

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Nº 239

P

P

E

Q

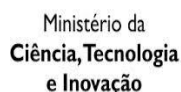


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DIMENSIONAMENTO DE WETLAND CONSTRUÍDO PARA
SEPARAÇÃO ÁGUA-DERIVADOS DE PETRÓLEO**

Laís Alexandre Nascimento

Orientadores: Prof. Dr. Mohand Benachour
Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos



PROGRAMA UFPE/DEQ-PRH28-ANP/MCT

Engenharia do Processamento Químico do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

**Título da Especialização com Ênfase no Setor Petróleo e Gás:
*Desenvolvimento de Processos Químicos do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis***



Dimensionamento de *Wetland* Construído para separação água-derivados de petróleo

Laís Alexandre Nascimento

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientadores

Prof Dr. Mohand Benachour

Prof Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

FEVEREIRO, 2016

LAÍS ALEXANDRE NASCIMENTO

**DIMENSIONAMENTO DE *WETLAND* CONSTRUÍDO PARA
SEPARAÇÃO ÁGUA-DERIVADOS DE PETRÓLEO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de pesquisa: Tecnologia de Petróleo e Gás Natural

Orientadores: Prof. Dr. Mohand Benachour
Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Recife-PE
Fevereiro/2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

N244d Nascimento, Laís Alexandre.

Dimensionamento de wetland construído para separação água-derivados de petróleo / Laís Alexandre Nascimento. – 2017.

68 f.: il., fig. tab.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Coorientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Química. 2. Tratamento de efluentes. 3. Áreas alagadas artificiais. 4. CFD. 5. Adição de microbolhas. 6. Coletor regulável de óleo. 7. Efluentes oleosos. I. Benachour, Mohand (Orientador). II. Santos, Valdemir Alexandre (Coorientador). III. Título.

660.2 CDD (22. Ed.)

UFPE/BCTG/2017-262

LAÍS ALEXANDRE NASCIMENTO

**DIMENSIONAMENTO DE WETLAND CONSTRUÍDO PARA
SEPARAÇÃO ÁGUA-DERIVADOS DE PETRÓLEO**

Linha de Pesquisa: Engenharia Ambiental

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 25 de Fevereiro de 2016 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Mohand Benachour/DEQ-UFPE
(Orientador)

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos/DEQ-UNICAP
(Co-orientador)

Prof. Dr. José Geraldo de Andrade Pacheco Filho/DEQ-UFPE
(Examinador Interno)

Prof^a. Dr^a. Maria de Los Angeles Perez Palha/DEQ-UFPE
(Examinadora Externa)

Prof^a. Dr^a. Otidene Rossiter Sá da Rocha/DEQ-UFPE
(Examinadora Externa)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Eliane Alexandre e
Luiz Carlos, pelo eterno apoio e amor.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por serem a base da minha vida e por dedicarem a mim todo o amor do mundo, principalmente aos meus pais Eliane e Luiz Carlos, que me apoiaram em todos os momentos e que vão continuar me acompanhando por onde eu for.

Ao meu noivo Igor, por todo o companheirismo e amor em todos esses anos, principalmente durante o Mestrado, um dos momentos que mais precisei.

Às minhas amigas, companheiras nas horas mais tensas da minha vida acadêmica, por fazerem estressantes momentos de estudo em gargalhadas maravilhosas: Brígida Villar, Jokderléa Corrêa, Natália Trindade e Nathália Padilha.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Mohand Benachour e Prof. Dr. Valdemir Alexandre, por todo apoio, incentivo e orientação dados durante a pesquisa. Sem vocês esse projeto não seria possível.

À Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, pelo aprendizado e apoio obtidos ao longo deste Mestrado.

Ao Centro de Gestão Tecnologia e Informação (CGTI), por tornar viável este projeto.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP e à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao PRH-28, do Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Grande consumidor de água, o setor industrial tem adotado práticas que minimizem os impactos nos recursos hídricos. Entre essas, o tratamento de efluentes garante que águas residuárias sejam corretamente descartadas e reutilizadas. Constantemente presentes nas atividades industriais, os derivados de petróleo compõem efluentes líquidos tóxicos, produzidos em larga escala. Águas residuárias com concentrações de óleos e graxas representam grande preocupação ambiental devido ao seu alto poder degradante e à dificuldade de separação água-óleo, além de serem nocivas à saúde do ser humano. *Wetlands* construídos, ou áreas alagadas artificiais, destacam-se no tratamento de efluentes oleosos, por possuírem uma tecnologia contendo mecanismos físicos, químicos e biológicos capazes de retirarem resíduos de óleo. Entre as possíveis adaptações, a adição de microbolhas apresenta grandes melhorias ao sistema, incluindo aumento da separação física e fornecimento de oxigênio. Neste trabalho avaliou-se o aumento na eficiência do tratamento de efluentes oleosos em *wetlands* construídos aerados (com adição de microbolhas). Foram realizadas simulações fluidodinâmicas dos protótipos, com e sem injetores de microbolhas, com auxílio do *software* ANSYS Versão 15, além de experimentos práticos, comparando as concentrações iniciais e finais de óleo lubrificante no efluente, auxiliado por monitoramento de parâmetros como número de Reynolds, tempo máximo de exposição ao óleo e tempo de poda. As simulações demonstraram que a flotação causada pela adição de microbolhas no *wetland* piloto foi capaz de proporcionar uma melhor separação da fração oleosa do efluente. Os tempos de poda e de máxima exposição proporcionaram melhores condições de operação. Os resultados dos testes experimentais no *wetland* construído sem microbolhas demonstraram que foi atingida uma redução de concentração volumétrica da fase oleosa de 22,16%, enquanto que o protótipo aerado apresentou uma redução de 74,41%, resultando em um efluente com concentração de óleos e graxas inferior ao limite de 20 mg/L exigido pela Resolução CONAMA 430/2011. Portanto, foi possível concluir que a adição de microbolhas proporcionou um aumento significativo na eficiência do tratamento de águas oleosas em *wetlands* construídos. Visando manter o nível de óleo na superfície do *wetland* em condições de sobrevivência das macrófitas flutuantes, foi elaborado um coletor regulável de óleo, o qual, juntamente com a inclusão da injeção de microbolhas deram origem a uma solicitação de patente para essa inovação tecnológica.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes. Áreas alagadas artificiais. CFD. Adição de microbolhas. Coletor regulável de óleo. Efluentes oleosos.

ABSTRACT

The industrial sector, one of the largest consumers of water, has been adopting efficient ways to minimize their impact on the environment. Among them is the wastewater treatment, which allows that the water is properly discarded and reused. Constantly present in industrial activities, petroleum derivatives which contain toxic effluents are produced on a large scale. Oily wastewater represents a large environmental concern due to its degrading power and the difficulty of water-oil separation, in addition to being harmful to the human's health. Constructed wetlands are highlights in the treatment of oily wastewater, by having a technology containing physical, chemical and biological mechanisms capable of withdrawing oily waste. Among the possible adjustments, the addition of microbubbles shows great improvements to the system, including an increased physical separation and supply of oxygen. The aim of this study was to evaluate a possible increase in treatment efficiency of oily wastewater in constructed wetlands with addition of microbubbles. Fluid dynamic simulations of the prototypes were performed with and without microbubbles in ANSYS Version 15, in addition to practical experiments comparing the initial and final concentrations of lubricating oil, following parameters such as Reynolds number, maximum exposure to oil and pruning time. Simulations showed that the flotation caused by microbubbles addition would be able to provide better separation of the oily fraction of the effluent. The pruning and maximum exposure times allowed better operations conditions. The results of experimental tests at the constructed wetland without microbubbles demonstrate a reduction of 22.16%, while the aerated prototype decreased the oil concentration by 74.41%, resulting in an effluent with a concentration of oil and grease under the limit of 20 mg/L of Brazilian legislation CONAMA 430/2011. Therefore, it was possible to conclude that the addition of microbubbles provided a significant increase in the efficiency of treatment of oily wastewater with constructed wetlands. To keep the oil level in the wetland surface in living conditions of the floating macrophytes, was designed an adjustable oil collector, which, together with the inclusion of microbubbles injection, resulted in a patent application for this technological innovation.

Keywords: Wastewater treatment. Artificial wetlands. CFD. Addition of microbubbles. Adjustable oil collector. Oily wastewater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	<i>Wetland</i> construído horizontal com escoamento subsuperficial.....	17
Figura 2	<i>Wetland</i> construído com escoamento superficial.....	18
Figura 3	<i>Eichhornia crassipes</i>	20
Figura 4	Isométrico em SolidWorks do protótipo de <i>wetland</i> construído.....	31
Figura 5	Distribuidor de fluxo do efluente no <i>wetland</i> piloto.....	32
Figura 6	Geometria do <i>wetland</i> construído piloto com injetores (<i>DesingModeler</i>)	33
Figura 7	Malha hexaédrica gerada para a simulação do <i>wetland</i> construído.....	34
Figura 8	Protótipos do <i>wetland</i> construído preenchidos por macrófitas.....	43
Figura 9	Protótipo preenchido com efluente oleoso.....	43
Figura 10	Injetores de microbolhas instalados na base do <i>wetland</i> construído.....	45
Figura 11	Separação física da água oleosa.....	46
Figura 12	Distribuição de frações volumétricas do óleo no piloto sem microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul).....	49
Figura 13	Frações volumétricas do óleo no protótipo sem microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul).....	50
Figura 14	Distribuição de frações volumétricas do óleo no piloto com microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul).....	51
Figura 15	Frações volumétricas do óleo no protótipo com microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul).....	51
Figura 16	Coletor de óleo livre.....	54
Figura 17	<i>Box plot</i> das concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo sem microbolhas.....	57
Figura 18	<i>Box plot</i> das concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo com microbolhas.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Toxicidade de hidrocarbonetos e respectivos danos ambientais.....	16
Tabela 2	Parâmetros e respectivos valores utilizados na criação da geometria.....	34
Tabela 3	Definições automáticas de itens do <i>Meshing Control</i>	35
Tabela 4	Valores utilizados nas configurações avançadas de curvatura.....	35
Tabela 5	Indicadores de qualidade da malha.....	36
Tabela 6	Propriedades dos fluidos integrantes do sistema <i>wetland</i> construído- microbolhas.....	36
Tabela 7	Condições de contorno utilizadas na simulação do <i>wetland</i> sem microbolhas.....	37
Tabela 8	Condições de contorno utilizadas na simulação do <i>wetland</i> com microbolhas.....	37
Tabela 9	Unidades gerais para as dimensões utilizadas nas equações.....	38
Tabela 10	Separações físicas esperadas para diferentes Números de Reynolds.....	41
Tabela 11	Valores utilizados para determinação do Número de Reynolds.....	52
Tabela 12	Valores utilizados para determinação do tempo necessário para espessura máxima.....	53
Tabela 13	Concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo sem microbolhas.....	55
Tabela 14	Concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo com injetores de microbolhas.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APHA	<i>American Public Health Association</i>
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etil-Benzeno e Xilenos
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
TPH	<i>Total Petroleum Hydrocarbons</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS GREGAS

δ	<i>Delta de Kronecker</i> (matriz identidade)
φ	Porcentagem de óleo no efluente
μ	Viscosidade dinâmica molecular [kg/m.s]
μ_c	Viscosidade dinâmica molecular da fase contínua [kg/m.s]
ρ	Densidade [kg/m ³]
ρ_c	Densidade da fase contínua [kg/m ³]
τ	Tensão de cisalhamento [N/m ²]
Θ	Coeficiente de temperatura [1/K]

LETRAS LATINAS

C	Concentração de resíduo oleoso no efluente [mg/L]
D _H	Diâmetro hidráulico [m]
k	Constante de velocidade de reação de primeira ordem [1/s]
k ₂₀	Constante de velocidade de reação de primeira ordem a 20 °C [1/s]
k _t	Constante de velocidade de reação de primeira ordem dependente da temperatura [1/s]
Q	Vazão Volumétrica do efluente [m ³ /s]
Re	Número de Reynolds
S _M	Somatório das forças de corpo
t	Tempo de retenção hidráulica [s]
U	Vetor velocidade [m/s]
v _c	Velocidade média de escoamento da fase contínua [m/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 EFLUENTES OLEOSOS.....	15
2.2 WETLANDS CONSTRUÍDOS.....	16
2.2.1 Classificação e Processos de Remoção.....	17
2.2.2 <i>Eichhornia crassipes</i>.....	19
2.2.3 Vantagens e Desvantagens do Uso de <i>Wetlands</i> Construídos.....	20
2.3 DIMENSIONAMENTO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS.....	22
2.3.1 Histórico Geral do Uso de <i>Wetlands</i> Construídos.....	22
2.3.2 Modelos Cinéticos.....	22
2.3.3 Adaptações.....	24
2.3.3.1 Analogia entre <i>Wetlands</i> Construídos e Decantadores Horizontais Contínuos.....	24
2.3.3.2 Adição de Microbolhas.....	25
2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (<i>COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS - CFD</i>).....	26
2.4.1 Aplicação de CFD no Dimensionamento de <i>Wetlands</i> Construídos.....	28
2.5 USO DO BOX PLOT NA ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO.....	31
3.2 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS PROTÓTIPOS DE WETLAND CONSTRUÍDO.....	32
3.2.1 Criação da Geometria.....	33
3.2.2 Geração de Malha.....	34
3.2.3 Configurações CFX-Pre.....	36
3.2.3.1 Equações Aplicadas no Desenvolvimento da Simulação.....	37
3.2.4 CFX-Solver Manager e CFD-Post.....	39
3.3 CRITÉRIOS DE OPERAÇÃO.....	39
3.3.1 Regime de Escoamento.....	40

3.3.2 Tempo de Exposição das Macrófitas ao Óleo.....	41
3.3.3 Tempo de Poda.....	41
3.4 EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO.....	42
3.5 EXPERIMENTOS NO WETLAND CONSTRUÍDO SEM MICROBOLHAS.....	42
3.6 PRODUÇÃO E INJEÇÃO DE MICROBOLHAS NO PROTÓTIPO PILOTO.....	44
3.7 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ÓLEO.....	45
3.7.1 Análise das Amostra de Água Oleosa.....	45
3.7.2 Coeficientes de Remoção e Eficiência.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS PROTÓTIPOS.....	49
4.1.1 Simulação do <i>Wetland</i> Construído Piloto sem Microbolhas.....	49
4.1.2 Simulação do <i>Wetland</i> Construído Piloto com Microbolhas.....	50
4.2 NÚMERO DE REYNOLDS.....	52
4.3 TEMPO DE EXPOSIÇÃO MÁXIMA.....	53
4.3.1 Coletor de Óleo.....	54
4.4 TEMPO DE PODA.....	55
4.5 TESTES EXPERIMENTAIS NO WETLAND CONSTRUÍDO PILOTO SEM MICROBOLHAS.....	55
4.6 TESTES EXPERIMENTAIS NO WETLAND CONSTRUÍDO PILOTO COM ADIÇÃO DE MICROBOLHAS.....	57
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.1 CONCLUSÕES.....	60
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A indústria é responsável por cerca de 20% do uso de recursos hídricos disponíveis para o consumo no mundo. A água integra atividades como lavagens de equipamentos e materiais, procedimentos de troca de calor e usos como reagente e solvente. Estas operações provocam alterações nas propriedades da água, transformando-a em efluente, impedindo assim seu reaproveitamento ou descarte adequado (ABDEL-GHANI *et al.*, 2011; UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION, 2014).

Para reduzir os impactos causados pelo elevado consumo de água, as indústrias buscam cada vez mais alternativas na engenharia química e ambiental. O tratamento de efluentes se destaca por ser uma das opções mais desejáveis, visto que possibilita o reuso desses e viabiliza o descarte adequado de águas residuárias tratadas no meio ambiente, atendendo parâmetros exigidos pela legislação vigente (DAMIANOVIC; NERY; PIRES, 2013; HWANG; MOORE, 2011).

Os efluentes contaminados com derivados de petróleo demandam grande atenção devido ao seu alto poder poluente, sendo necessário um tratamento eficiente para a recuperação de sua qualidade. Efluentes oleosos representam grandes riscos à saúde e ao meio ambiente em geral (ASSMAR *et al.*, 2010; SANTOS, 2012; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011).

Os *wetlands* construídos encontram-se entre as opções conhecidas de tratamentos de efluentes oleosos, cuja operação reproduz em um ambiente controlado processos físicos, químicos e biológicos existentes em áreas alagadas naturais. Nestes sistemas, há a retirada dos poluentes através de plantas aquáticas, conhecidas como macrófitas (TÜREC; TÜRKERA; VYMAZAL, 2014). Os *wetlands* construídos podem ser classificados de acordo com o tipo de macrófita e do fluxo escolhido (VYMAZAL, 2010).

As macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes*, conhecidas vulgarmente como aguapé e baronessas, são capazes de remover da água poluída excessos de nutrientes, metais pesados, derivados de petróleo, herbicidas, produtos químicos orgânicos e minerais, o que as tornam um ótimo modelo para o estudo dos efeitos do petróleo e de sua remoção (LOPES; PIEDADE, 2014). O crescimento acelerado dessa espécie a torna conhecida como praga, o que reforça a necessidade de uma utilização do excesso da biomassa produzida que pode ser destinada para

biofertilizantes e biogás, tornando o sistema uma opção sustentável (AGUILAR-GONZÁLEZ *et al.*, 2013; MURPHY; VILLAMAGNA, 2010).

