

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS AMBIENTAIS

CONRADO FOLLE WEBER

**PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE *WETLANDS*
CONSTRUÍDOS EM SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

CONRADO FOLLE WEBER

**PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE *WETLANDS*
CONSTRUÍDOS EM SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à disciplina de TCC-2, do Curso
Superior de Tecnologia em Processos
Ambientais da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná como requisito parcial
para obtenção de título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Real Prado

CURITIBA
2015

CONRADO FOLLE WEBER

**PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE
WETLANDS CONSTRUÍDOS EM SISTEMA INDIVIDUAL DE
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso **aprovado** como requisito parcial à obtenção do grau de TECNÓLOGO EM PROCESSOS AMBIENTAIS pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) do Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

Membro 1 – Prof. Dr. Fernando Hermes Passig
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Membro 2 – Profa. Dra. Tamara Simone van Kaick
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Orientador – Prof. Dr. Marcelo Real Prado
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Coordenador de Curso – Prof. Alessandro Feitosa Machado

Curitiba, 03 de julho de 2015

RESUMO

WEBER, Conrado Folle. Proposta de dimensionamento e implantação de *wetlands* construídos em sistema individual de tratamento de esgoto sanitário. 2015. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O cenário brasileiro, no que se refere à poluição dos rios e mananciais de abastecimento público, oferece à população condições precárias de saneamento básico. Esta situação é comum em áreas rurais ou naquelas em expansão urbana, onde ainda não há rede de distribuição, sendo necessário, nestes casos, soluções individuais para cada domicílio. Uma tecnologia que vem se destacando, entre as possíveis alternativas em sistemas descentralizados de tratamento de esgoto, é a implantação dos *wetlands* construídos como tratamento complementar do efluente de tanque séptico. Visto isso, o presente trabalho apresenta uma proposta de um sistema de tratamento de esgoto sanitário, para futura implantação em um empreendimento do ramo de hotelaria, na cidade de Curitiba, Paraná. Foram estabelecidos parâmetros para direcionar o dimensionamento e a implantação de *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado. O meio suporte escolhido para o processo de filtração do sistema é composto por camadas de brita nº 2 e areia grossa, onde serão cultivadas plantas das espécies *Zantedeschia aethiopica* (copo-de-leite), *Canna x generalis* (cana-índica), e a *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo). O estudo busca contribuir à sociedade em geral, propondo uma solução eficiente em saneamento ecológico, que visa atender as necessidades sociais e ambientais de tecnologias voltadas à manutenção do meio ambiente, ao equilíbrio com as interações humanas e a uma melhor distribuição dos recursos naturais no Brasil.

Palavras-chave: Saneamento básico. Tratamento de esgoto. Sistemas descentralizados. Fluxo vertical afogado.

ABSTRACT

WEBER, Conrado Folle. Proposal of design and implantation of constructed wetlands in individual system of wastewater treatment. 2015. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The situation in Brazil, regarding to pollution of rivers and public fountainheads, offers the population poor sanitation conditions. This is common in rural areas or those in urban sprawl where there is still no distribution network, being necessary in these cases, individual solutions for each household. A technology that has stood out among the possible alternatives in decentralized wastewater treatment systems is the implantation of constructed wetlands as a complementary treatment of septic tank effluent. Considering that, this paper presents a proposal of a system for wastewater treatment for future implantation in a hotel business in the city of Curitiba, Paraná. Parameters have been established to direct the design and the implantation of constructed wetlands with vertical saturated flow. The media chosen for the filtration process in the system is composed of gravel and coarse sand layers, where plant species of *Zantedeschia aethiopica*, *Canna x generalis*, and *Hedychium coronarium* will be grown. The study desires to contribute to society in general by offering an efficient solution in ecological sanitation, which aims to meet the social and environmental needs of technologies focused on the maintenance of the environment and the balance with human interactions, and to a better distribution of the natural resources in Brazil

Key-words: Sanitation. Sewage treatment. Decentralized systems. Saturated vertical flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de uma estação de tratamento de esgoto com <i>wetland</i> de fluxo superficial.....	21
Figura 2 – Exemplo de <i>wetland</i> subsuperficial de fluxo horizontal.....	23
Figura 3 – Exemplo de <i>wetland</i> subsuperficial de fluxo vertical livre.....	25
Figura 4 – Exemplo de <i>wetland</i> subsuperficial de fluxo vertical afogado.....	26
Figura 5 – Macrófitas Emergentes.....	30
Figura 6 – Macrófitas Flutuantes.....	30
Figura 7 – Local disponível para implantação do sistema.....	43
Figura 8 – Croqui da área disponível para implantação do sistema.....	44
Figura 9 – Croqui do tanque séptico proposto como tratamento primário.....	54
Figura 10 – <i>Zantedeschia aethiopica</i> (copo-de-leite).....	55
Figura 11 – <i>Canna x generalis</i> (cana-índica).....	56
Figura 12 – <i>Hedychium coronarium</i> (lírio-do-brejo).....	57
Figura 13 – Proposta do sistema de tratamento de esgoto (tratamento primário e secundário).....	60
Figura 14 – Croqui do <i>wetland</i> construído de fluxo vertical afogado.....	61
Figura 15 – Croqui do sistema de tratamento de esgoto proposto (Planta Baixa).....	62
Figura 16 – Croqui do sistema de tratamento de esgoto proposto (Implantação).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos meios suportes para sistemas com fluxo subsuperficial.....	31
Tabela 2 – Valores médios de contribuição de esgoto	45
Tabela 3 – Características físico-químicas típicas dos esgotos sanitários.....	46
Tabela 4 – Características dos meios suportes utilizados em sistemas de <i>wetlands</i> construídos	47
Tabela 5 – Orçamento previsto para implantação de sistema individual de tratamento primário e secundário de esgoto sanitário, para 25 pessoas, com consumo diário de 100L/hab.dia	51
Tabela 6 – Valores assumidos para os parâmetros de dimensionamento do tanque séptico	53

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABELAS	4
SUMÁRIO	5
1. INTRODUÇÃO	8
2. JUSTIFICATIVA	11
3. OBJETIVOS	12
3.1. OBJETIVO GERAL	12
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1. ESGOTO SANITÁRIO	13
4.1.1. Caracterização do Esgoto Sanitário	13
4.1.2. Níveis de Tratamento	15
4.1.3. Sistemas Individuais de Tratamento	16
4.2. <i>WETLANDS</i> NATURAIS	18
4.3. <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	20
4.3.1. Fluxo Superficial	20
4.3.2. Fluxo Subsuperficial	21
4.3.3. Vegetação	28
4.3.4. Meio suporte	31
4.4. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	32
4.4.1. Local de Implantação	33
4.4.2. Condições Climáticas	33
4.4.3. Disponibilidade de Área	34
4.4.4. Topografia	34
4.4.5. Hidráulica	34
4.4.6. Dimensionamento	38
4.5. IMPLANTAÇÃO	40
4.6. MANUTENÇÃO	40
4.7. MONITORAMENTO	41
5. METODOLOGIA	42
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO E IDENTIFICAÇÃO DOS EFLUENTES	42
5.2. ESTIMATIVAS DA GERAÇÃO DE EFLUENTES	44
5.3. DIMENSIONAMENTO DO TANQUE SÉPTICO	46
5.4. DEFINIÇÃO DO MEIO SUPORTE A SER UTILIZADO NO <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO	47
5.5. DEFINIÇÃO DA VEGETAÇÃO A SER CULTIVADA NO <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO	48
5.6. DEFINIÇÃO DA HIDRÁULICA E DIMENSIONAMENTO DO <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO	48
5.7. PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DO <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO	50
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6.1. CARACTERÍSTICAS ESTIMADAS DO ESGOTO SANITÁRIO DO EMPREENDIMENTO	52
6.2. DIMENSIONAMENTO DO TANQUE SÉPTICO PARA O TRATAMENTO PRIMÁRIO	52
6.3. MEIO SUPORTE E VEGETAÇÃO ESCOLHIDOS PARA O SISTEMA DE <i>WETLANDS</i>	54
6.4. HIDRÁULICA E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	57
6.5. PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO	60
7. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

Estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU, 2014), contabilizam hoje, no planeta Terra, mais de 7 bilhões de habitantes, espalhados por toda área terrestre, onde se concentra a água doce distribuída para o consumo humano em suas diversas atividades. O recurso, além de pertencer à pequena parcela de 3% do total de água do planeta, encontra-se cada vez mais escasso e potencialmente poluído.

Em muitos municípios brasileiros, a falta de saneamento básico traz diversos problemas ambientais, com consequências à saúde humana. Os dejetos humanos são veículos de germes patogênicos causadores de várias doenças, como febres, diarreias infecciosas, amebíase, esquistossomose, teníase, ascaridíase, entre outras (FUNASA, 2004). Portanto, toda a população mundial, e principalmente os governos municipais, estaduais e o federal, carregam em conjunto a responsabilidade sobre a poluição das águas dos rios.

Em se tratando de esgoto sanitário lançado nos corpos hídricos, os principais agentes poluidores são: sólidos suspensos; matéria orgânica biodegradável; nutrientes, como fósforo e nitrogênio; patogênicos; sólidos dissolvidos e coloidais; compostos orgânicos voláteis; e odores (METCALF & EDDY, 2003).

O órgão regulador a respeito de despejo de esgoto sanitário nos rios, do Brasil, é o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Através das Resoluções nº 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005), e nº 430, de 13 de maio de 2011 (BRASIL, 2011), o conselho dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, exigindo a remoção dos poluentes presentes no esgoto, antes da devolução do efluente nas águas do país.

Para solucionar e prevenir os impactos relacionados à geração e má disposição do esgoto sanitário, é necessária efetiva remoção dos poluentes, a qual percorre por diversos níveis de tratamento, a fim de se obter os parâmetros exigidos pelo CONAMA. Dentre os níveis de tratamento de esgoto, o tratamento preliminar se refere àquele responsável pela remoção de sólidos grosseiros, enquanto o primário objetiva a remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica. Como mecanismo biológico, utiliza-se de um tratamento secundário para remoção de

matéria orgânica remanescente, e eventuais nutrientes (nitrogênio e fósforo). O tratamento dito terciário, nem sempre é necessário, porém é de extrema importância quando se visa reutilização da água tratada, sendo assim tem como objetivo a remoção de poluentes específicos, sejam eles nutrientes, patogênicos, compostos não biodegradáveis ou metais pesados (SPERLING, 2014).

Os tratamentos supracitados são empregados em estações de tratamento de esgoto sanitário, sejam coletivas ou em sistemas individuais. As cidades brasileiras, das quais possuem rede coletora de esgoto sanitário, utilizam o tratamento de maneira coletiva, reunindo todo o esgoto gerado pela população em uma única estação antes da sua devolução aos corpos receptores. Porém, no Brasil, segundo censo realizado pelo IBGE (2010), nem todos habitantes possuem rede coletora em suas residências, sendo necessário, nestes casos, soluções individuais para cada domicílio.

São diversos os motivos para implantação de sistemas individuais, ou descentralizados, de tratamento de esgoto. O principal motivo é a existência de municípios em áreas inviáveis de se instalar uma rede coletora de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2013), apenas 39% do esgoto gerado no país é tratado, sendo milhões de brasileiros não conectados à rede coletora de esgoto. Esta situação é comum em áreas rurais ou naquelas em expansão urbana, onde ainda não há rede de distribuição.

A implantação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto sanitário tem como objetivo melhorar a disposição do efluente na natureza, garantindo eficiência na remoção de matéria orgânica e patogênica, e assim evitar a contaminação de rios e mananciais de abastecimento público (SAMUEL, 2011). Outro problema que traz a demanda de um melhor manejo hídrico é a escassez de água na Terra, onde a exploração exacerbada dos recursos naturais preocupa todos, alertando a população para o desenvolvimento de tecnologias aptas ao tratamento e reutilização de suas águas, minimizando os impactos econômicos e sociais da falta d'água (SANTOS, 2006).

Existem planos municipais de saneamento básico, como exemplo, o Plano Municipal de Saneamento Básico de Campina Grande do Sul (PMCGS, 2013), na

região metropolitana de Curitiba, que propõem ações voltadas a um melhor tratamento do esgoto gerado nas áreas sem rede coletora. Normalmente, são sugeridos sistemas individuais de tratamento de esgoto, compostos por filtro biológico, como tratamento secundário dos efluentes de tanque séptico, antes da disposição final do esgoto tratado, que completa o ciclo básico de tratamentos normalmente empregados em situações descentralizadas. Para Sezerino (2015), nestas situações é possível também optar por sistemas diferentes, como por exemplo, a utilização dos *wetlands* construídos em sistemas individuais de tratamento de esgoto.

Neste contexto, a proposta deste trabalho de conclusão de curso é discorrer acerca do dimensionamento, para elaboração de projetos de implantação de *wetlands* construídos, como tratamento secundário, empregados ao tratamento descentralizado de esgoto sanitário. Busca-se estabelecer critérios a serem seguidos para dimensionar e direcionar a implantação destes sistemas, levando em consideração as limitações específicas de cada proposta.

O trabalho traz uma pesquisa acerca de uma tecnologia socioambiental que visa diminuir e prevenir problemas do cenário atual, garantindo um melhor manejo de água no planeta, e combinando o consumo consciente dos recursos naturais com o cuidado efetivo do meio ambiente e da saúde humana.

