

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS LONDRINA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

JOHVANNY LOURENÇO MENDONÇA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE *WETLANDS* CONSTRUÍDO
DE FLUXO VERTICAL PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE
CERVEJARIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA
2020**

JOHVANNY LOURENÇO MENDONÇA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE *WETLANDS* CONSTRUÍDO
DE FLUXO VERTICAL PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE
CERVEJARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Orlando de Carvalho Júnior

LONDRINA

2020



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEP. ACADEMICO DE AMBIENTAL-LD

TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE WETLANDS CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CERVEJARIA

Por

JOHVANNY LOURENÇO MENDONÇA

Monografia apresentada às 15 horas e 30 min. do dia 30 de Novembro de 2020 como requisito parcial, para conclusão do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Ajadir Fazolo	Membro
Ricardo Nagamine Costanzi	Membro
Orlando de Carvalho Junior	Orientador
Orlando de Carvalho Junior	Professor(a) responsável TCCII

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Selma e João, por me ensinarem a batalhar dia após dia na conquista dos meus sonhos. À minha mãe, mulher da minha vida, agradeço imensamente por ter me abençoado com o seu amor e carinho em todas as horas. Agradeço por ser minha heroína e meu exemplo. A meu pai, homem que admiro muito, agradeço por me ensinar que a vida pode ser dura, mas não há nada que o trabalho duro não conquiste. Obrigado por me ensinar a ser forte, independente do desafio.

Agradeço ao Prof. Dr. Orlando de Carvalho Júnior e também a Prof. Dr^a. Joseane Debora Peruço Theodoro, pela orientação deste Trabalho de Conclusão de Curso. Por toda a paciência, colaboração, aprendizados e acima de tudo pela amizade que cultivamos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao corpo docente do Câmpus Londrina, em especial para os professores do Departamento de Engenharia Ambiental, que me auxiliaram em todo o processo de me tornar um profissional. Às queridas professoras Alessandra Furtado, Tatiane Cristina Dal Bosco, Sueli Tavares e Ligia Batista pelo carinho e por todo trabalho desenvolvidos juntos.

À minha irmã, Jaqueline, mulher que tanto admiro e amo, por todos os momentos que me incentivou a me tornar um ser humano melhor. Ao meu irmão, Johnny, por quem tenho grande carinho. À minha sobrinha, Jully, que vivenciou a experiência de uma graduação junto comigo e que muitas vezes estudou ao meu lado.

Aos meus amigos que fiz nessa jornada e que me ajudaram a me tornar a pessoa que sou hoje: Gabriella Braganceiro, Gustavo Ferro, Thiago Mosreschi, Janaina Casado, Maria Christina Andrade, Pedro Miguez, Letícia Lopes, Isabele Brito, Vinícius Alexandre, Arlete Alves, Gabriel Lourenço e muitos outros. Agradeço imensamente pelos inúmeros áudios de desabafos, noites viradas estudando juntos, sorrisos e abraços que me confortaram durante muitos momentos difíceis.

À minha família Londrinense: Flávia Pedrozo, Regiane Garcia, Aline Marinhos e Jérémy Scié. A nossa casa sempre foi um refúgio, onde sempre me senti seguro. Muito obrigado pelos jantares, festas e alegrias que vivemos juntos.

Às minhas amigas de anos e anos: Mariana Altvater, Náthaly Martins e Bianca Rebello. Sinto muitas saudades dos dias que passamos juntos, mas sei que posso contar com vocês por toda a minha vida. Agradeço por me fazerem sentir abraçado, mesmo que a distância.

À Eric Yudi Harada, meu companheiro para todas as horas, que esteve do meu lado desde o começo ouvindo meus desabafos e comemorando as minhas conquistas junto comigo. Com você todos os dias difíceis se tornaram mais fáceis e todos os dias felizes faziam mais sentido. Sou muito grato pelo seu companheirismo, carinho e paciência. Você me ensinou a enfrentar todos os meus problemas sem temer. Obrigado por tudo, sempre!

Por fim agradeço a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente me auxiliaram a vencer a barreira que se criou para a conclusão deste trabalho devido a pandemia de COVID-19, foram enormes os desafios e os problemas porém com o apoio dos meus grandes amigos o sonho de me tornar um Engenheiro pôde se realizar. Muito obrigado.

MENDONÇA, J. L. **Dimensionamento de um sistema de Wetlands Construído de fluxo vertical para pós-tratamento de efluente de cervejaria.** 2020. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). – Curso de Engenharia ambiental – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2020.

RESUMO

Wetlands Construídos são uma inovadora e promissora tecnologia para tratamento e pós-tratamento de efluentes industriais, devido a sua fácil operação e baixíssima periodicidade de manutenção. O presente trabalho apresenta o projeto de dimensionamento de um sistema *Wetlands* Construído de Fluxo Vertical (WCFV) plantado com *Heliconia Rostrata*, para pós-tratamento de efluente industrial proveniente de uma cervejaria. Utilizou-se uma base de dados sobre o efluente de cervejaria contendo: vazão média, DQO, DBO_{5,20} e NTK para a definição dos critérios de dimensionamento. Os critérios de projeto utilizados foram: taxa de aplicação superficial, carga orgânica limite e balanço de massa para oxigênio dissolvido. O projeto final resultou em uma Área superficial de 5.00,00 m² e memorial de cálculo com dimensionamento de reservatório, dimensionamento de sistema de alimentação e bombeamento e sistema de drenagem. O Substrato Filtrante do sistema é composto por areia (0,25 mm < D₁₀ < 0,40 mm) na camada mais superficial, brita nº0 (3,00 < D₁₀ < 10,00 mm) para a camada intermediária e brita nº2 (20,00 mm < D₁₀ < 40,00 mm) para a camada mais profunda. Foram sugeridos critérios de operação e manutenção para alcançar uma eficiência teórica de 80% de remoção de MO e 56,4% de remoção média de Nitrogênio Total. Por fim, concluiu-se que o sistema projetado, se devidamente executado, pode atender as especificidades dos padrões de lançamento de efluentes das legislações vigentes do Brasil e do Estado do Paraná.

Palavras chave: Efluente de Cervejaria; Dimensionamento; *Heliconia Rostrata*; *Wetlands* Construídos.

MENDONÇA, J. L. **Design of a vertical flow constructed wetland system for post-treatment of brewery effluent.** 2020. 60 p. Course Conclusion Paper (Bachelor of Environmental Engineering). - Environmental Engineering Course - Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2020.

ABSTRACT

Constructed Wetlands are an innovative and promising technology for the treatment and after-treatment of industrial effluents, due to their easy operation and very low maintenance periodicity. The present work presents the dimensioning project of a Vertical Flow Constructed Wetlands system planted with *Heliconia Rostrata*, for post-treatment of industrial effluent from a brewery. A database was used on the brewery effluent containing: average flow, Chemical Oxygen Demand, Biochemical oxygen demand and Total Nitrogen Kjeldahl to define the design criteria. The design criteria used were: Surface Application Rate, Organic Limit Load and Mass Balance for Dissolved Oxygen. The final project resulted in a surface area of 5.00.00 m² and calculation memorial with dimensioning of reservoir, dimensioning of the feeding and pumping system and drainage system. The filtering substrate of the system is composed of sand (0.25 mm < D10 < 0.40 mm) in the most superficial layer, gravel n°0 (3.00 < D10 < 10.00 mm) for the intermediate layer and gravel n°2 (20 , 00 mm < D10 < 40.00 mm) for the deepest layer. Operation and maintenance criteria have been suggested to achieve a theoretical efficiency of 80% MO removal and 56.4% average removal of Total Nitrogen. Finally, it was concluded that the designed system, if properly executed, can meet the specificities of the effluent release standards of the current legislation in Brazil and the State of Parana.

Keywords: Brewery Effluent; Dimensioning; *Heliconia Rostrata*; Constructed Wetlands.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo conceitual de um Wetland com raízes de papiro que faz fronteira com um lago, as linhas indicam os limites do modelo.....	15
Figura 2 - Esquema de classificação de Wetlands Construídos.....	17
Figura 3 - Esquema de sentido de fluxo em WC de fluxo vertical descendente.....	19
Figura 4 – Fotografia de Heliconia Rostrata	24
Figura 5 – Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes atual.....	31
Figura 6 - Dimensões do reservatório	40
Figura 7 - Sistema Hidráulico de alimentação do WCFV	41
Figura 8 - Exemplificação de sistema hidráulico de alimentação	42
Figura 9 - Interface do sistema KSB EasySelect® versão 14.6	43
Figura 10 - Bomba KWP-Bloc.....	44
Figura 11 - Dano causado por cavitação a sistemas de bombeamento.....	45
Figura 12 - Esquema representativo dos substratos utilizados para o sistema de WCFV.....	47
Figura 13 – Esquema da variação de altura do início e fim do WCFV	48
Figura 14 - Esquema do sistema de drenagem	49
Figura 15 - Vista superior ao sistema WCFV	49
Figura 16 -Vista lateral do sistema de WCFV.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração de DBO, DQO e NTK em efluentes de cervejarias.....	25
Tabela 2 - Medidas de Vazão do Afluente ao sistema de Pós-tratamento.....	32
Tabela 3 - Análise estatística das medidas de vazão.....	33
Tabela 4 - Dados do efluente de cervejaria.....	33
Tabela 5 - Comprimento virtual do sistema hidráulico.....	41
Tabela 6 - Resumo de legislações atendidas.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MO	Matéria Orgânica
WC	<i>Wetlands</i> Construídos
WCFV	<i>Wetlands</i> Construído de Fluxo Vertical
NH₄⁺	Nitrogênio Amoniacal
PO₄⁻	Ortofosfato
CaCO₃	Carbonato de Cálcio
pH	Potencial Hidrogeniônico
NO₃⁻	Nitrato
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
NH_x	Nitrogênio Total Amoniacal
C/N	Relação Carbono - Nitrogênio
NO₂⁻	Nitrito
PR	Paraná
OD	Oxigênio Dissolvido
Q	Vazão
A_s	Área Superficial Sugerida
TH	Taxa de Aplicação Superficial
A	Área Superficial
C	Concentração
DOD	Demanda de Oxigênio Dissolvido
Conv	Convecção
Dif	Difusão
VT_r	Volume Total
VU_r	Volume Útil
P	Potência
Q_b	Vazão de Bombeamento
H_{ms}	Altura Manométrica de Sucção
H_{mr}	Altura Manométrica de Recalque
Q_a	Vazão de Aplicação
d	Diâmetro Interno
J	Perda de Carga
PVC	Policloreto de Vinila
η	Eficiência da Bomba

rpm	Rotações por Minuto
NPSH_d	<i>Net Positive Suction Head</i> disponível
NPSH_r	<i>Net Positive Suction Head</i> requerido
H_r	Perda de Carga na Sucção
H_a	Pressão Atmosférica Local
H_z	Distância Vertical da Superfície do Líquido
H_{vp}	Pressão de Vapor da Água
mca	Metros de Coluna de Água
k	Coefficiente de Permeabilidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
UASB	<i>Up flow Anaerobic Sludge Blanket</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1. <i>WETLANDS</i> NATURAIS.....	15
3.2. <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	16
3.2.1 <i>Classificação dos Wetlands Construídos</i>	17
3.3. <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DESCENDENTE	18
3.4. COMPONENTES DOS SISTEMAS <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	19
3.4.1 <i>Meio Suporte Filtrante</i>	19
3.4.3 <i>Sistemas de Plantas</i>	22
3.4.4 <i>Microrganismos</i>	24
3.5. POLUENTES NO EFLUENTE DE CERVEJARIAS E SUA ASSIMILAÇÃO POR SISTEMAS DE WC.....	25
3.5.1 <i>Nitrogênio</i>	26
3.5.2 <i>Fósforo</i>	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE CERVEJARIA.....	31
4.1.1 <i>Vazão Afluente ao Sistema de Pós-Tratamento</i>	31
4.1.2 <i>Dados de Entrada</i>	33
4.2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	34
4.2.1 <i>Determinação de Área Superficial</i>	34
4.2.2 <i>Balanco de Oxigênio</i>	36

5. RESULTADOS E DICUSSÃO	39
5.1 RESERVATÓRIO DE ARMAZENAMENTO E SISTEMA DE BOMBEAMENTO	39
5.2 SISTEMA WCFV	46
5.3 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	51
5.4 REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA, NITROGÊNIO E FÓSFORO.....	53
6. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

Um dos impactos negativos causados pelo lançamento de efluentes industriais sem o devido tratamento é a poluição dos recursos hídricos, devido a altas cargas de poluentes orgânicos e inorgânicos (VON SPERLING, 2005).

Com o aumento da população mundial e do consumo de produtos industrializados torna-se extremamente necessário o tratamento adequado de águas residuárias, porém ao mesmo tempo cresce também o desafio de alcançar os padrões de lançamento de efluentes exigidos pelas Resoluções CONAMA 357/05 e CONAMA 430/11 (BRASIL, 2005, 2011).