O dimensionamento dos *wetlands* construídos pode ser baseado em analogias com outros equipamentos de separação de fases, de forma a incorporar características destes em sua operação. Alguns incrementos podem ser utilizados para melhorar a capacidade de separação dos *wetlands*. Uma destas adaptações, a adição de microbolhas de ar, pode ser utilizada para aumentar a retenção dos derivados de petróleo próximos à superfície e às raízes das macrófitas. Devido a sua larga utilização como agentes separadores de poluentes, as microbolhas poderão contribuir expressivamente para o tratamento de efluentes oleosos através de *wetlands* construídos (AGARWAL; NG; LIU, 2011).

O objetivo geral deste trabalho foi investigar um possível aumento de eficiência de separação água-óleo com a adição de fluxos de microbolhas em um *wetland* construído dimensionado de forma análoga a um decantador horizontal contínuo, elevando a capacidade de retenção da fase oleosa na superfície do sistema, mas controlando esse teor de óleo em função da condição de máxima exposição da *Eichhornia crassipes*, de 3 L/m² (CREMA; BIUDES; CAMARGO, 2011). Para isso, os objetivos específicos desenvolvidos foram:

- Estudar o efeito da separação física proporcionada pelas microbolhas no tratamento de efluentes oleosos em *wetlands* construídos pilotos;
- Produzir um efluente sintético água-óleo para testes experimentais com os *wetlands* construídos;
- Simular, utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD), a taxa de acúmulo do óleo retido na superfície do *wetland* construído;
- Comparar as eficiências de separação água-óleo com e sem a adição de microbolhas;
- Propor uma estratégia de operação para o *wetland* construído capaz de manter um teor de óleo que permita sobrevivência à população de macrófitas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EFLUENTES OLEOSOS

O petróleo é uma substância composta por uma mistura de hidrocarbonetos, a qual no estado líquido se apresenta oleosa, menos densa que a água e com origem fóssil, de cor variando as nuances entre o preto e o castanho. Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos formados principalmente por hidrogênio e carbono, podendo apresentar e conter também oxigênio, nitrogênio e enxofre que irão proporcionar diferentes características de acordo com o arranjo. Após a extração, o petróleo bruto é encaminhado às refinarias, complexos industriais responsáveis pela produção de derivados de petróleo, como Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), gasolina, querosene, nafta, parafina, óleo lubrificante e diesel (POMBO, 2011).

São classificados como efluentes oleosos, as correntes aquosas que contém concentrações variadas de resíduos oleosos, graxas e gorduras. O setor industrial é grande geradora de águas oleosas, devido ao constante uso de derivados de petróleo. Nas indústrias, a água é poluída por óleo em consequência de processos específicos e de atividades corriqueiras e comuns a todos setores industriais como lavagens de pisos e equipamentos, vazamentos de máquinas e veículos e sistemas de refrigeração. Resíduos oleosos são encontrados em efluentes líquidos como óleo livre, óleo disperso, óleo emulsionado e óleo dissolvido, devido às variações nos diâmetros das gotas (COCA; GUTIÉRREZ; BENITO, 2011).

Ao ser descartado incorretamente, os efluentes oleosos transportam diversos contaminantes para corpos hídricos. O impacto ao meio ambiente é proporcional à quantidade do poluente: quanto maior for a concentração de óleo no efluente, maiores serão as alterações físicas, químicas e biológicas ocorrerão na área atingida. Após o descarte, os resíduos oleosos tendem a formar manchas na superfície da água, causando malefícios para a fauna e flora. Com o espalhamento da mancha de óleo, as trocas de calor e gases importantes são prejudicadas. A renovação de oxigênio é reduzida, comprometendo as reações químicas que ocorrem no ambiente marinho e as atividades de micro-organismos aeróbios que necessitam de oxigênio dissolvido para realizar a degradação de poluentes, ajudando no processo de autodepuração (JAMALY; GIWA; HASAN, 2015). Além de impedir reações de troca, a mancha também dificulta a

passagem de luz, prejudicando a fotossíntese e consequentemente a flora marinha (SANTOS, 2012).

A toxicidade de grupos gerais de hidrocarbonetos e os seus respectivos danos causados ao meio ambiente são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Toxicidade de hidrocarbonetos e respectivos danos ambientais

Tipo de hidrocarboneto	Toxicidade e danos ambientais
Leves (1 a 10 átomos de carbono)	Alta toxicidade para a biota, porém com breve duração em função da redução da concentração pela evaporação.
Moderados (11 a 22 átomos de carbono)	Toxicidade dependente do conteúdo de aromáticos. Toxicidade aguda e crônica para organismos marinhos, em consequência do abafamento físico/mecânico e toxicidade química.
Pesados (23 ou mais átomos de carbono)	Toxicidade baixa, relacionada ao efeito de abafamento. Flora marinha mais sensível a esse tipo de hidrocarbonetos.
Residuais	Toxicidade baixa, afetando apenas ambientes sensíveis caso ocorra uma retenção prolongada do hidrocarboneto.

Fonte: adaptado de SILVA (2004)

Além dos danos ambientais, alguns hidrocarbonetos oferecem riscos diretos para a saúde do homem. Entre os chamados de BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xilenos), o benzeno apresenta uma expressiva preocupação. A exposição a este hidrocarboneto pode provocar o surgimento de doenças como anemia aplástica e câncer. Por ser estável, o anel benzênico se torna persistente no meio ambiente, dificultando sua remoção (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011).

2.2 WETLANDS CONSTRUÍDOS

São denominadas de *wetlands* (em português, áreas alagadas) as regiões inundadas ou saturadas por água advinda de fontes superficiais e/ou subterrâneas. Estas inundações favorecem o surgimento de vegetações adaptadas às características do local. De acordo com Calijuri e Cunha (2013), diversas funções ecológicas são atribuídas aos *wetlands*, entre elas: ciclagem de

nutrientes, produção primária pelas plantas aquáticas, manutenção da biodiversidade, regulação climática e controle do fluxo hidrológico.

Os *wetlands* construídos são equipamentos utilizados no tratamento de efluentes domésticos, agrícolas e industriais que reproduzem operação semelhante ocorrida nas áreas alagadas naturais (*wetlands*), com ajustes que permitem sua otimização. Conciliam em um único tratamento processos físicos, químicos e biológicos que tornam possível realizar a recuperação de águas residuárias através de oxirredução, precipitação, dissolução, complexação e assimilação biológica que irão reduzir a carga poluidora do efluente e contribuir para a melhoria da qualidade da água. Portanto, *wetlands* construídos são ecossistemas artificiais com diferentes níveis de tecnologia que procuram atingir as mesmas funções ecossistêmicas básicas de áreas alagadas naturais (GRULL, 2013; RAJABZADEH; LEGGE; WEBER, 2015; VYMAZAL, 2010).

2.2.1 Classificação e Processos de Remoção

Os *wetlands* construídos podem ser classificados de acordo com o tipo de escoamento em subsuperficial e superficial, sendo esses subdivididos de acordo com o fluxo e os tipos de macrófitas, respectivamente. Em *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial (Figura 1), a água residuária flui através de um meio poroso, na saída e na entrada do equipamento, onde estará em contato com as macrófitas. São frequentemente compostos por tubulações de entrada e saída, revestimento de membrana sintética, meio filtrante (poroso) e macrófitas, sendo estas geralmente emergentes (KADLEC; WALLACE, 2009; VYMAZAL, 2011).

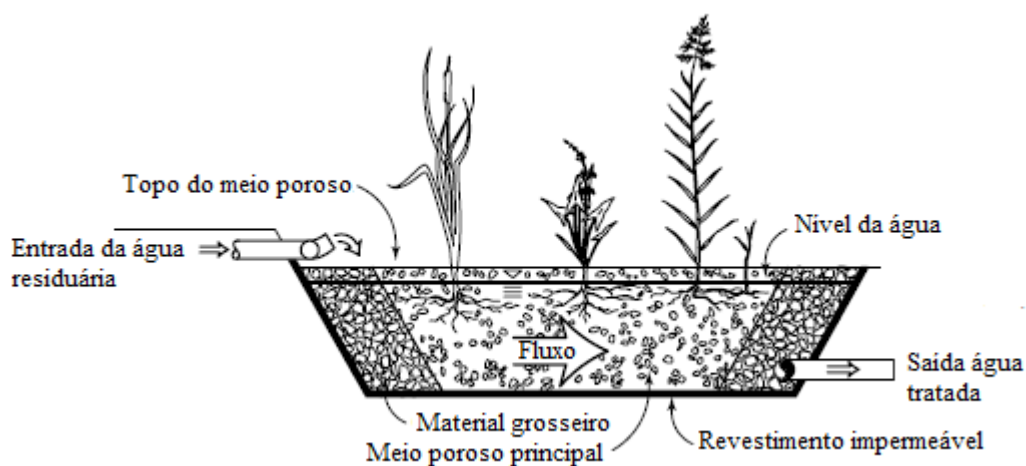


Figura 1 – *Wetland* construído horizontal com escoamento subsuperficial
Fonte: adaptado de KADLEC e WALLACE (2009)

Os *wetlands* construídos com escoamento subsuperficial são divididos em função da direção do escoamento: horizontal e vertical. No escoamento subsuperficial horizontal, a água residuária é descarregada em uma das extremidades do leito, geralmente no interior de uma camada composta por materiais como pedras de granulometria grosseira, seguindo um movimento predominantemente horizontal ao longo do leito. No escoamento vertical, o efluente é descarregado pela superfície do leito, em diversos pontos ou numa das extremidades, para que ocorra percolação com escoamento preferencialmente vertical, através do meio poroso. Este tipo de *wetland* possui variadas aplicações em efluentes, incluindo desalogenação redutiva, oxidação de amônia e nitrificação (GALVÃO, 2009; LAUTENSCHLAGER, 2001).

Em *wetlands* construídos com escoamento superficial (Figura 2), a água residuária escoar através de um leito preenchido por água e macrófitas, sem meio poroso, o que proporciona a este tipo de escoamento uma semelhança maior com *wetlands* naturais. A alimentação do efluente é realizada por uma extremidade do *wetland* construído e a retirada da água tratada efetuada na área inferior da extremidade oposta.

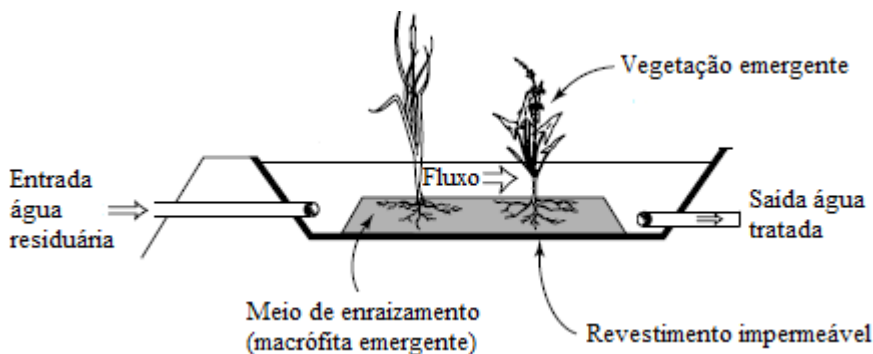


Figura 2 – *Wetland* construído com escoamento superficial

Fonte: adaptado de KADLEC e WALLACE (2009)

Em *wetlands* superficiais podem ser utilizadas macrófitas emergentes, submersas e flutuantes. Em todo o trajeto, a lâmina d'água permanece acima das raízes das plantas aquáticas ou em contato apenas com raízes submersas, no caso de macrófitas flutuantes. A velocidade do fluxo é predominantemente lenta ao longo de todo o percurso (SEZERINO et al., 2015; VYMAZAL, 2011).

Os *wetlands* construídos de escoamento superficial são utilizados em processos de polimento de efluentes parcialmente tratados ou como única etapa de tratamento. São os mais utilizados para o tratamento de efluentes urbanos, agrícolas e industriais, devido a facilidade de

se adaptar a diferentes níveis de água, além de possuírem operação fácil e de baixo custo (KADLEC; WALLACE, 2009).

Nos *wetlands* de escoamento superficial, o tratamento é realizado a partir de variados processos físicos, químicos e biológicos. Em efluentes com petróleo e derivados (combustíveis, óleos e graxas, álcoois, BTEX e hidrocarbonetos de petróleo), os principais mecanismos de remoção atuantes nesses *wetlands* construídos são a decantação, volatilização, radiação UV, degradação microbiológica e retirada pelas plantas (WALLACE; KNIGHT, 2006).

2.2.2 *Eichhornia crassipes*

As plantas que compõem os *wetlands* são responsáveis por parte dos mecanismos de remoção de poluentes das águas residuárias. Estas plantas são conhecidas como macrófitas aquáticas, que habitam desde brejos até ambientes totalmente submersos. As macrófitas aquáticas são, em sua grande maioria, vegetais terrestres que, ao longo de seu processo evolutivo, se adaptaram ao ambiente aquático, por isso apresentam grande capacidade de adaptação a variados ambientes (KADLEC; WALLACE, 2009; JAFARI, 2010).

Em áreas alagadas, as macrófitas desempenham funções importantes, tais como retenção e ciclagem de nutrientes, liberação de resíduos orgânicos, velocidade do fluxo hídrico, além de alterar parâmetros dos corpos hídricos como Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica do Oxigênio (DBO), Demanda Química do Oxigênio (DQO), Nitrogênio (N), pH, entre outros. A presença das macrófitas favorecem o desenvolvimento de biofilmes compostos por micro-organismos capazes de degradar poluentes, potencializando o tratamento de efluentes (CALHEIROS *et al.*, 2010; GALVÃO, 2009; PEDROSO, 2010).

As macrófitas aquáticas podem ser separadas em emergentes, submersas e flutuantes. Neste último grupo destaca-se a espécie *Eichhornia crassipes* (Figura 3), também conhecida como aguapé, jacinto d'água e baronesa. Macrófita pertencente à família *Pontederiaceae* e nativa da Amazônia, foi descoberta no Brasil em 1823 pelo pesquisador botânico alemão Carl Friedrich Philipp von Martius. Por causa da beleza de suas flores de coloração lilás, foi exportada para uso ornamental, sendo atualmente encontrada em diversas áreas do planeta (QUINTÃO, 2012; TÉLLEZ *et al.*, 2008).



Figura 3 – *Eichhornia crassipes*

Fonte: PEDROSO (2010)

As raízes submersas do aguapé atuam como um filtro, capturando os nutrientes e outros elementos encontrados na água, mesmo que estes estejam em quantidades elevadas ou que sejam considerados poluentes como por exemplo metais pesados e óleos minerais. A capacidade das macrófitas capturarem nutrientes e poluentes de corpos d'água se deve ao seu caráter bioissorvente e a sua elevada área superficial, conferindo-lhe um grande potencial para acumular solutos (JAFARI, 2010; MENDONÇA; FERREIRA; MOTTA SOBRINHO, 2013).

Além da remoção direta pela absorção das raízes, há outros processos químicos e biológicos como a liberação de oxigênio na zona radicular que cria condições de oxidação no meio, estimulando a degradação aeróbia do poluente, o crescimento de bactérias nitrificantes e a inativação de compostos que seriam tóxicos às raízes das plantas (MATOS *et al.*, 2010).

2.2.3 Vantagens e Desvantagens do Uso de Wetlands Construídos

As vantagens da utilização de *wetlands* construídos estão associadas à variedade de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no tratamento. Entre estes processos mereçam destaque a alta capacidade de remoção das macrófitas aquáticas e a separação física eficiente que ocorre no tanque. Este último, confere ao *wetland* características correspondentes a um tratamento primário semelhante à decantação devido a separação água-óleo graças a diferença de densidade e à baixa velocidade de escoamento do fluido (CHAGAS; SALATI; TAUKE-TORNISIELO, 2012).

Os *wetlands* construídos apresentam outras vantagens que podem ser enumeradas (CHEN *et al.*, 2014; HAYDER *et al.*, 2015; WELZ *et al.*, 2011):

- a) Baixo impacto ambiental;
- b) Produção secundária de biomassa;
- c) Tratamento de efluentes com baixo custo de implantação e manutenção;
- d) Consumo reduzido de energia elétrica;
- e) Valorização paisagística do local utilizado para tratamento, devido a beleza das flores das macrófitas.

A utilização de *wetlands* construídos pode implicar principalmente em três desvantagens que podem ser facilmente solucionadas:

- a) Excessiva produção de biomassa: com a alta taxa de crescimento das macrófitas, há um aumento na população implicando em diversos inconvenientes. É preciso controlar a produção de biomassa para evitar dificuldades na taxa de crescimento e nas atividades biológicas. A biomassa retirada pode ser destinada para diversos usos, como produção de adubos para agricultura e ração animal (VYMAZAL, 2011; WALLACE; KNIGHT, 2006).
- b) Tempo superior às outras técnicas de tratamento: por não utilizar aceleradores de reações como aditivos químicos ou agitadores, o tempo gasto no tratamento em *wetlands* construídos tende a ser superior aos de outras técnicas. Além disso, quanto mais tempo o efluente permanecer no tanque, maior será a retenção de poluentes pelas macrófitas e a separação de fases óleo-água. A redução do tempo de tratamento pode ser obtida modificando critérios de projeto ou utilizando os *wetlands* construídos após o efluente ter sido previamente tratado por outros equipamentos;
- c) Surgimento de mosquitos atraídos pelas plantas e efluente: em se tratando de *wetlands* com escoamento superficial, os efluentes e as macrófitas ficam mais expostos a agentes externos, atraindo e facilitando a instalação de vários insetos (BULLER, 2012; WALLACE; KNIGHT, 2006). Porém, no caso de efluentes oleosos, a camada de óleo na superfície impede que insetos depositem larvas na água.