2. JUSTIFICATIVA

Visto o cenário brasileiro atual, a que se refere à poluição de rios e mananciais de abastecimento público, além de muitos registros de doenças relacionadas à falta de saneamento básico, são de extrema importância estudos sobre sistemas de tratamento de águas residuárias. Tais sistemas podem se portar como tecnologias sociais, disponível a toda população, e que visam um ambiente harmonizado ao desenvolvimento humano.

Acredita-se ser necessária a ampliação do conhecimento, tanto científico como social, a respeito da viabilidade de implantação de *wetlands* construídos em sistemas de tratamento de esgoto sanitário, a fim de melhorar o cenário de saneamento básico no país. A demanda por estudos, acerca dos critérios de dimensionamento dos sistemas com *wetlands*, vem da falta de normatização, seja municipal, estadual ou federal, a qual ajudaria a guiar a implantação da tecnologia, havendo um melhor reconhecimento, pelos órgãos ambientais, como opção descentralizada para o tratamento de esgoto.

Os *wetlands* construídos são sistemas empregados no controle da poluição hídrica, desde meados dos anos 1970, em países europeus e nos Estados Unidos da América. No Brasil, vêm aumentando o número e a qualidade das pesquisas relacionadas ao uso da tecnologia para tratamento de águas residuárias, o que resulta em uma evolução constante na eficácia de seus diversos usos.

Em busca dos parâmetros que direcionam o dimensionamento e a implantação destes sistemas, o estudo almeja contribuir à sociedade, através de pesquisas em soluções de saneamento ecológico, atendendo a necessidade social e ambiental de tecnologias voltadas à manutenção meio ambiente, ao equilíbrio com a saúde humana e a uma melhor distribuição dos recursos naturais no Brasil.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Propor um dimensionamento e a implantação de *wetlands* construídos, como tratamento secundário, em um sistema individual de tratamento de esgoto sanitário, para aplicação em escala real.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar, definir e estimar a vazão do efluente a ser tratado;
- Avaliar e definir o meio suporte e a vegetação a serem utilizados no *wetland* construído;
- Definir a hidráulica e dimensionar o sistema de *wetland*;
- Apresentar uma proposta para implantação de um sistema de *wetland* construído, com intenção de futura aplicação prática.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Esgoto Sanitário

4.1.1. Caracterização do Esgoto Sanitário

Segundo Jordão e Pessoa (2009), os efluentes urbanos são compostos pelos despejos provenientes de diversas modalidades do uso e origem da água: doméstico, comercial, industrial, de utilidade pública, de áreas agrícolas, pluviais, entre outros tipos de efluentes sanitários.

O esgoto sanitário, diferente do industrial, é constituído por águas pluviais, águas de infiltração, e em maior parcela, de efluentes domésticos. Estes efluentes domésticos, ou domiciliares, são gerados por residências, edifícios comerciais, instituições ou qualquer edificação com instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou algum dispositivo de utilização da água para fins domésticos. Portanto, o esgoto doméstico deve ser composto, basicamente, por água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes e água de lavagem (JORDÃO & PESSOA, 2009).

A caracterização do esgoto sanitário varia quantitativamente e qualitativamente com a sua utilização. A vazão de esgoto doméstico é, normalmente, calculada com base no consumo de água de uma respectiva localidade. Sendo assim, calcula-se de maneira usual em função da população e de um valor atribuído para o consumo médio diário de água, para cada habitante, denominado por Sperling (2014) como *Quota Per Capita* (QPC). Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água, sendo a fração restante composta por sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. E é devida a esta pequena fração de 0,1% que há necessidade de tratar os esgotos (SPERLING, 2014).

Sperling (2014), afirma que a contribuição de esgotos depende de inúmeros fatores em função dos usos à qual a água foi submetida. Tais usos, e a forma com que são exercidos, variam com o clima, com a situação social e econômica da população, e seus hábitos. Ainda segundo Sperling (2014), para projetar uma estação de tratamento, não há interesse em determinar os diversos compostos do

quais a água residuária é constituída, mas muitas vezes é preferível a utilização de parâmetros indiretos que traduzam o caráter ou o potencial poluidor do despejo em questão. Tais parâmetros são divididos em: físicos; químicos; e biológicos.

As características físicas mais importantes dos efluentes incluem odor, turbidez, cor, temperatura; e teor dos sólidos totais, compostos pelos dissolvidos, em suspensão e os sedimentáveis. O teor de matéria sólida é a característica mais importante, em termos de dimensionamento e controle de operações das unidades de tratamento (METCALF & EDDY, 2003).

Para Jordão e Pessoa (2009), a temperatura dos esgotos fica, normalmente, acima da temperatura do ar (na faixa de 20 a 25°C), os gases formados no processo de decomposição são os responsáveis pelos odores característicos dos esgotos, e a cor e a turbidez indicam, imediatamente e aproximadamente, o estado de decomposição do esgoto.

Dentre as principais características químicas presentes nos esgotos domésticos, destaca-se a matéria orgânica, sendo de primordial importância sua caracterização, uma vez que é o principal problema de poluição dos corpos d'água (SPERLING, 2014). Segundo Metcalf e Eddy (2003), as substâncias orgânicas presentes nos esgotos são constituídas, principalmente, por: compostos de proteínas (40% a 60%); carboidratos (25% a 50%); gordura e óleos (8% a 12%); e ureia, surfactantes, fenóis, pesticidas, metais e outros (em menor quantidade). A areia e substâncias minerais dissolvidas compõe a matéria inorgânica contida nos esgotos.

Para se medir a quantidade de matéria orgânica presente em um efluente, deve-se determinar sua Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), determinação padronizada pelos *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). Além da DBO, deve ser considerada a presença de nitrogênio e fósforo no efluente. Constatando a presença de nitrogênio, estima-se o grau de estabilização da matéria orgânica. O fósforo orgânico se encontra combinado às proteínas e aminoácidos, e o inorgânico sob a forma de ortofosfato e polifosfato. Há também outras determinações que podem caracterizar a matéria orgânica, como o oxigênio consumido (OC) e o dissolvido (OD), a fração de sólidos voláteis presentes

nos sólidos totais, assim como a Demanda Química de Oxigênio (DQO) (JORDÃO & PESSOA, 2009).

As características biológicas dos esgotos se referem, principalmente, aos microrganismos presentes nas águas residuárias, assim como seus indicadores de poluição. De acordo com Metcalf e Eddy (2003), as características biológicas das águas residuárias são de fundamental importância para o controle de doenças causadas por organismos patogênicos de origem humana, e na função fundamental das bactérias e microrganismos de decomposição e estabilização da matéria orgânica.

Os principais organismos encontrados nos rios e esgotos são: bactérias, fungos, protozoários, vírus, algas e os grupos de plantas e animais. As bactérias de origem fecal são adotadas como indicadores de poluição da água, a fim de medir a extensão de uma contaminação. Os principais indicadores de contaminação fecal são: coliformes totais (CT); coliformes fecais ou termotolerantes (CF); *Escherichia coli* (EC); e *Streptococcus fecalis* (EsF) (SPERLING, 2014).

4.1.2. Níveis de Tratamento

Para o tratamento do esgoto sanitário, são empregados operações e processo unitários, agrupados em diferentes níveis de tratamento. Segundo Metcalf e Eddy (2003), os tratamentos preliminar e primário se referem às operações físicas unitárias, o tratamento secundário aos processos químicos e biológicos, e o tratamento terciário se refere à combinação dos três.

O tratamento dito preliminar trata da remoção daqueles constituintes das águas residuárias capazes de causar problemas de manutenção e operação nas demais etapas do tratamento. O exemplo mais comum de tratamento preliminar, utilizado em estações de tratamento de esgoto sanitário, é o gradeamento (METCALF & EDDY, 2003). Para Sperling (2014), o tratamento preliminar destina-se principalmente à remoção de sólidos grosseiros e areia.

O tratamento primário destina-se à remoção dos sólidos em suspensão sedimentáveis e os sólidos flutuantes. Uma parte significativa destes sólidos em

suspensão é compreendida pela matéria orgânica. Sua remoção é tida por processos simples, como a sedimentação, implicando na redução da carga de DBO dirigida ao tratamento secundário (SPERLING, 2014). Portanto, a aplicação apenas do tratamento primário não apresenta resultados satisfatórios na remoção de poluentes, sendo sua principal função o preparo do efluente para o tratamento secundário (METCALF & EDDY, 2003).

Segundo Sperling (2014), o principal objetivo do tratamento secundário é a remoção da matéria orgânica, presentes em duas formas distintas: matéria orgânica dissolvida, a qual não é removida por processos físicos, como nos tratamentos primários; e a matéria orgânica em suspensão, cujos sólidos de sedimentabilidade mais lenta persistem na massa líquida, mesmo após um tratamento primário. Sendo assim, é necessária a inclusão desta nova etapa no tratamento, a etapa biológica, havendo reações bioquímicas realizadas por microrganismos, na remoção da matéria orgânica.

Os tratamentos secundários convencionais incluem lagoas de estabilização, processos de disposição sobre o solo, sistemas alagados construídos (*wetlands*), reatores anaeróbios, lodos ativados, e reatores aeróbios com biofilmes (SPERLING, 2014).

Quando se tem como objetivo um melhor resultado no tratamento de águas residuárias, são utilizados métodos de tratamentos avançados e específicos para cada situação. A fim de se obter a desinfecção do esgoto sanitário, ou seja, para remoção de patógenos do efluente, recorre-se ao tratamento terciário. O método mais comum é a cloração, porém a radiação UV e utilização de ozônio apresentam suas vantagens (METCALF & EDDY, 1991). O tratamento terciário é de extrema importância quando se visa à reutilização da água tratada.

4.1.3. Sistemas Individuais de Tratamento

Além dos sistemas coletivos de tratamento de esgoto sanitário das cidades, outra opção é o sistema individual de tratamento. De acordo com Sperling (2014), os sistemas individuais pressupõem a solução no local, sendo adotados para atendimento unifamiliar, embora possam atender a um certo número de residências

próximas entre si, combinando sistemas individuais de tratamento primário, com uma única unidade de tratamento secundário

Dentre as vantagens básicas do saneamento descentralizado, destacam-se a redução, ou não utilização da água potável para transporte dos efluentes, reduzindo a pressão sobre a escassez dos recursos hídricos, a possibilidade de execução em etapas de acordo com o investimento financeiro, a disponibilidade de muitas tecnologias flexíveis às diversas situações, além de promover a proteção da saúde humana e do meio ambiente (MASSOUD, 2009).

A caracterização do efluente, gerado e introduzido no sistema, será de grande importância para indicar a escolha do sistema a ser implantado. Estes sistemas descentralizados podem ser implantados em diferentes situações (SEZERINO, 2015): residências rurais ou urbanas; pequenos empreendimentos; serviços de hotelaria; entre outros serviços que se assemelham ao ambiente e conjunto de hábitos domésticos, em se tratando de geração de esgoto sanitário. A geração de águas residuárias industriais direciona a implantação de projetos específicos de tratamento, os quais devem estar de acordo com as características do efluente industrial, a fim de garantir os parâmetros exigidos pelo CONAMA, através das Resoluções nº 357 (BRASIL, 2005) e nº 430 (BRASIL, 2011).

Segundo Metcalf e Eddy (1991), em uma residência padrão, o sistema individual de tratamento pode receber todos os efluentes sanitários combinados em uma unidade de tratamento primário, assim como pode haver a segregação dos efluentes. Neste caso, não se misturam as águas negras, dos vasos sanitários, das demais águas, ditas águas cinza, sendo necessária a utilização de tecnologias distintas para o tratamento das fezes e demais efluentes.

Um sistema individual de tratamento de esgoto sanitário, que recebe em conjunto os efluentes domésticos, deve possuir todos os níveis de tratamento necessários, para remoção máxima dos poluentes. Este sistema é, normalmente, composto por caixa de gordura (tratamento preliminar), tanque séptico (tratamento primário), filtro biológico (tratamento secundário), desinfecção (tratamento terciário), infiltração no solo (disposição final) (METCALF & EDDY, 1991). Ainda é possível aperfeiçoar o sistema, armazenando a água tratada, em cisternas, para possível reutilização no próprio local.

Diferentes formas de tratamentos secundário e terciário, assim como de disposição final do efluente, podem ser utilizadas desde que atendam com eficiência o objetivo de tratamento complementar dos efluentes de tanques sépticos. A Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 13969 (BRASIL, 1997), apresenta alguns exemplos como alternativas aos convencionais.

Diferentes caracterizações de efluentes geram diferentes projetos, tanto na área rural como urbana. Uma tecnologia que vem se destacando, entre as possíveis alternativas em sistemas descentralizados de tratamento de esgoto, é a implantação dos *wetlands* construídos como tratamento complementar do efluente de tanque séptico (SEZERINO, 2015).

Além de atingir eficiências satisfatórias na remoção de poluentes, os *wetlands* construídos podem atuar como jardins ecológicos, estreitando as relações do homem com a natureza (KAICK et al., 2008). Por estes motivos, a tecnologia tende a ganhar espaço no cenário atual, podendo ser utilizada por pequenos empreendimentos, como pousadas, escolas, condomínios residenciais, ou até mesmo conjuntos habitacionais de moradias populares.

4.2. *Wetlands* Naturais

Os *wetlands* naturais são áreas alagadas, universalmente conhecidas pelo termo em inglês, as quais alagam por um período do ano, ou mantêm-se permanentemente alagados o ano todo, devido a sua localização na geografia terrestre. Estas áreas pantanosas apresentam características particulares, variando de acordo com a sua vegetação e condições aquáticas. Podem ser encontradas em áreas de transição de sistemas terrestres e aquáticos, em locais onde apresentam baixa topografia, como depressões de relevo, ou em áreas com solos de baixa permeabilidade (KADLEC & WALLACE, 2009).

