação ao parâmetro pH, foram encontrados para as amostras analisadas valores médios na faixa de 4,72 a 11,72, chegando bem próximos aos citados por Golub et al. (2014) e por Jaiyeola e Bwapwa (2016), o que mostra que os resultados de pH obtidos são uma característica do efluente cervejeiro. Entretanto, o pH apresenta variação expressiva, podendo estar associada a etapa de limpeza que faz uso de maiores volumes de água e produtos químicos, ocasionando cargas de choque no efluente. Sendo assim, ressalta-se a importância do ajuste do parâmetro para as etapas de tratamento dos efluentes, como por exemplo no tratamento biológico, em que o pH deve estar perto da neutralidade para atividade dos microrganismos (VON SPERLING, 2017).

Para os parâmetros nitrogênio total Kjeldahl e fósforo total, os teores médios encontrados possuem valores nas faixas de 9,09–47,52 mg/L e 9,60-22,12 mg/L, respectivamente. Simate et al. (2011) e Jaiyeola e Bwapwa (2016) mencionam valores próximos para fósforo total, porém a faixa de valores para nitrogênio total Kjeldahl citadas pelos autores é elevada, podendo essa diferença ser resultante dos processos produtivos e de limpeza envolvidos, natureza das matérias-primas, condições operacionais e tipos de cervejas produzidas, que irão modificar as características dos efluentes, sendo que no presente estudo o efluente analisado foi proveniente somente da produção de cerveja Pilsen (SIMATE et al., 2011; OLAJIRE, 2012).

Contudo, a variação dos valores obtidos mostra a ineficiência da operação do sistema de tratamento de efluentes atual, onde os comportamentos dos parâmetros de caracterização indicam a necessidade de equalização do efluente para seu correto tratamento. Sendo assim, as justificativas já utilizadas para a variação da carga orgânica se aplicam também para os demais parâmetros.

Na Tabela 10 são expostos os resultados de turbidez, pH, sólidos sedimentáveis, carbono orgânico total, carbono inorgânico, fósforo total e nitrogênio total kjeldahl, obtidos nas amostras de efluentes provindos da limpeza da fábrica nas três campanhas de amostragem realizadas, para os três pontos de coleta.

Tabela 10 - Determinações físicas e químicas da etapa de limpeza

DETERMINAÇÕES	1ª Coleta			2ª Coleta			3ª Coleta		
	GRADE	BR 1	BR 2	GRADE	BR 1	BR 2	GRADE	BR 1	BR 2
Turbidez (NTU)	234,67±1,15	205,67±1,15	74,17±0,61	56,10±0,35	274,33±1,53	185,00±1,73	117,33±1,15	459,00±2,65	237,00±0
pH	11,50±0,01	4,60±0,08	4,52±0,02	5,41±0,01	4,93±0,03	4,91±0,01	7,59±0,02	4,84±0,01	4,51±0,02
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	1,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	2,80	0,10	0,10
Fósforo total (mg/L)	21,02±2,73	17,80±2,31	12,59±1,63	3,33±0,43	7,66±0,99	9,85±1,27	11,80±1,53	17,60±2,28	16,88±2,19
Nitrogênio total kjeldahl (mg/L)	47,02±10,02	28,22±6,78	21,03±2,92	11,71±5,52	35,86±4,81	57,62±1,03	7,20±0,08	17,57±1,66	34,08±0,24

Valores: média ± desvio padrão. BR= biorreator.

Fonte: Da autora (2019).

Conforme os resultados apresentados na Tabela 08, o comportamento dos efluentes da etapa de limpeza é semelhante ao observado nos efluentes da produção, confirmando a falta de precisão na operação e baixa eficiência do sistema de tratamento empregado atualmente, onde as justificativas para as variações observadas são idênticas.

5.2 Teste de floculação

Os valores de cor, turbidez e DQO obtidos no teste de floculação realizado no efluente bruto da etapa de produção são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do teste de floculação

DETERMINAÇÕES	BRUTO	TESTE 1	TESTE 2
DQO (mg/L)	4479,04±109,76	3736,53±259,08	3904,19±299,16
Turbidez (NTU)	330,00±2,83	5,78±0,05	10,27±0,51
Cor (Pt-Co)	101,50±0,71	36,65±0,07	42,70±1,41

Valores: média ± desvio padrão

Fonte: Da autora (2019).

Os resultados apresentados para os parâmetros analisados a partir do teste de floculação mostram redução expressiva de cor e turbidez, e redução de DQO, nos efluentes clarificados. Em termos de eficiências, o Teste 1 obteve 16,58% para DQO, 98,25% para turbidez e 63,89% para cor. Já no Teste 2, o efluente clarificado apresentou eficiências de 12,83% para DQO, 96,89% para turbidez e 57,93% para cor.