2.3 DIMENSIONAMENTO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS

2.3.1 Histórico Geral do Uso de Wetlands Construídos

Na década de 1870, o químico inglês Edward Frankland realizou diversos experimentos a fim de comprovar a viabilidade da aplicação de esgoto tratado na irrigação e fertilização de fazendas. Os resultados positivos fizeram com que essa prática, conhecida como *Sewage farm*, despertasse o interesse nas possíveis aplicações de águas residuárias tratadas. Consequentemente, foi intensificada a busca por meios de tratamento de efluentes capazes de remover poluentes e recuperar a qualidade de água. Em meados de 1900, foi desenvolvido um projeto para criar *wetlands* especificamente para tratamento de águas residuárias. Em 1901, Cleophas Monjeau documentou o primeiro dimensionamento patenteado de um *wetland* construído de escoamento vertical e com um sistema de aeração (WALLACE; KNIGHT, 2006).

Desde de sua invenção até os dias atuais, vários modelos de dimensionamento de *wetlands* construídos foram desenvolvidos de forma a atender a grande demanda de efluentes. Nos Estados Unidos, em 1973, estudos iniciados por Robert Kadlec impulsionaram o dimensionamento de um *wetland* construído através de ferramentas de engenharia, ampliando a aplicação deste tipo de tratamento para efluentes industriais e águas de processo. De acordo com Toscani (2010), a primeira equação utilizada de modo regular para o dimensionamento de *wetlands* construídos foi apresentada em 1988 pela *United States Environmental Protection Agency*, sendo baseada num reator de fluxo pistão.

2.3.2 Modelos Cinéticos

Diversos pesquisadores utilizam o modelo cinético de primeira ordem para o dimensionamento de *wetlands* construídos. A frequente citação dessa equação se deve a simplicidade dos cálculos e aos resultados positivos apresentados (DÍAZ; ATENCIO; PARDO, 2014; HAGAHMED; GASMELSEED; AHMED, 2014; KADLEC; WALLACE, 2009; WALLACE; KNIGHT, 2006; MAYO, 2014). O modelo é expresso pela Equação 1.

$$\frac{C_o}{C_i} = \exp(-k.t) \quad (1)$$

sendo C_I a concentração do poluente no afluente (mg/L); C_O a concentração do poluente no efluente (mg/L); t o tempo de retenção hidráulica (dias) e k a constante de velocidade da reação de primeira ordem (dia^{-1}). A constante k é expressa pela Equação 2.

$$k = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (2)$$

Sendo k_{20} representando a constante de velocidade da reação a 20°C e θ o coeficiente de temperatura, sendo este adimensional e variável de acordo com o tratamento. Estudos realizados por Kadlec e Wallace (2008) determinaram que em *wetlands* construídos o θ pode variar entre 0,99 e 1,05.

A Equação 3, desenvolvida por Kadlec e Knight (1996), apresenta uma variação da Equação 1. A principal diferença entre as equações se dá pelo surgimento da concentração de base (C^*), a qual indica a concentração que naturalmente existe no *wetland* construído. No caso da remoção de hidrocarbonetos, a concentração de base será nula, uma vez que esses poluentes não são naturais do meio aquático (GALVÃO, 2009).

$$\frac{C_{OUT} - C^*}{C_{IN} - C^*} = \left(1 + \frac{k}{N}\right)^{-N} \quad (3)$$

Em que C_{OUT} é a concentração do efluente (mg/L), C_{IN} é a concentração do afluente (mg/L), C^* é a concentração de base (mg/L), k é a constante de primeira ordem (s^{-1}) e N é o número de tanques (*wetlands* construídos) do sistema.

Haberl *et al.* (2003) desenvolveram a Equação 4 para quantificar a mudança de concentração ao longo do *wetland* construído.

$$\ln\left(\frac{C - C^*}{C_{in} - C^*}\right) = -\frac{k}{Q} \cdot y \quad (4)$$

Em que C^* é a concentração de base (mg/L), C_{in} é a concentração do afluente (mg/L), k é a constante de primeira ordem, Q é a vazão volumétrica (L/dia) e y é a distância percorrida pelo fluxo, a qual varia de 0 (entrada do *wetland* construído) a 1 (saída do *wetland* construído).

A mudança da concentração do poluente ao longo do *wetland* é dada pela Equação 5:

$$q \cdot \frac{dC}{dy} = -k \cdot (C - C^*) \quad (5)$$

Fatores como o tipo de poluente a ser retirado, o espaço disponibilizado para a instalação do sistema e a espécie de macrófita disponível são determinantes para a seleção do modelo. Assim, para que o *wetland* construído seja eficiente é necessário que o dimensionamento proposto seja adequado para tratar o efluente em questão. Em razão de sua versatilidade, o dimensionamento de *wetlands* construídos pode ser baseado em analogias com outros equipamentos, como por exemplo reatores de fluxo pistão, reatores biológicos e decantadores.

2.3.3 Adaptações

2.3.3.1 Analogia entre Wetlands Construídos e Decantadores Horizontais Contínuos

Na recuperação de águas oleosas, o tratamento deverá ser capaz de separar a água dos hidrocarbonetos presentes. A decantação é um dos métodos de separação de líquidos imiscíveis mais conhecidos, a qual consiste em armazenar o efluente líquido durante um determinado período para que a fase menos densa se desloque para a superfície, enquanto que a fase mais densa permaneça próxima ao fundo (NASCIMENTO *et al.*, 2012).

A decantação está entre os mecanismos presentes nos *wetlands* construídos responsáveis pelo tratamento de efluentes oleosos. Esta separação água-óleo por diferença de densidade é ocasionada principalmente por duas características dos *wetlands* construídos: tempo de residência e retenção da fase orgânica (WALLACE; KNIGHT, 2006).

O tempo de residência se refere ao período que o efluente permanece no *wetland* construído, suficiente para que ocorra o tratamento e, conseqüentemente, a separação gravitacional. A ação da gravidade proporciona um deslocamento das frações da fase orgânica, de forma que se estabeleça acima da fase aquosa devido a diferença de densidade, ao longo do tempo de residência. *Wetlands* dimensionados com geometrias retangulares aumentam o tempo de residência dos efluentes, beneficiando a decantação (LUDWIG, 1997).

Retenção da fase orgânica ocorre por meio das raízes das macrófitas, atuando como filtros, retendo impurezas e criando meios de degradação. Quando o sistema radicular se encontra próximo a superfície, a tendência é que os poluentes se concentram acima da fase aquosa. No caso de efluentes oleosos, este comportamento é evidenciado devido à baixa densidade da fase orgânica em relação a água. A presença de macrófitas nos leitos também reduz a velocidade do escoamento nos *wetlands*, facilitando o processo de decantação (KADLEC; WALLACE, 2009).

A velocidade do fluido exerce um importante papel no processo de decantação de efluentes oleosos. Altas velocidades implicam em arrastes de gotículas de óleo e consequente distribuição destas na fase aquosa. Por sua vez, menores velocidades favorecem a ação da gravidade e, conseqüentemente, a decantação. (LUDWIG, 1997)

Para que ocorra uma separação de fases eficiente em decantadores e/ou *wetlands* construídos, é preciso que o escoamento apresentado pela água oleosa não tenha um alto grau de turbulência. Em decantadores horizontais, a fase contínua flui perpendicularmente as gotas da fase dispersa, causando naturalmente uma turbulência que interfere no processo de sedimentação. Portanto, para evitar a intensificação da turbulência, é preciso que o efluente seja introduzido de forma uniforme e com velocidade controlada ao longo do equipamento (AL-YAARI; AL-SARKHI; ABU-SHARKH, 2012).

2.3.3.2 Adição de Microbolhas

Bolhas e microbolhas de ar são empregadas no tratamento de efluentes em processos de separação que envolvam adsorção ou absorção dos poluentes. Para o tratamento de efluentes com gotículas oleosas destacam-se as microbolhas, em virtude de suas características. São classificadas como microbolhas as bolhas de diâmetro menores que 100 μm . O minúsculo tamanho fornece as microbolhas algumas características peculiares, tais como baixa velocidade de ascensão, alta pressão interna e elevada área superficial. As microbolhas podem ser geradas a partir de diferentes métodos, sendo a cavitação e a pressurização os mais utilizados. No processo geral de cavitação, há o direcionamento para o interior do efluente de microbolhas geradas a partir do ar absorvido em um aerador. No método de pressurização, água com alta pressão é saturada com gás e posteriormente injetada em um ambiente com pressão atmosférica, ocorrendo a liberação do gás em excesso sob a forma de microbolhas durante a repentina queda de pressão. O método de pressurização é utilizado na formação de microbolhas na técnica de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), a qual dissolve o ar em solução aquosa com elevadas pressões (ENGLERT, 2008; LI, 2006).

A aplicação de microbolhas em tratamentos de águas residuárias está diretamente relacionada a dois processos: flotação e fornecimento de oxigênio. Flotação corresponde a um processo de separação sólido-líquido ou líquido-líquido onde ocorre a captura do material

disperso através do contato com bolhas. As partículas hidrofóbicas são adsorvidas na superfície das bolhas, sendo posteriormente arrastadas até a lâmina d'água, onde se torna possível a remoção do agregado bolha-partícula. Obtém-se uma maior eficiência ao utilizar microbolhas para processos de flotação, uma vez que este tamanho de bolha apresenta grande área superficial de forma a promover maiores interações favorecendo, conseqüentemente, a transferência de massa (AGARWAL; NG; LIU, 2011; ENGLERT, 2008; LI, 2006).

Além da flotação, as microbolhas forneçam o oxigênio. O ar contido nas microbolhas é transportado, aumentando níveis de oxigênio no meio aquoso. De acordo com Li (2006), as microbolhas são mais eficientes no fornecimento de oxigênio do que bolhas com diâmetros maiores, de forma que a concentração de oxigênio aumenta com a diminuição do tamanho das bolhas. Ao serem aplicadas no tratamento de efluentes oleosos, as microbolhas oferecem um aumento na eficiência de separação. O fornecimento de oxigênio favorece as atividades de micro-organismos aeróbios que, por sua vez, irão degradar o óleo presente no efluente. O arraste dos resíduos oleosos representa outra vantagem da utilização de microbolhas.

2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* - CFD)

Escoamentos e fenômenos relacionados podem ser descritos através de equações diferenciais parciais, sendo estas, em sua maioria, não resolvidas analiticamente (FERZIGER; PERIC, 2002). Para determinar numericamente uma solução, é necessário utilizar um método de discretização para que as equações diferenciais se aproximem de um sistema de equações algébricas, as quais podem ser resolvidas por um computador através da fluidodinâmica computacional, em inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Através de simulações, a fluidodinâmica computacional permite que o pesquisador analise quais parâmetros e condições irão maximizar a eficiência do sistema em estudo. CFD promove otimizações em diversas áreas da engenharia, proporcionando reduções expressivas de gastos relacionados à energia e a equipamentos, além de minimizar impactos ambientais devido a redução de poluição gerada. Entre os mais utilizados *softwares* voltados para a fluidodinâmica computacional estão ANSYS Fluent, CFD-ACE+, CFX e FLOW-3D (GLATZEL *et al.*, 2008; MEZHERICHER, 2012; MERONEY, 2012).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), o desenvolvimento de simulações em pacotes de CFD pode ser esquematizado em três grupos principais: pré-processamento, solver e pós-processamento.

No pré-processamento são inseridas as características do problema a ser analisado nas etapas posteriores. Inicialmente, o usuário cria ou importa a geometria da região de interesse, definindo o tipo (2D ou 3D) e suas dimensões (FAISCA, 2013).

Após a determinação da geometria, é gerada uma malha que será formada a partir da divisão da região de interesse em subdomínios, onde serão resolvidas as equações que regem os fluidos do problema. As malhas podem ser estruturadas ou não-estruturadas, cabendo ao usuário definir qual tipo irá abranger melhor toda a geometria. Malhas quadrilaterais e hexaédricas proporcionam soluções de alta qualidade com células e nós em quantidades menores do que comparadas aos outros tipos, porém necessitam de um esforço computacional maior, impossibilitando sua utilização em geometrias mais complexas. Para uma melhor análise, é indicado que sejam aplicados vários tipos de malha, alternando entre tipos que gerem maiores quantidades de nós e outros mais simples (ANSYS, 2010; FAISCA 2013; JUSTI, 2012).

Além da geometria e da malha, na etapa do pré-processamento também serão definidas as configurações necessárias para a resolução das equações que descrevem o problema. Propriedades dos materiais, modelos físicos apropriados, condições de operação, condições de contorno, valores iniciais e convergência da solução deverão ser informados para a execução do solver (ANSYS, 2010; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A etapa definida como *solver* corresponde ao processamento do problema, onde ocorre a resolução de equações de estado e de transporte de momento, massa e calor nos elementos de volume, relacionadas ao modelo físico definido pelo usuário na etapa de pré-processamento (SILVA, 2012). Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a etapa solver é baseada no seguinte roteiro:

- a) Aproximação de variáveis desconhecidas de fluxo através de funções simples;
- b) Discretização pela substituição de aproximações dentro das equações governantes do fluxo;
- c) Solução de equações algébricas.

Após os cálculos, é verificado se há convergência da solução. Caso não ocorra, deverão ser feitas alterações no pré-processamento. A convergência é alcançada, geralmente, quando: modificações nas variáveis de solução por iteração não são significantes, propriedades globais de conservação são alcançadas e quando as variáveis de interesse atingem valores estáveis (ANSYS, 2010; JUSTI, 2012).

Por fim, a etapa de pós-processamento consiste na visualização dos resultados alcançados no solver, representados por gráficos de superfície (2D e 3D), mapas de contorno, linhas de corrente, entre outros recursos disponíveis nos softwares de CFD (JUSTI, 2012).

2.4.1 Aplicação de CFD no Dimensionamento de Wetlands Construídos

No dimensionamento de *wetlands* construídos, é extremamente indicado que se tenha o conhecimento detalhado do comportamento hidráulico do sistema. Através da fluidodinâmica computacional, modelos matemáticos podem ser utilizados para uma melhor compreensão dos modelos de escoamento presentes. Para o estudo hidráulico em *wetlands* construídos, a CFD apresenta vantagens como baixo custo, análise completa do campo de escoamento e possibilidade de ampliação (*scale-up*) (FAN et al., 2008; KNIGHT; WALLACE, 2006; LANGERGRABER; PRESSL; HABERL, 2014).

Algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a utilização de fluidodinâmica computacional para a simulação de *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial (FAN; HAI; LU, 2009; FAN; HAI; WANG; LU; YANG, 2008; RAJABZADEH; LEGGE; WEBER, 2015; SAMSÓ; GARCIA, 2013) e de escoamento superficial (HAN; CHEN; ZHOU, 2014).

A simulação realizada por Fan et al. (2008) teve como objetivo estudar as características de um *wetland* construído de escoamento subsuperficial. A simulação em CFD resultou em uma análise completa da influência sofrida pela eficiência de separação devido à localização do dispositivo de entrada de efluente, ao meio poroso, à camada protetora, à velocidade de entrada e à pressão de saída.

Fan, Hai e Lu (2009) simularam um *wetland* construído subsuperficial, utilizando o código comercial de CFD, Fluent 6.22. O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho hidráulico com diferentes dimensionamentos das áreas de distribuição de água residuária e retirada de água tratada. Através das simulações, foi possível observar a variação da eficiência de

remoção de poluentes, reforçando que a qualidade do tratamento depende do dimensionamento utilizado e dos parâmetros hidráulicos adotados. Os autores destacaram a importância da escolha da CFD para o estudo, por se tratar de uma ferramenta sofisticada, sem custo e de fácil operação.

Rajabzadeh, Legge e Webber (2015) desenvolveram um modelo de fluidodinâmica computacional para estudar o efeito do desenvolvimento do biofilme nas características hidrodinâmicas de *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial. Foram utilizadas equações de Navier-Stokes para descrever o fluxo em regiões abertas e equações de Brinkmann para o fluxo em regiões porosas. Como resultado, obteve-se um modelo computacional capaz de prever processos biológicos de forma realista, podendo ser aplicado a *wetlands* construídos de larga escala.

Samsó e Garcia (2013) apresentaram um modelo fluidodinâmico 2D, que implementa o escoamento do fluido e equações de transporte juntamente com um modelo biocinético. Os autores utilizaram este modelo, denominado BIO_PORE, para analisar o crescimento de biomassa nas áreas com grandes concentrações de substrato. Os autores concluíram que modelo proposto foi capaz de reproduzir precisamente o comportamento hidráulico e hidrodinâmico de um protótipo de *wetland* construído.

Han, Chen e Zhou (2014) desenvolveram um modelo fluidodinâmico computacional, 3D, baseado no método de volume finito com um método de rastreamento de partículas Lagrangeano. O modelo foi utilizado como ferramenta para prever o comportamento de sólidos suspensos em um *wetland* construído com escoamento superficial. As comparações entre os valores obtidos pela simulação e os obtidos experimentalmente indicaram que o modelo em 3D desenvolvido conseguiu reproduzir bem as condições reais do *wetland* construído.