Segundo Tundisi (2008), são inúmeras as definições e tipos de áreas alagadas. Porém, todas apresentam algumas características em comum, como por exemplo, a evidente distinção de seu tipo de solo em comparação com áreas mais elevadas e secas, e o suporte de uma vegetação hidrófita, adaptada a áreas rasas com condições permanentemente inundadas ou com variações periódicas de nível.

O tipo de vegetação predominante nos *wetlands* é de macrófitas aquáticas. Estas plantas, que habitam desde brejos até ambientes verdadeiramente aquáticos, são divididas em: macrófitas emergentes, que produzem órgãos reprodutivos aéreos, localizando-se em regiões com pouca profundidade; macrófitas flutuantes, as quais não possuem raízes no substrato e flutuam livremente pelo ambiente alagado; ou submersas, que ocorrem nas profundidades, podendo estar livres ou fixas no substrato (TUNDISI, 2008).

Dentre os processos que ocorrem com as macrófitas aquáticas, destaca-se a tolerância delas as baixas tensões de oxigênio dissolvido, com estruturas próprias para transportar gases e para a fixação de HCO_3^- na fotossíntese. Neste caso, o processo excreta OH^- e produz um ambiente com elevado pH, que precipita íons carbonato (TUNDISI, 2008).

As propriedades dos *wetlands* naturais tornam estes ambientes peculiares, com grande potencial de uso pelo homem, dentre a maioria dos grupos de ecossistemas na Terra. A abundância de água é, sempre, bastante importante para maioria das formas de produção biológica, e as plantas aquáticas são adaptadas a utilizar desse fator alagadiço para suportar períodos de baixa umidade, com menos elementos químicos, como o oxigênio. Devido a isso, os *wetlands* naturais estão entre os ecossistemas biologicamente mais produtivos, onde além de plantas, habitam diversos tipos animais, sejam eles mamíferos, pássaros, répteis, anfíbios, e peixes (KADLEC & WALLACE, 2009).

Ainda segundo Kadlec e Wallace (2009), esta alta taxa de atividade biológica das áreas alagadas possibilita a transformação de vários poluentes, encontrados nos despejos sanitários, em subprodutos inofensivos ou em nutrientes adicionais que podem ser utilizados pela própria vida biótica do local. Esta transformação é vista como um processo natural de tratamento de esgoto sanitário, possuindo baixo custo de operação e manutenção, pelo fato de se utilizar pouca estrutura em uma estação de tratamento, assim como o mínimo de energia e agentes químicos para atingir o objetivo principal.

Mitsch (2000) afirma que os *wetlands* naturais são capazes de utilizar a filtração física, química e biológica na transformação de poluentes presentes em esgotos sanitários, e junto ao seu habitat selvagem, harmoniza a relação da

sociedade com a natureza, apresentando alguns bons exemplos de estações de tratamento de esgoto por este método, ao redor do mundo.

4.3. Wetlands Construídos

Baseado no sistema natural de tratamento de águas residuárias, descrito no item anterior, os *wetlands* construídos, ou sistemas alagados construídos, são alternativas modernas para estações de tratamento de diversos tipos de efluentes.

Segundo Mitsch (2000), a necessidade de rigor ao projetar uma estação de tratamento por *wetlands* varia, dependendo da localização e aplicação. De maneira geral, um projeto que usa processos naturais para atingir seus objetivos rende soluções mais baratas e satisfatórias. Porém, os *wetlands* construídos devem garantir processos mais acessíveis ao controle, uma vez bem projetadas.

Um tratamento por *wetlands* construídos pode ser projetado de diferentes modos hidráulicos. Kadlec e Wallace (2009) separam as possibilidades de construções de acordo com o fluxo. Os *wetlands* construídos com fluxo superficial são áreas projetadas para simular lagoas do tipo pântano, com vegetação variada, já as que utilizam fluxo subsuperficial, o efluente atravessa, horizontalmente ou verticalmente, um leito filtrante cultivado com macrofitas emergentes.

A gama de diferentes modelos de dimensionamento varia entre simulações mais simples, como empíricas, numéricas e estatísticas, até os modelos mais complexos, baseados em processos específicos. Kumar e Zhao (2011) apresentam um estudo em busca de melhor compreensão dos processos que ocorrem nos *wetlands* construídos, e dos critérios de dimensionamento destes sistemas. Os autores apresentam diversos modelos de dimensionamento, suas evoluções e alterações, que vêm acontecendo nos últimos anos.

4.3.1. Fluxo Superficial

Um projeto de *wetland* com fluxo superficial proporciona uma área aberta e alagada, com vegetação flutuante e algumas plantas emergentes. Ao percorrer o

fluxo da lagoa, o efluente é tratado pelos processos de sedimentação, filtração, oxidação, redução, adsorção e precipitação (KADLEC & WALLACE, 2009).

Este tipo de *wetlands* construídos, por simular uma situação natural de lagoa, tem uma forte tendência em incorporar animais ao ambiente, tornando-a aparentemente mais selvagem. O modelo não é comumente usado como tratamento secundário, devida a exposição dos humanos aos patógenos do efluente, mas comum como tratamento avançado de um efluente vindo de processos de tratamento secundário ou terciário (KADLEC & WALLACE, 2009). A Figura 1 ilustra uma aplicação de *wetland* de fluxo superficial, como polimento, em uma estação de tratamento de esgoto.

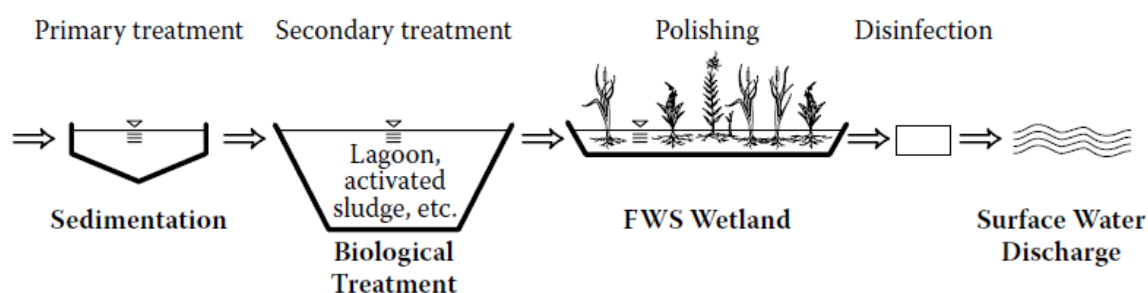


Figura 1 – Exemplo de uma estação de tratamento de esgoto com *wetland* de fluxo superficial. Fonte: KADLEC & WALLACE, 2009.

Este tipo de *wetland* aceita diferentes condições climáticas. Porém, em ambientes extremos, a formação de gelo na lagoa deve dificultar a hidráulica no período de inverno, diminuindo a eficiência em alguns processos do tratamento, sendo, portanto, indicado a regiões com invernos menos rigorosos (DUPOLDT et al., 2000).

4.3.2. Fluxo Subsuperficial

Wetlands subsuperficiais consistem em filtros cultivados com macrófitas, onde a areia, ou algum outro tipo de solo hidráulico, age como meio filtrante e soma-se ao cultivo de vegetação, que proporcionará a zona de raízes, atuante no tratamento. Estes sistemas possuem suas tubulações cobertas por um material de drenagem,

normalmente pedras britas, as quais muitas vezes não fazem parte do processo de filtração, mas evitam a exposição do esgoto à superfície (HOFFMANN et al., 2010).

Kadlec e Wallace (2009) afirmam que os sistemas de fluxo subsuperficial são capazes de operar em ambientes mais frios, por não haver efluente exposto na superfície. Porém, a maior limitação destes modelos seria a possibilidade de colmatação do meio filtrante.

A seguir será discutido acerca dos três principais modos hidráulicos comumente empregados no tratamento de águas residuárias por *wetlands* construídos. Mas vale resaltar a existência ainda de outros modelos, como é o caso do Modelo Francês, que combina tratamento primário e secundário de efluentes, e os modelos híbridos, que utilizam a combinação do fluxo vertical com horizontal para aumentar desempenho no tratamento (HOFMANN et al., 2011).

4.3.2.1. Fluxo Subsuperficial Horizontal

Neste caso, o efluente é direcionado horizontalmente no *wetland*, e tende a permanecer embaixo da superfície do meio filtrante, percorrendo pelas raízes e rizomas da vegetação presente, formando uma lagoa. Pelo fato de não haver efluente exposto durante o processo de tratamento, o risco associado à saúde humana, pela exposição de organismos patogênicos, é minimizado (KADLEC & WALLACE, 2009). Se bem operado, este tipo de *wetland* não proporciona um habitat favorável à proliferação de mosquitos, causadores de doenças como dengue, malária, etc.

Segundo Hoffmann et al. (2011), devido aos primeiros projetos de *wetlands* construídos serem de fluxo subsuperficial horizontal, este tipo de sistema é ainda o tipo mais comumente utilizado. Hoje em dia diversos projetos foram melhorados, o que resultou numa melhor qualidade dos efluentes tratados por esse modelo, assim, tornou-se amplamente aceito como um tratamento robusto e com baixa necessidade de manutenção.

A Figura 2, a seguir, ilustra um modelo de um *wetland* subsuperficial de fluxo horizontal. Estes modelos são, normalmente, feitos com revestimento impermeável,

e compostos por tubulação de entrada, meio filtrante, vegetação emergente e tubulação de saída (KADLEC & WALLACE, 2009).

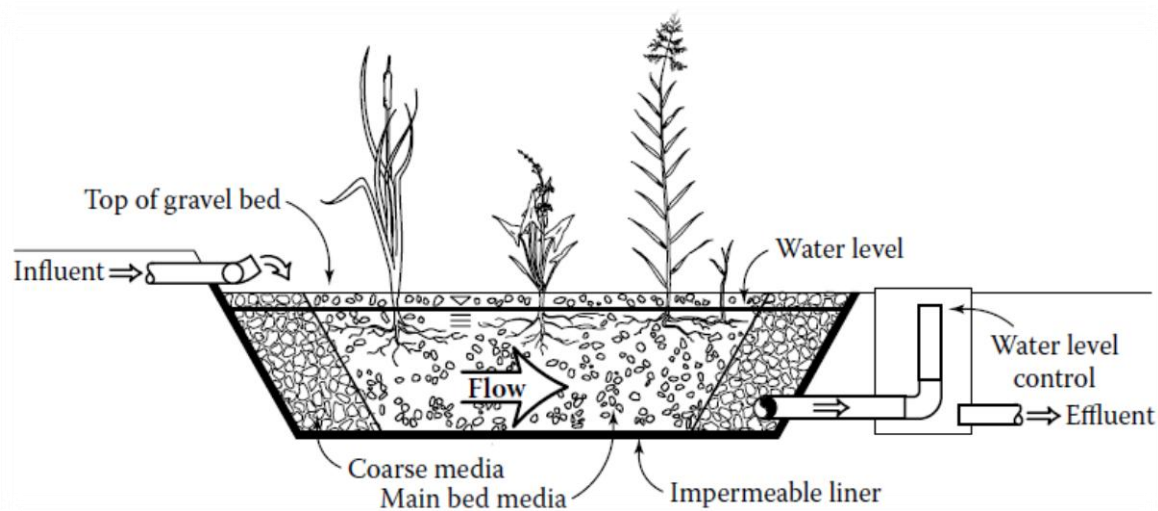


Figura 2 – Exemplo de *wetland* subsuperficial de fluxo horizontal.
 Fonte: KADLEC & WALLACE, 2009.

A matéria orgânica da água residual é removida por bactérias presentes sobre a superfície do meio suporte e das raízes das plantas. O fornecimento de oxigênio é um fator bastante importante para a eficiência destes processos de tratamento, e ao contrário dos sistemas de fluxo vertical, nos *wetlands* de fluxo horizontal têm muito pouca transferência de oxigênio externo, sendo esta uma das razões de maior exigência do sistema por área disponível (HOFFMANN et al., 2010).

Este tipo de *wetland* construído é normalmente mais caro, caso comparado com o modelo de *wetland* descrito no item 4.3.1, anterior. Porém, o modelo possui o menor custo de manutenção entre as demais alternativas (KADLEC & WALLACE, 2009). Segundo Wallace e Knight (2006), este tipo de *wetland* é comum, como tratamento secundário, em residências familiares ou em sistemas coletivos de pequeno porte. Tecnologia importante que pode ser usada em conjuntos habitacionais ou em comunidades rurais, combinando sistemas isolados de tratamento primário.

Hoffmann et al. (2011) descreve algumas recomendações básicas sobre projetos de estações de tratamento de esgoto doméstico por *wetlands* construídos de fluxo subsuperficial horizontal:

- Enquanto a superfície do filtro é mantida em nível para evitar erosão, no inferior do tanque, a inclinação deve ser entre 0,5-1% da entrada para a saída, para se alcançar uma boa drenagem;
- A profundidade de leitos filtrantes é normalmente em torno de 60 centímetros com uma da camada livre, de 15 centímetros, para acumulação de água;
- A área superficial específica exigida é de cerca de 3-10 m²/hab, dependendo da temperatura e outro factores. Em lugares com climas quentes, menos área é necessária devido à maior atividade biológica. Em climas frios, o valor mínimo de dimensionamento não deve ser inferior a 5 m²/hab;
- A carga orgânica por área de superfície não deve exceder a 4-10 gDBO/m²d em climas frios, ou 16 gDQO/m²d. Nenhum dados estão disponíveis para climas quentes, com areia grossa como substrato;
- A carga hidráulica deve ser de 60-80 mm/d para águas cinza e 40 mm/d para águas negras. No entanto, o fator limitante é a carga orgânica, o que significa que a água cinza com carga orgânica baixa (de chuveiros ou lavanderia) pode provavelmente ser aplicada aos *wetlands* de fluxo horizontal, mesmo com cargas hidráulicas elevadas.