Metcalf e Eddy (2013) citam que para melhor remoção dos particulados, o pH ideal para adição do coagulante sulfato de alumínio deve estar com valores na faixa de 7 a 8, porém os testes ocorreram com pH do efluente no valor de 4,5. Entretanto, mesmo sem realizar ajuste prévio do pH, o efluente clarificado apresentou melhoras consideráveis principalmente nos teores de turbidez e cor, indicando a contribuição positiva desta operação no tratamento de efluentes para alcançar os valores permitidos pela legislação. Contudo, de acordo com Jordão e Pessoa (2014), a floculação pode ser usada para remoção de uma parcela das cargas poluentes antes do tratamento biológico, como também para polimento final do efluente, visto que com

os ajustes corretos de pH e coagulante, o tratamento tende a apresentar eficiências ainda maiores.

5.3 Dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados

Na Quadro 02 abaixo, seguem os principais valores dos parâmetros resultantes do dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados, onde o memorial de cálculo do dimensionamento encontra-se no Anexo A do documento.

Quadro 02 - Dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados

Parâmetros	Resultados
Fator de biodegradabilidade do efluente	0,96
Reator aeróbio	Resultados
Volume	56,23 m ³
Tempo de retenção hidráulico do reator	4,32 dias
Relação microrganismo/alimento	0,16 kgDBO ₅ /kgSSV.d
Remoção de lodo excedente	2,81 m ³ /d
Sistema de aeração	2 aeradores de 5cv
Requisitos de nutrientes	adição de 0,58 kgNT/d
Decantador secundário	Resultados
Vazão máxima	0,81 m ³ /h
Vazão de reciclo do lodo	0,49 m ³ /h
Área superficial	1,64 m ²
Diâmetro	1,44 m
Volume	4,92 m ³
Tempo de detenção hidráulica (Q _{méd})	4,77 h
Tempo de detenção hidráulica (Q _{máx})	3,78 h

Fonte: Da autora (2019).

A partir do processo calculado, estimou-se a redução de 95% (VON SPERLING, 2005) da carga orgânica do efluente, que se considerado o valor obtido do efluente bruto coletado, corresponde a um valor final na saída do sistema de lodos ativados de 124,86 mg/L de DBO₅.

Conforme a Resolução CONSEMA 355/2017, para a vazão média diária do empreendimento de 13 m³/dia de efluente, a DBO₅ ainda não se encontra dentro dos padrões permitidos pela legislação. Porém, se houverem ajustes no sistema de tratamento de efluentes da empresa, como no gradeamento e equalização, e forem implementadas as operações de floculação e tratamento biológico (sistema de lodos ativados), será possível o lançamento do efluente em corpo receptor dentro dos padrões exigidos pela legislação.

6 CONCLUSÃO

Com base no exposto nos itens anteriores, é possível concluir que:

A maior geração de efluentes líquidos da cervejaria em estudo ocorre nas etapas de moagem, mistura e mostura, filtração, fervura e centrifugação, devido à alta quantidade de água empregada nestas operações.

Os resultados das análises de caracterização das amostras de efluente bruto coletadas indicam alto teor de carga orgânica (açúcares) e baixos valores de pH, fazendo necessário o ajuste prévio do parâmetro para as etapas de tratamento. Em relação ao nitrogênio total Kjeldahl, este apresenta menor concentração do que a requerida para as atividades metabólicas dos microrganismos, o que prevê adição diária do nutriente para o bom funcionamento do tratamento biológico. Já as médias dos valores obtidos para fósforo evidenciaram que a concentração do nutriente no efluente atende o necessário para a demanda requerida pelos microrganismos. A turbidez se mostra elevada, obtendo picos ao longo do sistema de tratamento atual. De forma geral, todos os parâmetros analisados tiveram picos de carga ao longo do sistema de tratamento, onde o comportamento destes mostram a necessidade de equalização do efluente para seu correto tratamento, que no momento está operando de maneira ineficiente.

O sistema atual de tratamento existente na indústria não torna o efluente adequado à disposição final, com valores de DQO de saída dos reatores biológicos acima de 5900 mg O₂/L, e de DBO₅ acima de 3000 mg O₂/L, sendo necessária a readequação de todas as etapas, sugerindo a concepção de uma estação de

tratamento projetada de acordo com a composição determinada neste estudo, ainda considerando a variabilidade do efluente, dado que a indústria produz outros tipos de cervejas que não a Pilsen.

O teste de floculação promoveu redução expressiva nos parâmetros de cor e turbidez, e redução dos valores DQO, com eficiências nas faixas de 12,83-16,58% para DQO, 96,89-98,25% para turbidez e 57,93-63,89% para cor, indicando que esta operação pode se apresentar como preparação do efluente para o lodo ativado ou ainda como polimento, se usando após o lodo ativado.