2.5 USO DO BOX PLOT NA ANÁLISE ESTATÍSTICA

A estatística desempenha um importantíssimo papel em qualquer tipo de experimento. Através de uma análise estatística dos dados, é possível determinar a confiabilidade destes, garantindo a qualidade dos resultados apresentados. Por meio de ferramentas estatísticas, cientistas podem criar planejamentos experimentais, os quais otimizam seus estudos, sistemas e produtos, fornecendo vantagens como a redução do tempo gasto em seu desenvolvimento e

aumento da produção. Através de planejamentos estatísticos, é possível avaliar diversas situações, e escolher qual o melhor meio para se atingir o melhor resultado (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

A análise estatística é um meio poderoso amplamente utilizado nas validações de dados e avaliações dos cenários propostos. Através dela, o pesquisador se torna capaz de discernir qual a melhor configuração para alcançar os resultados desejados, além de determinar se um dado específico está coerente com os demais. Para isto, é preciso que seja escolhido o teste estatístico apropriado para atender a necessidade do pesquisador (NORMANDO; TJÄDERHANE; QUINTÃO, 2010).

Tabelas são comumente escolhidas para a exposição de um conjunto de dados. Porém, em alguns casos, os resultados obtidos em experimentos demandam representações gráficas que os apresentem de forma detalhada, destacando determinados aspectos. Entre os gráficos mais utilizados, estão os setoriais, de barras, lineares e histogramas (RYAN, 2009).

Box plot, conhecido também como desenho esquemático ou gráfico de caixa, é uma representação gráfica largamente utilizada para avaliar a ocorrência de valores incomuns chamados *outliers*, os quais apresentam grandes desvios em relações aos outros dados. Além disso, os gráficos de caixas permitem uma melhor visualização da posição central e dispersão dos dados e dos desvios gerais da simetria. A representação gráfica box plot utiliza como dados: mediana, primeiro quartil, terceiro quartil e intervalo interquartil. O primeiro quartil constitui um valor limitante, onde 25% de todos os dados são menores que o primeiro quartil, sendo os 75% maiores. O terceiro quartil, por sua vez, é o valor limitante onde 25% dos valores do conjunto de dados são maiores que o terceiro quartil, e os 75% restantes menores. O intervalo interquartil é composto pela subtração do terceiro quartil pelo primeiro quartil (BUSSAB; MORETTIN, 2013).

As informações obtidas sobre a forma da distribuição e a frequência de variáveis transformam o box plot em um tipo de representação gráfica importante para a análise estatística de experimentos para aqueles que desejam obter uma avaliação detalhada e simplificada da simetria da distribuição dos dados. O box plot também é indicado para comparações de diferentes conjuntos de dados e para ilustrar a relação entre eles (LAPPONI, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Os testes experimentais deste projeto foram realizados no protótipo instalado na área externa de um galpão, localizado no bairro de Afogados, pertencente ao Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI).

O desenho do *wetland* construído piloto foi projetado através do *software SolidWorks* (Figura 4), onde foi possível prever e definir a localização de dispositivos de entrada e saída de efluentes, a distribuição das macrófitas e o formato retangular do protótipo.

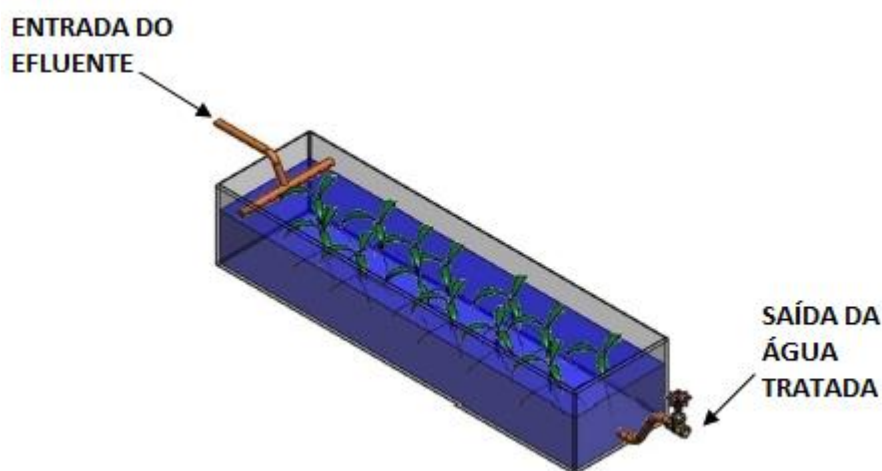


Figura 4 – Isométrico em SolidWorks do protótipo de *wetland* construído

Visando garantir o andamento do experimento, foram construídos dois *wetlands* pilotos, cada um com as seguintes dimensões: 3 metros de comprimento, 0,8 metros de largura, 0,6 metros de altura e paredes com 10 milímetros de espessura. O material utilizado foi policarbonato incolor e transparente, a fim de permitir a visualização das distribuições de seus componentes internos. Apenas um protótipo foi utilizado durante os testes experimentais, sendo o outro *wetland* piloto destinado para o cultivo das macrófitas e como reserva para a necessidade de substituição do protótipo.

A distribuição da água oleosa foi projetada para ser efetuada através de uma tubulação perfurada com 8 orifícios de 4 milímetros de diâmetro (Figura 5), disposta transversalmente na

entrada do *wetland* piloto, permitindo que o efluente escoasse de forma homogênea em relação à secção transversal e longitudinal do protótipo.

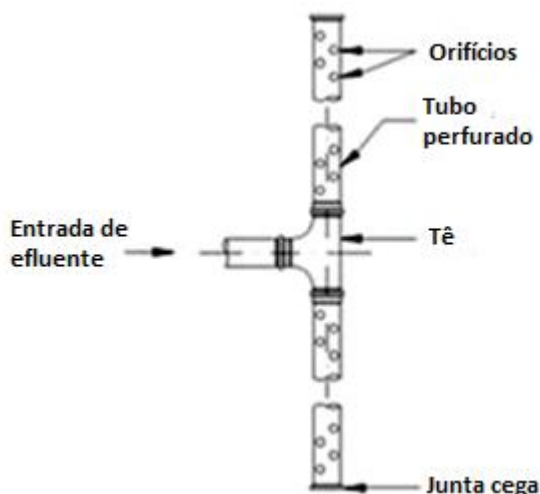


Figura 5 - Distribuidor de fluxo do efluente no *wetland* piloto

3.2 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS PROTÓTIPOS DE WETLAND CONSTRUÍDO

Anteriormente à execução de testes experimentais, foram realizadas simulações fluidodinâmicas visando prever a separação água-óleo lubrificante no *wetland* construído. Por meio desta estimativa foi possível determinar quais seriam as melhores condições de operação nos protótipos, visando a melhoria da eficiência do tratamento. Foi utilizado o *software* ANSYS® versão 15, instalado em um *notebook* Dell com as seguintes configurações:

- a) Modelo: Inspiron 5558
- b) Sistema operacional: Windows 10 Pro (64 bits)
- c) Processador: Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2.40GHz
- d) Memória instalada (RAM): 8 GB
- e) Placa de vídeo: NVIDIA GeForce 920M, 8GB de memória

Ao todo, duas simulações foram processadas para avaliar o comportamento do efluente nas duas configurações do protótipo, sem e com microbolhas. Os parâmetros e as dimensões dos *wetlands* construídos foram os mesmos para as duas simulações, sendo a diferença entre elas apenas a presença dos injetores. As macrófitas não foram incluídas na simulação, tendo em vista que a retirada por adsorção/degradação de óleo pelas mudas é muito menor em comparação a remoção pela flotação.

3.2.1 Criação da Geometria

Utilizando o *ANSYS® DesignModeler™ 15.0*, componente do *ANSYS® Workbench*, foi possível criar a geometria em 3D do protótipo e determinar a localização dos dispositivos de entrada e saída e os injetores de microbolhas (Figura 6). Não foram adicionados injetores na criação da geometria do protótipo sem microbolhas.

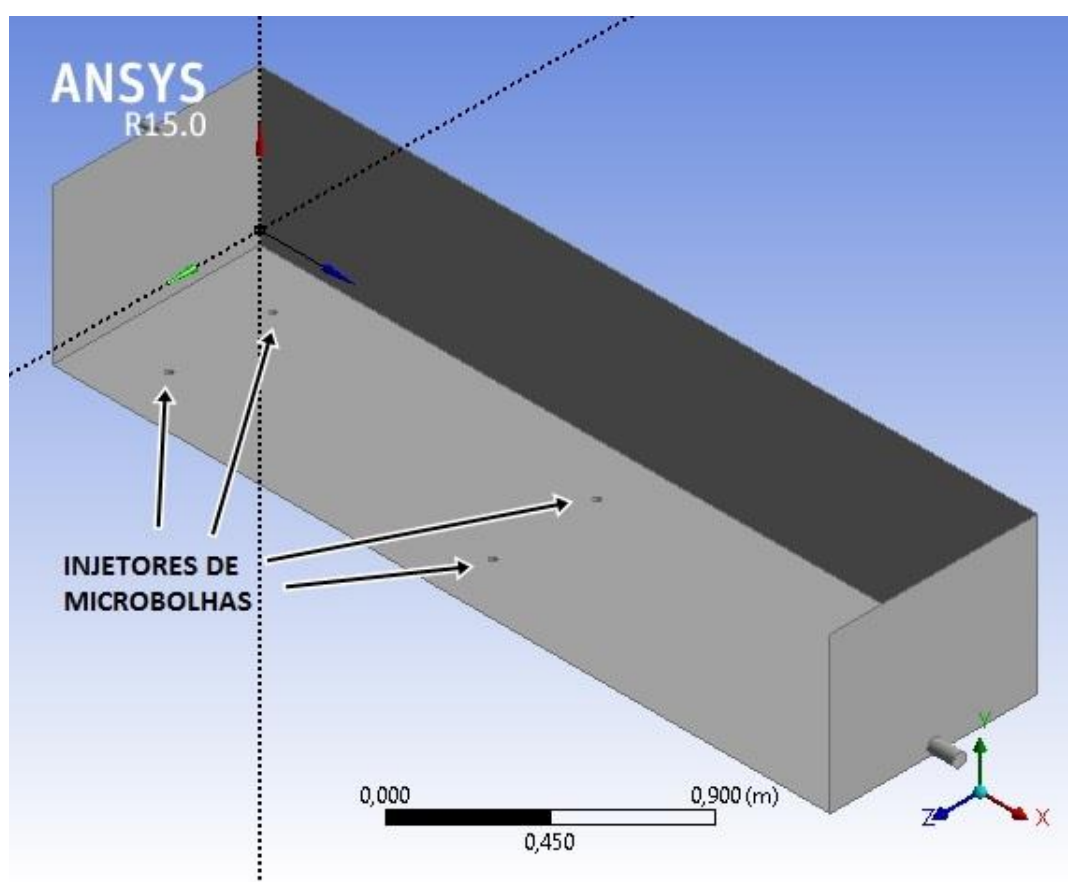


Figura 6 - Geometria do *wetland* construído piloto com injetores (*DesignModeler*)

Para uma melhor representação da realidade, as dimensões utilizadas na criação da geometria foram as mesmas do protótipo, expressas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros e respectivos valores utilizados na criação da geometria

Parâmetro	Valor
Comprimento do <i>wetland</i>	3,0 m
Largura do <i>wetland</i>	0,8 m
Altura do <i>wetland</i>	0,6 m
Diâmetro do dispositivo de entrada do efluente	0,0254 m
Diâmetro do dispositivo de saída da água tratada	0,0508 m
Diâmetro dos Orifícios de Injetores de microbolhas	0,0254 m

3.2.2 Geração de Malha

A malha numérica (*mesh*) da simulação foi gerada a partir do *ANSYS® Meshing™*. Para a análise fluidodinâmica do protótipo, foi escolhido o método hexaédrico (*hex-dominant*) (Figura 7). Foram utilizadas as mesmas configurações de malha para os dois protótipos, com e sem injetores de microbolhas.

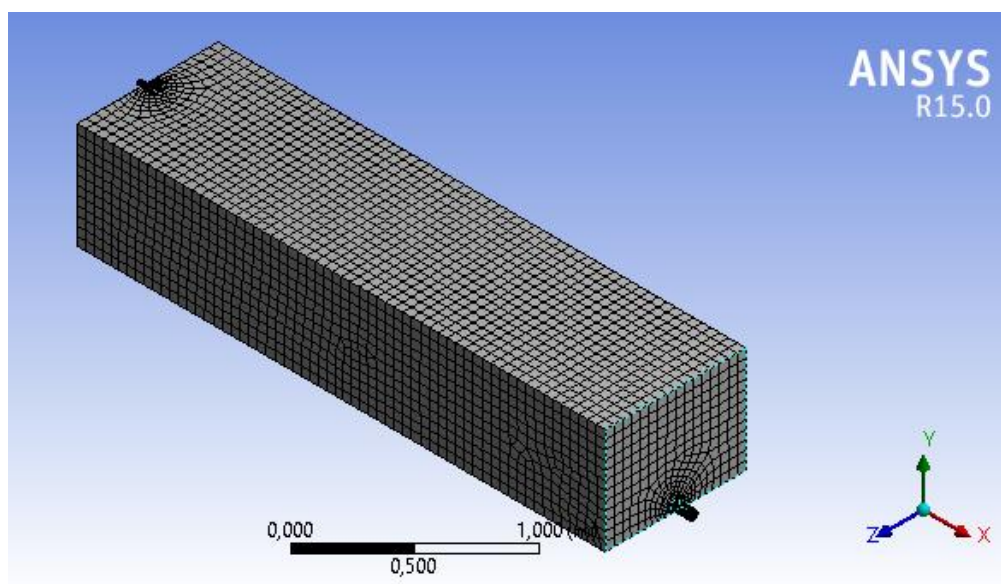


Figura 7 - Malha hexaédrica gerada para a simulação do *wetland* construído

No campo de trabalho do *ANSYS® Meshing™*, foram definidas umas das opções apresentadas nos campos *Physics Preference* e *Solver Preference*. O primeiro define qual o tipo de análise física que o programa irá se basear para criar a malha. Após definição do *Physics Preference*, é definida a opção a ser utilizada do *Solver Preference* que tem como função resolver as equações relacionadas à malha. Determinando esses dois campos, o *ANSYS® Meshing™* automaticamente define outros detalhes necessários para a criação da malha, escolhendo as melhores opções para a configuração definida pelo usuário.

Para a simulação deste trabalho, foram selecionadas CFD e CFX como opções para *Physics Preference* e *Solver Preference*. Os nós e elementos da malha criada foram, respectivamente, 33456 e 37631. As configurações padrões definidas pelo *ANSYS® Meshing™* estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Definições automáticas de itens do *Meshing Control*

Opções do <i>Meshing control</i>	Definição
Relevância central (qualidade da malha)	Grosseira
Tamanho inicial da malha numérica	Variável
Suavização	Média
Transição	Devagar
Taxa de transição	0,77
Ângulo de curvatura	12° a 36°
Prevenção de colisões	Preenchimento com elementos tetraédricos e piramidais (<i>Stair stepping</i>)
Verificação de forma (malha)	CFD

Os valores utilizados nas configurações avançadas de curvatura estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores utilizados nas configurações avançadas de curvatura

Configuração avançada (Curvature)	Valor
Ângulo de curvatura	18° (Padrão do programa)
Tamanho mínimo	0,0001 m
Tamanho máximo da face	0,05 m
Tamanho máximo	0,05 m
Taxa de crescimento	1,20 (Padrão do programa)

A verificação preliminar da qualidade da malha pode ser feita através da análise de parâmetros disponibilizados pelo ANSYS Meshing, entre eles: element quality, orthogonal quality e skewness (ANSYS, 2010; JUSTI, 2012). Os valores de referência e os valores médios obtidos dos parâmetros citados estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Indicadores de qualidade da malha

Indicadores	Valores de referência	Valores médios obtidos
Qualidade do elemento	0: volume nulo/negativo 1: cubo/quadrado perfeito	0,715
Qualidade ortogonal	0: pior qualidade 1: melhor qualidade	0,756
Assimetria	0: célula/face equilátera 1: célula/face assimétrica	0,388

3.2.3 Configurações CFX-Pre

Após determinação da geometria e configuração da malha, foi configurado o pré-processador do ANSYS CFX. No CFX-Pre são adicionados os dados de entrada e condições para que seja possível executar a simulação. Na Tabela 6 estão os fluidos analisados na simulação e suas propriedades.