4.3.2.2. Fluxo Subsuperficial Vertical

Muitos tipos de *wetlands* de fluxo subsuperficial vertical são encontrados ao redor do mundo. A tecnologia foi desenvolvida na Europa, meados dos anos 1960, com a intenção de fornecer níveis maiores de transferência de oxigênio, e produzir um efluente nitrificado, o que não acontece nos *wetlands* de fluxo horizontal, que são limitados quanto à capacidade de oxidar amônia (KADLEC & WALLACE, 2009).

Dentre as diversas variações, os modelos mais comuns de *wetlands* de fluxo vertical possuem tubulação de entrada distribuída por toda a superfície do tanque, onde são despejadas doses do efluente, de maneira intermitente, como mostra a Figura 3. O efluente atravessa um meio filtrante, normalmente feito de areia e brita, e a água tratada é coletada pela tubulação da parte inferior do sistema (NIVALA et al., 2013).

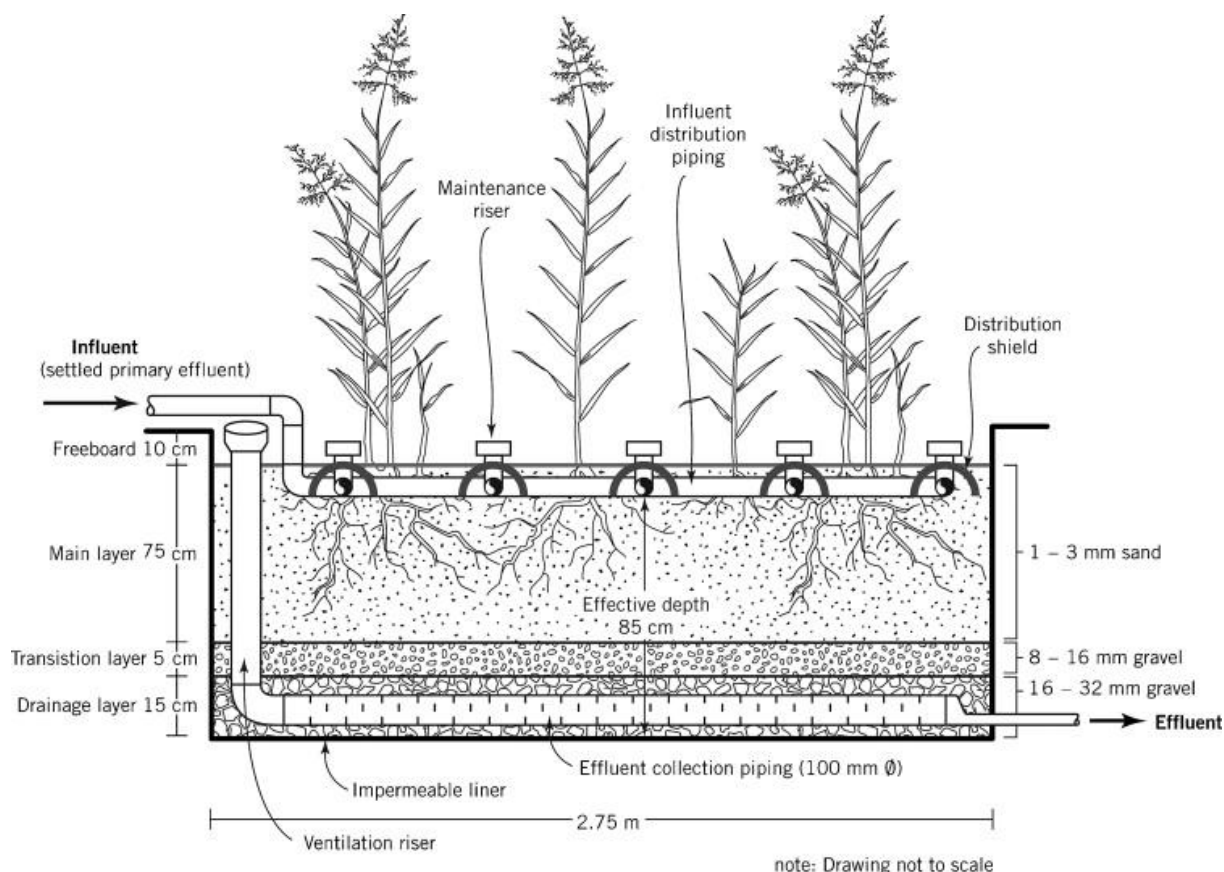


Figura 3 – Exemplo de *wetland* subsuperficial de fluxo vertical livre.
Fonte: NIVALA et al., 2013.

Pela capacidade de oxidação da amônia, Kadlec e Wallace (2009) indicam os *wetlands* de fluxo vertical para o tratamento de efluentes com taxas maiores de amônia que as encontradas no esgoto sanitário. É o caso, por exemplo, para águas residuárias de processamento de alimentos ou de aterro sanitário.

Contudo, há diversas aplicações deste tipo de *wetland* em sistemas individuais de tratamento de esgoto sanitário, tanto na Europa como no Brasil. Kaick et al. (2008) apresenta, em artigo, alguns exemplos de *wetlands* subsuperficiais de fluxo vertical, implantados no Brasil, com resultados satisfatórios na remoção de poluentes presentes no esgoto sanitário.

O modelo de Kaick (2002) é conhecido como *wetland* construído de fluxo vertical afogado. Neste sistema a saída do efluente se encontra em uma altura específica, podendo fazer com que o líquido fique reservado por um período maior dentro do sistema. As plantas são cultivadas em um meio suporte, composto por brita nº 2 e areia grossa. A tubulação de entrada do sistema fica embaixo de outra

camada de meio filtrante, que tem a intenção de não expor o líquido ao contato humano. O esgoto é lançado com fluxo verticalmente descendente. Utiliza-se também a pedra brita, na parte inferior do tanque, onde também tem função na drenagem do efluente tratado.

Um modelo semelhante é discutido por Nivala et al. (2013). Observa-se na Figura 4 praticamente o mesmo design demonstrado na Figura 3, porém com uma diferença na altura da saída do efluente, e neste caso específico uma linha de aeração.

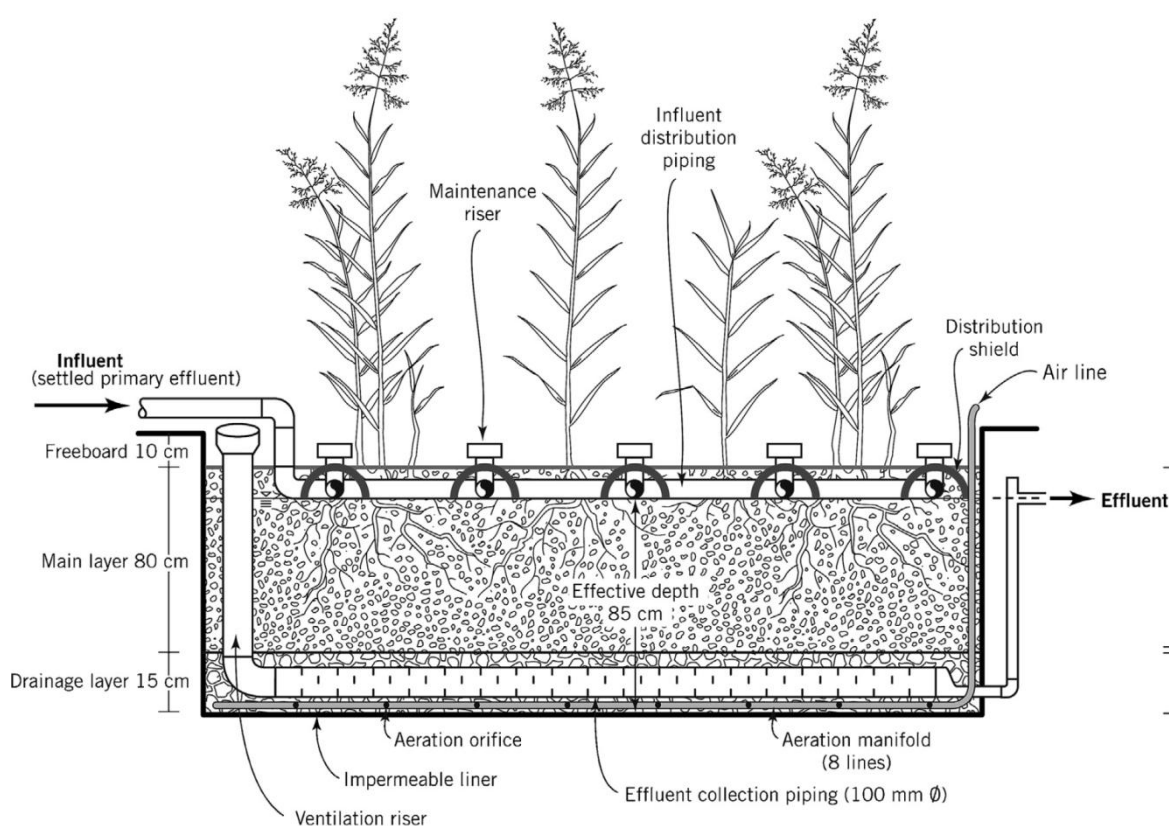


Figura 4 – Exemplo de *wetland* subsuperficial de fluxo vertical afogado
Fonte: NIVALA et al., 2013.

Para Nivala et al. (2013), os *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado, ou saturado, como também é conhecido, apresentam duas vantagens em seu processo. Primeiro, a taxa de carga orgânica ($\text{gDBO}/\text{m}^2\text{d}$) de entrada, distribuída pela área superficial do tanque, é muito menor na configuração deste tipo de reator do que nos modelos de fluxo horizontal. Wallace e Knight (2006) relacionam a colmatação do meio suporte à carga de DBO aplicada na área de secção que

recebe o líquido. Sendo assim, com uma carga de entrada sendo distribuída em uma área maior, minimizam-se os potenciais de colmatação do sistema. A segunda vantagem dos sistemas afogados, constatado por Nivala et al. (2013), é que a mistura da água nos leitos filtrantes é maior, provocada ainda mais quando em presença de aeração mecânica, que faz com que as bolhas de ar percorram o caminho ascendente, inverso do líquido.

Outra vantagem do sistema de fluxo vertical afogado é o fato de haver uma maior disponibilidade hídrica, além do fornecimento constante de nutrientes, ao cultivo das plantas. Andrade (2012) constatou em estudo um melhor crescimento de plantas cultivadas em sistema afogado, quando comparado ao sistema de fluxo livre. Para Kadlec e Wallace (2009), diversas plantas utilizadas em sistemas de *wetlands* construídos têm seus desenvolvimentos naturais em áreas com inundação periódica ou perenes (com alagamento entre 50 e 100% do tempo), confirmando o potencial do sistema de fluxo afogado.

Um levantamento, realizado por Ferreira et al. (2013), com o intuito de verificar a possibilidade de padronização do sistema de *wetlands* de fluxo vertical, constatou valores bastante satisfatórios no tratamento de esgoto sanitário. O estudo considerou trabalhos realizados por pesquisadores, no Brasil, e apontou médias para remoção de DBO entre 77% e 99% de eficiência, 99% de remoção de coliforme total, e remoção de nutrientes, Nitrogênio e Fósforo, com máximas de 89% de N amoniacal, 93,3% de N total e 99,6% de Fósforo.

Entretanto, a compreensão completa, aprofundada e detalhada dos sistemas de *wetlands* construídos é algo ainda desejado por muitos pesquisadores, devido aos inúmeros processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em paralelo e se influenciam entre si (KUMAR & ZHAO, 2011).

As sugestões de Hofmann et al (2011) para a elaboração de projetos de sistemas de fluxo vertical no tratamento de esgoto doméstico são:

- As tubulações de distribuição devem ser concebidas de tal maneira que alcancem uma distribuição uniforme do efluente pré-tratado em todo o leito alagado. Isto é assegurado escolhendo o diâmetro dos tubos de

distribuição, seus comprimentos, o diâmetro de buracos e espaçamento entre os furos na distribuição dos tubos;

- Permitir boa drenagem na entrada e saída do sistema;
- Uma inclinação inferior de 0,5-1% em direção à saída é importante para os grandes tanques;
- A profundidade dos leitos filtrantes de areia deve ser pelo menos de 50 cm, com um adicional de 20 cm de cascalho na base para cobrir os tubos de drenagem, 10 centímetros de cascalho na parte superior do leito, além de 15 centímetros de borda livre para acumulação de água. O cascalho no topo evita a acumulação de água livre na superfície, e pode, de fato, desconsiderados se não há acesso de pessoas ao sistema;
- A área superficial específica exigida é normalmente 3-4 m²/hab, em regiões frias, e 1-2 m²/hab em regiões quentes;
- A carga orgânica por área de superfície deve ser limitada aos 20 g DQO/m²d, em climas frios. Isso se aplica as águas cinza e águas residuais. Alguns autores têm tido boas experiências com projetos de *wetlands* de fluxo vertical, em climas quentes, com cerca de 60-70 g DQO/m² d, correspondente a cerca de 30-35 g DBO/m²d.
- A carga hidráulica para estes sistemas, em climas frios, não deve ser superior a 100-120 mm/d. Porém há casos, em climas quentes, que mostram que taxas de até 200 mm/d, de águas residuais pré-tratadas, podem ser aplicadas sem influências negativas.
- Durante eventos de chuva, pode ser aplicada carga hidráulica de até 500 mm/d, em curta duração;

4.3.3. Vegetação

Nos *wetlands* construídos são cultivadas as macrófitas aquáticas. Existem milhares de espécies destas plantas naturais de áreas alagadas. É o componente estrutural dominante no tratamento. Portanto, é essencial um conhecimento básico de cultivo de plantas aquáticas, assim como suas características, para obter sucesso no tratamento (DUPOLDT et al., 2000).