A partir dos dados de caracterização do efluente bruto, o processo de lodo ativado dimensionado necessitará de um reator com 56,23 m³ de volume, com tempo de retenção hidráulico de 4,32 dias, dotado de sistema de aeração mecânica composto por dois aeradores superficiais de 5 cv, com remoção de lodo excedente de 2,81 m³/d no próprio reator biológico, considerando vazão de reciclo de lodo do decantador secundário para o reator de 0,49 m³/h. Com relação ao decantador secundário, este necessitará de uma área superficial de 1,64 m², com diâmetro de 1,44 m e volume de 4,92 m³. Dessa forma, estima-se uma redução de 95% da carga orgânica, chegando ao valor de 124,86 mg O₂/L de efluente, que juntamente com a etapa de floculação e ajustes no tratamento preliminar da estação de tratamento de efluente atual, a empresa conseguirá atender os padrões de lançamentos exigidos pela legislação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. Brasília: 2011. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/GuiaNacionalDeColeta.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- ALVES, C. **Tratamento de águas de abastecimento**. 3. ed. Publindústria, 2010.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington (USA). 2012.
- ANDRADE, G. C. **Eficiência dos processos de flotação e filtração com uso de coagulante natural e químico no tratamento de efluente de laticínio**. Monografia (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015.
- ARANTES, M. K. **Produção de biohidrogênio em reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais com biomassa imobilizada (AnSBBR) a partir de água residuária de cervejaria**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação “Stricto Sensu” em Engenharia Química – Nível Doutorado, 2018.
- ARRUDA, C. S. C. et al. Pós-tratamento de efluente cervejeiro com coagulantes naturais. **InterfacEHS –Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 10, n. 1, 2015. Disponível em: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2015/06/130_InterfacEHS_ed-vol_10_n_1_2015.pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA - CERVBRASIL. **Anuário de 2014**. Disponível em: <<http://www.cervbrasil.org.br/novosite/anuarios/anuariofinal2014.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2019.
- _____. **Dados do setor cervejeiro nacional**. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/>. Acesso em: mar. 2019.
- BAMFORTH, C. **Vinhos versus cervejas**. São Paulo: SENAC. 2011.

BEM, C. C. et al. Características da matéria orgânica – Estudo comparativo de padrões de espectrometria de fluorescência e UV-Vis de rio e lago em bacias urbanizadas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p.135-147, 2013.

BORGO, C. C. et al. Tratamento de efluente originário do processo de lavagem do biodiesel e da etapa de brassagem da produção de cerveja artesanal utilizando semente de moringa oleífera. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. p. 497-503. São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineering/proceedings/cobecic2019/EAT55.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2019.

BORTOLI, D. A. D. S. et al. Leveduras e produção de cervejas - Revisão. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 3, n. 1, p. 45-58. 2013.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Decreto 24.643, de 10 de julho de 1934. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-24643-10-julho-1934-498122-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 9 mar. 2019.

_____. Governo do Brasil. **Brasil é o terceiro maior produtor mundial da bebida**. 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/08/brasil-e-o-terceiro-no-ranking-de-producao-mundial-de-cerveja/cerveja.jpg/view>>. Acesso em: 24 fev. 2019.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/vigilancia-agropecuaria/ivegetal/bebidas-arquivos/lei-no-12-305-de-02-de-agosto-de-2010.pdf/view>>. Acesso em: 30 jun. 2019.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

_____. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Resolução Consema nº 355, de 19 de julho de 2017. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201707/19110149-355-2017-criterios-e-padroes-de-emissao-de-efluentes-liquidados.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

BRUNELLI, L. T.; MANSANO, A. R.; FILHO, W. G. V. **Caracterização físico-química das cervejas elaboradas com mel**. Campinas - São Paulo, 2014.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. 3. ed., São Paulo: Elsevier, 2013.

CARVALHO, D. M.; ROSA, S. S. Aumento de consumo de cerveja artesanal importada. **Jornada Científica e Tecnológica da Fatec de Botucatu**. Botucatu - Rio de Janeiro, 2015.

CARVALHO, M. S. **Aplicação da *Moringa oleifera* na remoção de células de *Microcystis aeruginosa* e metabólitos por flotação por ar dissolvido e filtração rápida.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Curitiba, 2015.

CERVESIA. **Microcervejaria: processo.** 2017. Disponível em: <<https://www.cervesia.com.br/artigos-tecnicos/tecnicos/processo-produtivo-producao/mosto/1039-microcervejaria-processo.html>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

_____. **O Mercado cervejeiro brasileiro atual – potencial de crescimento.** 2011. Disponível em: <<https://www.cervesia.com.br/artigos-tecnicos/dados-estatisticos/581-o-mercado-cervejeiro-brasileiro-atual-%E2%80%93-potencial-de-crescimento.html>>. Acesso em: 9 mar. 2019.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos: planejamento, elaboração e apresentação.** 3. ed. Lajeado: Univates, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios.** 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

CHOI, H. **Parametric study of brewery wastewater effluent treatment using *Chlorella vulgaris* microalgae.** Departamento de Convergência de Energia e Meio Ambiente, Universidade Católica Kwandong, Coréia, 2016.