Existem inúmeros tipos de tecnologias de tratamento de efluentes, variando de soluções físicas ou mecânicas, químicas e biológicas, alguns exemplos são lagoas de tratamento, tanques de sedimentação, coagulação e reatores biológicos. Em todo o Brasil encontram-se instalados sistemas de tratamentos combinados, que somam mais de um tipo de tratamento em série, com o objetivo de se aproximar dos padrões de lançamentos de efluentes determinados pela Resolução CONAMA 430 e também de legislações regionais como a Portaria IAP nº266 de 2013 e Resolução CEMA 070 de 2009. Contudo, em muitos casos ainda não se obtém um resultado satisfatório e mostra-se necessário um pós-tratamento do efluente.

Atualmente muito se tem pesquisado sobre tecnologias capazes de eliminar, ou pelo menos reduzir, os impactos negativos causados pelo lançamento de efluentes industriais nos ecossistemas aquáticos. A chave do problema é encontrar soluções viáveis no âmbito econômico, praticidade na operação e fácil manutenção (JUNIOR, 2013; MASI et al., 2000). O efluente industrial gerado em plantas de Cervejarias possui grandes concentrações de poluentes, portanto, necessita de um tratamento efetivo a fim de proteger os recursos hídricos.

Os *Wetlands* Construídos (WC) são uma tecnologia simples, porém muito eficiente no tratamento de esgotos sanitários, águas residuais e pós tratamento de efluentes industriais. São definidos como um filtro natural composto de microrganismos, meio filtrante ou substrato e zona de raízes de macrófitas (DUPOLDT et al., [s.d.]; HARTY, 2017; SUTHERSAN, 2001; U.S. EPA, 2000).

Os primeiros registros de usos de WCs no tratamento de esgotos sanitários datam de 1970 na Europa. Desde então os mesmos vem sendo amplamente utilizados em todo o mundo mostrando-se muito eficientes, inclusive no pós-tratamento de efluentes industriais e no tratamento de águas cinzas, principalmente em regiões tropicais (DUPOLDT et al., [s.d.]; SEZERINO et al., 2018). Contudo ressalta-se a necessidade de contínuos estudos para o aprimoramento das condições de operacionalidade desses sistemas visando sempre a melhor eficiência de remoção de poluentes.

Sendo assim este trabalho propõe o dimensionamento de um sistema de *Wetlands* Construído de Fluxo Vertical (WCFV) para o pós-tratamento de efluente proveniente de cervejarias visando lançamento dentro dos padrões das legislações vigentes.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo principal dimensionar uma Estação para Pós-Tratamento do Efluente de uma cervejaria empregando a biotecnologia *Wetlands* construído de fluxo vertical

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Propor a biotecnologia de *Wetlands* Construídos de fluxo Vertical como alternativa viável para pós-tratamento de efluente industrial proveniente de cervejarias.
- b) Diminuir impactos nos recursos hídricos provenientes do lançamento de efluentes de cervejarias que possuem ETEs (Estações de Tratamento de Efluentes) que não atendam ao padrão ambiental

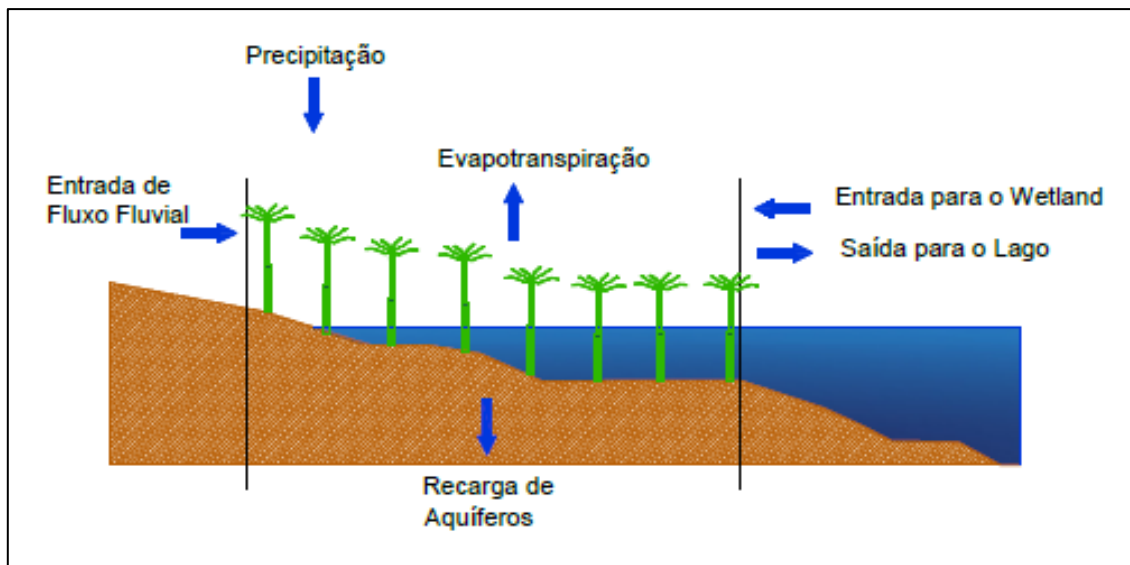
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. WETLANDS NATURAIS

Os *Wetlands* naturais são ambientes caracterizados pela transição entre um ecossistema aquático e um ecossistema terrestre, podendo ser alagadas por curtos períodos ou constantemente. *Wetlands* são popularmente conhecidos como brejos, pântanos ou charco, mas podem ser definidos como zonas de amortecimento de impactos. As principais funções de *Wetlands* naturais são a regulação de águas de inundação, proteção contra a alta erosão de solos costeiros ou solos de margens de rios, lagoas e lagos além do melhoramento das características físico químicas das águas (MONTEIRO, 2009).

A Figura 1 ilustra como funciona a dinâmica de sistemas de *Wetlands* naturais, seus componentes e o ciclo das águas dentro do sistema.

Figura 1 - Modelo conceitual de um Wetland com raízes de papiro que faz fronteira com um lago, as linhas indicam os limites do modelo



Fonte: Adaptado de HES e VAN DAM (2019).

Muito se tem discutido sobre a diferença entre *Wetlands* naturais e *Wetlands* Construídos, contudo pode-se resumir esta diferença na possibilidade de controle de variáveis como porcentagem de saturação do sistema, concentração de oxigênio dissolvido, tempo de detenção hidráulica e também afluente bem determinados nos sistemas de *Wetlands* Construídos (MBURU et al., 2015; SEZERINO et al., 2018; U.S. EPA, 2000).

3.2. WETLANDS CONSTRUÍDOS

Wetlands Construídos (WC) são filtros, alagados ou não, compostos por uma zona de raízes que tem por função a remoção de matéria orgânica e de nutrientes além de compostos tóxicos como metais pesados por exemplo. Essas estruturas simulam um ecossistema natural de pântanos, criando um ambiente propício ao tratamento secundário e otimizando a ciclagem de nutrientes presentes nos esgotos domésticos e efluentes industriais (SEZERINO et al., 2018).

Os sistemas WC tem-se mostrado eficientes em efluentes e águas residuárias distintas devido ao seu grande potencial de adaptação podendo ser utilizados no tratamento de esgotos sanitários, efluentes industriais, águas cinzas e águas provenientes de escoamento superficial (DUPOLDT et al., [s.d.]; SEZERINO et al., 2018; SILVA, 2007).

No substrato dos WC ocorre a filtração de sólidos suspensos pela zona de raízes que reduz a velocidade e distribui o escoamento do efluente. Segundo Koottatep (2001) as plantas presentes nos WC podem ser plantas vasculares aquáticas e algas de tecido facilmente visível.

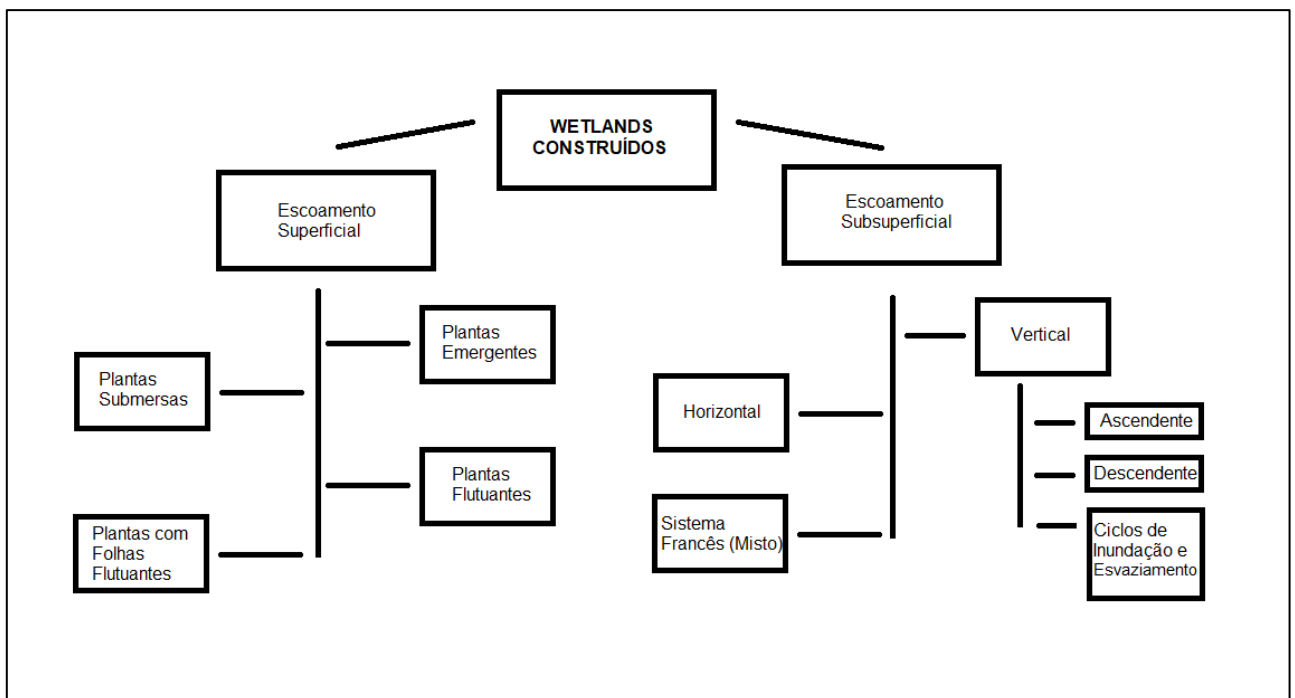
As aplicações de WC datam de muito tempo, sendo em 1952 a concepção do primeiro sistema construído pelo Instituto Max Planck (*Max Planck Institute*) na Alemanha na cidade de *Pion* como cita Silva et al.(2007. pg. 6) segundo Masi (2004). Desde então o uso destes sistemas tem crescido em todo o mundo, contando até mesmo com modelos distintos dependendo das condições climáticas da região onde se localiza.

Segundo Pitaluga (2011) os esgotos brutos e efluentes tratados por sistemas com plantas, como os sistemas de WC por exemplo, necessitam de um pré-tratamento para a melhor eficiência de remoção de matéria orgânica e de remoção de nutrientes. O pré-tratamento é necessário para evitar a colmatção do sistema, pois remove a maioria dos sólidos suspensos presentes nos esgotos sanitários e efluentes industriais aumentando assim o tempo de vida dos sistemas de WC.

3.2.1 Classificação dos *Wetlands* Construídos

Os WC podem variar de acordo com o sentido do escoamento (SUTHERSAN, 2001) podendo ser classificados como Fluxo Horizontal ou Vertical, como mostra o esquema de classificação na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de classificação de *Wetlands* Construídos



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2016).

Os WC podem ser classificados então como: *Wetlands* de fluxo superficial; *Wetlands* de fluxo subsuperficial; e *Wetlands* de Sistemas Mistos (DUPOLDT et al., 1993; RODRIGUES, 2016; SEZERINO et al., 2018).

3.3. WETLANDS CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DESCENDENTE

Os sistemas de *Wetlands* Construído de fluxo vertical (WCFV) são comumente utilizados em propriedades rurais ou para pequenas populações como um complemento à um tratamento preliminar de esgotos, como fossa séptica por exemplo.

Usualmente os WCFV podem ser construídos acima do nível do solo ou então escavados em formato de valas, em ambas as situações mostra-se necessária a impermeabilização do sistema (KOOTTATEP et al., 2001).

A impermeabilização, tanto lateral quanto de fundo, é uma etapa essencial para garantir que o efluente não irá percolar para o solo evitando assim a contaminação das camadas mais profundas do solo, a contaminação de águas subterrâneas e a geração de um passivo ambiental.

Contudo existem sistemas construídos em receptáculos de plásticos, como bombonas ou canos de PVC, que reduzem os custos de implantação do sistema devido à ausência da necessidade de impermeabilização do sistema. Estes sistemas também possuem grande potencial de aplicabilidade devido a capacidade de serem modulares, o que lhes permite acoplamento de outras unidades dos WC caso seja necessário.