De acordo com Dupoldt et al. (2000), não há dúvida quanto a importância da vegetação no sistema de *wetlands* construídos. Diversos estudos que medem eficiência de tratamento de águas residuárias, com e sem vegetação, concluem quase sempre que o desempenho no tratamento é maior na presença de plantas.

As plantas utilizadas no sistema de *wetlands* construídos, além de proporcionar a característica visual do sistema, fornecem superfície para crescimento de microrganismos e adesão do biofilme, atuando na retirada de nutrientes do efluente (KONNERUP et al., 2008).

Na implantação dos sistemas, a densidade da vegetação deve ser calculada baseando-se na distribuição das mudas no *wetland* construído, com um distanciamento de 0,50 m, tanto lateral como longitudinalmente, de modo que haja espaço para o aumento da biomassa e formação do biofilme radicular para o tratamento empregado (SCHULZ, 2009).

As macrófitas aquáticas são divididas em plantas emergentes, flutuantes e submersas. Os dois primeiros tipos são os mais comuns em *wetlands* construídos. De maneira geral, a seleção da vegetação a ser cultivada está relacionada com a profundidade da zona de raízes e a altura da planta, assim como com o tipo de sistema escolhido, fluxo superficial ou subsuperficial. As macrófitas emergentes (Figura 5) são fixas no substrato do *wetland* e adaptadas a profundidades de 0,5 a 1,5 m. As macrófitas flutuantes (Figura 6) podem ser fixas no substrato, possuindo folhas e flores flutuantes, ou vivem livres sobre a superfície do *wetland*. As flutuantes fixas chegam a habitar profundidades de até 3 m (KADLEC & WALLACE, 2009).

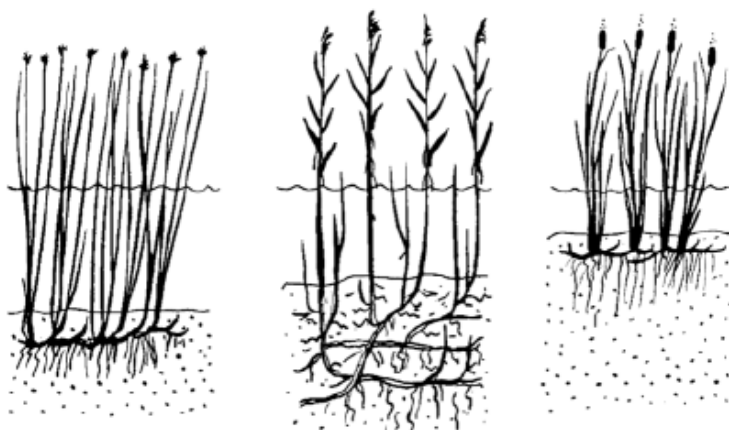


Figura 5 – Macrófitas Emergentes
 Fonte: KADLEC & WALLACE, 2009.



Figura 6 – Macrófitas Flutuantes
 Fonte: KADLEC & WALLACE, 2009.

A altura da planta e a profundidade da zona de raízes indicam a melhor seleção de vegetação para o fim proposto. As plantas do tipo emergentes são as mais apropriadas para os *wetlands* de fluxo subsuperficial (KADLEC & WALLACE, 2009).

Para Zanella (2014), a escolha das espécies para se cultivar em um sistema de *wetlands* construídos deve ter como orientação: a tolerância da planta à manutenção da rizosfera, permanentemente saturada ou submersa; às características do efluente que se pretende tratar; capacidade de adaptação às condições climáticas do local onde será instalado o sistema; resistência; e facilidade de manejo.

Nem todas as espécies de plantas aquáticas possuem a mesma eficiência no tratamento de águas residuárias, uma vez que plantas para tratamento por *wetlands* devem ser capazes de tolerar a combinação do fluxo contínuo com a exposição a

efluentes, contendo altas e variáveis concentrações de poluentes (DUPOLDT et al., 2000).

4.3.4. Meio suporte

O processo de filtração biológica nos *wetlands* construídos é fornecido pelo meio suporte utilizado. Este serve como substrato ao cultivo da vegetação, favorece as transformações químicas e bioquímicas, além de aprisionar os poluentes removidos (DUPOLDT et al., 2000).

Os *wetlands* subsuperficiais utilizam, normalmente, areia e pedra brita como meio suporte. Porém há diversos outros materiais possíveis de utilização, como bambu, conchas marinhas, calça, materiais plásticos, entre outros. A escolha do meio suporte deve estar sempre de acordo com os recursos naturais que a região de implantação oferece, e sua durabilidade, podendo assim minimizar custos (KAICK, 2002).

Para Metcalf e Eddy (1991), o importante é conhecer a porosidade e a permeabilidade (condutividade hidráulica) do meio suporte escolhido, assim se faz um estudo hidráulico e de dimensionamento dos *wetlands* construídos com maior eficácia. Alguns exemplos são apresentados na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Características dos meios suportes para sistemas com fluxo subsuperficial

Tipo de meio suporte	Diâmetro	Porosidade, α	Condutividade	
	efetivo d_{10} (mm)		hidráulica, k_s (ft ³ /ft ² .d)	K_{20}
Areia fina	1	0.42	1,380	1.84
Areia média	2	0.39	1,575	1.35
Pedra brita nº 0	8	0.35	1,640	0.86
Pedra brita nº 1	8-16	0,38	-	-
Pedra brita nº 2	16-32	0,40	-	-

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (1991) e Nivala et al. (2013).

Nota: ft³/ft².d x 0.3048 = m³/m².d

Philippini e Sezerino (2004) apresentam, com base em outras literaturas, valores recomendados quanto à granulometria e índices físicos do meio suporte:

- Diâmetro efetivo (d_{10}) superior ou igual a 0,20mm;
- Coeficiente de uniformidade (U) menor ou igual a 5 unidades;
- Coeficiente de permeabilidade, ou condutividade hidráulica saturada (Ks), maior ou igual a 10^{-4} m/s ($\geq 10^{-2}$ cm/s ou $\geq 0,36$ m/h).

O meio suporte deve ser de granulometria tal que permita o escoamento continuado dos esgotos, sem problemas de entupimento (SPERLING, 2014). Segundo Knowles et al. (2011), o entupimento, ou colmatção do meio poroso, é um dos principais problemas operacionais dos sistemas de *wetlands* construídos, sendo um dos fatores limitantes para expansão da tecnologia, no tratamento de águas residuárias. Muitos estudos vêm sendo realizados, com a intenção de identificar, caracterizar e solucionar os problemas causados pela colmatção nestes sistemas (NIVALA et al., 2012).

Segundo Hoffmann et al. (2011) a camada de areia filtrante deve ter uma altura entre 40 a 80 cm, e o meio suporte não deve conter argila, lodo, nem outro material muito fino. Além disso, sugere algumas ações para prevenir a colmatção: melhorar a eficiência do pré-tratamento; utilização de pequenas rochas ou cascalhos grosseiros nas zonas de entrada do sistema; vários pontos de entrada, garantindo que a água residuária seja distribuída uniformemente sobre toda a largura e profundidade do tanque.

Ainda para Hoffmann et al. (2011), no caso de *wetlands* de fluxo vertical, uma espécie de colmatção “temporária” acontece regularmente e é parte do processo. Descansos regulares dos leitos são realizados para reverter o processo de colmatção.

4.4. Considerações de Projeto

Segundo Hoffmann et al. (2011), as condições necessárias para utilizar os sistemas de *wetlands* construídos para tratamento de esgoto são:

- Espaço suficiente para implantação do sistema;
- Climas sem frios rigorosos, apesar da fácil adaptação no dimensionamento de sistemas com fluxo subsuperficial;
- Área de implantação ensolarada;
- As plantas cultivadas devem estar adaptadas às condições climáticas locais;
- O efluente não pode conter substâncias tóxicas;
- E é importante ter uma equipe bem treinada para manutenção do sistema.

4.4.1. Local de Implantação

A escolha do local para construção de um sistema de *wetlands* leva em consideração diversos aspectos, os quais influenciam diretamente nos resultados obtidos, principalmente o custo da implantação. É necessário um estudo do local, quanto à disponibilidade de área, topografia, permeabilidade do solo, recursos ambientais existentes, assim como possíveis impactos na vizinhança.

Dupoldt et al. (2000) cita alguns critérios que o melhor local para implantação deve seguir. Entre eles:

- Proximidade da fonte do efluente;
- Inclinação, para que a água flua através da gravidade;
- Solo passível de compactação, para evitar contaminação das águas subterrâneas;
- O *wetland* deve estar acima do lençol freático;

4.4.2. Condições Climáticas

Os *wetlands* construídos são diretamente influenciados pelas condições climáticas da região onde se planeja construir o sistema. Isto ocorre pelo fato de se portarem como corpos d'água abertos à atmosfera (DUPOLDT et al., 2000).

Problemas operacionais podem ocorrer em consequência de épocas de secas, de chuvas intensas e em invernos extremamente rigorosos. Para Dupoldt et al. (2000), há situações em que os *wetlands* podem diminuir a eficiência de

tratamento, devido as chuvas fortes que aumentam o fluxo rapidamente, diminuindo o tempo que o efluente permanece no sistema. O aumento no fluxo pode diluir alguns poluentes dissolvidos, enquanto aumenta a quantidade de materiais em suspensão.

Portanto é de extrema importância um estudo meteorológico do local, para ter conhecimento das temperaturas extremas a que o tratamento será exposto, assim como buscar soluções para proteger das chuvas a superfície dos *wetlands*, e garantir iluminação suficiente para o cultivo das plantas.

4.4.3. Disponibilidade de Área

O tempo de retenção da água no *wetland* está diretamente relacionado com a eficácia do tratamento. Segundo Dupoldt et al. (2000), a relação entre o tamanho da área alagada com o tempo de retenção da água é fator determinante no dimensionamento dos *wetlands*. Portanto, o local de implantação deve ser grande o suficiente para atender as dimensões mínimas e qualquer possibilidade de expansão.

4.4.4. Topografia

As regiões mais baixas são locais de grande potencial para construção dos *wetlands*. Se a área apresenta declive gradual, a água flui por gravidade, tornando o sistema mais simples e sem gastos de energia, além de minimizar custos (DUPOLDT et al., 2000).

4.4.5. Hidráulica

Segundo Mitsch (2000), a hidráulica do sistema é a variável mais importante no design dos *wetlands* construídos, garantindo resposta às condições químicas e biológicas no tratamento do efluente. Os parâmetros utilizados para descrever a hidráulica dos *wetlands* incluem o hidroperíodo, a profundidade da água, variações sazonais, taxa de carga hidráulica e o tempo de detenção hidráulico.

4.4.5.1. Profundidade da água

Um dos parâmetros hidráulicos mais básicos nos *wetlands* construídos é o hidroperíodo. O termo se refere à profundidade padrão da água durante todo o período hidráulico, incluindo as variações sazonais de profundidade e frequentes cheias. *Wetlands* que possuem variações sazonais de profundidade da água tem o maior potencial em diversidade de plantas, animais e processos biogeoquímicos (MITSCH, 2000).

4.4.5.2. Variações Sazonais

Tempestades e enchentes sazonais raramente afetam um tratamento de esgoto por *wetlands* construídos. A variação do hidroperíodo, períodos secos intercalados com enchentes, é um ciclo natural das planícies pantanosas, e sendo assim, variações nos níveis d'água dos *wetlands* construídos devem ser aceitas. Estas variações de nível podem favorecer oxidação de sedimentos orgânicos e, em alguns casos, promover um sistema com altos níveis de retenção química (MITSCH, 2000).

4.4.5.3. Taxa de Carga Hidráulica

Pode ser definida como o volume, por unidade de tempo, pela unidade de área, que é equivalente à profundidade de inundação sobre a área de tratamento, por unidade de tempo (MITSCH 2000).

De acordo com Kadlec e Wallace (2009), a taxa de carga hidráulica é definida como:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Em que:

q = taxa de carga hidráulica (m/d)

A = área superficial do *wetland* (m^2)

Q = vazão do efluente (m^3/d)

Kadlec e Wallace (2009) salientam que definição é mais aplicada ao aumento do fluxo de entrada do efluente: $q_i = Q_i / A$. Afirmam, ainda, que alguns *wetlands* operam com alimentação intermitente, como é o caso de alguns modelos de *wetlands* subsuperficiais de fluxo vertical. Nessas circunstâncias o termo taxa de carga hidráulica se refere ao tempo médio da taxa de fluxo.