CLAAS, I. C.; MAIA, R. A. M. **Manual básico de resíduos industriais de curtume.** SENAI/RS, 1994.

CLEMENTINO, M. R. A.; NETO, P. J. R.; ALENCAR, J. R. B. Carbono orgânico total: metodologia analítica e aplicações para indústria farmacêutica. **Revista Brasileira de Farmácia**, v. 89, n.1, p. 74-80, 2008.

COLARES, C. J. G.; SANDRI, D. Eficiência do tratamento de esgotos com tanques sépticos seguidos de leitos cultivados com diferentes meios de suporte. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 8, n.1, 2013.

DATAMARK. **Petrópolis toma mercado da brasil kirin no nordeste.** 2015. Disponível em: <<https://www.datamark.com.br/noticias/2015/12/petropolis-toma-mercado-da-brasilkirin-no-nordeste-186003/>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

DUARTE, L. G. R. **Avaliação do emprego do café torrado como aromatizante na produção de cervejas.** Dissertação (Mestrado) - Curso em Ciências Microbiológicas aplicadas, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Adequação da metodologia Kjeldahl para determinação de nitrogênio total e proteína bruta.** 2006. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/pantanal/busca-de-publicacoes/-/publicacao/812198/adequacao-da-metodologia-kjeldahl-para-determinacao-de-nitrogenio-total-e-proteina-bruta>>. Acesso em: 02 maio 2019.

FARRUGIA, B. Sistemas biológicos para tratamento de efluentes. **Revista TAE**, 2012. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/3671-noticias>>. Acesso em: 01 out. 2019.

FERREIRA, A. C. et al. Simbolismo e construção da identidade por meio do consumo de cerveja artesanal. **Revista de Negócios**, v. 23, n. 3, p. 19-35, 2018.

FILHO, J. A. S. et al. Tratamento de efluentes da indústria de bebidas em reator anaeróbio de circulação interna (IC). **Revista Internacional de Ciências**, v. 3, n.1, 2013.

FOGAÇA, F. C. **Estudo da eficiência da eletrocoagulação aplicada a afluentes da produção de bebidas não alcoólicas e não gaseificadas**. Dissertação (Mestrado) - Curso em Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Química. Vitória - Espírito Santo, 2016.

GEREMIAS, C. **Dimensionamento de uma microestação de tratamento de efluentes de uma microcervejaria**. 2017. Relatório Técnico/Científico (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Apostila da ABES**. Mato Grosso, 2004.

GIORGI, V. V.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, J. O. C. A produção cervejeira como patrimônio inatingível. Universidade Federal de Alfenas. **Cultura Histórica & Patrimônio**, Minas Gerais, v. 3, n. 2. 2016.

GOLUB, N. B.; SHCHURSKAYA, E. A.; TROTSENKO, M. V. Anaerobic treatment of brewery wastewater with simultaneous hydrogen production. **Journal of Water Chemistry and Technology**, v. 36, n. 2, p. 90–96, 2014.

GOMES, A. G. Filtros biológicos percoladores. **Revista TAE**, 2013. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/6109-noticias>>. Acesso em: 03 nov. 2019.

HAMPSON, T. **O grande livro da cerveja** - Informações atualizadas sobre cervejas e as grandes cervejarias em todo o mundo. São Paulo: Publifolha, 2014.

JAIYEOLA, A. T.; BWAPWA, J. K. Treatment technology for brewery wastewater in a water-scarce country: A review. **South African Journal of Science**, v. 112, n. 3-4, 2016.

JERÔNIMO, C. E. M. et al. Estudo comparativo entre técnicas de determinação da matéria orgânica em efluentes industriais de composição carbonácea. **HOLOS – Instituto Federal do Rio Grande do Norte**, ano 28, v. 2, 2012.

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

KLEBAN, J.; NICKERSON, I. To brew, or not to brew – That is the question: an analysis of competitive forces in the craft brew industry. **Journal of the International Academy for Case Studies**, v. 18, n. 3, p. 59-81, 2012.

KUNZE, W. **Tecnología para cerveceros y malteros**. Alemanha: VLB Berlin, 2006.

LEGNER, Carla. Sistemas de flotação para ar dissolvido. **Revista TAE**, 2015. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/8782-noticias>>. Acesso em: 02 set. 2019.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LIMA, R. R. et al. Granulometria de areias de filtros industriais para o tratamento de água de processo. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Florianópolis, 2014.