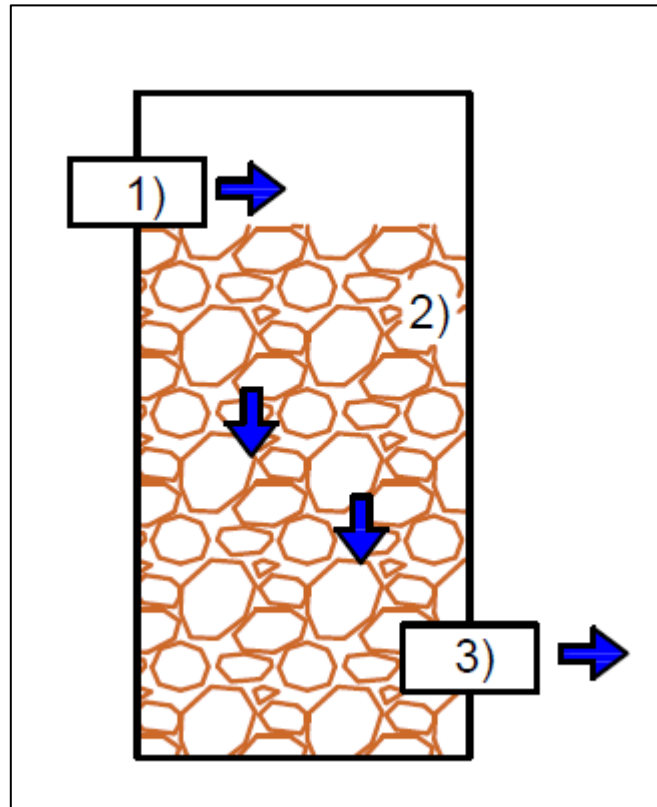
No interior do sistema é necessário o uso de materiais de granulometria conhecida para a formação de um substrato onde acontece a interface efluente-microrganismo-raiz (DUPOLDT et al., 1993). As plantas mais utilizadas nesse estilo de WC são as macrófitas, que são plantadas no substrato.

Nos sistemas de WCFV descendente o efluente a ser tratado chega ao sistema acima da superfície, tendo um bom arraste de oxigênio proveniente da atmosfera. Vale ressaltar que nesses sistemas a aplicação de efluente é intermitente e não constante, pois necessita-se de um tempo de detenção hidráulica superior ao de sistemas contínuos

(U.S. EPA, 2000). A Figura 3 abaixo ilustra o sentido do escoamento em um WC de fluxo vertical descendente.

Figura 3 - Esquema de sentido de fluxo em WC de fluxo vertical descendente.

1) Tubulação de entrada. 2) Substrato filtrante. 3) Tubulação de Saída.



Fonte: Autoria própria (2020).

3.4. COMPONENTES DOS SISTEMAS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

3.4.1 Meio Suporte Filtrante

O meio suporte dos WC geralmente é composto por materiais de granulometria conhecida, podendo variar essas granulometrias no sentido do escoamento. As principais

funções atribuídas ao meio suporte são a filtração de águas residuárias e também servir de suporte para o desenvolvimento das plantas ali inserida (HARTY, 2017; SILVA, 2007).

Um bom meio suporte possui características bem definidas, sempre buscando a melhor filtração do efluente a ser tratado, sendo as principais características: Uniformidade, porosidade e condutividade hidráulica (DUPOLDT et al., 1993).

Deve-se evitar substratos argilosos como meio suporte, pois materiais desse tipo tendem a acumular partículas poluentes por adsorção evitando assim a decomposição por ação dos microrganismos. O acúmulo exacerbado também pode levar a saturação precoce do meio suporte, o que acarretará na liberação dos poluentes para o efluente tratado (SILVA, 2007). Contudo espera-se que o meio filtrante possa adsorver Nitrogênio em sua forma amoniacal (NH_4^+) e também Ortofosfato (PO_4^-) (MASI et al., 2000).

Os substratos comumente utilizados em sistemas de WC são as britas e as areias, com granulometria variada de acordo com as características de remoção desejadas (BRIX; ARIAS, 2005). Devido ao baixo custo, grande retenção e remoção de matéria orgânica e a alta disponibilidade as areias e as britas são os meios suportes mais utilizados no mundo. A retenção e a remoção da matéria orgânica é devido à formação de biofilmes bacterianos que ficam adsorvidos a superfície do material suporte (U.S. EPA, 2000; YANG et al., 2018).

Segundo Yang et al (2018) o uso de substratos variados em sistemas de WC tem mostrado resultados interessantes, principalmente se tratando da eficiência da remoção de nutrientes. Inúmeros materiais têm sido estudados como substrato ao meio suporte de WC, variando de materiais plásticos a minerais sintéticos. O uso destes materiais reduz fortemente a possibilidade de eutrofização de corpos hídricos devido à redução de Nitrogênio e Fósforo nos ecossistemas aquáticos (MBURU; KIPKEMBOI; KIMWAGA, 2019; MIRANDA et al., 2019; YANG et al., 2018).

3.4.2. Colmatação

O maior desafio na operação de sistemas de WC é a colmatação prematura dos meios filtrantes, que pode ser definida como a redução da condutividade hidráulica devido

a obstrução dos espaços vazios pelo biofilme microbiano (YANG et al., 2017) ou por ações físicas (SILVA, 2007). Em outras palavras as características hidráulicas internas do sistema influenciam diretamente a eficiência de remoção de poluentes, logo quanto maior a colmatação menor a eficiência do sistema (HUA et al., 2018).

Há incertezas nos fatores causadores da colmatação, como na temperatura por exemplo. Sabe-se que em climas tropicais as atividades biológicas dos microrganismos tendem a aumentar, porém o consumo da matéria orgânica também tende a acelerar. Esse fator acaba equilibrando a ocupação dos espaços vazios e impedindo a colmatação (HARTY, 2017; SEZERINO et al., 2018; SILVA, 2007).

Já variação da aplicação das cargas hidráulicas, com ciclos intermitentes respeitando intervalos de tempo pré definidos, pode melhorar a aeração do substrato consequentemente aumentando a degradação aeróbia da matéria orgânica (HUA et al., 2018).

- Segundo Silva (2007) apud Blazejewski e Murat-Blazejewska (1997) as principais causas da colmatação são:

- Existência de pequenos poros no meio suporte;
- Acumulação de sólidos suspensos nos poros do substrato do meio suporte;
- Crescimento microbiano exacerbado;
- Entupimento dos poros devido a géis inorgânicos provenientes da dissolução de Ca no meio;
- Precipitação e deposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) em situações de pH ácido;
- Ausência de limpeza com baixas velocidades de infiltração.

3.4.3 Sistemas de Plantas

A presença de vegetação em WC proporciona a distribuição e a redução da velocidade de entrada das águas residuárias nos sistemas. As vegetações mais comumente usadas são as macrófitas que são plantas que crescem no meio suporte absorvendo nutrientes. Segundo (BRIX, 2003) o termo macrófita inclui desde as algas de tecidos não identificáveis a olho nu, até as plantas aquáticas vasculares.

As raízes das plantas auxiliam na redução dos sólidos suspensos, esse material adsorvido forma um rico ecossistema excelente para o crescimento de fungos e bactérias responsáveis pela degradação da matéria orgânica (BRIX, 2003). Contudo, existem inúmeras variedades de plantas que podem ser utilizadas nos sistemas de WC como as plantas ornamentais que além do tratamento trazem um aspecto paisagístico ao sistema.

Existem fatores determinantes no desenvolvimento de plantas nos sistemas de WC, como o comprimento das raízes e a necessidade de nutrientes (BRIX, 2003). A penetrabilidade das raízes no substrato filtrante é um fator importante a ser observado, variando muito em espécies distintas podendo medir entre 0,3 a 0,9 metros de profundidade. Esse fator é importante pois permite a oxigenação das camadas inferiores do substrato possibilitando assim a atividade de microrganismos aeróbios (SILVESTRE; PEDRO-DE-JESUS, 2002).

As plantas inseridas nos sistemas de WC necessitam também de nutrientes para o desenvolvimento, tanto da parte aérea quanto das raízes e rizomas. O nitrogênio é considerado um macronutriente pois para o desenvolvimento das plantas mostra-se extremamente necessário. Para ser assimilado às estruturas das plantas o nitrogênio necessita estar em sua forma de Nitrato (NO_3^-) embora existem algumas poucas espécies de plantas, como o arroz por exemplo, que conseguem absorver o nitrogênio em sua forma amoniacal (NH_4^+) (KANT, 2018; MA et al., 2018). Segundo Brix (2003) as principais contribuições do Nitrogênio como macronutriente são:

- É responsável pelo crescimento da planta;
- Atua diretamente na fotossíntese;
- É parte constituinte da clorofila, vitaminas, carboidratos e proteínas;
- É responsável pela coloração verde-escura das folhas;
- Atua no desenvolvimento do sistema radicular.

3.4.3.1 *Helicônia* (Caeté)

Uma das plantas muito utilizadas em sistemas de WC é a *Helicônia*, conhecido como Caeté ou ainda Bananeira do Mato (Figura 4). O Caeté faz parte da família *Heliconiaceae*, é facilmente encontrado em ambientes tropicais e possui sistema radicular propício para a formação de colônias de microrganismos. A sua ampla utilização se dá pelo fato da sua fácil manutenção, sem necessidades de muitos cuidados, e também por sua capacidade de brotação gerando novos indivíduos agregados ou não ao organismo originário. Esse gênero pode alcançar até 12 metros de altura, tendo sua iluminação mínima ideal de 30% e iluminação máxima ideal indeterminada visto que reage bem a grandes taxas de irradiação solar (MOSCA, 2004).

Figura 4 – Fotografia de *Heliconia Rostrata*



Fonte: Capturada por Rodrigues (2016).

Um sistema vertical com a *Heliconia rostrata* demonstrou, em um estudo na cidade de Viçosa em Minas Gerais para tratamento de efluente de suinocultura com carregamento orgânico de $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de DQO, uma remoção de 57,2% (DQO), 33,8% (NTK), 36,9% (NH_x), 37,6% (PT), 21,4% (K) e 25,4% (alcalinidade) (SARMENTO; BORGES; DE MATOS, 2013).

3.4.4 Microrganismos

Os principais agentes no processo de tratamento de efluentes, esgotos e águas residuárias são os microrganismos, sendo eles bactérias, arqueas e fungos sendo o último em menor quantidade. Os sistemas de WC possuem grande variação desses microrganismos, fato esse devido às diferentes condições físico-químicas, contudo os microrganismos mais proeminentes são as bactérias. As bactérias, seres unicelulares classificados como procariontes devido a sua simplicidade molecular, podem ser divididos em dois grandes grupos. Bactérias que utilizam o Oxigênio comoceptor final de elétrons são conhecidas como bactérias aeróbias e bactérias que utilizam outros

aceptores de elétrons são conhecidas como anaeróbias (MADIGAN et al., 2010; VON SPERLING, 1996).

Os microrganismos ficam adsorvidos à superfície tanto do meio filtrante, quanto das raízes das plantas. Uma vez adsorvidos formam uma camada gelatinosa chamada de biofilme, capaz de aumentar a eficiência de remoção de poluentes (BRIX, 1993; SEZERINO et al., 2018; VON SPERLING, 1996).

3.5. POLUENTES NO EFLUENTE DE CERVEJARIAS E SUA ASSIMILAÇÃO POR SISTEMAS DE WC

As indústrias alimentícias fazem parte do setor que mais cresce no mundo, visto que juntamente ao crescimento populacional aumenta também a demanda por produtos processados. A quantidade de resíduos produzidos nessas indústrias é enorme, causando grandes impactos ambientais. Geralmente as concentrações de compostos orgânicos presentes nos efluentes gerados por este tipo de indústria são muito elevadas (VYMAZAL, 2014).

Segundo Vymazal (2014) as cervejarias possuem grandes concentrações de DBO, DQO e NTK estimativas essas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Concentração de DBO, DQO e NTK em efluentes de cervejarias.

Parâmetros	Concentração Mínima	Concentração Máxima
DBO mg. L ⁻¹	500	64.000
DQO mg. L ⁻¹	750	80.000
NTK mg. L ⁻¹	67	216

Fonte: Adaptado de Vymazal (2014).

Segundo Vymazal (2014) o efluente proveniente de cervejarias possui, na maioria dos casos, o pH entre 3 e 4 caracterizando um meio ácido. As concentrações de Matéria Orgânica (MO) presentes neste efluente podem variar de acordo com o seu processo de

fermentação, apresentando altas concentrações de carboidratos, açúcares e sólidos suspensos provenientes de ingredientes como o milho, cevada, malte e leveduras.

Devido às suas características de composição, o efluente industrial proveniente de cervejarias é submetido a processos complexos de tratamento a fim de reduzir a carga de poluentes ali presente. As operações unitárias mais comuns envolvidas no tratamento são: Gradeamento; Caixa de Areia; Medida de vazão por Calha Parshall; Lagoas Anaeróbias; Lagoas Aeróbias; e Lagoas de Estabilização. Existem também outros tratamentos físico-químicos e biológicos que podem ser empregados, como: Coagulação; Flotação; Eletrocoagulação; Filtração; e uso de Reatores biológicos (RISSARDO et al., 2019).