4.4.5.4. Tempo de Detenção Hidráulico (TDH)

Para um *wetland* de fluxo superficial, o volume de água do *wetland* é definido como o volume contido entre a superfície da água, o fundo do *wetland* e seus lados. Para *wetlands* subsuperficiais, o volume contido no tanque deve ser multiplicado pela porosidade do meio suporte utilizado (KADLEC & WALLACE, 2009). Se projetados com a intenção de remoção de DBO, o tempo de detenção pode ser estimado usando a equação de primeira ordem, é (METCALF & EDDY, 1991):

$$\frac{C_e}{C_o} = A \exp(-0.7K_T(A_v)^{1.75}t) \quad (2)$$

Em que:

C_e = concentração de DBO₅ na saída (mg/L)

C_o = concentração de DBO₅ na entrada (mg/L)

A = coeficiente determinado empiricamente, que representa a fração de DBO₅ não removida

K_T = constante de primeira ordem da temperatura dependente

A_v = área superficial para atividade microbológica (m^2/m^3)

t = tempo de detenção hidráulica (d)

Metcalf e Eddy (1991) define o tempo de detenção hidráulico em função do fluxo com o sistema geométrico do *wetland*, expresso por:

$$t = \frac{LWnd}{Q} \quad (3)$$

Em que:

t = tempo de detenção (d)

L = comprimento do *wetland* (m)

W = largura do *wetland* (m)

n = fração da área de secção, não ocupada por plantas

d = profundidade do *wetland* (m)

Q = vazão média do efluente, $[Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{saída}} / 2]$ (m³/d)

Para sistemas de *wetlands* subsuperficiais, projetados para remoção da DBO, um modelo similar é sugerido por Metcalf e Eddy (1991), para determinar o tempo de detenção:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t') \quad (4)$$

Em que:

C_e = concentração de DBO₅ na saída (mg/L)

C_o = concentração de DBO₅ na entrada (mg/L)

K_T = constante de primeira ordem da temperatura dependente

Nesta equação, o tempo de detenção, t', é definido como o tempo de detenção teórico, baseado na porosidade do meio suporte (METCALF & EDDY, 1991):

$$t' = \frac{LW\alpha d}{Q} \quad (5)$$

Em que:

t' = tempo de detenção teórico (d)

L = comprimento do *wetland* (m)

W = largura do *wetland* (m)

Q = vazão do efluente (m³/d)

α = porosidade do meio suporte

d = profundidade do *wetland* (m)

O tempo de detenção real t , é uma função da condutividade hidráulica do meio suporte pelo comprimento do *wetland* (METCALF & EDDY, 1991):

$$t = \frac{L}{k_s S} \quad (6)$$

Em que:

t = tempo de detenção (d)

L = comprimento do *wetland* (m)

k_s = condutividade hidráulica (m³/m².d)

S = inclinação do *wetland* (m/m)

4.4.6. Dimensionamento

A geometria do *wetland* vai depender do fluxo do sistema: superficial ou subsuperficial. Para sistemas com fluxo superficial, a área da superfície ($L \times W$) é dada pelo tempo de detenção e profundidade do *wetland*, através da equação (3), descrita no item 4.4.5.4 (METCALF & EDDY, 1991).

Para sistemas de *wetlands* com fluxo subsuperficial horizontal, a área de secção (A_c) do substrato é estabelecida pela capacidade de demanda hidráulica (Equação 7) (METCALF & EDDY, 1991).

$$A_c = \frac{Q}{k_s S} \quad (7)$$

Em que:

A_c = Área de secção (m^2)

Q = vazão do efluente (m^3/d);

k_s = condutividade hidráulica ($m^3/m^2.d$)

S = inclinação do *wetland* (m/m)

O fluxo de velocidade, definido pelo k_s e S , deveria ser limitado ao valor de 6.8 m.d^{-1} , para minimizar a distribuição localizada de biofilmes. A largura necessária do sistema é uma função da área de secção pela profundidade, calculada pela equação (8). O comprimento necessário deve, então, ser calculado pela equação do tempo de detenção hidráulico (METCALF & EDDY, 1991).

$$W = \frac{A_c}{d} \quad (8)$$

Em que:

W = largura do *wetland* (m)

A_c = Área da secção (m^2)

d = profundidade do *wetland* (m)

4.5. Implantação

Alguns critérios são levados em consideração no momento de implantação de *wetlands* construídos. Não somente relacionados com a qualidade do produto final obtido, mas também em relação aos impactos ambientais ou de vizinhança que a obra pode trazer.

A área de implantação deve ser acessível, para facilitar os trabalhos. Caso o local possua um ambiente inapropriado ao objetivo, o custo de implantação pode ser impactado. Assim, diversos fatores devem ser previstos, e se necessário, medidas de adaptação devem ser tomadas, a fim de evitar problemas durante a construção. Na etapa construtiva, levam-se em consideração possíveis variações climáticas da região, medidas de controle de erosão, gestão de resíduos da construção civil, controle de ruídos, entre outros possíveis impactos (DUPOLDT et al., 2000).

Dupoldt et al. (2000) também sugere a reutilização do solo, retirado na escavação e preparo da área, como substrato no próprio sistema, se for adequado a essa finalidade. Caso contrário o solo retirado pode ser utilizado para outros fins construtivos.

É necessário o acompanhamento constante do responsável pela obra, durante a construção, assim garantindo o resultado esperado. Deve-se acompanhar o projeto elaborado quanto aos materiais utilizados, à impermeabilidade do *wetland* e suas tubulações, à distribuição das camadas do meio filtrante, assim como ter cuidado no plantio da vegetação optada.

4.6. Manutenção

Para Sperling (2014), a operação e manutenção dos sistemas de *wetlands* construídos são bastante simples. As atividades estão relacionadas, basicamente, ao controle de poda e remoção das plantas em estágios de decomposição.

Para obter bons resultados, os *wetlands* construídos devem ser bem gerenciados. Como exemplo, Dupoldt et al. (2000) cita o problema causado pela falta de poda das plantas, que retorna nutrientes ao sistema, através da biomassa da planta quando estas morrem.

A manutenção dos *wetlands* deve focar em fatores importantes à eficiência do tratamento (DUPOLDT et al., 2000):

- Garantir o contato do efluente com a comunidade microbiológica, presente na zona de raízes;
- Assegurar que o fluxo alcance todas as partes dos *wetlands*, evitando zonas mortas;
- Manter um ambiente favorável à vida microbiológica;
- Manter o cultivo de plantas em bom estado vegetativo;

4.7. Monitoramento

O monitoramento é necessário para garantir os objetivos do tratamento proposto, indicando a integridade biológica do processo nos *wetlands*. Monitorá-los pode identificar problemas antes que se agravem. O grau de detalhe no monitoramento está relacionado com o tamanho e a complexidade do sistema projetado (DUPOLDT et al., 2000).

Após a implantação do *wetland* construído, na fase de operação do sistema, análises do efluente devem ser realizadas com certa constância, a fim de manter controle da eficiência de tratamento, durante toda sua vida útil.

Segundo Dupoldt et al. (2000), é importante monitorar para:

- Gerar dados que melhoram o desempenho do tratamento;
- Identificar problemas;
- Determinar a conformidade com os parâmetros de tratamento exigidos;

5. METODOLOGIA

O presente trabalho, visando um estudo sobre aplicação de *wetlands* construídos em sistemas individuais de tratamento de esgoto, teve como objetivo apresentar um dimensionamento e uma proposta de implantação de um sistema que irá tratar os efluentes sanitários gerados por um empreendimento do ramo de hotelaria.

O local de implantação, para elaboração da proposta, é uma residência localizada na cidade de Curitiba, Paraná. No entanto, a casa está em fase de reforma, adequando seu espaço físico para oferecer o serviço de hospedagem, no formato de albergue, não assistencial.

Segundo a proprietária do local, na idealização do empreendimento, foi realizado um plano de gestão ambiental com foco em direcionar algumas de suas ações ao incentivo de pesquisas científicas, voltadas às tecnologias de melhor uso da água e minimização de impactos ambientais. Sendo assim, o desenvolvimento da proposta de implantação deste sistema de *wetlands* construídos, teve como foco atender as características e demandas do empreendimento, visando alta eficiência no tratamento de seus efluentes sanitários.

5.1. Caracterização do empreendimento e identificação dos efluentes

A caracterização do empreendimento foi feita através de conversas diretas com a proprietária do local, assim como visitas à área de implantação. Destes encontros, foram coletados dados a respeito do futuro empreendimento, a fim de possuir informações suficientes para a caracterização do cenário a que o sistema deverá atender.

A primeira visita ao local foi realizada com o intuito de analisar a viabilidade de implantação do sistema de *wetlands* construídos: foi avaliado qual era a área disponível do local e identificado quais seriam os efluentes destinados ao sistema. A Figura 7, a seguir, mostra o local disponível para a implantação.



Figura 7 – Local disponível para implantação do sistema
Fonte: Autoria própria, 2015.

De acordo com a previsão do empreendimento, na fase de operação, o albergue deverá receber, em momentos de alta temporada, além dos cinco funcionários previstos, o máximo de 40 hóspedes. Os albergues possuem dinâmicas parecidas com as de um hotel convencional, porém em uma escala menor, onde a hospedagem é compartilhada entre as pessoas, que podem usufruir de todo o espaço comum para descansar, trabalhar, dormir, tomar banho, fazer sua higiene pessoal e até mesmo cozinhar e lavar roupas. Muito se assemelha ao cenário de um hotel, no que se refere à geração de efluentes.

A residência onde será implantado o sistema já possui rede coletora de esgoto, na qual são destinados os efluentes da cozinha, lavanderia, e dos banheiros que preexistiam ante a nova intervenção que vem sendo feita. Apesar disso, há interesse, por parte dos idealizadores do empreendimento, no tratamento dos efluentes dos chuveiros, pias e vasos sanitários, gerados nos banheiros do pavimento superior, os quais foram construídos nesta reforma, e que serão de uso

exclusivo dos hóspedes daquele andar. Sendo assim, foi limitado o leito máximo de 25 pessoas (número de contribuintes previstos para o sistema, em alta temporada). A Figura 8 apresenta um croqui com a área disponível para implantação do sistema e a localização da fonte geradora dos efluentes a serem tratados.

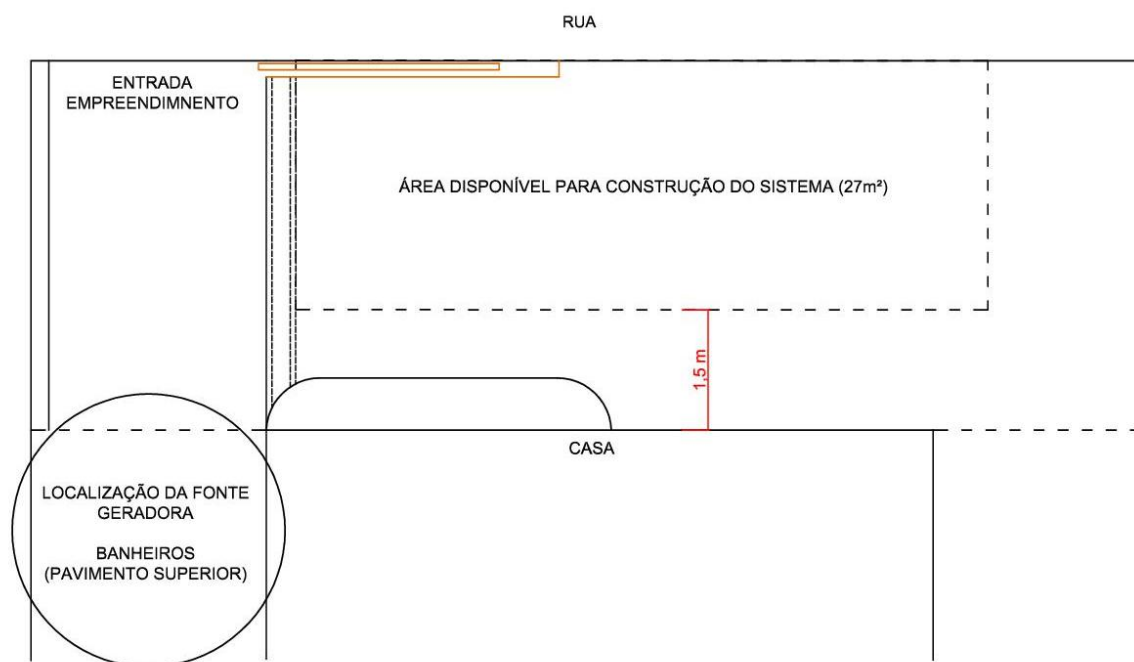


Figura 8 – Croqui da área disponível para implantação do sistema
Fonte: Autoria própria, 2015.

5.2. Estimativas da geração de efluentes

Os efluentes sanitários, que serão destinados ao sistema de tratamento proposto, foram estimados tanto de maneira quantitativa, calculando a vazão gerada pela fonte, quanto de maneira qualitativa, utilizando os parâmetros e características físicas e químicas, para esgoto sanitário, encontrados na literatura (METCALF & EDDY, 2003; SPERLING, 2014).

Para o cálculo da vazão de entrada do sistema, foi considerado o número máximo de contribuintes que utilizarão os novos banheiros do empreendimento, em alta temporada, estimando a vazão máxima prevista. O cálculo da vazão doméstica média de esgoto, dado por Sperling (2014), é:

$$Q_{d\text{méd}} = \frac{Pop \cdot QPC \cdot R}{1000} \quad (9)$$

Em que:

$Qd_{méd}$ = vazão doméstica média de esgoto (m^3/d)

QPC = quota per capita de água (L/hab.d)

Pop = número de contribuintes (hab.)