MARCON, A. L. S. **Eficiência no tratamento e controle de efluentes de uma indústria de bebidas**. Monografia (Especialização) - Curso em Gestão e Perícia Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, 2018. Disponível em: <http://bdm.ufmt.br/bitstream/1/1120/1/TCCP_2018_Andr%C3%A9%20Lu%C3%ADs%20Sagiorato%20Marcon.pdf> Acesso em: 05 out. 2019.

MATSUBARA, A. K. et al. Desenvolvimento de cerveja artesanal de trigo adicionada de gengibre (*Zingiber Officinale* Roscoe). **Tópicos em ciências e tecnologia de alimentos**: resultados de pesquisas acadêmicas, São Paulo: Edgard Blücher. 2016.

MELO, R. **Erro na Lei pode aumentar o preço das cervejas de trigo**. 2015. Disponível em: <<http://muchabreja.com.br/erro-na-lei-pode-aumentar-o-preco-das-cervejas-de-trigo/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering**: Treatment and reuse. Boston: Mc Graw Hill, 5. ed. 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. ANUÁRIO DA CERVEJA NO BRASIL 2018: crescimento e inovação. 2019. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pasta-publicacoes-DIPOV/anuario-da-cerveja-no-brasil-2018>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 4. ed. Aracaju: J. Andrade, 2004.

OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, p. 1-21, 2012.

PAIXÃO FILHO, J. L. **Aplicação do lodo de lagoa facultativa em roseira**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2012.

PORTES, A. C. **Pré-tratamento de efluente de microcervejaria por adsorção empregando adsorventes alternativos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Setor de Meio Ambiente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

RAO, G. A. et al. pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: a case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 2131-2136, 2006.

REBELLO, F. D. F. P. Produção de cerveja. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 3, 2009.

RIBEIRO, D. B. **Determinação de condições ótimas do processo de coagulação/floculação para tratamento de efluente sintético de curtume.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Química. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2018.

ROCHA, C. M. et al. Alternativas para o tratamento de efluente de cervejaria utilizados lodos ativados e tratamento físico-químico. 14º CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. 2017a.

ROCHA, C. M. et al. Dimensionamento e comparação de estações de tratamento de efluentes utilizando lodos ativados e reator UASB para uma cervejaria artesanal. **Revista Processos Químicos**. Artigo Geral 9, 2017b.

ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A química da cerveja. **Revista Química Nova**, v. 37, n.2, p. 98-105, 2015.

SANTOS, S. P. **Os primórdios da cerveja no Brasil**. 2. ed. Cotia: Ateliê Editorial, 2004.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI. **Tecnologia cervejeira**. Instituto SENAI de Tecnologia em Alimentos e Bebidas. Rio de Janeiro: SENAI, 2014.

SILVA, H. A.; LEITE, M. A.; PAULA, A. R. V. **Cerveja e sociedade**. São Paulo: SENAC, 2016. v. 4, n. 2.

SILVA, L. D. et al. Eficiência da coagulação, floculação e decantação como tratamento primário de efluente têxtil. **Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia**, v. 5, n.1, p.36-40, 2019.

SILVESTRE, C. F. **Influência das condições operacionais em uma planta piloto de flotação por ar dissolvido (FAD) = Influence of operating conditions in a dissolved air flotation (daf) pilot plant**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331967>>. Acesso em: 07 set. 2019.

SIMATE, G. S. et al. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. **Desalination**, v. 273, p. 235-247, Elsevier: 2011.

SOUZA, R. L. **Cachaça, vinho e cerveja: da Colônia ao século XX**. Rio de Janeiro: Estudos Históricos, n. 33, p. 56-75. 2004.

SPLABOR. Equipamentos para laboratório. **Medidor de pH ou pHmetro – entenda o funcionamento**. 2017. Disponível em: <<http://www.splabor.com.br/blog/phmetro/entenda-o-funcionamento-de-um-phmetro/>>. Acesso em: 10 maio 2019.

TEIXEIRA, T. M. N.; BRANDÃO, C. C. S. Avaliação da filtração lenta como tratamento de águas com baixa turbidez e presença de algas e cianobactérias: aplicação à água do Lago Paranoá/DF. XIV ENEEAMB, II FÓRUM LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE, E I SBEA – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL CENTRO-OESTE, Brasília, 2016.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. **Eclética Química**. São Paulo, 1997, v. 22.

VENTURINI FILHO, W. G. **Bebidas alcoólicas: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, v. 1. 2010.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Minas Gerais: Editora UFMG, 2017.

_____. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – lodos Ativados**. 2. ed. Minas Gerais: Editora UFMG, 2005.

ANEXO

ANEXO A - Memorial de cálculo do dimensionamento preliminar do sistema de lodos ativados

1. Parâmetros de projeto

Os parâmetros do projeto são apresentados na Tabela 01, sendo que para a realização do dimensionamento do sistema, alguns valores foram adotados conforme recomendados pela literatura. Frisa-se que para todos os cálculos de dimensionamento foram utilizados os valores médios dos parâmetros resultantes das amostragens executadas nos três pontos de coletas da estação de tratamento de efluentes do empreendimento no qual foi realizado o presente estudo. Levou-se em consideração que o sistema atual não está adequado ao tipo de efluente e demanda da fábrica, apresentando valores oscilantes, sendo usado para cálculos valores representativos, com comportamentos amplos do efluente em termos analíticos.