Contudo vale salientar que mesmo havendo uma grande variação de tratamentos, ainda assim é um grande desafio alcançar os níveis adequados para o lançamento do efluente de cervejarias nos corpos hídricos (VYMAZAL, 2014).

Uma boa alternativa para o polimento destes efluentes seria o pós tratamento por meio de *Wetlands* Construídos, possibilitando assim uma maior remoção de matéria orgânica e também uma remoção mais refinada de Nitrogênio e Fósforo (MOURÃO, 2017; RISSARDO et al., 2019; VYMAZAL, 2014).

3.5.1 Nitrogênio

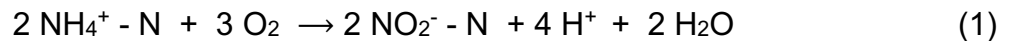
Nos WC o processo de remoção do nitrogênio se inicia logo na superfície do sistema onde o efluente entra em contato com as raízes, rizomas e meio filtrante. A transformação do Nitrogênio é realizada pelas bactérias nas regiões aeróbias próximas as raízes pelo processo de nitrificação.

Segundo Harty (2017) nos sistemas de WC a remoção de nitrogênio ocorre também por meio da assimilação das plantas, visto que o mesmo é considerado um macronutriente, que é a utilização do Nitrogênio na composição de suas estruturas celulares.

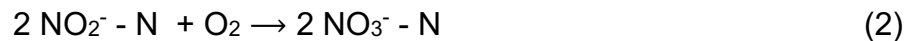
3.5.1.1 Transformação do Nitrogênio em Sistemas de Wetlands Construídos

A primeira transformação que o Nitrogênio sofre dentro dos sistemas de WC é a amonificação, onde a fração orgânica transforma-se em N amoniacal. Portanto, nessa etapa não há a remoção do nitrogênio e sim a disponibilização do mesmo para outros processos. Essa etapa depende de vários fatores como o pH, atividade microbiana, temperatura, umidade, relação C/N e disponibilidade de nutrientes (VON SPERLING, 1996).

A próxima etapa é a oxidação da amônia que resulta em nitritos (NO_2^-) e posteriormente em nitratos (NO_3^-), que são formas reduzidas do nitrogênio e servem como um forte indicador de poluição ambiental quando se encontram acima dos valores aceitáveis de acordo com o definido pela Resolução CONAMA nº357/05. A equação 1 mostra a transformação da amônia em nitrito .



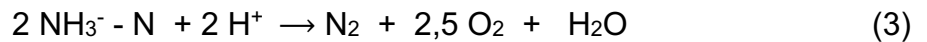
A transformação de nitritos em nitratos se dá pela reação abaixo:



O processo resultante das Equações 1 e 2 é chamado de nitrificação, onde o consumo de oxigênio dessa etapa é associado a Demanda Nitrogenada e há uma acidificação do meio devido a liberação de íons de H^+ (MADIGAN et al., 2010; U.S. EPA, 2000; VON SPERLING, 1996). Os principais microrganismos que realizam a nitrificação são os *Nitrosomonas*, bactérias estritamente aeróbias, e os *Nitrobacter* que são bactérias facultativas (MADIGAN et al., 2010). Devido a atividade microbiana ser a responsável pela nitrificação um fator limitante neste processo é o pH, devido ao consumo de alcalinidade do meio pelas bactérias responsáveis. Segundo Sezerino (2018) o pH deve

ser maior que 7,5 para haver uma otimização do processo, e a temperatura deve estar entre 25° C a 36° C possibilitando assim uma maior taxa de nitrificação.

Em condições anóxicas, em baixas concentrações de oxigênio ou até mesmo na ausência do mesmo, e na presença de nitratos ocorre o processo de desnitrificação (VON SPERLING, 1996), resultante da Equação 3, que converte os nitratos em nitrogênio gasoso como mostra a reação:



A desnitrificação é realizada pelas bactérias dos gêneros *Lactobacillus*, *Achromobacter*, *Proteus*, *Aerobacter*, *Alcaligenes* e *Micrococcus* (MADIGAN et al., 2010; METCALF AND EDDY, 2003). Devido a isso a desnitrificação mostra-se extremamente eficiente em um pH ótimo de 6,5 a 9,0, na presença de carbono orgânico e temperaturas entre 25° C a 65 ° C. Contudo a desnitrificação pode ainda acontecer fora dessas condições ótimas porém com menor eficiência (BRIX, 1993; VON SPERLING, 1996, 2005).

Já a assimilação realizada pelas macrófitas e plantas possui o potencial retirar 200 a 2500 Kg N. ha⁻¹.ano⁻¹ em climas temperados, possibilitando o desenvolvimento tanto da parte aérea quando das raízes e rizomas da planta. Contudo para manter esta taxa de assimilação mostra-se necessária a remoção da parte aérea das plantas por meio de podas controladas, incentivando assim a maior assimilação do nitrogênio para a produção de nova biomassa (BRIX, 2003; FIA et al., 2014; KANT, 2018; MA et al., 2018).

3.5.2 Fósforo

A remoção do fósforo presente nos efluentes industriais é essencial para evitar o crescimento descontrolado de algas em ambientes aquáticos naturais, visto que o mesmo é essencial ao crescimento desses organismos, prevenindo a eutrofização de corpos hídricos (METCALF & EDDY, 2003).

Os sistemas de WCFV podem alcançar de 45% a 90% de remoção de fósforo dependendo da operação do sistema, se mostrando uma boa tecnologia na remoção do mesmo (PROCHASKA; ZOUBOULIS, 2006; SCHOLZ et al., 2007).

4. MATERIAL E MÉTODOS

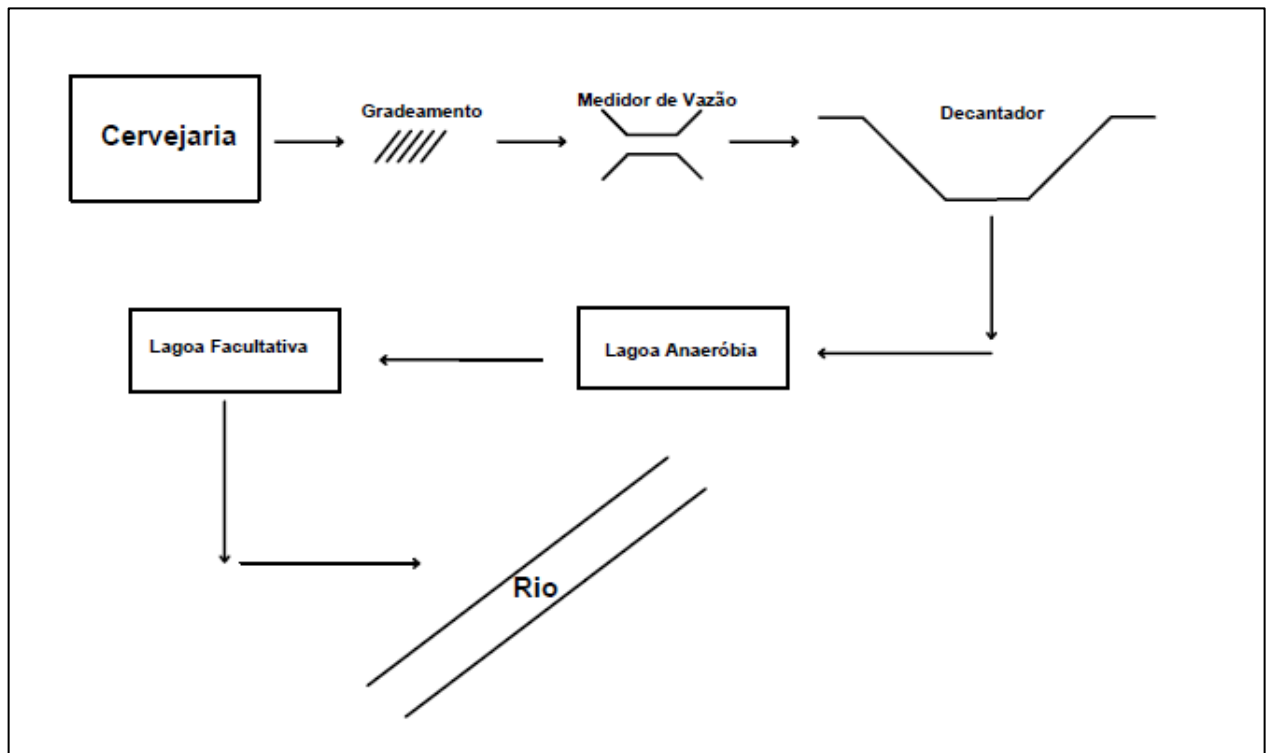
As características e valores adotados para o efluente a fim de dimensionar o sistema de pós-tratamento por WCFV foram cedidas por uma cervejaria localizada no Estado do Paraná

Esta cervejaria produz uma variedade de bebidas à base de cevada, como *Chopps*, *Ipa*, *Pilsen*, puro malte e *Lager*. O processo de fermentação destas bebidas varia de acordo com as características finais desejadas, o que proporciona um efluente com altas concentrações de MO.

Os dados utilizados para o dimensionamento do pós-tratamento em questão foram amostrados após o sistema de tratamento convencional já adotado pela cervejaria. Esse sistema prévio de tratamento é composto por: Gradeamento; Medidor de Vazão;

Decantador; Lagoa Anaeróbia; e Lagoa Facultativa. Este sistema de tratamento é descrito em fluxograma na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes atual



Fonte: Autoria própria (2020).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE CERVEJARIA

4.1.1 Vazão Afluente ao Sistema de Pós-Tratamento

Para realizar o dimensionamento do sistema de Pós-tratamento por WCFV é necessária uma vazão de projeto, a fim de calcular e projetar parâmetros de operação. A vazão de saída das Lagoas Facultativas foi monitorada durante sete meses, de janeiro a agosto de 2020 excluindo apenas o mês de abril. Estes dados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Medidas de Vazão do Afluente ao sistema de Pós-tratamento.

Data	Vazão Média (m³/h)	Data	Vazão Média (m³/h)
02/01/2020	26,97	11/03/2020	20,47
03/01/2020	37,23	12/03/2020	21,05
06/01/2020	41,40	13/03/2020	24,64
08/01/2020	30,24	16/03/2020	33,00
09/01/2020	30,24	17/03/2020	28,65
13/01/2020	31,10	18/03/2020	24,11
14/01/2020	30,24	19/03/2020	31,10
15/01/2020	30,24	23/03/2020	24,11
16/01/2020	30,24	24/03/2020	21,12
17/01/2020	24,64	25/03/2020	20,23
20/01/2020	38,01	26/03/2020	31,88
21/01/2020	50,72	05/05/2020	35,12
22/01/2020	49,75	06/05/2020	36,28
24/01/2020	24,11	12/05/2020	31,16
27/01/2020	37,59	19/05/2020	31,88
28/01/2020	37,59	28/05/2020	32,15
29/01/2020	44,15	29/05/2020	42,25
30/01/2020	50,28	02/06/2020	31,88
31/01/2020	40,87	04/06/2020	40,25
03/02/2020	38,01	12/06/2020	31,33
04/02/2020	53,39	17/06/2020	28,49
05/02/2020	47,86	19/06/2020	41,35
06/02/2020	42,72	23/06/2020	36,75
07/02/2020	42,76	24/06/2020	31,88
11/02/2020	32,27	25/06/2020	40,45
12/02/2020	27,39	01/07/2020	39,45
13/02/2020	40,87	03/07/2020	37,88
14/02/2020	34,73	07/07/2020	31,88
20/02/2020	24,11	09/07/2020	42,15
21/02/2020	30,24	22/07/2020	38,20
26/02/2020	20,47	28/07/2020	40,21
27/02/2020	30,24	03/08/2020	31,88
28/02/2020	33,96	04/08/2020	32,00
02/03/2020	28,64	07/08/2020	40,45
10/03/2020	20,47	18/08/2020	24,49

Fonte: Autoria própria (2020).

Para o dimensionamento adotou-se a vazão de 33,77 m³.h⁻¹, esse valor representa o valor médio observado na série de dados de vazão analisada como observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise estatística das medidas de vazão.

Período de coleta	Nº de Amostras	Vazão Mínima (m ³ /h)	Vazão Média (m ³ /h)	Vazão Máxima (m ³ /h)	Desvio Padrão	Variância
02 de janeiro a 18 de agosto de 2020	70	20,23	33,77	53,39	7,93	62,84

Fonte: Autoria própria (2020).

4.1.2 Dados de Entrada

Para o dimensionamento do sistema de pós-tratamento por WCFV foram utilizados dados fornecidos pela empresa que datam de 10 de janeiro de 2019 até 03 de junho de 2020, sendo dados mensais de monitoramento dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados do efluente de cervejaria.