R = coeficiente de retorno esgoto/água

Foi utilizada tanto a norma técnica NBR 7229 (BRASIL, 1993), como Sperling (2014), para obtenção dos valores de coeficiente de retorno ($R = 80\%$) do consumo local de água, assim como para os valores da quota per capita de água ($QPC = 100$ L/hab.d), valor médio de hotéis, não incluindo lavanderia e cozinha, como indicado na Tabela 2, um vez sendo destinado ao sistema apenas os efluentes dos banheiros. Para Sperling (2014), a faixa de vazão para um estabelecimento comercial do tipo hotel é de 100-200 L/hab.d.

Tabela 2 – Valores médios de contribuição de esgoto

Prédio	Unidade	Contribuição de esgoto (L/dia)
Ocupantes permanentes		
• Residência		
Padrão alto	pessoa	160
Padrão médio	pessoa	130
Padrão Baixo	pessoa	100
• Hotel (exceto lavanderia e cozinha)	pessoa	100
• Alojamento provisório	pessoa	80

Fonte: Adaptado de NBR 7229 (BRASIL, 1993).

De acordo com Sperling (2014), a vazão de efluentes estimada deverá ser encaminhada, antes de entrar no sistema de *wetlands* construídos, para um tratamento primário (tanque séptico), o qual foi dimensionado de acordo com a norma técnica NBR 7229 (BRASIL, 1993), como descrito no próximo item 5.3.

Para as características físico-químicas típicas de esgoto sanitário, usualmente utilizadas em estudos e projetos, foram utilizados valores fornecidos por Sperling (2014), os quais estão listados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Características físico-químicas típicas dos esgotos sanitários

Parâmetro	Concentração
Sólidos totais	1100 mg/L
DBO ₅	300 mg/L
DQO	600 mg/L
Nitrogênio total	45 mgN/L
Fósforo	7 mgP/L
pH	7,0
Alcalinidade	200 mgCaCO ₃ /L

Fonte: Adaptado de SPERLING (2014)

5.3. Dimensionamento do tanque séptico

O sistema de *wetlands* construídos, neste trabalho, atuará como tratamento secundário dos efluentes do tanque séptico, tendo como intenção principal remover matéria orgânica biodegradável, sólidos suspenso, e nutrientes, como nitrogênio e fósforo (METCALF & EDDY, 2003).

Sendo assim, o tanque séptico proposto para o tratamento primário dos efluentes sanitários do empreendimento foi dimensionado de acordo a equação (10), da norma técnica NBR 7229 (BRASIL, 1993), onde constam os valores dos parâmetros subcitados.

$$V = 1000 + N(C \cdot T + K \cdot Lf) \quad (10)$$

Em que:

V = volume útil (L)

N = número de pessoas ou unidades de contribuição

C = contribuição de despejos (L/hab.d)

T = período de detenção (d)

K = taxa de acumulação de lodo digerido (d)

Lf = contribuição de lodo fresco (L/hab.d)

5.4. Definição do meio suporte a ser utilizado no *wetland* construído

Foi feito um levantamento bibliográfico (METCALF & EDDY, 1991; KADLEC & WALLACE, 2009; HOFFMANN et al., 2011; NIVALA et al., 2013; SPERLING, 2014; entre outros) acerca dos diferentes tipos de meio suporte comumente utilizados em *wetlands* construídos. A areia e a pedra brita são os meios filtrantes mais utilizados, e os quais vêm apresentando eficiência satisfatória nos tratamentos empregados. Sendo assim, foram os meios suportes escolhidos para utilização na proposta deste trabalho.

Segundo a NBR 13969 (BRASIL, 1992), parâmetros como a área superficial dos grãos, seu diâmetro efetivo, assim como o coeficiente de uniformidade do meio podem influenciar no dimensionamento de sistemas biológicos que utilizam algum meio filtrante no processo. Para o modelo de dimensionamento de Metcalf e Eddy (1991), a porosidade do meio filtrante e a condutividade hidráulica influenciam diretamente nos estudos hidráulicos dos *wetlands* construídos, sendo determinante, para efeito de cálculos.

Baseado nisso, a partir da definição dos materiais, foi montada uma tabela reunindo alguns dados das características de cada meio. Os dados apurados foram: preço; diâmetro efetivo dos grãos; porosidade do meio filtrante (α); condutividade hidráulica (k_s); e a constante de primeira ordem da temperatura (K_{20}). Os valores estão apresentados na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Características dos meios suportes utilizados em sistemas de *wetlands* construídos

Características	Areia grossa	Brita nº 2
*Preço (R\$/m ³)	80,00	60,00
Diâmetro efetivo (mm)	0,6 - 2	6 - 20
Porosidade, α	0,39	0,51
Condutividade hidráulica, k_s (m ³ /m ² .d)	0,48	0,59
K_{20}	1,35	0,87

Fonte: NBR 13969 (BRASIL, 1997); NBR 6502 (BRASIL, 1995); METCALF & EDDY (1991); ANDRADE (2012);

* Os valores dos preços/m³ foram obtidos através de orçamento realizado junto às empresas do ramo, que atendem a região de Curitiba, PR.

5.5. Definição da vegetação a ser cultivada no *wetland* construído

Para definição da vegetação de cultivo no *wetland*, foi realizado um levantamento na literatura (ALMEIDA et al., 2010; SANTOS et al., 2011; ANDRADE, 2012; MENDONÇA et al., 2012; PAROLIN et al., 2012; FERREIRA et al., 2013; entre outros) acerca das diferentes plantas que já vêm sendo utilizadas como fito-tratadoras de esgoto sanitário.

Foram levantados exemplos de plantas em que os sistemas apresentam eficiência no tratamento de esgoto sanitário e que possuem características de cunho ornamental, além de serem aptas ao cultivo em *wetlands* construídos de fluxo subsuperficial (0,5 a 1,5 m de altura), baseado nos critérios de seleção de Kadlec e Wallace (2009).

Outros critérios de escolhas foram assumidos, sugeridos por Zanella (2014). Entre eles, a tolerância da planta ao ambiente permanentemente saturado, a capacidade de adaptação às condições climáticas do local, resistência, e facilidade de manejo.

Foram escolhidas três espécies de plantas diferentes para a proposta de implantação deste sistema de *wetlands* construídos: *Zantedeschia aethiopica* (copo-de-leite), *Canna x generalis* (cana-índica) e a *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo).

5.6. Definição da hidráulica e dimensionamento do *wetland* construído

O modelo de *wetland* construído, escolhido para elaboração da proposta, é o modelo denominado de *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado (KAICK, 2002), descrito anteriormente no item 4.3.2.2. Este modelo foi escolhido devido às vantagens em que sistemas já implantados apresentam, como a diminuição do potencial de colmatação e melhor mistura da água nos leitos filtrantes (NIVALA et al. 2013), satisfatórias taxas de eficiência no tratamento secundário de efluente de tanque séptico, demonstrados pela literatura (KAICK et al. 2008; FERREIRA et al., 2013), além de maior disponibilidade hídrica e de nutrientes fornecidos às plantas cultivadas em *wetlands* construídos (ANDRADE, 2012).

Segundo Andrade (2012), para o dimensionamento do sistema de *wetlands* construídos com fluxo vertical afogado, leva-se em consideração o volume total demandado pelo tanque, considerando a vazão de entrada no sistema, o tempo de detenção hidráulico, e a porosidade do meio filtrante.

Foi tirada uma média dos valores de porosidade (α) dos meios filtrantes, obtidos por Andrade (2012), sendo estes 0,39 para areia grossa e 0,51 para brita nº 2, apresentados anteriormente na Tabela 4. Assim, levando em consideração o mesmo volume utilizado para os dois meios filtrantes, a porosidade média do meio suporte do tanque é de 0,45.

Na equação (11), obtida de Metcalf e Eddy (1991), o tempo de detenção hidráulico (t'), para sistemas de *wetlands* construídos, é definido como o tempo de detenção teórico, baseado na porosidade do meio suporte.

$$t' = \frac{LW\alpha d}{Q} \quad (11)$$

Em que:

t' = tempo de detenção teórico (d)

L = comprimento do *wetland* (m)

W = largura do *wetland* (m)

Q = vazão do efluente (m³/d)

α = porosidade do meio suporte

d = profundidade do *wetland* (m)

A equação (11) foi adaptada, a fim de atender os parâmetros necessários para o dimensionamento de *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado, considerando o volume mínimo demandado para o tempo de detenção hidráulico a ser utilizado.

5.7. Proposta de implantação do *wetland* construído

Com o dimensionamento do sistema definido, foram elaborados os croquis para a proposta de implantação do sistema de tratamento de esgoto, utilizando o software de computador AutoCAD 2014. Nos desenhos são apresentadas as dimensões, do tanque séptico e do *wetland* construído, as tubulações necessárias, e a distribuição do meio suporte.

A densidade da vegetação foi calculada se baseando na metodologia de Schulz (2009). A distribuição das mudas no *wetland* construído se dá com 0,50 m de distanciamento, tanto lateral como longitudinalmente, de modo que haja espaço para o aumento da biomassa e formação de biofilme radicular para o tratamento.

De acordo com as normas técnicas NBR 7229 (BRASIL, 1993), e NBR 13969, é possível utilizar diferentes materiais para construir o tanque séptico e demais unidades de tratamento complementar, de modo a manter o ambiente impermeável, sendo eles: alvenaria de tijolo; concreto armado; e plástico ou fibra de vidro de alta resistência. Para a proposta do presente trabalho, foi optado pela construção de alvenaria com intenção de diminuir custos. Há também a possibilidade de utilizar lonas ou mantas impermeabilizantes, nos *wetlands* construídos, o que pode baratear o custo de implantação, segundo Kaick (2002).

Foi realizada uma pesquisa quanto aos materiais de construção e seus custos para elaborar um orçamento prévio da implantação do sistema. A estimativa dos materiais necessários foi realizada pela empreiteira que está trabalhando na reforma do empreendimento, a qual já vem ocorrendo há um tempo. A empreiteira também forneceu os valores previstos para mão de obra a ser contratada. Foram feitos três orçamentos, em diferentes lojas especializadas no ramo, localizadas na cidade de Curitiba, Paraná. Na Tabela 5, a seguir, encontra-se a estimativa dos materiais necessários para construção do sistema, seus preços unitários, com base no menor valor apresentado pelos orçamentos, o valor da mão de obra, assim como o valor final estimado para a implantação do sistema.

Tabela 5 – Orçamento previsto para implantação de sistema individual de tratamento primário e secundário de esgoto sanitário, para 25 pessoas, com consumo diário de 100L/hab.dia

<i>Materiais (tanque séptico/wetland construído)</i>	<i>Unidade</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Preço</i>	<i>Custo</i>
Areia média	m ³	2	R\$ 83,80	R\$ 167,60
Brita nº 1	m ³	1	R\$ 63,00	R\$ 63,00
Cimento	saco 50 kg	17	R\$ 25,45	R\$ 432,65
Cal	saco 20 kg	15	R\$ 5,85	R\$ 87,75
Tijolo	unidade	2200	R\$ 0,17	R\$ 374,00
Tubo PVC esgoto 100 mm (6 m)	unidade	6	R\$ 61,59	R\$ 369,54
Curva longa esgoto 90° 100 mm	unidade	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Cruzeta PVC esgoto 100 mm	unidade	1	R\$ 19,00	R\$ 19,00
T esgoto 100 mm	unidade	7	R\$ 11,48	R\$ 80,36
Joelho esgoto 90° 100 mm	unidade	5	R\$ 6,08	R\$ 30,40
Joelho esgoto 45° 100 mm	unidade	2	R\$ 6,08	R\$ 12,16
Terminal de ventilação 100 mm	unidade	4	R\$ 6,96	R\$ 27,84
Brita nº 2 (meio filtrante)	m ³	7,5	R\$ 60,00	R\$ 450,00
Areia grossa (meio filtrante)	m ³	6,5	R\$ 80,00	R\$ 370,00
Vegetação	unidade	40	R\$ 20,00	R\$ 800,00
SUBTOTAL				R\$ 3.314,3
<i>Implantação</i>	<i>Unidade</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Preço</i>	<i>Custo</i>
Aluguel escavadeira (transporte, operador e combustível)	diária	1	R\$ 750,00	R\$ 750,00
Mão de obra (construção alvenaria)	unidade	1	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00
Caçamba entulho	unidade	4	R\$ 150,00	R\$ 600,00
Frete materiais	unidade	2	R\$ 25,00	R\$ 50,00
SUBTOTAL				R\$ 4.900,00
TOTAL				R\$ 8.214,3

Fonte: Autoria própria, 2015.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Características estimadas do esgoto sanitário do empreendimento

Para o máximo de 25 hóspedes, considerando um cenário de alta temporada, uma contribuição per capita de 100 L/hab.d, valor médio de hotéis, não incluindo lavanderia e cozinha, segundo NBR 7229 (BRASIL, 1993), e taxa de retorno de 80%, é prevista a vazão média diária ($Q_{d\text{méd}}$) de 2 m³/d, a qual foi obtida pela equação (9) de Sperling (2014), como descrita anteriormente no item 5.2.

$$Q_{d\text{méd}} = \frac{Pop \cdot QPC \cdot R}{1000}$$

$$Q_{d\text{méd}} = \frac{25 \text{ hab} \cdot 100 \text{ L/hab.d} \cdot 0,8}{1000}$$

$$Q_{d\text{méd}} = 2 \text{ m}^3/\text{d}$$

Esta vazão deverá passar por um tratamento primário (tanque séptico) e em seguida ser destinada ao sistema de *wetland* construído, como tratamento secundário (SPERLING, 2014).