Tabela 01 - Parâmetros de projeto

Parâmetro	Valor	Unidade	Referência
Coefficiente de Produção Celular (Y)	0,60	gSSV/gDBO ₅	
Idade do Lodo (θ _c)	20,00	Dia	
DBO ₅ Solúvel Efluente (S)	4,00	mg/L	
Concentração de Sólidos Suspensos Voláteis (SSTA) (X _v)	3500,00	mg/L	
Fração Biod. dos Sólidos Suspensos Voláteis (SSVTA) (F _b)	0,61	kgSSb/kgSSV	
Coefficiente de Respiração Endógena (K _d)	0,08	d ⁻¹	
Razão de Recirculação de Lodo (Q _r /Q)	0,90	-	
Concentração Média de Oxigênio Dissolvido no Reator	2,00	mg/L	Von Sperling, 2005
Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH) para Q _{méd}	0,33	m ³ /m ² .h	
Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH) para Q _{máx}	1,00	m ³ /m ² .h	
Taxa de Aplicação dos Sólidos (TAS) para Q _{méd}	3,00	kg/m ² .h	
Taxa de Aplicação dos Sólidos (TAS) para Q _{máx}	6,00	kg/m ² .h	
Altura do Decantador (H)	3,00	M	
Relação SSV/SS no Efluente Bruto	0,80	gSSV/gSS	
Relação SSb/SS no Efluente Bruto	0,80	gSSb/gSS	
Relação SSV/SS ao Gerar Sólidos	0,90	gSSV/gSS	
Densidade de Potência (DP)	40,00	W/m ³	Claas & Maia, 1994
Vazão de Afluente	13,00	m ³ /d	Indústria
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	2497,22	mg/L	Experimental
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	3994,05	mg/L	Experimental
Fósforo Total	13,72	mg/L	Experimental
Nitrogênio Total Kjeldahl	27,24	mg/L	Experimental

Fonte: Da autora (2019).

2. Fator de biodegradabilidade

Visando verificar se o efluente possui capacidade de se degradar biologicamente para então assim se dimensionar um tratamento biológico, foi calculado o fator de biodegradabilidade do efluente, conforme Equação 3:

$$fb = \frac{DBO_5}{0,65 \times DQO}$$

$$fb = \frac{2497,22}{0,65 \times 3994,05}$$

$$fb = 0,96$$

De acordo com Claas e Maia (1994), valores de biodegradabilidade superiores a 0,9 correspondem a uma ótima condição de biodegradabilidade, sendo, portanto, viável a instalação de um tratamento biológico como o sistema de lodos ativados.

3. Sistema de lodos ativados – Reator aeróbio

3.1. Volume do reator

Inicialmente, para calcular o volume requerido para o reator aeróbio, deve-se calcular a carga de DBO_5 removida na etapa biológica (S_r), para isso, fez-se o uso de dados recomendados pela literatura, juntamente com o valor de vazão de efluente da indústria, conforme Equação 4:

$$S_r = Q \times (S_o - S)/1000$$

$$S_r = 13 \text{ m}^3/d \times (2497,22 \text{ mg/L} - 4 \text{ mg/L})/1000$$

$$S_r = 32,41 \text{ kg } DBO_5/d$$

O volume do reator foi calculado considerando valores de parâmetros recomendados na literatura, juntamente com o valor de DBO_5 , que foi obtido de maneira experimental através do efluente analisado da indústria, conforme Equação 5:

$$V = \frac{Y \times \theta_c \times S_r \times 1000}{X_v \times (1 + f_b \times K_d \times \theta_c)}$$

$$V = \frac{0,6 \text{ gSSV/gDBO}_5 \times 20 \text{ d} \times 32,41 \text{ kgDBO}_5/\text{d} \times 1000}{3500 \text{ gSSV/m}^3 \times (1 + 0,61 \times 0,08 \text{ d}^{-1} \times 20 \text{ d})}$$

$$V = 56,23 \text{ m}^3$$

3.2. Tempo de retenção hidráulico

Com o valor do volume requerido para o reator aeróbio, consegue-se a partir da Equação 6 calcular o tempo de retenção hidráulico, tendo base de cálculo o volume do reator e a vazão afluente do empreendimento.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

$$TRH = \frac{56,23 \text{ m}^3}{13 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$TRH = 4,32 \text{ dias}$$

3.3. Relação alimento/microrganismo

A relação alimento/microrganismo é calculada por meio da Equação 7, sendo possível saber a quantidade de alimento disponível por unidade de massa de microrganismos.