Tabela 6 - Propriedades dos fluidos integrantes do sistema *wetland* construído-microbolhas

Propriedades	Ar	Óleo lubrificante	Água
Densidade (kg/m ³)	1,185	769,940	997,0
Massa molar (kg/kmol)	28,960	226,446	18,015
Calor específico (J/kg.K)	1,004 x 10 ³	2214,435	4181,7
Viscosidade dinâmica (kg/m.s)	1,831 x 10 ⁻⁵	0,003	8,899 x 10 ⁻⁴
Condutividade térmica (W/m.K)	2,610 x 10 ⁻²	0,14	0,607
Pressão (atm)	1	1	1

Nota: Dados fornecidos pelo banco de dados do software ANSYS Versão 15

As condições de contorno utilizadas na simulação do *wetland* sem microbolhas estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Condições de contorno utilizadas na simulação do *wetland* sem microbolhas

Condições	Regiões	
	Entrada	Saída
Tipo de contorno	Entrada	Saída
Velocidade normal (m/s)	0,5	0,5
Turbulência	Média (5%)	-
Fração volumétrica da água	0,9	-
Fração volumétrica do óleo	0,1	-

As condições de contorno da simulação do *wetland* com microbolhas estão expostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições de contorno utilizadas na simulação do *wetland* com microbolhas

Condições	Regiões		
	Entrada	Injetores	Saída
Tipo de contorno	<i>Inlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>
Velocidade normal (m/s)	0,5	0,5	0,5
Turbulência	Média (5%)	Média (5%)	-
Fração volumétrica da água	0,9	0,99	-
Fração volumétrica do óleo	0,1	-	-
Fração volumétrica do ar	-	0,01	-

No que se refere às paredes do protótipo, foi definido que as paredes não apresentam rugosidades (devido ao material utilizado) e que não há deslizamento de água, ar ou óleo sobre as mesmas. O tempo simulado foi de 200 horas (aproximadamente 8 dias) para ambos protótipos.

3.2.3.1 Equações Aplicadas no Desenvolvimento da Simulação

Para o desenvolvimento da análise e solução do problema na etapa correspondente ao *CFX-Solver*, é preciso que sejam definidas no pré-processamento as equações a serem resolvidas. Para a simulação deste trabalho, o *ANSYS® CFX®-Pre* utilizou equações governantes da

continuidade e de momento, além de equações de dissipação da turbulência e energia cinética turbulenta.

Para simbolizar as unidades dos termos das equações citadas acima, foram utilizadas unidades gerais para dimensões, como demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Unidades gerais para as dimensões utilizadas nas equações

Dimensões	Unidades
Comprimento	L
Massa	M
Tempo	T
Temperatura	Θ
Quantificação química	A

Fonte: ANSYS (2009)

A equação da continuidade, a qual demonstra o princípio da Lei de conservação de massa, foi expressa pela Equação 6 (ANSYS, 2009).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (6)$$

Sendo: ρ , densidade ($M L^{-3}$); t , tempo (T) e U , vetor de velocidade ($L T^{-1}$).

A equação de momento representa a aplicação da Segunda Lei de Newton, a qual atesta a conservação da quantidade de movimento. A Equação 7 traz a expressão utilizada pelo ANSYS® 15 para determinação da equação de momento.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (7)$$

Sendo: S_M a fonte de momento, ou a soma das forças de corpo ($M L^{-2} T^{-2}$); e τ tensão de cisalhamento ($M L^{-1} T^{-2}$) que pode ser determinado pela Equação 8.

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U) \quad (8)$$

Sendo: μ a viscosidade molecular ($M L^{-1} T^{-1}$); T a temperatura (Θ); e δ matriz identidade ou delta de Kronecker.

Por se tratar de um sistema que envolve operações com óleo e possíveis evaporações deste, foi escolhido automaticamente pelo CFX-Pre o modelo de equações turbulentas k - ϵ . A dissipação turbulenta, ou a dissipação do redemoinho turbulento (em inglês, *turbulence eddy dissipation*), é a taxa a qual as flutuações da velocidade se dissipam. É representada por ϵ e tem como unidade $L^2 T^{-3}$. A energia cinética de turbulência, representada pela letra k , é definida como as variações apresentadas pela velocidade e tem como unidade $L^2 T^{-2}$ (ANSYS, 2009).

3.2.4 CFX-Solver Manager e CFD-Post

Após definir a geometria, *mesh* e as configurações de entrada, foi executada a solução da simulação através do *CFX-Solver Manager*, integrante do pacote ANSYS® 15. Neste programa foi possível obter informações acerca da solução, por meio de gráficos relacionados aos fenômenos de transporte do sistema.

Por fim, foi utilizado o programa *CFD-Post*, também integrante do pacote ANSYS® 15, para análise quantitativa e visualização, através de gráficos, dos resultados obtidos da simulação. Para este trabalho foi analisada a distribuição da fração volumétrica de óleo utilizando gráficos de contorno e plano.

3.3 CRITÉRIOS DE OPERAÇÃO

A operação do *wetland* construído piloto utilizado neste trabalho teve como base três critérios essenciais para seu desempenho: regime de escoamento, tempo de exposição máxima e tempo de poda.

Por se tratar de um *wetland* construído com dimensionamento análogo ao de um decantador contínuo horizontal, a determinação do grau de turbulência é extremamente importante devido à sua influência no processo de separação física (LUDWIG, 1997). O regime de escoamento foi determinado a partir do Número de Reynolds, o qual torna possível a previsão da eficiência de separação física do protótipo através de parâmetros como velocidade de escoamento e diâmetro hidráulico (YIN; KOCH, 2008).

Devido à sua toxicidade, derivados de petróleo são compostos nocivos às plantas aquáticas. Portanto, torna-se necessário limitar a exposição das macrófitas a esses poluentes. No

caso da espécie *Eichhornia crassipes*, Crema, Biudes e Camargo (2011) determinaram 3 L/m² de petróleo como dosagem máxima suportada por mudas da *Eichhornia crassipes*. Com base neste estudo, foi estimado o tempo necessário para atingir essa dosagem máxima de óleo, visando manter as melhores condições para o desenvolvimento das macrófitas. Por fim, foi elaborado um mecanismo para remoção do óleo em excesso.

Em consequência da sua acelerada taxa de crescimento, as macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes* atingem altas densidades populacionais. Em *wetlands* construídos, a quantidade de macrófitas deve ser controlada para que não ocorram alterações no ambiente devido ao excesso de mudas (SHU *et al.*, 2015). Portanto, um sistema de retirada de mudas em períodos definidos se torna indispensável para a manutenção do equipamento.

3.3.1 Regime de Escoamento

A determinação do regime de escoamento foi realizada através do Número de Reynolds, número adimensional que relaciona as forças de inércia e as forças de viscosidade (YIN; KOCH, 2008). O Número de Reynolds pode ser encontrado pela Equação 9.

$$Re = \frac{v_c D_H \rho_c}{\mu_c} \quad (9)$$

Sendo v_c a velocidade dinâmica média de escoamento da fase contínua, D_H o diâmetro hidráulico, μ_c a viscosidade dinâmica da fase contínua e ρ_c a densidade da fase contínua. No caso deste estudo, a fase contínua corresponde a água e a dispersa ao óleo lubrificante. A velocidade dinâmica (v_c) e o diâmetro hidráulico (D_H) são determinados através das Equações 10 e 11, respectivamente.

$$v_c = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Sendo Q a vazão do efluente (m³/s) e A a área do *wetland* construído (m²).

$$D_H = \frac{4A_m}{P_m} \quad (11)$$

Sendo A_m a área molhada do *wetland* construído (m^2) e P_m o perímetro molhado do *wetland* construído (m).

A partir da definição do Número de Reynolds e do regime de escoamento, é possível estimar a eficiência da separação de fases da mistura submetida a decantação. Na Tabela 10 estão os resultados previstos de separações por decantação para diferentes Números de Reynolds.

Tabela 10 – Separações físicas esperadas para diferentes Números de Reynolds

Número de Reynolds	Resultado esperado
< 5000	Separação física com poucos problemas
5000 – 20000	Separação com alguns transtornos
20000 – 50000	Grandes dificuldades de separação
> 50000	Pouca possibilidade de separação

Fonte: LUDWIG (1997)

3.3.2 Tempo de Exposição das Macrófitas ao Óleo

Visando a manutenção do ambiente e a sobrevivência das mudas de *Eichhornia crassipes*, foi estimado o tempo necessário para atingir a espessura máxima suportável de óleo para as macrófitas no *wetland* construído. Para isto, foi tomada como referência a dosagem testada por Crema, Biudes e Camargo (2011) de 3 L/ m^2 de petróleo bruto da Petrolífera de Urucu. A Equação 12 foi utilizada para a determinação do tempo máximo de exposição.

$$L \cdot e \cdot C = t \cdot \varphi \cdot Q \quad (12)$$

Sendo: L a largura do *wetland* construído (m); e a espessura máxima do óleo (m); C o comprimento do *wetland* construído (m); t, tempo máximo de exposição (h); φ , porcentagem de óleo do efluente; Q, vazão volumétrica de entrada (m^3/h).

3.3.3 Tempo de Poda

De acordo com estudos realizados por Kawai e Grieco (1983), a máxima eficiência de separação de um *wetland* construído preenchido por *Eichhornia crassipes* é atingida quando sua área está 70% ocupada pelas mudas. Acima deste limite de ocupação, as macrófitas tendem a saturar o ambiente, iniciando um processo de decréscimo de atividade biológica, resultando na

morte das mudas. Portanto, torna-se indispensável determinar o tempo de poda necessário para conter a área ocupada pelas mudas. Para isto, foi utilizada a Equação 13.

$$\ln A = \ln A_o - k_{red} \times t \quad (13)$$

Sendo: A a área livre final do wetland construído (m²); A_o, a área inicialmente livre do wetland construído (m²); k_{red}, a constante de redução de área livre (dias⁻¹); t o tempo (dias).

3.4 EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO

Para a realização dos testes experimentais foi utilizado efluente sintético com concentração aproximada de 45 mg/L de óleo lubrificante, proveniente de um flotor por ar dissolvido (FAD), localizado no mesmo galpão onde está instalado o protótipo do *wetland* construído.

Para a produção do efluente sintético, foi utilizado Óleo Lubrificante Monoviscoso DULUB HD 40 cuja composição inclui hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos, aromáticos, poliaromáticos e aditivos de 3,46% com propriedades anticorrosiva, antidesgaste, antiespumante, antioxidante, detergente, dispersante e agente de reserva alcalina, de acordo com a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (2012).

Antes de ser introduzido no FAD, a água e o óleo lubrificante foram dispostos em um tambor com capacidade de 200 litros. Conectada ao tambor, uma bomba para um tanque de mistura promoveu uma intensa recirculação dos fluidos imiscíveis. Após a operação, o efluente sintético criado apresentou uma fina camada de óleo na superfície, além de emulsões geradas devido ao constante contato entre as fases. O procedimento durou 30 minutos.

3.5 EXPERIMENTOS NO WETLAND CONSTRUÍDO SEM MICROBOLHAS

No início dos testes experimentais, o protótipo sem injetores e o reserva foram preenchidos com água potável e, posteriormente, por 30 mudas de macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes* (Figura 8), coletadas em um açude localizado no bairro de Apipucos, Recife-PE.



Figura 8 - Protótipos do *wetland* construído preenchidos por macrófitas

Após a disposição das macrófitas, foi introduzido no protótipo utilizado para os testes o efluente oleoso sintético, até altura de 0,4 metros (Figura 9). A vazão volumétrica de entrada foi de 500 L/h e o regime de operação foi estacionário.



Figura 9 - Protótipo preenchido com efluente oleoso

O regime de escoamento no *wetland* construído foi dividido da seguinte forma: a fase contínua, água, teve regime contínuo. Por sua vez, o óleo se enquadra no regime de semi-batelada, uma vez que há o seu acúmulo na lâmina d'água e nas raízes das macrófitas. Para o protótipo sem microbolhas, o tempo para atingir o preenchimento do protótipo com o efluente foi cerca de 2 horas e meia. Em seguida a completa introdução do efluente, foram retiradas amostras em quintuplicata de 70 mL na entrada do protótipo. Após 2 semanas, foram coletadas outras amostras em quintuplicata de 70 mL no final do *wetland*. Os testes experimentais ocorreram no período entre 3 e 17 de agosto de 2015, com a retirada das amostras às 10 horas da manhã do primeiro dia e último dia do experimento.

3.6 PRODUÇÃO E INJEÇÃO DE MICROBOLHAS NO PROTÓTIPO PILOTO

As microbolhas foram produzidas através de uma bomba centrífuga instalada no arranjo experimental do FAD. A bomba utilizada tem motor com 2,0 hp de potência e altura manométrica total de 60 metros de coluna de água. Foi instalada uma válvula nas proximidades do final da linha de descarga da bomba onde se monitorou sua abertura a fim de produzir uma pressão entre 1,5 e 5,5 bar, facilitando a produção de microbolhas.

A produção de microbolhas foi realizada a partir da mistura de um fluxo de ar atmosférico com água aspirada no interior da carcaça e ao longo da linha de descarga da bomba centrífuga. A entrada de ar foi controlada por um rotâmetro localizado no tubo de sucção da bomba. A adição de microbolhas no *wetland* construído foi realizada por meio de dois injetores conectados à saída da bomba centrífuga.

Os injetores foram confeccionados com tubos e conectores de policloreto de polivinila (PVC). Foram instalados no início e na metade da base do *wetland* construído, regiões onde há maior necessidade de tratamento do efluente, uma vez que apresentam maiores concentrações de poluentes do que na região que compreende a saída do protótipo (Figura 10).



Figura 10 - Injetores de microbolhas instalados na base do *wetland* construído

Após a instalação dos injetores, o *wetland* construído recebeu novas mudas de macrófitas, juntamente com o efluente sintético, reiniciando os testes experimentais. O regime de escoamento permaneceu o mesmo, sendo contínuo para a água e semi-batelada para o óleo. Foram mantidas a mesma vazão e amostragem dos testes realizados no protótipo sem injetores, com retirada de amostras em quintuplicata de 70 mL nas proximidades da entrada do *wetland* imediatamente depois do preenchimento total com efluente sintético e, após 2 semanas, nova retirada de amostras em quintuplicata de 70 mL nas proximidades da saída de água tratada.

Os testes experimentais ocorreram no período entre 31 de agosto a 14 de setembro de 2015, com a retirada das amostras às 10 horas da manhã do primeiro dia e último dia do experimento.

3.7 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ÓLEO

3.7.1 Análise das Amostras de Água Oleosa

As amostras retiradas nos dois protótipos foram analisadas no laboratório integrante do Centro de Gestão de Tecnologia – Nordeste, localizado no centro do Recife, bairro de São José. A análise utilizada para a determinação quantitativa de óleos e graxas foi baseada no método de partição gravimétrica, correspondente a seção 5520 *Oil and Grease - B. Partition-Gravimetric*

Method da 20ª edição do livro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* publicado pela *American Public Health Association – APHA* (APHA, 1999). Os béqueres e cadinhos escolhidos para coleta foram lavados com solvente n-Hexano P.A. da marca Cinética. Após lavagem, os materiais foram pesados através de uma balança de precisão analítica 0,0001g Bel Engineering modelo M 241A.

Imediatamente depois da coleta, as amostras foram encaminhadas para o laboratório, a fim de garantir melhores resultados. Foi transferido o conteúdo de água oleosa de cada amostra, por vez, e 70 mL de n-Hexano, obedecendo uma proporção de 1:1 (v/v), para um funil de decantação dentro de uma estufa com temperatura 80°C por aproximadamente 20 minutos. Para garantir que todo o conteúdo de óleo fosse transferido, os recipientes utilizados nas coletas foram lavados com solvente. Após o preenchimento, o funil de decantação foi vigorosamente agitado por 2 minutos, sendo posteriormente deixado em repouso para efetuação da separação física (Figura 11).

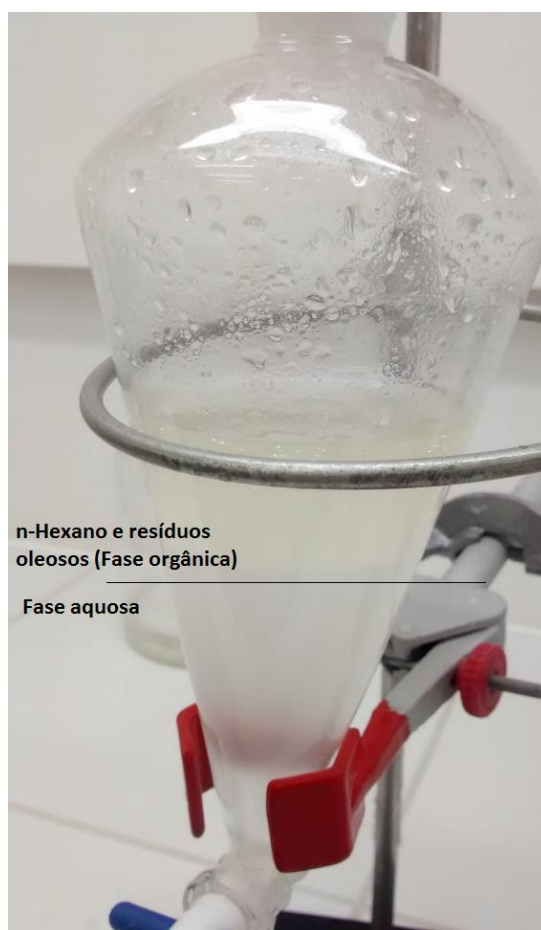


Figura 11 - Separação física da água oleosa

Com a visualização e estabilização da separação após, aproximadamente, 10 minutos, a camada aquosa foi drenada e reservada em um béquer. Posteriormente, a camada menos densa correspondente ao n-Hexano e ao óleo foi drenada do funil e encaminhada para secagem a 80 °C em uma placa aquecedora Fisatom modelo 510 dentro da estufa para evaporação do solvente. Em seguida, os béqueres e cadinhos foram inseridos em um dessecador por 1 hora.