Data da coleta	DQO mg/L	pH	T °C	DBO5 mg/L	Fos. Total mg/L	S.S.T. mg/L	NTK mg/L
10/01/2019	282,00	8,35	29,20	125,00	8,25	132,00	27,60
08/02/2019	343,00	8,20	28,00	168,00	8,25	96,00	27,90
04/04/2019	268,00	8,30	24,00	95,00	12,25	136,00	22,80
09/05/2019	253,00	7,78	26,00	71,00	7,50	88,00	15,00
09/06/2019	274,00	8,39	18,90	116,00	9,00	160,00	-
11/07/2019	264,00	8,39	17,90	70,00	8,25	176,00	5,40
05/09/2019	406,00	8,22	22,40	147,00	10,00	152,00	16,80
03/10/2019	445,00	8,01	28,20	155,00	8,75	124,00	33,90
06/11/2019	336,00	8,36	28,00	88,00	10,25	220,00	12,30
03/12/2019	315,00	8,95	28,20	101,00	15,00	260,00	15,90
09/01/2020	185,00	7,94	29,00	60,00	11,00	120,00	15,00
06/02/2020	210,00	8,28	32,00	82,00	8,00	100,00	16,80
05/03/2020	217,00	8,21	28,70	61,00	8,75	80,00	30,30
23/04/2020	284,00	8,90	24,00	141,00	9,00	92,00	27,00
07/05/2020	191,00	8,19	25,00	59,00	8,00	100,00	27,00
03/06/2020	234,00	7,67	22,00	83,00	5,50	162,00	23,40
Médias	271,00	8,25	27,00	91,50	8,75	128,00	19,80
Mínimas	185,00	7,67	17,90	59,00	5,50	80,00	5,40

Continuação da Tabela 4 – Dados do efluente de cervejaria.

	DQO mg/L	pH	T °C	DBO5 mg/L	Fos. Total mg/L	S.S.T. mg/L	NTK mg/L
Máximas	445,00	8,95	32,00	168,00	15,00	260,00	33,90
Desvio Padrão	73,26	0,34	3,94	36,25	2,17	50,00	9,29
Variância	5366,76	0,11	15,53	1314,38	4,70	2499,58	86,25

Fonte: Autoria própria (2020).

4.2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

4.2.1 Determinação de Área Superficial

O dimensionamento do sistema foi realizado de acordo com os critérios de Platzer (1999) e Sezerino (2006) para *Wetlands* de Fluxo Vertical. Para a determinação da Área Superficial Sugerida (Equação 4) foi adotada uma Taxa de Aplicação Superficial (TH) máxima de 0,2 m.d⁻¹ e adotada uma vazão de projeto de 33,77 m³.h⁻¹.

$$TH = \frac{Q}{As} \quad (4)$$

Onde:

Q = Vazão (m³ d⁻¹);

As= Área Superficial Sugerida (m²);

TH = Taxa de Aplicação Superficial (m.d⁻¹).

Substituindo os valores na Equação 4 têm-se:

$$0,2 \frac{m}{d} = \frac{810,48 \frac{m^3}{d}}{As}$$

$$As = 4052,4 m^2$$

Contudo, Sezerino (2006) determina que a carga orgânica limite, ou máxima, de DQO aplicada a um sistema de WC deve ser igual a 40 gDQO m⁻² d⁻¹. Portanto a partir da equação da carga orgânica limite pôde-se verificar se a área sugerida é adequada para o sistema (Equação 5).

$$Carga = \frac{DQO * Q}{A} \quad (5)$$

Onde:

DQO = Demanda Química de Oxigênio (g m⁻³);

Q = Vazão (m³ d⁻¹);

A= Área Superficial (m²);

Carga= Carga Orgânica em DQO aplicada (gDQO m⁻² d⁻¹).

Portanto:

$$Carga = \frac{271,00 \text{ g m}^{-3} * 810,48 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}}{4080,00 \text{ m}^2} = 53,83 \text{ gDQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Considerando a Área Sugerida a carga limite extrapola os 40 gDQO m⁻² d⁻¹ sugeridos por Sezerino (2006), para adequar o projeto foi aumentada a área para 5.500,00 m² resultando em:

$$Carga = \frac{271,00 \text{ g m}^{-3} * 810,48 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}}{5.500,00 \text{ m}^2} = 39,93 \text{ gDQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Foi definida então uma Área Superficial de 5.500,00 m², atendendo as especificações de dimensionamento. Para atender a esta área útil foi considerada uma largura de 40 m e um comprimento de 137,50 m.

4.2.2 Balanço de Oxigênio

a) Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) do Afluente:

Para a execução do cálculo da carga de $DQO_{af lu}$ e $NTK_{af lu}$, foram consideradas concentrações médias de $271,00 \text{ g m}^{-3}$ e $19,80 \text{ g m}^{-3}$, Tabela 4, respectivamente, e vazão de $810,48 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Com estes dados pode-se determinar as cargas aplicadas (λ) como mostra a Equação 6.

$$\lambda = Q * C \quad (6)$$

Onde:

λ = Carga aplicada (g d^{-1});

Q = Vazão ($\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$);

C = Concentração (g m^3);

Por fim substituindo os valores citados na Equação 6 tem-se:

$$DQO_{af lu} (\text{g d}^{-1}) = 271 \text{ g m}^{-3} * 810,48 \text{ m}^3 \text{ d} = 219,64 \text{ kg d}^{-1}$$

$$NTK_{af lu} (\text{g d}^{-1}) = 19,80 \text{ g m}^{-3} * 810,48 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} = 16,05 \text{ kg d}^{-1}$$

a) Demanda de Oxigênio Dissolvido (DOD):

A Demanda de Oxigênio Dissolvido pode ser calculada por meio da Equação

7.

$$DOD = 0,85 * 0,7 * [DQO_{af lu}] + 4,3 * [NTK_{af lu}] - 0,1 * 2,9 * [NTK_{af lu}] \quad (7)$$

Substituindo os valores de DQO_{aflu} e NTK_{aflu} encontrados acima na Equação 7, pode-se determinar a Demanda de Oxigênio Dissolvido.

$$DOD = 0,85 * 0,7 * 219.640,08 \text{ g } d^{-1} + 4,3 * 16.047,50 \text{ g } d^{-1} - 0,1 * 2,9 * 16.047,50 \text{ g } d^{-1}$$

$$DOD = 195,04 \text{ kg } d^{-1}$$

b) Aporte de Oxigênio no substrato filtrante por Convecção:

O aporte de OD dissolvido no substrato por convecção pode ser determinado pela Equação 8.

$$OD_{conv} = 0,3 \text{ gO}^2 \text{ L}^{-1} * \text{Vazão do pulso} * 1000 \text{ L m}^{-3} \quad (8)$$

Substituindo os valores na Equação 8 tem-se que:

$$OD_{con} = 0,3 \text{ gO}^2 \text{ L}^{-1} * 101,31 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} * 1000 \text{ L m}^{-3} = 30,39 \text{ kg } L^{-1}$$

c) Difusão de Oxigênio Dissolvido no Substrato Filtrante:

O aporte de OD no substrato por difusão pode ser determinado e acordo com a Equação 9.

$$OD_{dif} = 1 \text{ gO}^2 \text{ h m}^{-2} * \text{Área do WC} * [(24 \text{ h} - 15 \text{ h}) * n^{\circ} \text{ de pulsos}] \quad (9)$$

Substituindo o valor de área na Equação 9 tem-se que:

$$OD_{dif} = 1gO^2 h m^{-2} * 5.500,00 m^2 * [(24 h - 15 h) * 8]$$

$$OD_{dif} = 396,00 kgO^2 d^{-1}$$

Por meio de todos os valores encontrados é possível determinar o Balanço de OD teórico presente em um WCFV, como mostra a Equação 10.

$$Balanço de OD = Convecção + Difusão - Demanda > 0 \quad (10)$$

Para haver uma boa nitrificação é necessário um Balanço de OD positivo, devido aos metabolismos dos microrganismos nitrificantes. Portanto, substituindo os valores previamente calculados têm-se que:

$$Balanço de OD = 30,390 + 396,00 - 195,036 > 0$$

$$Balanço de OD = 231,36 kgO^2 d^{-1} > 0$$

5. RESULTADOS E DICUSSÃO

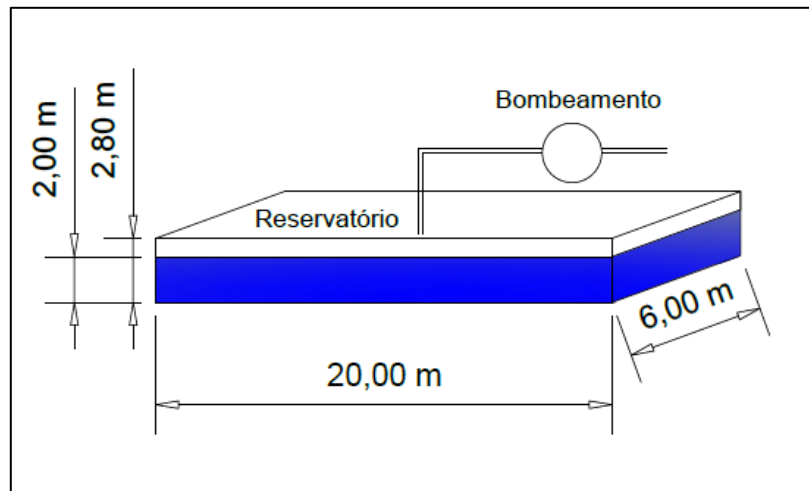
Os resultados apresentados no presente trabalho tratam-se do dimensionamento de uma unidade a ser utilizada no sistema proposto para Pós-tratamento, que é composto por: reservatório para armazenamento de efluente; e sistema de *Wetlands* Construído de Fluxo Vertical.

5.1 RESERVATÓRIO DE ARMAZENAMENTO E SISTEMA DE BOMBEAMENTO

O funcionamento do sistema WCFV foi definido como fluxo em batelada, ou seja, a entrada de efluente no sistema de pós-tratamento se dá em pulsos com intervalos de 3 horas entre si o que torna necessário o dimensionamento de um sistema de bombeamento e também de um reservatório. Há Também a possibilidade de realizar a sucção diretamente na lagoa de tratamento prévia ao sistema de WCFV, considerando é claro que o tempo de detenção hidráulica e velocidade de escoamento da lagoa não devem ser afetados, mantendo assim a eficiência do tratamento prévio. Contudo outro desafio neste formato é o carregamento de sólidos na sucção, como lodos e algas, devido a isso optou-se então pelo dimensionamento de um reservatório.

A vazão de projeto é $810,48 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, e o total de pulsos diários é de 8 ciclos, o que resulta em uma vazão aplicada de $101,31 \text{ m}^3$ a cada pulso. Considerando esse valor dimensionou-se um reservatório capaz de armazenar até 2 vezes a vazão de um pulso, criando assim um coeficiente de segurança caso haja problemas no bombeamento. O reservatório terá dimensões de $20 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 2,80 \text{ m}$, com $0,8 \text{ m}$ de altura livre e $2,0 \text{ m}$ de altura útil (Figura 6).

Figura 6 - Dimensões do reservatório



Fonte: Autoria própria (2020).

Assim, o volume total (V_{Tr}) e o volume útil (V_{Ur}) do reservatório (Equação 11) são representados por:

$$V_{Tr} = 20 \text{ m} * 6 \text{ m} * 2,80 \text{ m} = 336 \text{ m}^3 \quad (11)$$

$$V_{Ur} = 20 \text{ m} * 6 \text{ m} * 2 \text{ m} = 240 \text{ m}^3$$

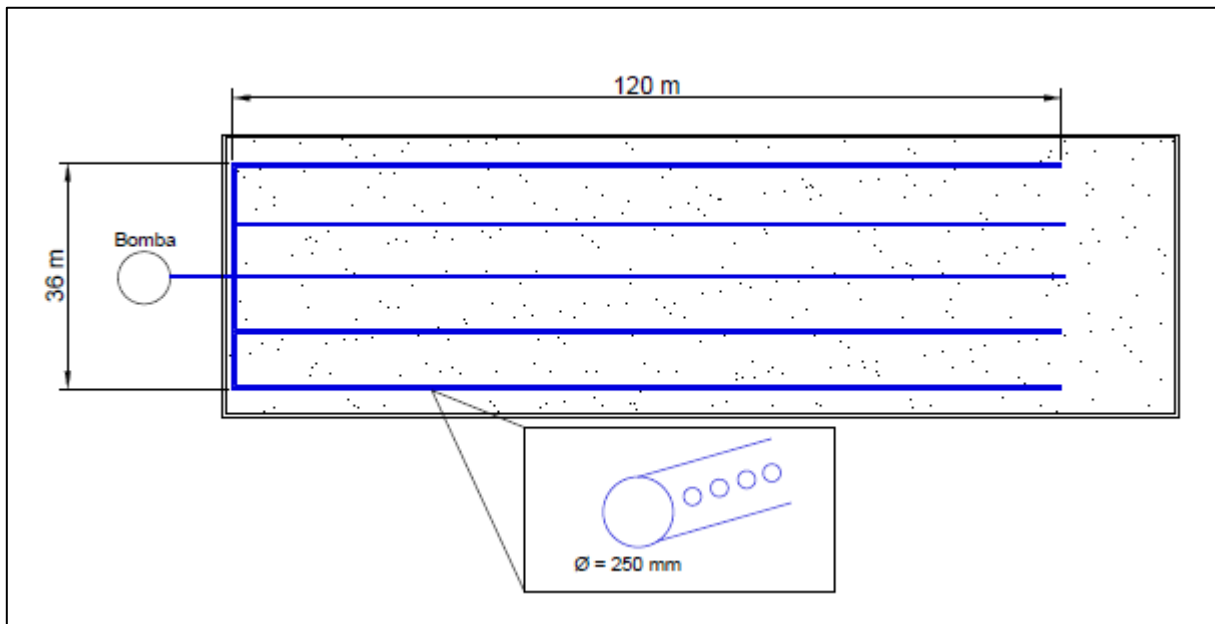
O Reservatório também possui um sistema de bombeamento para a alimentação do WCFV em cada pulso. Para o cálculo da potência (P) da bomba, são necessárias: a vazão de bombeamento (Q_b), as alturas manométricas de sucção e recalque (H_{ms} e H_{mr}). A vazão de bombeamento é definida pela vazão de aplicação (Q_a). Considerando um tempo de alimentação de 15 min a Q_a é de $6,75 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ou ainda $112,57 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$.