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \times S_o}{V \times X_v}$$

$$\frac{A}{M} = \frac{13 \text{ m}^3/\text{d} \times 2,49 \text{ kg/m}^3}{56,23 \text{ m}^3 \times 3,5 \text{ kgSSV/m}^3}$$

$$\frac{A}{M} = 0,16 \text{ kgDBO}_5/\text{kgSSV} \cdot \text{d}$$

3.4. Remoção de lodo excedente

Conforme idade do lodo adotada em 20 dias para um sistema de lodos ativados com aeração prolongada, foi admitido que a cada dia seriam descartados $\frac{1}{20}$ do volume do reator aeróbio. Foi empregada a Equação 8 para determinar a vazão de lodo excedente a ser descartado, tendo em vista que a cada 20 dias a biomassa seria removida, mantendo a idade do lodo prevista.

$$Q_{exc} = \frac{V}{\theta_c}$$

$$Q_{exc} = \frac{56,23 \text{ m}^3}{20 \text{ d}}$$

$$Q_{exc} = 2,81 \text{ m}^3/\text{d}$$

Como o adensamento do lodo excedente é previsto para ocorrer em uma caixa a parte, esta deverá possuir volume de 3 m^3 , para que possa atender ao volume de lodo.

3.5. Sistema de aeração mecânica

O sistema de aeração será mecânico via aerador superficial, sendo através da Equação 9 obtido o valor da potência introduzida para aerar o sistema. Para fins de cálculo, a densidade da potência foi adotada com base em valor da literatura citado por Claas e Maia (1994).

$$DP = \frac{P}{V}$$

$$40 \text{ W/m}^3 = \frac{P}{56,23 \text{ m}^3}$$

$$P = 2249,20 \text{ W ou } 3,06 \text{ cv}$$

O valor encontrado para a potência introduzida foi convertido em unidade de cavalo-vapor (cv), sendo assim $P = 3,06 \text{ cv}$. Dessa forma, serão adotados dois aeradores com potências de 5 cv cada, onde um irá operar no sistema e haverá o

segundo de reserva caso ocorra algum problema com o primeiro aerador, visando manter o sistema em constante aeração, minimizando falhas operacionais.

3.6. Requisitos de nutrientes

Com o intuito de saber se os efluentes analisados apresentam a demanda de nutrientes que os microrganismos necessitam para realizar suas atividades metabólicas, foi feita uma correlação embasada em dados recomendados pela literatura dos nutrientes necessários de acordo com a carga de DBO₅, conforme Quadro 3.9 de Von Sperling (2005), relacionando com os valores obtidos através de análises.

Por meio da Tabela 02, é possível a visualização dos nutrientes necessários para a carga de DBO₅ existente no efluente da indústria, comparando com os valores de nutrientes obtidos por meio das análises, e assim, observando a necessidade de adição ou remoção de nitrogênio e fósforo.

Tabela 02 - Requisitos de nutrientes com base nos valores de referência, valores obtidos e valores a serem corrigidos (N e P)

Parâmetros	Dados de referência	Dados obtidos	Demanda necessária	Valor de adição de nutrientes
DBO ₅ (mg/L)	100	2497,22	-	-
Nitrogênio (mg/L)	2,9	27,24	72,42	45,18
Fósforo (mg/L)	0,55	13,72	13,73	0,01

Fonte: Da autora (2019).

Em relação ao fósforo, percebe-se que a quantidade necessária para a carga de DBO₅ existente está próxima ao valor obtido através das análises do efluente, não havendo necessidade de adição e nem remoção desse nutriente. Já para o nitrogênio, há uma diferença expressiva no valor obtido através de análises do efluente em relação a demanda que seria necessária para carga orgânica existente de DBO₅. Dessa forma, o valor de nitrogênio que deve ser adicionado por dia para atender a demanda requerida pelos microrganismos pode ser obtido através da razão com a vazão de efluente da indústria, como mostrado a seguir:

$$\text{Dosagem nitrogênio} = Q \times XNT$$

Onde:

$$Q = \text{vazão do afluente (m}^3/\text{d)}$$

$$XNT = \text{quantidade de nitrogênio a ser adicionada (kg/m}^3\text{)}$$

Sendo assim:

$$\text{Dosagem nitrogênio} = 13 \text{ m}^3/\text{d} \times 0,04518 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Dosagem nitrogênio} = 0,58 \text{ kgNT/d}$$

A dosagem de nitrogênio que necessita ser adicionada ao sistema por dia será de 0,58 kg. Porém como haverá conversão bioquímica de sólidos presentes no efluente bruto, recomenda-se monitorar as concentrações de nutrientes após o decantador secundário, que irá conter o efluente tratado, para então definir se haverá necessidade de dosagem de nutrientes (METCALF; EDDY, 2013; VON SPERLING, 2005; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