Por fim, após calibração da balança, os béqueres e cadinhos contendo as amostras oleosas foram pesados novamente. De acordo com o apresentado pelo *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 1999), assumindo-se que os materiais estariam livres de resíduos, a diferença de massa antes e depois da coleta seria atribuída ao conteúdo de óleo. Portanto, a concentração de óleos e graxas nas amostras foi determinada através da Equação 14:

$$C_{og} = \frac{(A - B) \times 1000}{V_{amostra}} \quad (14)$$

Sendo: C_{og} a concentração de óleos e graxas (mg/L); A a massa final do recipiente (mg); B a massa inicial do recipiente (mg); $V_{amostra}$ o volume da amostra (mL).

As concentrações obtidas foram submetidas à análise estatística, por meio da ferramenta *box plot*, através do programa STATISTICA Versão 8.0

3.7.2 Coeficientes de Remoção e Eficiência

A determinação da taxa de remoção dos resíduos oleosos foi realizada a partir do modelo cinético de primeira ordem proposto por Pardue *et al.* (2014), descrito na Equação (15):

$$k = \frac{-\ln(C/C_o)}{t} \quad (15)$$

Sendo: k a constante de remoção de resíduos oleosos (dias^{-1}); C a concentração final de resíduos oleosos (mg/L); C_0 a concentração inicial de resíduos oleosos (mg/L); t tempo do experimento (dias).

A eficiência do tratamento, relacionada a redução de concentração de resíduos oleosos no efluente, foi determinada de forma percentual por meio da Equação (16), também proposta por Pardue *et al.* (2014).

$$Eficiência(\%) = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (16)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS PROTÓTIPOS

Para a simulação fluidodinâmica, foi escolhido como parâmetro a fração volumétrica do óleo. Visualizando a variação da fração volumétrica do óleo foi possível estimar a qualidade do tratamento.

4.1.1 Simulação do *Wetland* Construído Piloto sem Microbolhas

A distribuição axial das frações volumétricas da fase orgânica após simulação de 200 horas de operação no protótipo sem microbolhas está apresentada na Figura 12.

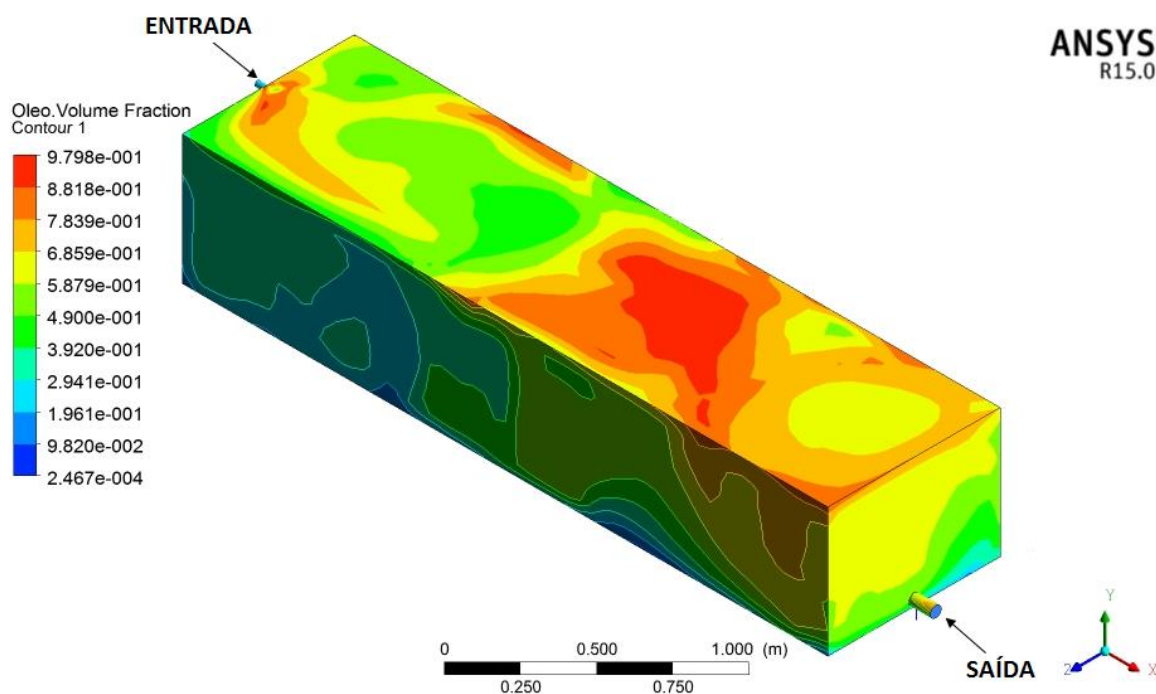


Figura 12 - Distribuição de frações volumétricas do óleo no piloto sem microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul)

A distribuição da fração volumétrica do óleo nos planos x, y e z está apresentada na Figura 13.

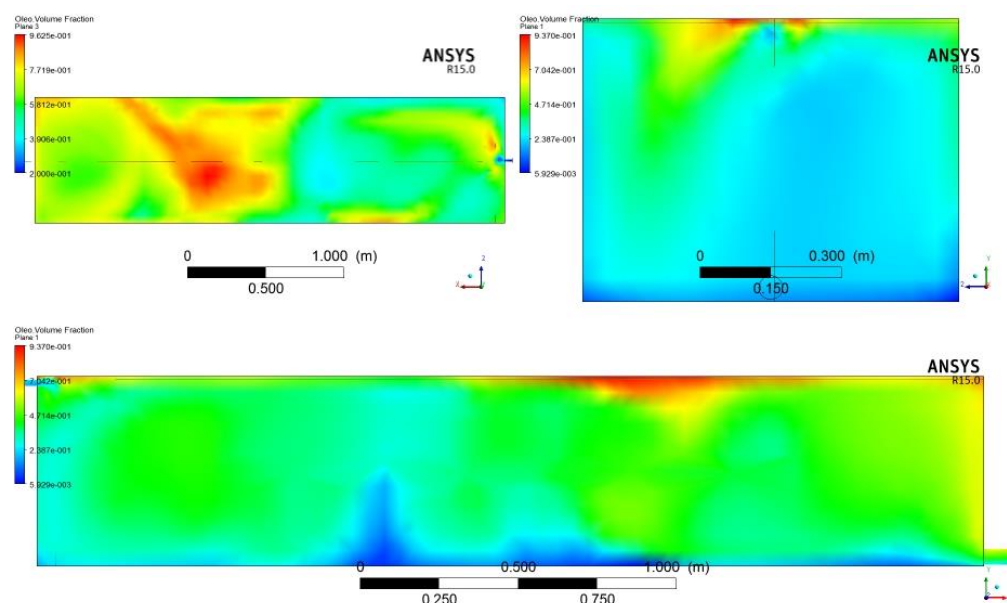


Figura 13 - Frações volumétricas do óleo no protótipo sem microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul)

As Figuras 12 e 13 demonstram que as frações volumétricas de óleo não estavam retidas apenas na superfície do *wetland* construído, estando presentes também nas proximidades da saída de água tratada. O espalhamento das frações volumétricas indica que a separação física não foi totalmente eficiente. De acordo com Yin e Koch (2008), em separadores gravitacionais com deve haver um balanço da altura das fases proporcionado pela diferença de densidade. Ainda de acordo com os autores, a fase dispersa deve atingir, no máximo, cerca de 10% da profundidade do equipamento, para que não ocorra a presença das duas fases na saída do separador.

Portanto, de acordo com o demonstrado na simulação, para que se obtenha melhores resultados é necessário que o tratamento no protótipo sem adição de microbolhas seja executado por mais tempo que 1 semana, tempo utilizado no CFD. Essa alteração implicaria em diversos inconvenientes como a necessidade do aumento na frequência de podas e, conseqüente, aumento na produção de biomassa (KAWAI; GRIECO, 1983; SHU *et al.*, 2015)

4.1.2 Simulação do *Wetland* Construído Piloto com Microbolhas

A Figura 14 apresenta a distribuição das frações volumétricas do óleo no *wetland* construído piloto com microbolhas.

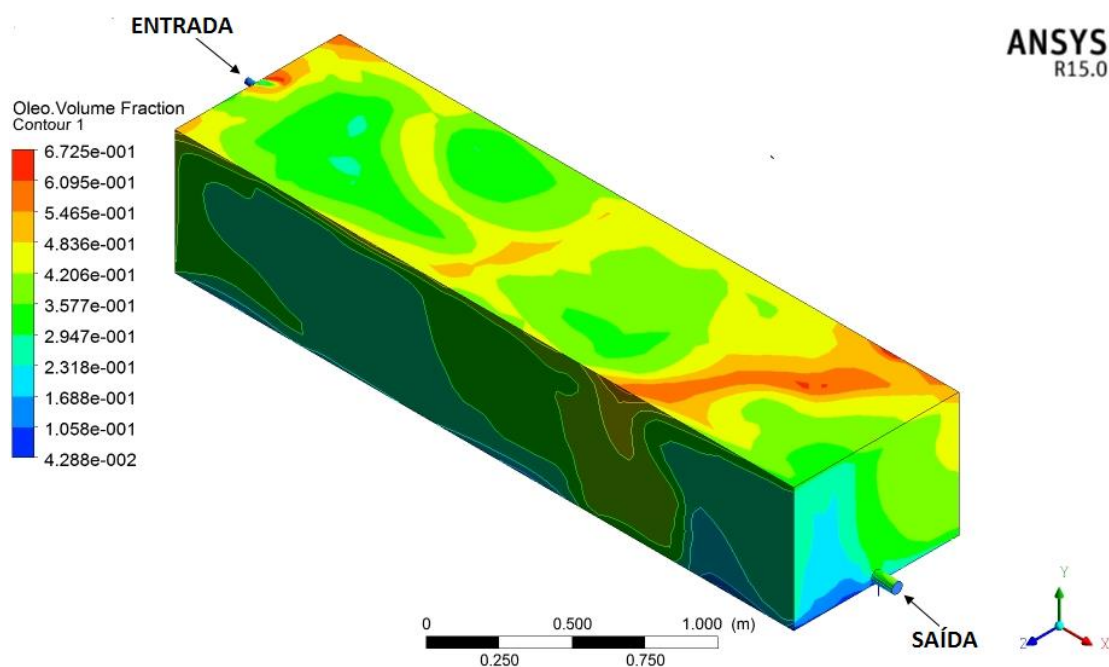


Figura 14 - Distribuição das frações volumétricas da fase orgânica no piloto com microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul)

A distribuição da fração volumétrica do óleo nos planos x, y e z está apresentada na Figura 15.

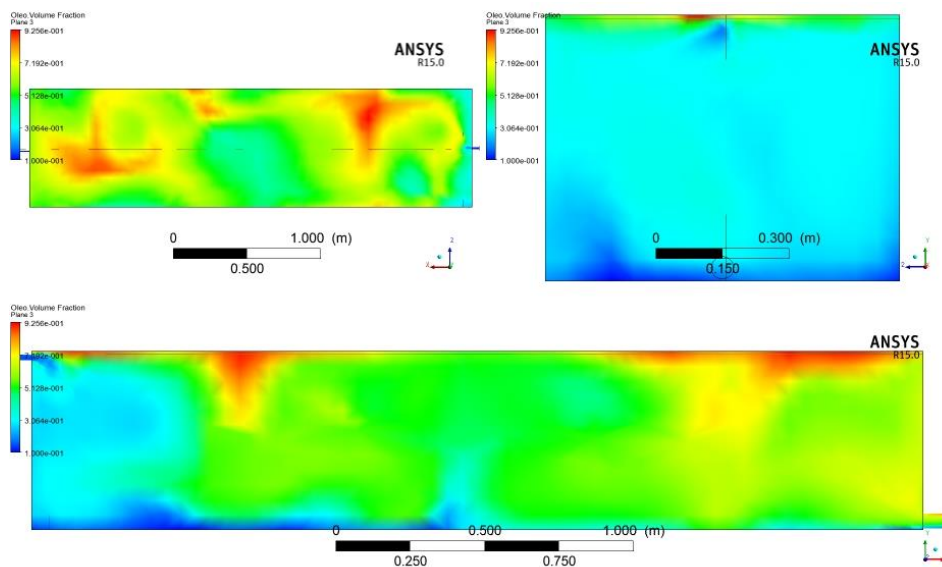


Figura 15 - Frações volumétricas do óleo no protótipo com microbolhas variando da maior intensidade (vermelho) para a menor (azul)

As Figuras 14 e 15 demonstraram que as frações volumétricas de óleo, em sua maioria, se encontraram nas proximidades da superfície do *wetland* construído piloto com injetores. Assim, é possível observar a influência positiva das microbolhas, uma vez que no protótipo sem injetores as frações de óleo se espalharam ao longo do *wetland*, como exposto nas Figuras 12 e 13.

Pode-se afirmar que as microbolhas conseguiram promover o arraste da fase orgânica para superfície, intensificando a separação gravitacional. De acordo com Agarwal, Ng e Liu (2011), devido suas grandes áreas superficiais, as microbolhas favorecem o processo de flotação, aumentando a eficiência do tratamento. Com a retenção da fase oleosa na superfície, há o aumento de contato dos resíduos oleosos com as raízes das macrófitas, permitindo a biodegradação do óleo nas raízes destas (MAYO, 2014).

4.2 NÚMERO DE REYNOLDS

A eficiência da separação física ocorrida no *wetland* construído piloto foi estimada através da determinação do número adimensional de Reynolds por meio da Equação 9 (LUDWIG, 1997).

Os valores utilizados no desenvolvimento desta equação estão na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores utilizados para determinação do Número de Reynolds

Termo	Valor
v_c (m/s)	$4,34 \cdot 10^{-4}$
D_H (m)	0,8
μ_c (kg/m.s)	$8,90 \cdot 10^{-4}$
ρ_c (kg/m ³)	1000

O número de Reynolds encontrado para esta configuração foi de 390,11, indicando a ocorrência mínima de problemas no processo de separação física no *wetland* construído piloto, com base na Tabela 10 (LUDWIG, 1997).

A baixa velocidade necessária para que ocorra eficientemente a separação por diferença de densidade é naturalmente atingida em *wetlands* construídos povoados por macrófitas flutuantes. Por percorrerem desde a lâmina d'água até a base do equipamento, as raízes das plantas aquáticas provocam um retardo no fluxo de efluente, mantendo a velocidade baixa e, por sua vez, favorecendo a separação por gravidade (LUDWIG, 1997).

Portanto, o Re encontrado constatou que o dimensionamento proposto foi bem-sucedido ao criar uma analogia entre *wetlands* construídos e decantadores contínuos horizontais, uma vez que o protótipo deste trabalho apresentou geometria e velocidade ideais para um separador gravitacional (AL-YAARI; AL-SARKHI; ABU-SHARKH, 2012).

4.3 TEMPO DE EXPOSIÇÃO MÁXIMA

O tempo necessário para que seja atingida a espessura máxima de óleo na lâmina d'água suportável pelas macrófitas foi determinado através da Equação 12.

Os valores utilizados no desenvolvimento da Equação 12 estão apresentados na Tabela 12. A espessura máxima de óleo (e) foi baseada na máxima dosagem suportada por mudas de *Eichhornia crassipes* (CREMA; BIUDES; CAMARGO, 2011).

Tabela 12 - Valores utilizados para determinação do tempo necessário para espessura máxima

Termo	Valor
L (m)	0,80
C (m)	3,00
e (m)	0,0072
Porcentagem volumétrica de óleo no efluente (%)	0,0045
Q (m ³ /s)	0,000139

Para as condições expostas na Tabela 12, o tempo até que fosse atingida a espessura máxima de óleo suportável pelas macrófitas foi de 31,97 dias.

Nos testes realizados por Crema, Biudes e Camargo (2011), mudas de *Eichhornia crassipes* resistiram a uma dosagem máxima de 3 L/m² de óleo proveniente da Petrolífera de Urucu por 84 dias, com posterior mortalidade total das macrófitas. Os autores relataram que, durante o experimento, condições ambientais como pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido sofreram modificações drásticas devido ao longo período de exposição ao óleo e à saturação da água.

Dessa forma, a utilização de um tempo de 32 dias de exposição máxima ao óleo permitiria que ocorresse uma manutenção ideal das condições favoráveis para a sobrevivência das macrófitas, evitando a perda total das mudas e garantindo uma melhor eficiência no tratamento. Após esse período, torna-se imprescindível avaliar a espessura do óleo na superfície e, se necessário, remover o seu excesso.

4.3.1 Coletor de Óleo

Para regular a exposição das macrófitas de *Eichhornia crassipes* à camada oleosa do efluente, foi elaborado um mecanismo auxiliar capaz de coletar a fase orgânica presente na lâmina d'água. Ao ser instalado na extremidade superior à saída de água tratada, o coletor regulável (Figura 16) fica localizado na altura da camada livre de óleo, permitindo que esta possa ser removida.