A tubulação de sucção é composta por um tubo de 2,60 m de altura, que succiona o efluente do fundo do reservatório direcionando esse fluido ao rotor da bomba. A perda de carga neste trecho da tubulação é desprezível. Portanto, a altura manométrica de sucção (H_{ms}) é de 2,6 m.

Já para o cálculo de H_{mr} , deve-se considerar as perdas de cargas distribuídas e localizadas. Para o presente projeto, adotou-se uma tubulação de esgoto de PVC, com diâmetro de 250 mm para todo o sistema de alimentação.

A tubulação do sistema de distribuição conta com 5 barras de cano PVC de 120 m, 1 barra de cano PVC de 36 m ambas com 250 mm de diâmetro totalizando um comprimento de 636 m (Figura 7). Os dispositivos instalados, que influenciam no comprimento virtual do sistema encontram-se descritos na Tabela 5.

Figura 7 - Sistema Hidráulico de alimentação do WCFV



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 5 - Comprimento virtual do sistema hidráulico.

Dispositivo	Diâmetro	Unidades	Comprimento Virtual Unitário	Comprimento Virtual Total
Joelho de 90°	250 mm	2	8,70 m	17,40 m
Tê saída bilateral	250 mm	1	14,00 m	14,00 m
Tê saída direta	250 mm	2	5,90 m	11,80 m
COMPRIMENTO VIRTUAL TOTAL				43,20 m

Fonte: Adaptado de Dalbosco (2016).

O sistema hidráulico de alimentação conta com furos nas laterais dos canos, possibilitando assim a aplicação do efluente no sistema construído (Figura 8), os furos

devem ter 8 mm de diâmetro e com espaçamento de 10 cm entre si. Contudo, esses furos não são considerados para o cálculo da perda de carga por recalque.

Figura 8 - Exemplificação de sistema hidráulico de alimentação



Fonte: (NUNES, 2018).

Considerando o comprimento real e o comprimento virtual do sistema é possível calcular a perda de carga proveniente do recalque para as tubulações (Equação 12):

$$hr = L \frac{10,64 \frac{Q^{1,85}}{c^{1,85} D^{4,87}}}{5} = 2,32 \text{ m} \quad (12)$$

Onde:

h: Perda de carga;

L: Somatória dos comprimentos (m);

Q: Vazão (m³);

c: Coeficiente de rugosidade atribuído a fórmula de Hazen-Williams (140 para diâmetros acima de 100 mm); e

D: Diâmetro.

Portanto a altura manométrica total (Equação 13) pode ser definida como:

$$h_m = h_{ms} + h_{mr} \quad (13)$$

$$h_m = 2,6 + 2,32 = 4,92 \text{ m}$$

Para a escolha da bomba utilizou-se o sistema KSB EasySelect® (KSB GROUP, 2020), um sistema online que seleciona um catálogo específico de bombas de acordo com critérios de projeto previamente definidos (Figura 9). Os principais critérios foram: Tipo de fluido a ser bombeado (efluente de cervejaria); Altura manométrica; Vazão caudal e Eficiência.

Figura 9 - Interface do sistema KSB EasySelect® versão 14.6

Fonte: Autoria própria (2020).

A bomba selecionada para o projeto foi a KWP-Bloc da KSB Group (Figura 10), bomba essa indicada para efluentes de cervejarias pré-tratados, pois encaixou-se perfeitamente às condições de vazão, altura manométrica e tipo de fluido estabelecidas no projeto. A eficiência é, segundo o fornecedor, $\eta = 66,15\%$ com uma Potência

Absorvida de 20,58 kW e 972 rpm de velocidade. Sugere-se para o sistema de bombeamento o uso de duas bombas em paralelo, possibilitando assim um rodízio de funcionamento e também a possibilidade de manutenção sem interrupção de operação em caso de algum problema identificado em uma das bombas.

Figura 10 - Bomba KWP-Bloc



Fonte: (KSB GROUP, 2020).

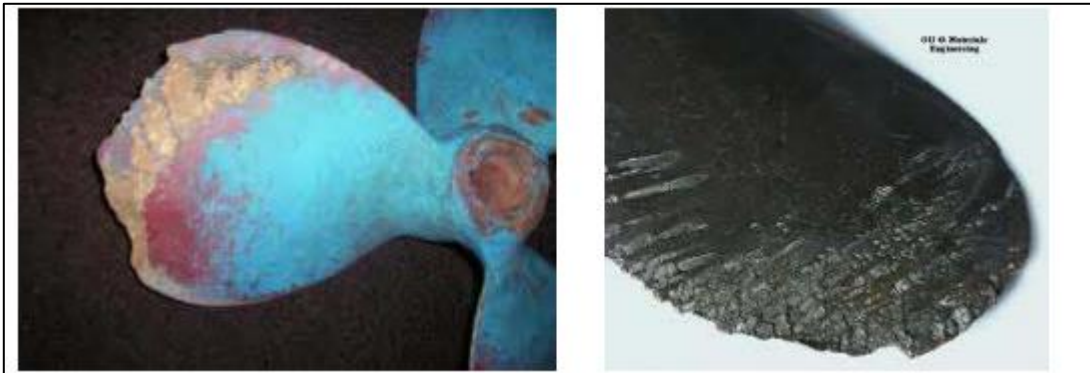
Contudo, calculou-se a Potência teórica requerida (Equação 14) a fim de averiguação:

$$P = \frac{h_m * Q_b}{75 * \eta} \quad (14)$$

$$P = \frac{11,95 * 112,57}{75 * 0,6615} = 27,11 \text{ cv} = 19,94 \text{ kW} = 26,74 \text{ HP}$$

Sistemas de bombeamento mal dimensionados podem perder a eficiência ao passar dos anos, fato esse devido a critérios definidos erroneamente, como a escolha de bombas incorretas, ou a ocorrência de cavitação (GANZ, 2012). A cavitação é um grande problema na operação de bombas, pois danifica as pás do sistema devido a presença de bolhas de gás que se chocam violentamente com a superfície destas pás (Figura 11).

Figura 11 - Dano causado por cavitação a sistemas de bombeamento



Fonte: Ganz (2012).

Para evitar este problema se fez necessário o cálculo do *Net Positive Suction Head* disponível ($NPSH_d$), que em tradução livre significa Carga Livre de Sucção, este critério está ligado diretamente a possível formação ou não de bolhas de gases dentro do sistema de sucção. Se o $NPSH_d$ for maior do que o *Net Positive Suction Head* requerido ($NPSH_r$) então não haverá a formação de bolhas de gases e conseqüentemente não haverá cavitação.

Para este cálculo foram considerados alguns parâmetros como:

- Pressão Atmosférica local para a cidade de Londrina (H_a) – 94,12 kPa ou ainda 9,60 mca (INPE, 2020);
- Perda de carga na sucção (H_f) – Desprezível;
- Distância vertical da superfície do líquido dentro do tanque de abastecimento até a linha de centro da bomba (H_z) – 0,85 m (considerando 0,5 m de submersão do sistema a fim de evitar a formação de vórtices);
- Pressão de vapor da água a 20°C (H_{vp}) – 2,346 Pa ou ainda 0,23 mca; e
- $NPSH_r$ fornecido pela fabricante da bomba – 3,75 mca (KSB GROUP, 2020).

Ganz (2012) define que o cálculo para o $NPSH_d$ de bombas não afogadas segue a Equação 15:

$$NPSH_d = H_a - H_z - H_f - H_{vp} \quad (15)$$

$$NPSH_d = 9,60 - 0,85 - 0 - 0,23 = 8,52 \text{ mca}$$

Portanto:

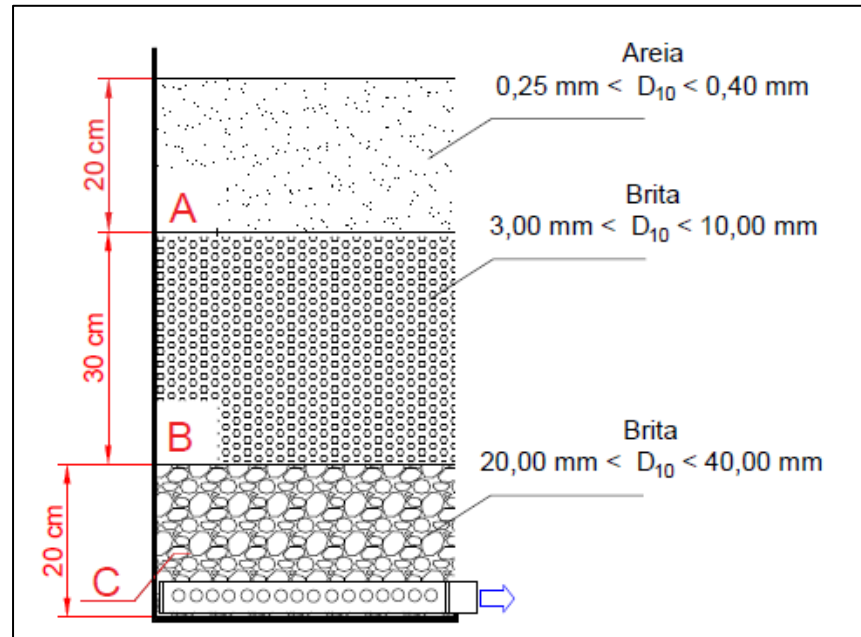
$$NPSH_d (8,52 \text{ mca}) > NPSH_r (3,75 \text{ mca})$$

Logo, conclui-se que não haverá cavitação no sistema sugerido.

5.2 SISTEMA WCFV

A área de projeto dimensionada foi de 5.500,00 m², com 40 m de largura e 137,5 m de comprimento. Já a profundidade adotada do tanque foi de 0,70 m, composta por três camadas distintas de material substrato. A camada mais profunda possui 0,20 m e é composta de britas nº 2 com granulometria entre 20 mm e 40 mm. A camada intermediária possui 0,30 m e é composta por britas nº 0 de granulometria menor em comparação a camada mais inferior, 3 mm e 10 mm, aumentando assim a área de superfície desse substrato. Já a camada superior é composta por areia média (0,25 mm > D₁₀ > 0,40 mm) a fim de promover uma fixação inicial para as mudas ali inseridas e possui uma profundidade de 0,20 m (Figura 12).

Figura 12 - Esquema representativo dos substratos utilizados para o sistema de WCFV



Fonte: Autoria própria (2020).

Segundo Harty (2017), para WCFV, a granulometria do substrato de base (região mais profunda) deve ser superior às outras camadas permitindo assim uma boa drenagem do efluente na saída do sistema. É importante ainda que o material filtrante nas camadas superiores possua uma granulometria adequada para a fixação das plantas escolhidas, permitindo assim o correto desenvolvimento da zona de raízes.