4. Dimensionamento do decantador secundário

Para dar início ao dimensionamento do decantador secundário que será a etapa posterior ao reator aeróbio, foram admitidas as vazões média (0,54 m³/h) e máxima de efluente. A vazão máxima de efluente por hora foi calculada conforme Equação 10, admitindo fator de pico de 1,5, tendo em vista que o decantador possa atender vazões acima das normalmente recebidas, sem afetar a efetividade da etapa.

$$Q_{m\acute{a}x} = Q \times K$$

$$Q_{m\acute{a}x} = 0,54 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,5$$

$$Q_{m\acute{a}x} = 0,81 \text{ m}^3/\text{h}$$

Calculou-se também, a partir da Equação 11, a vazão de reciclo do lodo do decantador para o reator aeróbio, garantindo a idade do lodo prevista em projeto.

$$Q_r = R \times Q$$

$$Q_r = 0,9 \times 0,54 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_r = 0,49 \text{ m}^3/\text{h}$$

Conhecendo as vazões média, máxima e de recirculação de lodo, é possível por meio das Equações 12 e 13, calcular as áreas superficiais do decantador, tendo embasamento nas taxas de aplicação hidráulica.

Para $Q_{\text{méd}}$:

$$A = \frac{Q}{TAH}$$

$$A = \frac{0,54 \text{ m}^3/\text{h}}{0,33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$A = 1,64 \text{ m}^2$$

Para $Q_{\text{máx}}$:

$$A = \frac{Q_{\text{máx}}}{TAH}$$

$$A = \frac{0,81 \text{ m}^3/\text{h}}{1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$A = 0,81 \text{ m}^2$$

Para os cálculos das áreas superficiais com base nas taxas de aplicação de sólidos, precisa-se ter conhecimento da concentração de sólidos suspensos totais no reator (SSTA), sendo essa concentração obtida por meio da Equação 14.

$$SSTA = \frac{SSVTA}{\text{Relação}_{SSV/SS}}$$

$$SSTA = \frac{3500 \text{ g/m}^3}{0,9}$$

$$SSTA = 3888,88 \text{ g/m}^3$$

Sabendo a concentração de sólidos suspensos no reator, calcula-se as áreas superficiais baseadas nas taxas de aplicação de sólidos, de acordo com as Equações 15 e 16.

Para $Q_{\text{méd}}$:

$$A = \frac{(Q+Q_r) \times X}{1000 \times T \Delta S}$$

$$A = \frac{(0,54 \text{ m}^3/\text{h} + 0,49 \text{ m}^3/\text{h}) \times 3888,88 \text{ g/m}^3}{1000 \times 3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$A = 1,33 \text{ m}^2$$

Para $Q_{\text{máx}}$:

$$A = \frac{(Q_{\text{máx}}+Q_r) \times X}{1000 \times T \Delta S}$$

$$A = \frac{(0,81 \text{ m}^3/\text{h} + 0,49 \text{ m}^3/\text{h}) \times 3888,88 \text{ g/m}^3}{1000 \times 6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$A = 0,84 \text{ m}^2$$

Conforme citado por Von Sperling (2005), a área a ser adotada para o decantador secundário será o maior valor obtido através dos cálculos das áreas superficiais, sendo assim, $A = 1,64 \text{ m}^2$. Com o valor de área do decantador, consegue-se encontrar o diâmetro por meio da Equação 17.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 1,64 \text{ m}^2}{3,14}}$$

$$D = 1,44 \text{ m}$$

Conforme Quadro 7.6 de Von Sperling (2005), determinou-se o valor da altura do decantador de acordo com o diâmetro calculado, sendo $H = 3 \text{ m}$. Com os valores de diâmetro e altura, calcula-se o volume do decantador, conforme Equação 18:

$$V = A \times H$$

$$V = 1,64 \text{ m}^2 \times 3 \text{ m}$$

$$V = 4,92 \text{ m}^3$$

Por fim, através das Equações 19 e 20 são calculados os tempos de detenção hidráulica, sendo consideradas as vazões média, máxima e de recirculação.

Para $Q_{\text{méd}}$ com recirculação:

$$t = \frac{V}{(Q+Q_r)}$$

$$t = \frac{4,92 \text{ m}^3}{(0,54 \text{ m}^3/\text{h} + 0,49 \text{ m}^3/\text{h})}$$

$$t = 4,77 \text{ h}$$

Para $Q_{\text{máx}}$ com recirculação:

$$t = \frac{V}{(Q_{\text{máx}}+Q_r)}$$

$$t = \frac{4,92 \text{ m}^3}{(0,81 \text{ m}^3/\text{h} + 0,49 \text{ m}^3/\text{h})}$$

$$t = 3,78 \text{ h}$$



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09