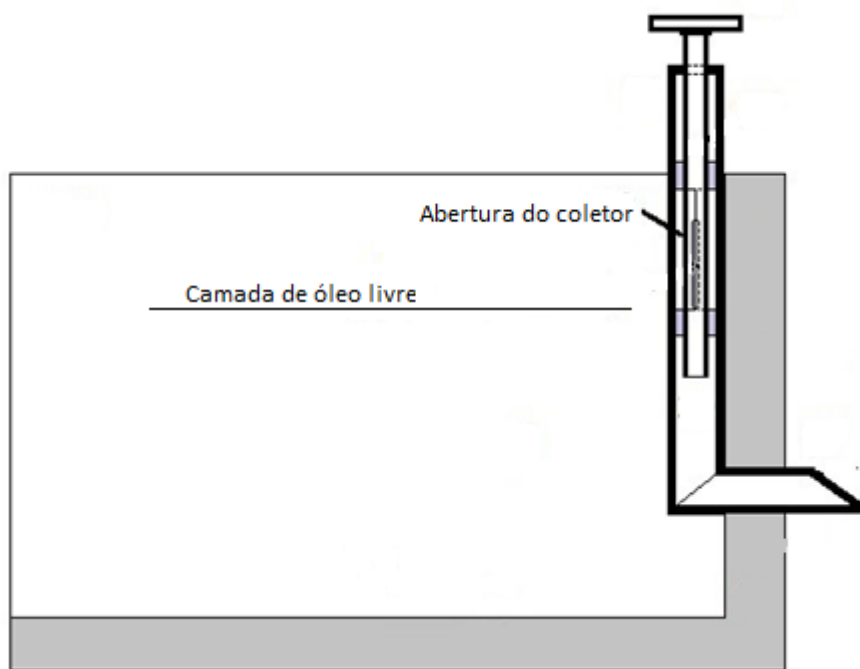


Figura 16 – Coletor de óleo livre

4.4 TEMPO DE PODA

Para o desenvolvimento da Equação 13 foi considerada 1,2 m² de área livre inicialmente e área final livre de 0,72 m². O valor escolhido para k_{red} foi de 0,099 dia⁻¹ utilizado para macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes* no tratamento de águas oleosas (NASCIMENTO *et. al*, 2014).

O tempo encontrado foi de 5,05 dias. Assim, para o *wetland* construído com metade da área inicialmente livre de macrófitas, é necessário que ocorra uma poda a cada 5 dias para manter a ocupação do protótipo em 70%, e consequentemente, maximizar a capacidade de separação.

Manter a área ocupada por aguapés de qualquer *wetland* construído em apenas 70% é vital para o sucesso do tratamento. Conforme apresentado no estudo realizado por Shu *et al.* (2015), altas densidades de mudas de *Eichhornia crassipes* resultam na mortalidade destas, devido às competições por oxigênio e nutrientes essenciais, além de alterações nas condições ideais de cultivo das plantas aquáticas. Ainda de acordo com Shu *et al.* (2015), macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes* possuem maiores taxas de crescimentos do que qualquer planta aquática, o que reforça a necessidade da limitação do preenchimento dessas em *wetlands* construídos. A decomposição de macrófitas dentro de *wetlands* construídos causam alterações. Devido aos distúrbios causados

4.5 TESTES EXPERIMENTAIS NO WETLAND CONSTRUÍDO PILOTO SEM MICROBOLHAS

Na Tabela 13 estão as concentrações iniciais e finais de óleo das amostras em quintuplicata retiradas do *wetland* construído piloto sem microbolhas.

Tabela 13 – Concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo sem microbolhas

Amostra	Concentração inicial de óleo (mg/L)	Concentração final de óleo (mg/L)
1	44,3851	35,8372
2	43,3977	34,6901
3	43,9831	32,8046
4	43,6289	31,5744
5	44,8985	36,5731
Média	44,0587	34,2959
Desvio padrão	0,5998	2,0825

Utilizando a Equação 15 e as médias das concentrações iniciais e finais, foi possível determinar uma constante de remoção de $0,018 \text{ dia}^{-1}$ para o protótipo sem microbolhas. Através da Equação 16, verificou-se que a eficiência de redução de resíduos oleosos no *wetland* construído sem microbolhas foi de 22,16%, no fim do experimento com duração de 2 semanas. A média das concentrações finais de óleo $34,2959 \pm 2,0825 \text{ mg/L}$ encontra-se acima do limite de 20 mg/L exigido pela Resolução CONAMA 430/2011, indicando uma baixa eficiência de tratamento do efluente oleoso.

Resultados aproximados foram obtidos por Al-Baldawi *et al.* (2013), utilizando *wetland* construído de escoamento superficial para tratamento de efluente oleoso. Após 14 dias de experimento, o *wetland* construído piloto atingiu remoção de 33,33% de TPH na água residuária com concentração inicial de 3% em volume de óleo diesel.

O alto teor de óleo apresentado na saída de água tratada do *wetland* construído sugere que não ocorreu uma retenção da fase orgânica na superfície do protótipo, indicando a necessidade de um dispositivo capaz de promover o arraste das gotículas de óleo e a sua posterior permanência nas proximidades da lâmina d'água. Este resultado confirma o apresentado pela simulação, que a separação proporcionada pelo *wetland* construído sem injetores seria insuficiente.

Para o aumento da eficiência de tratamento de efluentes oleosos em *wetlands* construídos, Pardue *et al.* (2014) indicaram ajustes no dimensionamento como a adição de pedras na base do *wetland* construído e aeração, visando melhorias nas condições de oxidação. Wu *et al.* (2015) comprovaram que os *wetlands* construídos possuem baixas taxas de transferência de oxigênio, limitando a eficiência do tratamento. Assim, torna-se necessário que seja aplicado um fornecimento de oxigênio, principalmente em efluentes industriais, os quais possuem altas concentrações de poluentes.

Visando analisar a dispersão dos dados, foram construídos gráficos *box plot*, utilizando o programa *Statistica* 8.0 (Figura 17), para as concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo sem microbolhas.

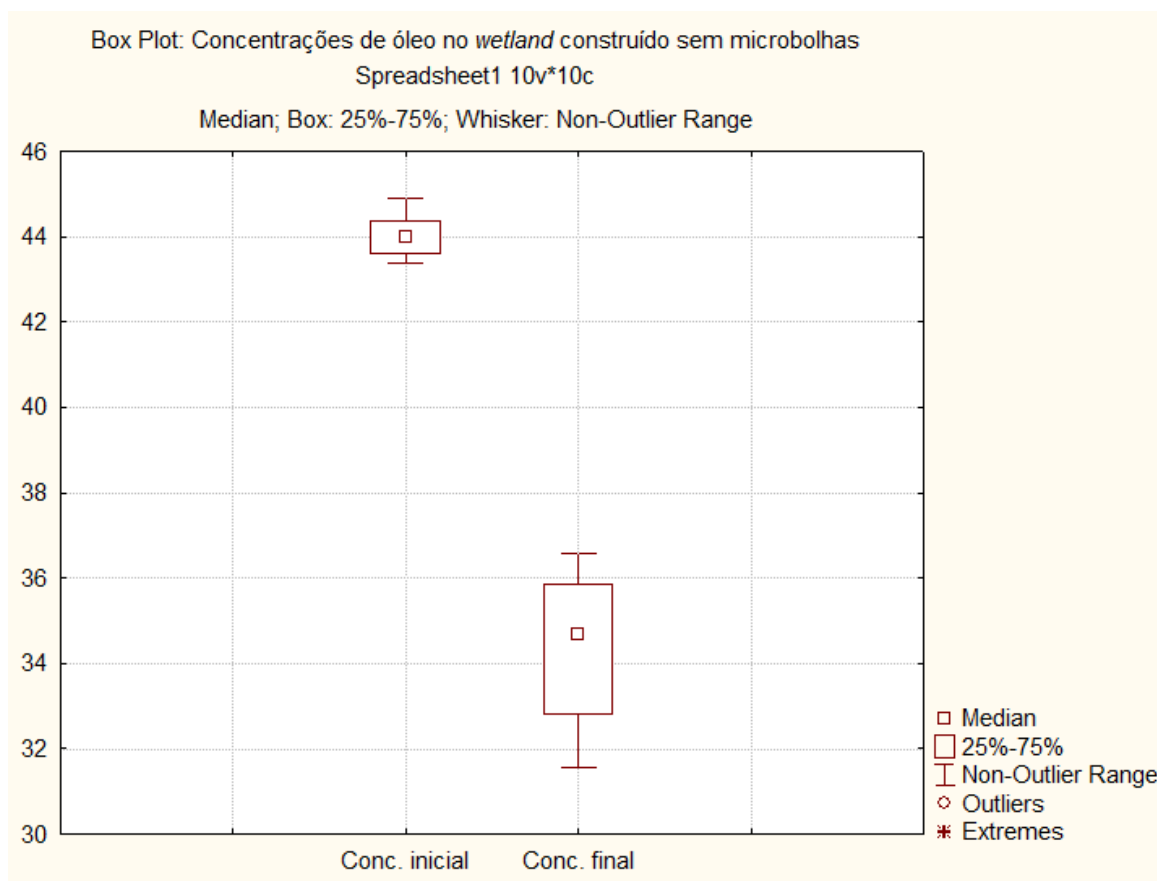


Figura 17 - Box plot das concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo sem microbolhas

A Figura 17 indicou que não houve ocorrência de valores incomuns (*outliers*) e extremos nas concentrações iniciais e finais de óleo do *wetland* construído sem microbolhas, eliminando efeitos negativos no desvio padrão e na distribuição dos dados. A ausência de valores discrepantes em ambos conjuntos de dados indica que não ocorreram erros de leitura e na execução do experimento. Observou-se que os valores relativos à concentração inicial obtiveram dispersão menor que os valores referentes à concentração final. Como não há presença de *outliers*, essa diferença na distribuição se torna aceitável.

4.6 TESTES EXPERIMENTAIS NO WETLAND CONSTRUÍDO PILOTO COM ADIÇÃO DE MICROBOLHAS

Após instalação dos injetores e preenchimento com novo efluente sintético e novas mudas, foi iniciada a segunda etapa de testes experimentais, seguindo o mesmo roteiro dos

realizados no protótipo sem microbolhas. As concentrações de óleo das amostras em quintuplicata retiradas no início e no final dos testes estão na Tabela 14.

Tabela 14 - Concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo com injetores de microbolhas

Amostra	Concentração inicial de óleo (mg/L)	Concentração final de óleo (mg/L)
1	44,7373	13,5007
2	45,6708	11,2214
3	45,4738	10,5657
4	45,1753	12,6157
5	46,0158	10,2029
Média	45,4146	11,6213
Desvio padrão	0,4865	1,3971

A constante de remoção de resíduos oleosos, determinada pela Equação 15, no protótipo com microbolhas foi de 0,097 dia⁻¹. A partir da Equação 16, determinou-se que a eficiência de remoção de resíduos oleosos foi de 74,41% no *wetland* construído piloto com microbolhas. A concentração média final de óleo 11,6213 ± 1,3971 mg/L encontra-se abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011 de 20 mg/L, indicando a alta eficiência de tratamento do protótipo aerado e a importância da separação água-óleo por meio da flotação causada pelas microbolhas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Eke (2008), o qual utilizou *wetlands* construídos verticais aerados em escala piloto para remoção de hidrocarbonetos de efluentes. Após 1 mês de tratamento, foi obtida uma remoção média de 90% nos seis protótipos integrantes do sistema, a qual poderia ser alcançada neste trabalho caso a duração do experimento fosse prolongada.

A redução da concentração do efluente oleoso pode ser atribuída à adição de microbolhas, a qual provocou a flotação no *wetland* construído, de forma que os resíduos oleosos foram arrastados e retidos nas proximidades da lâmina d'água, melhorando assim a separação por densidade e reduzindo a ocorrência de teores de óleo na saída da água tratada (AGARWAL; NG; LIU, 2011).

Assim como a flotação, o fornecimento de oxigênio está diretamente relacionado à redução da concentração de óleo na saída do protótipo aerado. O aumento da disponibilidade de oxigênio proporciona uma melhoria na eficiência de remoção de hidrocarbonetos, e consequentemente, uma queda expressiva na concentração de óleo. No protótipo com injetores de

microbolhas, o fluxo de ar tende a aumentar o processo de volatilização de hidrocarbonetos, auxiliando a redução de sua concentração (EKE, 2008). Os gráficos do tipo *box plot* para as concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo com microbolhas estão apresentados na Figuras 18.

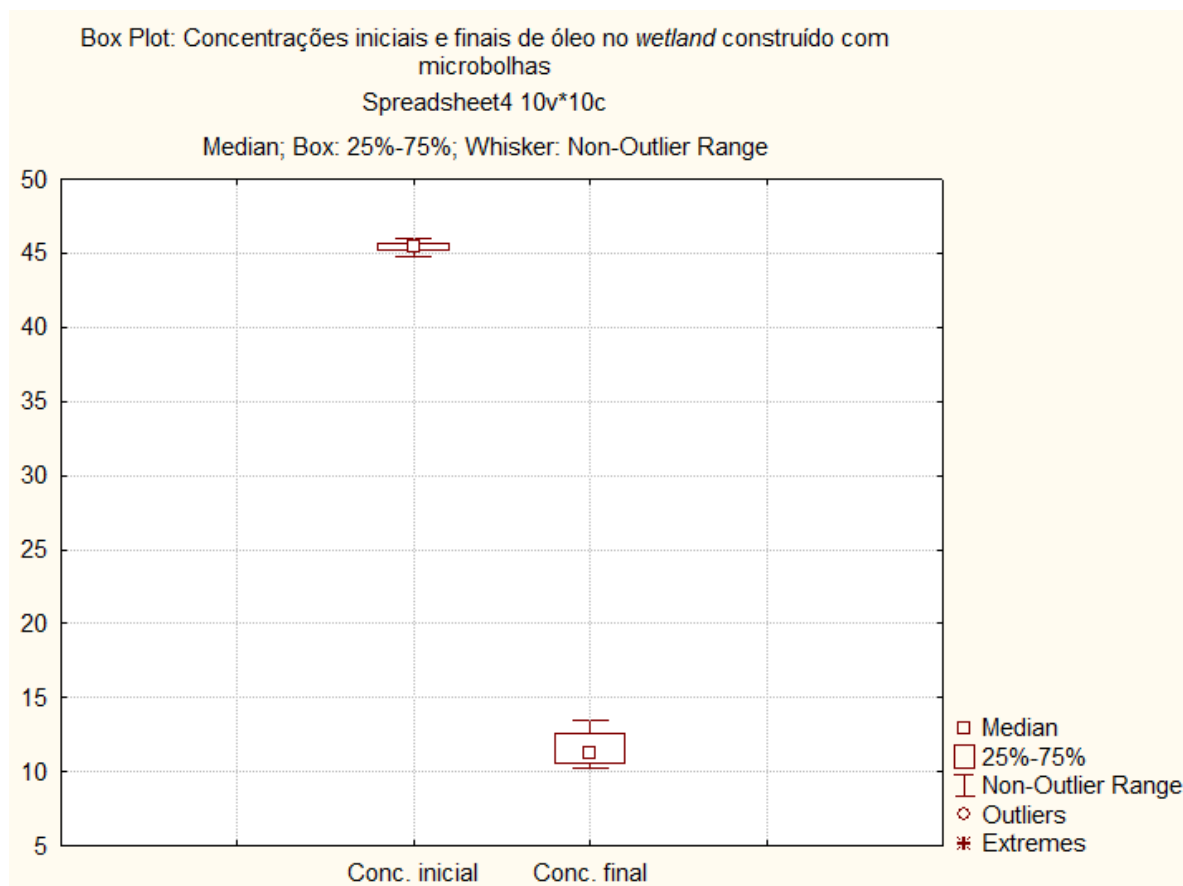


Figura 18 - Box plot das concentrações iniciais e finais de óleo no protótipo com microbolhas

A Figura 18 indica que não houve ocorrência de valores incomuns (*outliers*) e extremos nas concentrações iniciais e finais de óleo do *wetland* construído com microbolhas. Observou-se que a dispersão foi menor nos valores referentes a concentração inicial do que aos da concentração final. Mesmo assim, como não houve ocorrência de *outliers*, essa diferença de dispersão pode ser atribuída a uma variabilidade inerente ao experimento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados das simulações *por CFD* apresentaram uma ótima previsão do tratamento nos dois protótipos, antes e depois da instalação dos injetores. O *wetland* sem adição de microbolhas apresentou um espalhamento de frações de óleo ao longo do protótipo. Por sua vez, a simulação do protótipo com microbolhas retratou uma melhor separação do óleo, onde a fração volumétrica se concentrou majoritariamente na superfície.

Os gráficos obtidos na simulação por CFD demonstraram que a fração de óleo na saída do *wetland* construído com microbolhas ficou em torno de 0,13 enquanto que no protótipo sem injetores a fração de óleo na saída foi aproximadamente igual a 0,21, reafirmando a superioridade do tratamento aerado.

O número de Reynolds de 390,11 revelou que o *wetland* construído, com as configurações adotadas, não apresenta problemas significantes de separação. Comprovou-se, portanto, o potencial de tratamento físico do protótipo.

O tempo de poda de 5 dias confirmou a previsão de estudos anteriores. A constante de redução de área livre (k_{red}) se mostrou ideal para as mudas de *Eichhornia crassipes* no tratamento de efluente oleoso, adaptável para diversas áreas. O conhecimento do tempo necessário para poda permitiu que fosse efetuada a manutenção correta das macrófitas presentes no protótipo. Durante o período do experimento foram realizadas duas podas, mantendo o limite ideal de preenchimento.