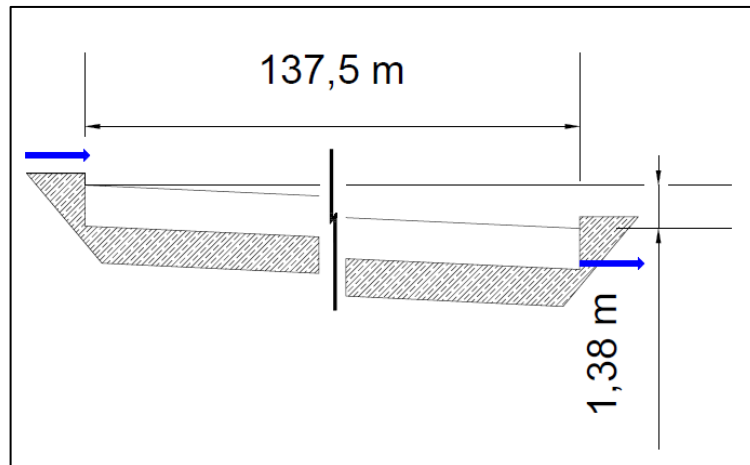
Vale ressaltar que existem outros tipos materiais que servem como substrato para o meio filtrante, como seixos, rochas de diâmetros variados, materiais sintéticos fabricados a partir de derivados do petróleo e até mesmo solo. É importante ressaltar que muito se tem pesquisado sobre o uso de materiais reciclados como substrato no tratamento e pós tratamento de efluentes por WC, há registros do uso de Resíduos da Construção Civil triturados e também do uso de garrafas pets (PITALUGA, 2011; SEZERINO et al., 2018). Contudo, é imprescindível que o material escolhido tenha uma boa condutividade hidráulica a fim de garantir uma boa drenagem, e ainda, que haja uma superfície adequada para o desenvolvimento e fixação de biofilmes bacterianos (HARTY, 2017; MACHADO et al., 2017; MASI et al., 2000).

Entretanto, muitos projetistas tendem à escolha da areia e de britas como meio filtrante na concepção de sistemas de WC. Isso se dá pelo fácil acesso a esses materiais, presentes em grande quantidade na natureza e com jazidas distribuídas em todo o território brasileiro, e também pelo baixo custo envolvido na aquisição e transporte destes materiais (PITALUGA, 2011).

A declividade adotada em projeto pode variar entre 0,5% a 2% (BRIX; ARIAS, 2005; DALBOSCO, 2016; HARTY, 2017), a fim de proporcionar um escoamento subsuperficial efetivo resultando numa boa drenagem de efluentes.

O valor escolhido para a declividade deste projeto foi de 1%, ou ainda $0,01 \text{ m.m}^{-1}$, o que representa uma diferença de 1,38 metros entre as extremidades do sistema (Figura 13).

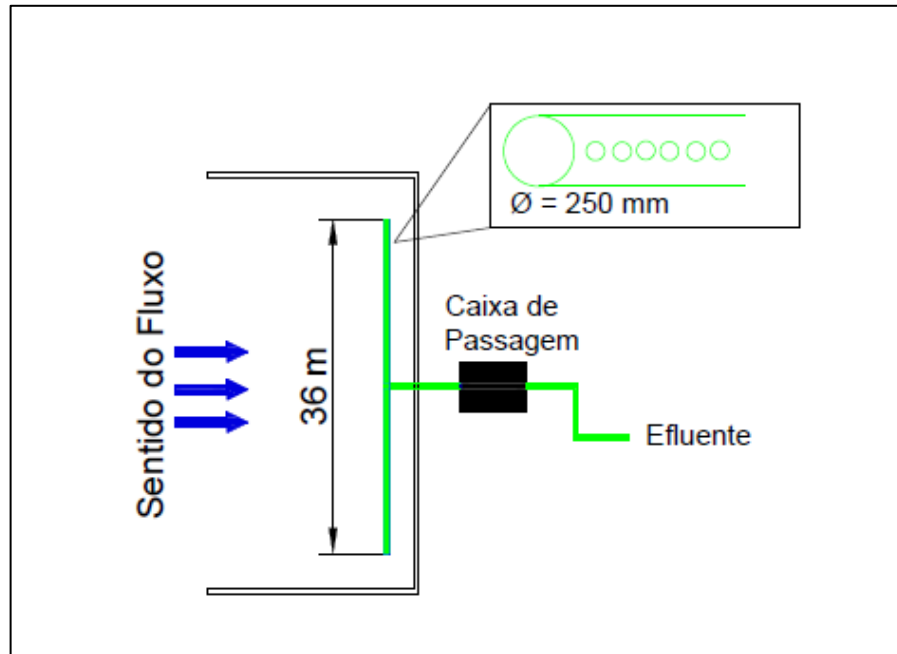
Figura 13 – Esquema da variação de altura do início e fim do WCFV



Fonte: Autoria própria (2020).

Para o sistema de drenagem do efluente tratado adotou-se o mesmo diâmetro de alimentação para os canos, 250 mm, contando com furos de 2 cm de diâmetro com espaçamento de 1 cm entre cada furo em ambos os lados do cano. O esquema do sistema de drenagem, para fácil compreensão, encontra-se na Figura 14.

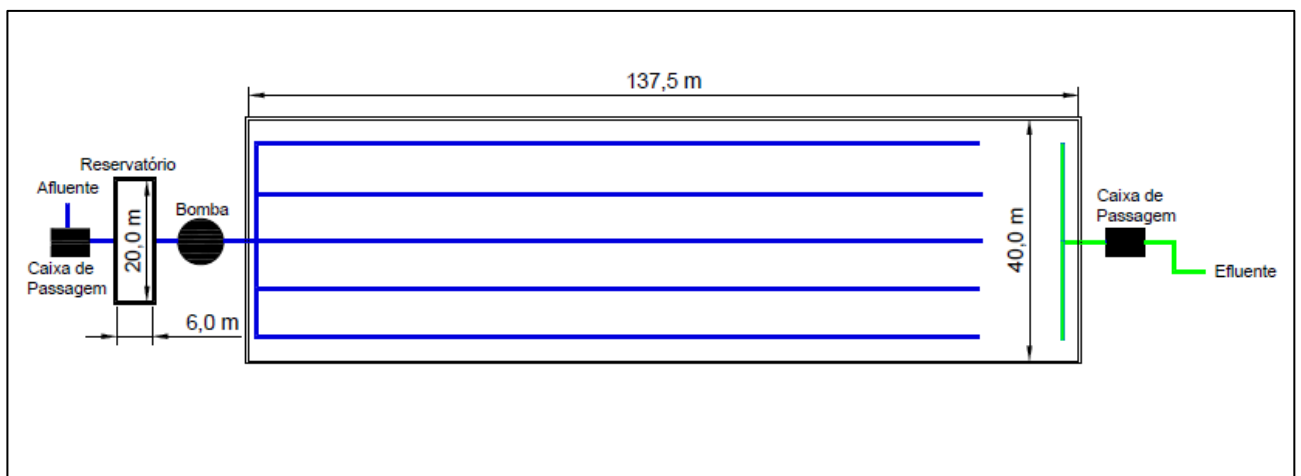
Figura 14 - Esquema do sistema de drenagem



Fonte: Autoria própria (2020).

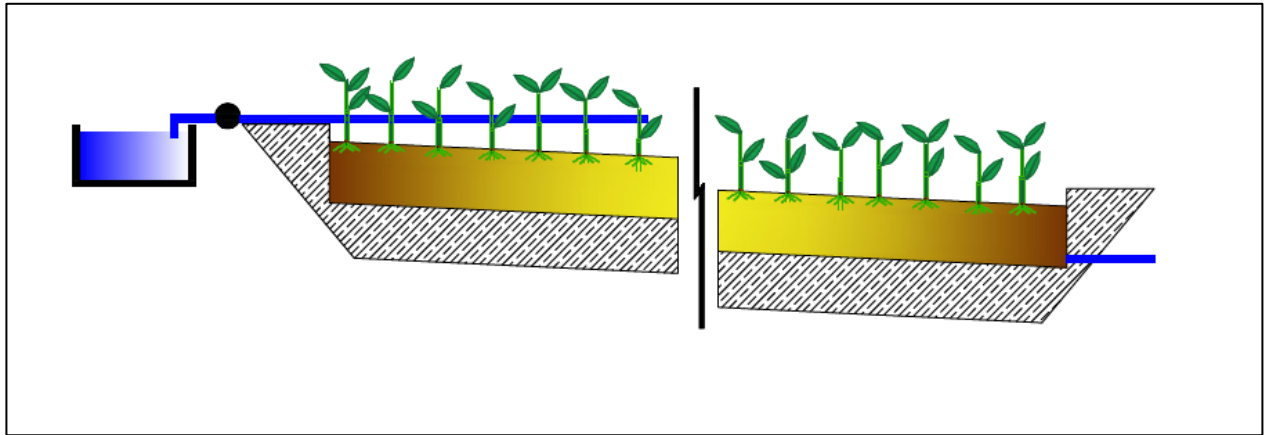
Para o contínuo monitoramento tanto do afluente ao sistema quanto do efluente de saída, o projeto conta ainda com uma caixa de passagem prévia ao reservatório e outra após o WCFV para futuras coletas de amostras (Figuras 15 e 16).

Figura 15 - Vista superior ao sistema WCFV



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 16 -Vista lateral do sistema de WCFV



Fonte: Autoria própria (2020).

Rodrigues (2016) sugere que para sistemas WC usando a *Heliconia Rostrata* a razão número de mudas por metro quadrado ideal é de 6 mudas.m⁻². Contudo alguns autores divergem acerca desse valor, variando entre 3 a 8 mudas dependendo do clima da região assim como da espécie utilizada (HARTY, 2017; KOOTTATEP et al., 2001; RODRIGUES, 2016). Adotou-se para este sistema em questão a relação 4 mudas.m⁻² (Figura 17).

O WCFV deverá ser escavado, respeitando as dimensões projetadas de área e volume. É importante que essa etapa seja executada com precisão, pois uma declividade incorreta pode gerar grandes problemas de drenagem assim como uma possível ineficiência do sistema.

Após a escavação é imprescindível que haja a impermeabilização do tanque destinado ao sistema de WCFV. Existem no mercado diversos tipos de materiais voltados a impermeabilização, os principais sendo derivados de petróleo.

Para este projeto adotou-se o uso de manta de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com uma espessura de 2 mm, que deve ser soldada em seus limites, evitando assim qualquer falha no material posicionada acima de uma camada de solo compactado com o coeficiente de permeabilidade de $1 \times 10^{-5} < k < 1 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$. O valor de k adotado é usado para a compactação de solos para a construção de Aterros Sanitários em áreas onde o lençol freático é menor que 1,5 m, essa compactação impede a infiltração do fluido resultante da decomposição da matéria orgânica, portanto é indicada para impedir a

infiltração do efluente no solo abaixo do WCFV (ABNT, 2010). Sobre a manta de PEAD adota-se também uma lona plástica de dupla camada a fim de proteger a manta de possíveis atritos com o meio suporte e possíveis fissuras.

O descarte do efluente no corpo hídrico se dá por um cano de PVC de 250 mm, o efluente é liberado sobre uma série de degraus construídos em concreto para promover uma oxigenação do mesmo, possibilitando assim um menor impacto ao corpo hídrico receptor.

A precificação do sistema WCFV pode variar de acordo com a região de interesse, isso devido a variação nos valores das matérias primas utilizadas, variação no preço da hora trabalhada para a máquina de escavação além também dos requisitos de área (RODRÍGUEZ MIRANDA; GARCÍA-UBAQUE; PENAGOS LONDOÑO, 2015). O modelo apresentado neste trabalho é indicado para empreendimentos que desejem alcançar taxas maiores de remoção de poluentes de seus efluentes a fim de alcançar padrões de lançamento determinados por legislações nacionais, como a Resolução CONAMA 430, e também resoluções estaduais, regionais e municipais.

5.3 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Alguns aspectos devem ser considerados durante a etapa de implantação do WCFV:

- Ao transplantar as mudas de *Heliconia Rostrata*, é necessário que seja garantido o menor estresse ao sistema vegetativo;
- Adote mudas de indivíduos já acostumados com o clima da região e transplante os mesmos em período chuvoso. Essa etapa deve ser realizada com pelo menos 30 dias prévios a alimentação com o efluente de cervejaria;
- Prefira plantar indivíduos jovens, pois a melhor taxa de remoção de poluentes é na etapa de crescimento das macrófitas; e
- O sistema de tratamento deve ser aclimatado, ou seja, o afluente deve ser levemente diluído a princípio e com menores taxas de alimentação do que a projetada, por pelo menos 15 dias. Após esse período o sistema estará pronto para operar como dimensionado;

O funcionamento do WCFV está ligado diretamente com o afluente ao sistema, por isso é importante monitorar as características físico-químicas do mesmo, adotando sempre medidas de correção no sistema de tratamento antecedente ao pós-tratamento caso necessário. Os fatores que devem sempre monitorados são:

- DBO e DQO;
- pH;
- Temperatura;
- Série de sólidos (principalmente sólidos suspensos);
- Série nitrogenada; e
- Ortofosfatos.

O monitoramento do efluente de saída também deve ser realizado a fim de verificar a eficiência do sistema de pós-tratamento.

É importante ressaltar que o sistema adotado tem baixo custo de manutenção, contudo, esse custo não é nulo. É necessário que num intervalo de 30 a 40 dias haja poda do sistema, incentivando assim que o sistema vegetativo continue a produzir biomassa removendo poluentes do efluente. Durante a poda, é necessário que se remova os indivíduos mais velhos devido a sua baixa eficiência de remoção de nutrientes. Sugere-se também que haja o controle da densidade de indivíduos invasores, como ervas daninhas por exemplo, que podem vir a ser prejudiciais ao sistema de plantas escolhido podendo até suprimir a presença de macrófitas.

Toda a biomassa removida do sistema de WCFV deve passar por um processo de compostagem nas próprias dependências do empreendimento, ou então direcionadas para um aterro sanitário licenciado para esta atividade.

Outro cuidado muito importante é a manutenção preventiva do sistema de alimentação e do sistema de drenagem, ocorrendo vistorias semanais do funcionamento de todos os equipamentos hidráulicos, além de vistorias anuais de verificação de acumulação de lodo no reservatório.

5.4 REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA, NITROGÊNIO E FÓSFORO

O sistema projetado possui o valor teórico de eficiência de remoção de matéria orgânica de 80%, considerando todos os critérios de área, demanda de oxigênio e carga aplicada. A eficiência real se apresentou bem próxima da teórica em sistemas desenvolvidos em outros estudos, podendo variar levemente de acordo com as macrófitas usadas e o microclima da região em questão (MOURÃO, 2017; PLATZER, 1999; SEZERINO, 2006; SILVA, 2007). Portanto, considerando uma eficiência de remoção de MO de 80%, espera-se alcançar 54,20 mg.L⁻¹ de concentração média de DBO_{5,20} atendendo portanto a Resolução CONAMA 430.

Entretanto, existem legislações regionais que podem ser mais restritivas que a Resolução CONAMA 430. É o caso da Portaria IAP nº256/13 e do Decreto nº 8.468/76 da CETESB (Tabela 6), que são legislações estaduais adotadas para o estado do Paraná e de São Paulo respectivamente.

Tabela 6 - Resumo de legislações atendidas.

Legislação	Descrição	Veredito
Resolução CONAMA 430/11	Redução mínima de 60%.	Atende sem a necessidade de pós-tratamento.
Portaria IAP Nº 256/13	Para 33,77m ³ /h, 75 a 150 kg DBO ₅ por dia.	Após a implantação do sistema de pós-tratamento por Wetlands passa a atender.
DECRETO Nº 8.468/76 (CETESB)	60 mg/L ou redução de 80%.	Atende os 60 mg/L estabelecidos.
RESOLUÇÃO CEMA 070/09	50 mg/L de DBO ₅	Após o pós-tratamento se aproxima, contudo, ainda não alcança o padrão de lançamento.

Fonte: Autoria própria (2020).

Contudo, El-Khateeb et al. (2009) constataram uma eficiência de 66,6% para a redução de DBO_{5,20} e 53% para a redução de DQO na cidade do Cairo no Egito. O efluente tratado nesta ocasião foi uma mistura entre esgoto sanitário e efluente

proveniente de indústrias da região, onde o mesmo era pré-tratado por um sistema *Up flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB).

Acerca da remoção de Nitrogênio total, vale ressaltar que para o tratamento de efluente de cervejaria em sistemas de WC ainda não há estudos que mostrem a eficiência de remoção de nitrogênio. Contudo, Nunes (2018) observou que, para o esgoto doméstico gerado em um restaurante universitário na cidade de Londrina, houve uma redução média de 56,4%. Entretanto, espera-se que a redução de nitrogênio seja relativamente baixa devido ao pré-tratamento aplicado ao efluente estudado na lagoa facultativa onde há nitrificação e desnitrificação.

Espera-se que o sistema projetado tenha alta eficiência na remoção de fosfatos devido a precipitação e adsorção do mesmo no meio filtrante, como apontam Nunes (2018) e Kim et al. (2015).

6. CONCLUSÃO

Com base nos critérios definidos por Platzer (1999) e Sezerino (2006), foi possível realizar o dimensionamento de um sistema de Pós-Tratamento de efluente de cervejaria por um *Wetlands* Construído de Fluxo Vertical.

O sistema projetado possui grandes requisitos de área, como demonstrado nos cálculos, o que pode ser um problema caso o empreendimento não conte com o espaço necessário o que tornaria necessário a aplicação de outras tecnologias. Contudo, havendo a disponibilidade de requisitos de área e interesse no investimento para a adoção desta tecnologia, o projeto se mostra vantajoso devido a simplicidade na operação, baixa periodicidade de manutenção e acima de tudo baixos custos envolvidos na operação.

Os custos de operação e manutenção envolvem a energia elétrica consumida pelo sistema de bombeamento, contratação de um operador para a manutenção da planta e o custo envolvido na destinação da biomassa retirada do sistema no período de poda. Em contrapartida outras tecnologias exigiriam outros gastos, como a contratação de mais operadores, manutenções mais rotineiras além de custos envolvidos com os maquinários envolvidos.

As eficiências teóricas esperadas são compatíveis com sistemas amplamente utilizados, como reatores aeróbios. Os padrões de lançamentos definidos em legislação, principalmente a DQO do efluente de saída, são atendidos pelo sistema projetado o que impacta não só na preservação do meio ambiente, mas também na imagem Sustentável do empreendimento em questão.

O tempo de vida do sistema está diretamente associado à sua operação, em boas condições de operação a vida útil do sistema pode ultrapassar 15 anos de funcionamento. A limpeza do sistema pode se mostrar necessária após os 15 anos de tempo de vida, limpeza esta composta pela remoção do lodo acumulado no meio filtrante, britas e areia. Contudo a substituição do material pode, ou não, ser necessária dependendo das condições de conservação do mesmo.

Por fim, conclui-se que o sistema de WCFV projetado é uma boa alternativa para o pós-tratamento de efluente de cervejaria.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15849. 2010.

BLAZEJEWSKI, R.; MURAT-BLAZEJEWSKA, S. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow. **Water Science and Technology**, v. 5, p. 183–188, 1997.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005**. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. **Resolução CONAMA 430 de 13 de maio de 2011**. Brasília, DF, 2011.

BRIX, H. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands System Design, Removal Processes and Treatment Performance. **Constructed Wetlands for Water Quality Improvement**, p. 9–22, 1993.

BRIX, H. Plants Used in Constructed Wetlands and their Functions. p. 8–10, 2003.

BRIX, H.; ARIAS, C. A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 5, p. 491–500, 2005.

DALBOSCO, V. Projeto de concepção de um sistema de Wetlands construídos em modelo francês na cidade de Nova Trento - SC. **Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 94, 2016.

DUPOLDT, C. et al. **A Handbook of Constructed Wetlands**. Davis, Lui ed. [s.l: s.n.]. v. 1

EL-KHATEEB, M. A. et al. Use of wetlands as post-treatment of anaerobically treated effluent. **Desalination**, v. 245, n. 1–3, p. 50–59, 2009.

FIA, F. R. L. et al. Remoção de nutrientes por *Typha latifolia* e *Cynodon* spp. cultivadas em sistemas alagados construídos. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

GANZ, S. Cavitation : Causes , Effects , Mitigation and Application by. 2012.

HARTY, F. **Permaculture guide to Reed Beds. Designing, building and planting your treatment wetland system**. 1. ed. Hampshire: Permanent Publications, 2017.

HES, E. M.; VAN DAM, A. A. Modelling nitrogen and phosphorus cycling and retention in *Cyperus papyrus* dominated natural wetlands. **Environmental Modelling & Software**, v. 122, n. October, p. 104531, 2019.

HUA, G. et al. Influence of clogging and resting processes on flow patterns in vertical flow constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 1142–1150, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Condições Meteorológicas da Cidade de Londrina**. Disponível em: <<https://tempo1.cptec.inpe.br/cidades/tempo/2993>>. Acesso em: 20 out. 2020.

JUNIOR, G. L. S. **Tratamento Biológico de Efluentes**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

KANT, S. Understanding nitrate uptake, signaling and remobilisation for improving plant nitrogen use efficiency. **Seminars in Cell and Developmental Biology**, v. 74, p. 89–96, 2018.

KIM, B. et al. Influence of the water saturation level on phosphorus retention and treatment performances of vertical flow constructed wetland combined with trickling filter and FeCl₃ injection. **Ecological Engineering**, v. 80, p. 53–61, 2015.

KOOTTATEP, T. et al. Potentials of vertical-flow constructed wetlands for septage treatment in tropical regions. **Science And Technology**, p. 315–323, 2001.

KSB GROUP. **KSB EasySelect®**. Disponível em: <<https://www.ksb.com/ksb-en/>>.

MA, Y. et al. Plant uptake in subsurface wastewater infiltration systems plays an important role in removing nitrogen from sewage. **Ecological Engineering**, v. 123, n. August, p. 193–201, 2018.

MACHADO, A. I. et al. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 187, p. 560–570, 2017.

MADIGAN, M. T. et al. **Microbiologia de Brock**. 12. ed. Porto alegre: ARTMED EDITORA SA, 2010.

MASI, F. et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in Italy: State-of-the-art and obtained results. **Proc. of the 7th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Orlando**, n. January, p. 979–985, 2000.

MASI, F. **Constructed Wetland for Wastewater treatment**. 2004.

MBURU, C.; KIPKEMBOI, J.; KIMWAGA, R. Impact of substrate type, depth and retention time on organic matter removal in vertical subsurface flow constructed wetland mesocosms for treating slaughterhouse wastewater. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, n. April 2017, p. 1–11, 2019.

MBURU, N. et al. **The rol of natural and constructed wetlans in nutrient cycling and retention on the landscape**. [s.l: s.n.].

METCALF AND EDDY, I. **Wastewater Engineering treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MIRANDA, S. T. et al. Influence of the substrate type and position of plant species on clogging and the hydrodynamics of constructed wetland systems. **Journal of Water Process Engineering**, v. 31, n. February, p. 100871, 2019.

MONTEIRO, R. C. DE M. **Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo “wetlands” para tratamento de água cinza visando o reúso não potável** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Campinas: [s.n.].

MOSCA, J. L. **Helicônia: Descrição, Colheita e Pós-Colheita**. Fortaleza: [s.n.].

MOURÃO, J. R. **Avaliação da eficiência de uma wetland construída no pós-tratamento de efluentes** XXV Congresso de Iniciação Científica da Unicamp. Campinas: [s.n.].

NUNES, A. S. **Remoção de Nutrientes em Wetland Construído do tipo Francês**. Londrina, PR: [s.n.].

PITALUGA, D. P. DA S. **Avaliação de diferentes substratos no tratamento de esgoto sanitário por zona de raízes**. Goiânia: [s.n.].

PLATZER, C. Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. **Water Science and Technology**, v. 40, p. 257–263, 1999.

PROCHASKA, C. A.; ZOUBOULIS, A. I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. **Ecological Engineering**, v. 26, n. 3, p. 293–303, 2006.

RISSARDO, I. D. O. et al. **EFLUENTE DE CERVEJARIA TRATADO POR ELETROCOAGULAÇÃO**. p. 3–8, 2019.

RODRIGUES, M. V. C. **Wetland Construído De Fluxo Vertical Empregado No Tratamento de Esgoto de um Restaurante Universitário**. p. 88, 2016.

RODRÍGUEZ MIRANDA, J. P.; GARCÍA-UBAQUE, C. A.; PENAGOS LONDOÑO, J. C. Analysis of the investment costs in municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca. **Dyna**, v. 82, n. 192, p. 230–238, 2015.

SARMENTO, A. P.; BORGES, A. C.; DE MATOS, A. T. Effect of cultivated species and retention time on the performance of constructed wetlands. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 34, n. 8, p. 961–965, 2013.

SCHOLZ, M. et al. Integrated Constructed Wetlands assessment and design for phosphate removal. **Biosystems Engineering**, v. 97, n. 3, p. 415–423, 2007.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (Constructed Wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical.** [s.l: s.n.].

SEZERINO, P. H. et al. **Wetlands Construídos Aplicados No Tratamento de Esgoto Sanitário.** 1. ed. Tubarão: Ministério da Saúde, 2018.

SILVA, S. C. DA. **“Wetlands Construídos” De Fluxo Vertical Com Meio Suporte De Solo Natural Modificado No Tratamento De Esgotos Domésticos.** Brasília: [s.n.].

SILVESTRE, A.; PEDRO-DE-JESUS, M. **Tratamento de Águas Residuárias Domésticas em Zonas Húmidas Artificiais.** [s.l: s.n.].

SUTHERSAN, S. **Constructed Treatment Wetlands. Natural and Enhanced Remediation Systems,** 2001.

U.S. EPA. **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.** n. September, p. 165, 2000.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgoto.** 2. ed. Belo Horizonte: [s.n.].

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: SEGRAC, 2005.

VYMAZAL, J. **Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. Ecological Engineering,** v. 73, p. 724–751, 2014.

YANG, M. et al. **Effects of clogging on hydraulic behavior in a vertical-flow constructed wetland system: A modelling approach. Ecological Engineering,** v. 109, n. April, p. 41–47, 2017.

YANG, Y. et al. **Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. Bioresource Technology,** v. 261, n. February, p. 441–452, 2018.