Os testes experimentais comprovaram a previsão das simulações por CFD. Após 2 semanas, a eficiência de remoção de óleo no *wetland* construído sem microbolhas foi de 22,16%. Por outro lado, após o mesmo tempo, a eficiência de remoção obtida pelo protótipo aerado foi de 74,41%. Ou seja, no protótipo sem microbolhas, a concentração final de óleo foi de 34,30 ppm enquanto no protótipo com microbolhas a concentração final de óleo foi de 11,62 ppm, sendo apenas este adequado ao limite estabelecido pela Resolução do CONAMA 430/2011 de 20 ppm. A constante de remoção de resíduos oleosos (k_{ro}) apresentada no *wetland* construído sem microbolhas foi de 0,018 dia⁻¹, inferior ao 0,097 dia⁻¹ apresentado pelo protótipo com microbolhas, reforçando a superioridade do protótipo aerado.

Portanto, foi possível concluir que a aeração resultou em um aumento expressivo da eficiência no tratamento de efluentes oleosos. O comportamento apresentado tanto nas simulações como nos testes experimentais confirmou a interferência positiva da flotação ocasionada pelas microbolhas, a qual provocou o arraste e uma maior retenção da fase oleosa nas proximidades da lâmina d'água. Em consequência da melhoria da eficiência de separação, há uma redução do tempo necessário para o tratamento no *wetland* construído, trazendo benefícios como redução de custos de operação e agilidade no resultado.

A velocidade de consumo de óleo pelas macrófitas é muito menor que a velocidade de acúmulo da fase orgânica e a estimativa de tempo para se atingir uma espessura máxima de óleo, com base no teor máximo de óleo permissível para sobrevivência das macrófitas, foi de cerca de 32 dias. Com base nesses dados, elaborou-se a inclusão de mais um mecanismo auxiliar, com a introdução, no sistema, de um coletor regulável da fase orgânica sobrenadante. As inclusões dos fluxos de microbolhas e a instalação de coletor regulável de óleo, em um *wetland* construído, deram origem a um pedido de patente no Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros se resumam nos itens seguintes:

- a) Estudar a contribuição da *Eichhornia crassipes* na remoção de derivados de petróleo;
- b) Investigar a contribuição da adição de microbolhas na degradação aeróbia;
- c) Avaliar as possibilidades de destinação das macrófitas após tratamento de efluente;
- d) Realizar testes com maiores concentrações de óleo;
- e) Analisar a aplicação de *wetlands* construídos com microbolhas no tratamento de outros efluentes;

REFERÊNCIAS

- ABDEL-GHANI, N. T.; EL-CHAGHABY, G. A.; HEGAZY, A. K. Phytoremediation of industrial wastewater potentiality by *Typha domingensis*. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 8, n. 3, p. 639-648, 2011.
- AGARWAL, A.; NG, W. J.; LIU, Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. **Chemosphere**, v. 84, p. 1175-1180, 2011.
- AGUILAR-GONZÁLEZ C. N.; FILETO-PÉREZ, H. A.; LÓPEZ, J.; PAÉZ, J. B.; RUTIAGA-QUIÑONES, J. G; RUTIAGA-QUIÑONES, O. M. Evaluation of *Eichhornia crassipes* as an Alternative Raw Material for Reducing Sugars Production. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 5340-5348, 2013.
- AL-BALDAWI, I. A. W.; ABDULLAH, S. R. S.; SUJA, F.; ANUAR, N.; MUSHRIFAH, I. Comparative performance of free surface and sub-surface flow systems in the phytoremediation of hydrocarbons using *Scirpus grossus*. **Journal of Environmental Management**, v. 130, p. 324-330, 2013.
- AL-YAARI, M.; AL-SARKHI, A.; ABU-SHARKH, B. Effect of drag reducing polymers on water holdup in an oil–water horizontal flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 44, p. 29-3, 2012.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. Washington: American Public Health Association. 1999.
- ANSYS. **Lecture 2 – Introduction to CFD Methodology**. 2010. Disponível em: <http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture02-intro-to-cfd.pdf> . Acesso em: 28 out. 2015.
- ASSMAR, D.; DONDONI, F.; FALQUETE, R.; FUNDÃO, A.; SANTANA, F. **Impactos Ambientais do Derramamento de Petróleo**. Projeto de pesquisa (Graduação em Engenharia Mecânica). São Mateus, ES: UFES, 2010.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 20 ago. 2015.
- BULLER, L. S. **Modelagem sistêmica do ciclo de vida do aguapé no pantanal e análise do uso desta biomassa para a produção de bio-óleo e biofertilizante**. Dissertação de Mestrado. Campinas, SP: UNICAMP, 2012.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 8. ed. São Paulo: Saraiva, 2013. 548 p.
- CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Sistemas aquáticos continentais. In:____. **Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, p.161-177, 2013.
- CALHEIROS, C. S. C.; TEIXEIRA, A.; PIRES, C.; FRANCO, A. R.; DUQUE, A. F.; CRISPIM, L. F. C.; MOURA, S. C.; CASRO, P. M. L. Bacterial community dynamics in horizontal flow constructed wetlands with different plants for high salinity industrial wastewater polishing. **Water Research**. v. 44, p. 5032-5038, 2010.

- CHAGAS, T. W. G.; SALATI, E.; TAUKE-TORNISIELO, S. M. Sistemas construídos de áreas alagadas: revisão da legislação e dos padrões de qualidade da água. **HOLOS Environment**. v. 12, n. 1, p. 87-98, 2012.
- CHEN, Y.; WEN, Y.; TANG, Z.; LI, L.; CAI, Y.; ZHOU, Q. Removal processes of disinfection byproducts in subsurface-flow constructed wetlands treating secondary effluent. **Water Research**. v. 51, p. 163-171, 2014.
- COCA, J.; GUTIÉRREZ, G. BENITO, J. Treatment of oily wastewater. Water purification and management. In: COCA-PRADOS, J.; GUTIÉRREZ-CERVELLO, G. **Water purification and management**. Springer: Dordrecht, 2011.
- CREMA, L. C.; BIUDES, J. F. V.; CAMARGO, A. F. M. Effect of Urucu oil (Brazilian Amazon) on the biomass of the aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Pontederiaceae). **Acta Limnologica Brasiliensia**. v. 23, n.4, p. 406-411, 2011.
- DAMIANOVIC, Márcia Helena Rissato Zamariolli; DEL NERY, Valéria; PIRES, Eduardo Cleto. Tratamento de Águas Residuárias Industriais. In: CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, p.477-499, 2013.
- DÍAZ, A.; ATENCIO, V.; PARDO, S. Assessment of an artificial free-flow wetland system with water hyacinth for treating fish farming effluents. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 27, p. 202-210, 2014.
- EKE, P. E. **Hydrocarbon removal with constructed wetlands**. Tese de Doutorado. Universidade de Edimburgo. 2008.
- ENGLERT, A. H. **Flotação por ar dissolvido (FAD) de micropartículas, caracterização de microbolhas e medidas de força de interação bolha-partícula**. Tese de doutorado. Porto Alegre, RS: UFRS, 2008.
- FAÍSCA, A. T. **A influência da geometria de saída na erosão em risers de fcc: um estudo com CFD**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2013.
- FAN, L.; RETI, H.; LU, Z. CFD study on hydraulic performance of subsurface flow constructed wetland: effect of distribution and catchment area. **The Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 5, p. 1272-1278, 2009.
- FAN, L.; RETI, H.; WANG, W.; LU, Z.; YANG, Z. Application of computational fluid dynamic to model the hydraulic performance of subsurface flow wetlands. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, p. 1415-1422, 2008.
- FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS. **Óleo lubrificante DULUB HD 40**. 2012. Disponível em: <<http://www.dulub.com.br/wp-content/uploads/2014/05/FISPQ-DULUB-HD-40.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2015.
- FERZIGER, J. H. PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin: Springer, 2002. 423 p.
- GALVÃO, A. F. **Comportamento Hidráulico e Ambiental de Zonas Húmidas Construídas Para o Tratamento de Águas Residuais**. Tese de doutorado. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

GLATZEL, T.; LITTERST, C.; CUPELLI, C.; LINDEMANN, T.; MOOSMANN, C.; NIEKRAWIETZ, R.; STREULE, W.; ZENGERLE, R.; KOLTAY, P. Computational fluid dynamics (CFD) software tools for microfluidic applications – A case study. **Computers & fluids**, v. 37, p. 218-235, 2008.

GRULL, D. Remediação e readequação de sistemas aquáticos superficiais contaminados. In: CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 621-641, 2013.

HABERL, R.; GREGO, S.; LANGERGRABER, G.; KADLEC, H. K.; CICALINI, A.; DIAS, S. M.; NOVAIS, J. M.; AUBERT, S.; GERTH, A.; THOMAS, H.; HEBNER, A. Constructed wetlands for the treatment of organic pollutants - Review article with case studies. **Journal of Soils and Sediments**, v. 3, p. 109-124, 2003.

HAGAHMED, D. E. O.; GASMELSEED, G. A.; AHMED, S. E. Multiple loops control of oil biodegradation in constructed wetlands. **Journal of Applied and Industrial Sciences**, v. 2, p. 6-13, 2014.

HAN, S.; CHEN, Z.; ZHOU, F. Three-Dimensional numerical model to evaluate the suspended solid removal in surface flow constructed wetland. In: Congress on Environmental Modelling and Software, 7, 2014, San Diego, CA. **Resumo expandido**. San Diego: International Environmental Modelling and Software Society (IEMSs), p. 1-8, 2014.

HAYDER, S.; HAIDER, H.; NADEEM, O.; HUSSAIN, G.; ZAHRA, S. Proposed model for wastewater treatment in Lahore using constructed wetlands. **Journal of Faculty of Engineering & Technology**. v. 22, n. 1, p. 07-17, 2015.

HWANG, S.; MOORE, I. Water network synthesis in refinery. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 10, p. 1975-1985, 2011.

JAFARI, N. Ecological and socio-economic utilization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Mart Solms). **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**. v. 14, n. 12, p. 43-49, 2010.

JAMALY, S.; GIWA, A.; HASAN, S. W. Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. **Journal of Environmental Sciences**, v. 37, p. 15-30, 2015.

JUSTI, G. H. **Aplicação da fluidodinâmica computacional na avaliação da hidrodinâmica de estágio em colunas de destilação**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2012.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. **Treatment wetlands**. Boca Raton: CRC Press, 1996.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment wetlands**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

KAWAI, H.; GRIECO, V. M. Utilização do aguapé para tratamentos de esgoto doméstico. Estabelecimento de critérios de dimensionamento de lagoa de aguapé e abordagem de alguns problemas operacionais. **Revista DAE**, São Paulo. n. 135, p. 79-90, 1983.

LANGERGRABER, G.; PRESSL, A.; HABERL, R. Behavior of a Two-Stage Vertical Flow Constructed Wetland with Hydraulic Peak Loads. In: VYMAZAL, J. **The Role of Natural and**

Constructed Wetlands in Nutrient Cycling and Retention on the Landscape. Suíça: Springer International Publishing, p. 175-188, 2014.

LAUTENSCHLAGER, S. R. **Modelagem do desempenho de wetlands construídas.** Dissertação de Mestrado. São Paulo, SP: USP. 2001.

LI, P. **Development of advanced water treatment technology using microbubbles.** 2006. Disponível em: <<http://iroha.scitech.lib.keio.ac.jp:8080/sigma/bitstream/handle/10721/2127/document.pdf?sequence=4>>. Acesso em: 11 jul. 2015.

LOPES, A.; PIEDADE, M. T. F. Experimental study on the survival of the water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms—Pontederiaceae) under different oil doses and times of exposure. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, p. 13503-13511, 2014.

LUDWIG, E. E. **Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants.** 2 ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 1997.

MATOS, A. T.; FREITAS, W. S.; BRASIL, M. S.; BORGES, A. C. Influência da espécie vegetal cultivada nas condições redox de sistemas alagados construídos. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 518-526, 2010.

MAYO, A. W. Modelling dynamics of organic carbon in water hyacinth *Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms artificial wetlands. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 6, p. 121-130, 2014.

MENDONÇA, E. T. R.; FERREIRA, J. M.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Tratamento da água de produção de petróleo através de processos combinados. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. v. 6, n. 1, p. 89-99, 2013.

MERONEY, R. N. CFD modeling of dense gas cloud dispersion over irregular terrain. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**. v. 104, p. 500-508, 2012.

MEZHERICHER, M. CFD-based modeling of transport phenomena for engineering problems. In: World Congress on Engineering, 3, 2012, Londres, **Resumos expandidos**.

MURPHY, B. R.; VILLAMAGNA, A. M. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. **Freshwater Biology**, v. 55, n. 2, p. 282-298, 2010.

NASCIMENTO, L. A.; MOURA, A. E. de; SARUBBO, L. A.; SANTOS, V. A. Validação de um modelo de dimensionamento de wetlands de macrófitas aéreas para separação água-óleo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20, 2014, Florianópolis. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo, SP: Blucher, 2015. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2, p. 8477 – 8483. ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/chemeng-cobeq2014-1285-20090-179819.

NASCIMENTO, L. A. SARUBBO, L. A.; GAMA, P. H. R. P.; LIMA FILHO, H. J. B.; SANTOS, V. A. Dimensionamento e simulação via CFD de um decantador contínuo para tratamento do afluente de uma termelétrica. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 16, 2012, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2012. CD ROM.

PARDUE, M. J; CASTLE, J. W.; RODGERS JR, J. H; HUDDLESTON III, G. M. Treatment of oil and grease in produced water by a pilot-scale constructed wetland system using biogeochemical processes. **Chemosphere**, v. 103, p. 67-73, 2014.

PEDROSO, G. A. **Utilização do aguapé e da cal no tratamento da água residuária do café processado por via úmida**. Trabalho de Conclusão de Curso. Muzambinho: MG. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul de Minas Gerais, 2010.

POMBO, F. R. **Gestão da demanda de água na indústria de refino de petróleo: desafios e oportunidades de racionalização**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: RJ. UFRJ, 2011. 152 p.

QUINTÃO, J. M. B. **Decomposição de macrófitas aquáticas em reservatórios com diferentes graus de trofia**. Dissertação de Mestrado (Ecologia). Brasília: DF. UnB, 2012. 67 p.

RAJABZADEH, A. R.; LEGGE, R. L.; WEBER, K. P. Multiphysics modelling of flow dynamics, biofilm development and wastewater treatment in a subsurface vertical flow constructed wetland mesocosm. **Ecological Engineering**, v. 74, p. 107-116, 2015.

SAMSÓ, R.; GARCIA, J. BIO_PORE, a mathematical model to simulate biofilm growth and water quality improvement in porous media: application and calibration for constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 54, p. 116-127, 2013.

SANTOS, A. A. O. **Sustentabilidade ambiental da criação de camarões de água doce e uso de aguapé no tratamento dos efluentes**. Tese de Doutorado. Jaboticabal, SP: UNESP, 2012.

SHU, X.; DENG, Q.; ZHANG, Q.; WANG, W. Comparative responses of two water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) cultivars to different planting densities. **Aquatic Botany**, v. 121, p. 1-8, 2015.

SILVA, P. R. **Transporte marítimo de petróleo e derivados na costa brasileira: estrutura e implicações ambientais**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2004.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, S. T.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 151-158, 2015.

TÉLLEZ, T. R.; LÓPEZ, E. M. R.; GRANADO, G. L.; PÉREZ, E. A.; LÓPEZ, R. M.; GUZMÁN, J. M. S. The water hyacinth, *Eichhornia crassipes*: an invasive plant in the Guadiana River Basin (Spain). **Aquatic Invasions**. v. 3, n. 1, p. 42-53, 2008.

TOSCANI, D. C. **Avaliação e aplicação de simulações matemáticas para definição de regime hidráulico e constantes cinéticas de remoção de matéria orgânica em reatores de tratamento de esgoto sanitário**. Dissertação de Mestrado. Curitiba, PR: UFPR, 205 p., 2010.

TÜREC, C.; TÜRKERA, O. C.; VYMAZAL, J. Constructed wetlands for boron removal: A review. **Ecological Engineering**, v. 64, p. 350-359, 2014.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **The United Nations World Water Development Report 2014**. 2014. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002257/225741e.pdf>> Acesso em: 18 mar. 2015

- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. Ed. New York: Prentice Hall, 2007. 520 p.
- VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **Water**. v. 2, p. 530-549, 2010.
- VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 61-69, 2011.
- WALLACE, S. D.; KNIGHT, R. L. **Small-scale constructed wetland treatment systems – Feasibility, design criteria, and O&M requirements**. Londres: IWA Publishing, 2006.
- WELZ, P. J.; RAMOND, J. B.; COWAN, D. A.; PRINS, A.; BURTON, S. G. Ethanol degradation and the benefits of incremental priming in pilot-scale constructed wetlands. **Ecological Engineering**. v. 37, p. 1453-1459, 2011.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Preventing disease through healthy environments – Exposure to benzene: a major public health concern**. 2011. Disponível em: <<http://www.who.int/ipcs/features/benzene.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2015.
- WU, S.; WALLACE, S.; BRIX, H.; KUSCHK, P.; KIRUI, W. K.; MASI, F.; DONG, R. Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. **Environmental Pollution**, v. 201, p. 107-120, 2015.
- YIN, X.; KOCH, D. L. Velocity fluctuations and hydrodynamic diffusion in finite-Reynolds-number sedimenting suspensions. **Physics of fluids**, v. 20, n. 4, p. 1-8, 2008.