A concentração de DBO, para esgoto doméstico bruto, é de 300 mg/L, valor típico empregado no Brasil e sugerido por von Sperling (2014). Levando em consideração a remoção de 30% de DBO, no tratamento primário (tanque séptico) (JORDÃO & PESSOA, 2009), estima-se a concentração de 210 mg/L a ser reduzida no tratamento secundário, empregado no sistema de *wetland* construído, até o grau desejado e aceito pelas Resoluções nº 357 (BRASIL, 2005) e nº 430 (BRASIL, 2011), do CONAMA. Philippi et al. (2007) encontrou, para situação semelhante, limites de efluentes de tanque séptico variando em 148-338 mg/L de DBO, 299-595 mg/L de DQO e 72-94 mg/L de sólidos suspensos.

6.2. Dimensionamento do tanque séptico para o tratamento primário

Para os cálculos de dimensionamento do tanque séptico, utilizou-se dos valores tabelados pela norma técnica NBR 7229 (BRASIL, 1993), os quais foram reunidos na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 – Valores assumidos para os parâmetros de dimensionamento do tanque séptico

Parâmetro	Valor assumido
Número de pessoas de contribuição.	N = 25 hab.
Contribuição diária de despejos por tipo de prédio e ocupante (hotéis, não incluindo lavanderia e cozinha).	C = 100 L/hab.d
Período de detenção dos despejos, por faixa de contribuição diária.	T = 0,92 d
Taxa de acumulação total de lodo digerido, em dias, por intervalo entre limpezas e temperatura do mês mais frio ($10^{\circ}\text{C} \leq t \leq 20^{\circ}\text{C}$).	K = 65
Contribuição diária de lodo fresco por tipo de prédio e de ocupante.	Lf = 1 (L/hab.d)

Fonte: Adaptado de NBR 7229 (BRASIL, 1993).

Com estes parâmetros, foi calculado, através da equação (10) o volume útil o qual o tanque séptico deve possuir:

$$V = 1000 + N(C \cdot T + K \cdot Lf)$$

$$V = 1000 + 25 \text{ hab} (100 \text{ L/hab.d} \cdot 0,92 \text{ d} + 65 \cdot 1 \text{ L/hab.d})$$

$$V = 4.925 \text{ L}$$

Para este volume útil, foi assumido o valor de 5 m^3 , assim facilitando o dimensionamento e a construção do tanque séptico. As distâncias mínimas referentes à localização do tanque séptico em relação a construções, assim como a profundidade mínima do tanque, foram respeitadas de acordo com a norma técnica NBR 7229 (BRASIL, 1993). Sendo assim, tem-se:

$$\text{Comprimento} = 2,4 \text{ m}$$

$$\text{Largura} = 1,2 \text{ m}$$

$$\text{Profundidade útil} = 1,75 \text{ m}$$

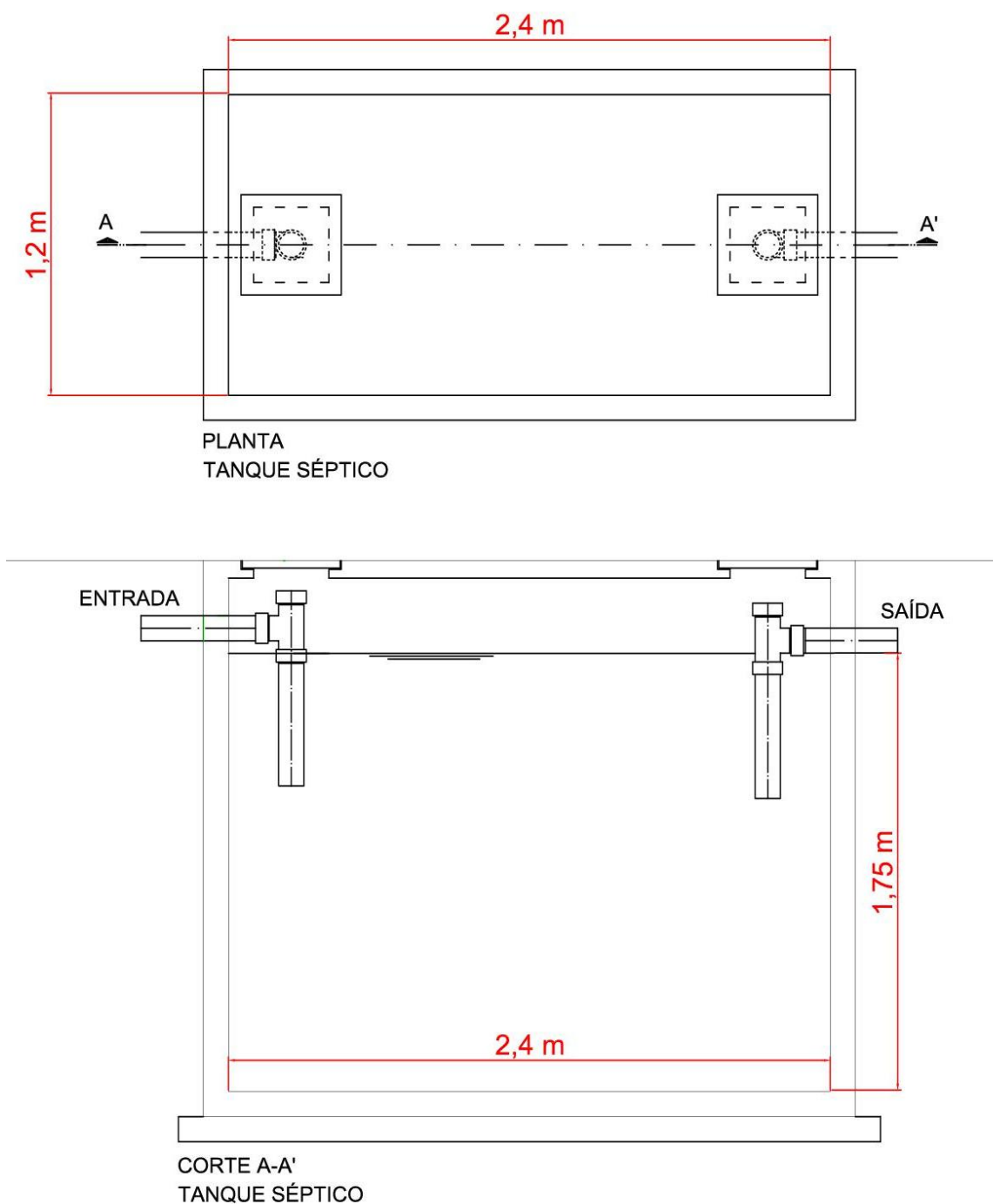


Figura 9 – Croqui do tanque séptico proposto como tratamento primário
 Fonte: Autoria própria (2015).

6.3. Meio suporte e vegetação escolhidos para o sistema de *wetlands*

Os meios filtrantes utilizados para elaboração desta proposta de implantação do sistema de *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado são a areia grossa e a brita nº 2. Considerando o volume total do meio suporte composto por 30% de areia

grossa, com porosidade de 0,31, e 70% de brita nº 2, com porosidade igual a 0,51, foi adotada a porosidade média (α) de 0,47, adaptado de Andrade (2012), utilizado no dimensionamento do sistema proposto.

A vegetação escolhida para a proposta, a fim de atuar com cunho paisagístico e ornamental, além do tratamento de efluente, será distribuída no tanque, compondo um cultivo em associação de três tipos de espécies diferentes: *Zantedeschia aethiopica* (copo-de-leite); *Canna x generalis* (cana-índica); e a *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo). As escolhas foram feitas com base nos critérios de seleção mencionados no item 5.5.

Dentre elas, a *Zantedeschia aethiopica* (Figura 10) é uma herbácea florífera, originária de lugares muito úmidos da África, podendo chegar até 1 m de altura, com rizomas vigorosos. A espécie pode ser cultivada a pleno sol ou a meia sombra, e é tolerante a baixas temperaturas. Devido sua altura, é ótima para as margens dos *wetlands* (LORENZI, 2001).

Santos *et al.* (2011) constatou, com o uso da *Zantedeschia aethiopica*, para tratamento de esgoto proveniente de tanque séptico, redução de carga orgânica, nutrientes e microrganismos patogênicos: DBO (87%), DQO (99%), coliformes fecais e totais (46%), nitrogênio amoniacal (40%), nitrogênio total Kjeldhal (8%), e redução significativa de fósforo, além de ausência de toxicidade.



Figura 10 – *Zantedeschia aethiopica* (copo-de-leite)
Fonte: ESTANQUES, 2014.

Para Lorenzi (2001), a *Canna x generalis* (Figura 11) vem do grande grupo de herbáceas híbridas, rizomatosas e perenes. São plantas de 0,3 a 1,5 m de altura, de folhagem verde e rajada. São muito floríferas, próprias para formação de maciços coloridos a pleno sol. Não toleram geadas, podendo apresentar má aparência durante o inverno. Esta espécie possibilita a formação de um maciço vegetal denso, de visual agradável e floração intensa de ocorrência em praticamente todas as épocas do ano, seu crescimento não é agressivo o que permite o plantio com outras mudas (ZANELLA, 2008).

Em trabalhos publicados, Parolin *et al.* (2012) obteve eficiência média de remoção, para tratamento de esgoto sanitário, de 83% para turbidez, 87,4% para DQO, 84,3% para DBO e 77,5% para fósforo, em sistema de *wetlands* construídos de fluxo vertical, cultivado com *Canna x generalis*.



Figura 11 – *Canna x generalis* (cana-índica)
Fonte: FLOWERS CANADA, 2015.

A última planta a ser ornamentada no sistema de *wetlands* é a *Hedychium coronarium* (Figura 12), é uma herbácea rizomatosa, florífera, ereta, perene e aromática, originária da Ásia tropical e naturalizada nas Américas. Possui alturas variando de 1,5 a 2 m, sendo bem ornamentada ao centro do tanque. É uma planta subespontânea de lugares brejosos a pleno sol que também não tolera geada (LORENZI, 2001).

Almeida et al. (2010) avaliou as eficiências percentuais de um sistema de *wetlands* construídos, cultivados com *Hedychium coronarium* com um TDH de 2,7 dias, tratando esgoto sanitário precedido de tanque séptico, e constatou redução de DBO (90,7%), de DQO (81,1%) e dos Coliformes Termotolerantes (99,99998%), após quatro meses de aplicação de esgoto.



Figura 12 – *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo)
Fonte: BETA FLORES, 2015.

6.4. Hidráulica e dimensionamento do sistema de *wetlands* construídos

De maneira geral, os parâmetros utilizados para o dimensionamento de *wetlands* construídos baseiam-se na área requerida, profundidade do tanque, tempo de detenção hidráulico, vazão média do efluente e as concentrações de DBO.

Modelos oriundos da cinética de primeira ordem, em termos de matéria orgânica carbonácea, os quais são aplicáveis aos reatores tipo pistão, são os mais amplamente utilizados para prever a área superficial necessária para o tratamento secundário de águas residuárias ou de baixa carga orgânica. Estes modelos, onde a taxa de remoção da DBO é diretamente proporcional a sua concentração no meio, vêm sendo utilizados para o dimensionamento de *wetlands* construídos de fluxo subsuperficial horizontal (METCALF & EDDY, 1991; PHILIPPI e SEZERINO, 2004).

Porém, neste trabalho foi realizado um estudo de uma proposta de tratamento de esgoto, utilizando o sistema de *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado, para o tratamento de efluente de tanque séptico. Deste modo, foi realizada uma busca, na literatura, por parâmetros que direcionam o estudo do comportamento hidráulico deste modelo de *wetlands*.

Andrade (2012) constatou em estudo uma melhor adaptação das plantas cultivadas em *wetlands* de fluxo vertical afogado, devido à maior disponibilidade de água e de nutrientes necessários para o metabolismo das plantas, não acarretando no estresse provocado pela falta de água. Isto se dá pelo fato do efluente permanecer por mais tempo dentro do tanque, se comparado àqueles modelos de fluxo livre. Para Nivala et al. (2013), o fato destes sistemas apresentarem melhor mistura da água nos leitos filtrantes, se assemelhando aos processos naturais de *wetlands*, tendem a potencializar a eficiência do tratamento de efluentes que apresentam diferentes vazões ao longo de um período.

A dinâmica dos albergues, que possuem habitantes transitórios na maior parte do ano, variando em épocas de baixas e altas temporadas, exige um sistema que seja flexível às diferenças de vazões, variando apenas seu tempo de detenção hidráulica (TDH). Andrade (2012) obteve um valor de TDH de 3 dias, para taxas satisfatórias de eficiência no tratamento de esgoto sanitário, em sistema de *wetland* construído de fluxo vertical afogado. Deste modo, foi estipulado o valor mínimo de 3 dias para a detenção hidráulica do efluente, na pior situação possível, onde a vazão diária do efluente será máxima (2 m³/d). No período de menor contribuição diária, o sistema deverá operar com um TDH maior, tendendo a aumentar a eficiência do tratamento.

O volume mínimo demandado para *wetlands* construídos de fluxo vertical afogado é obtido pela equação (11), adaptada de Metcalf e Eddy (1991), e confirmada em Andrade (2012). A equação considera o volume mínimo demandado para o tempo de detenção hidráulica teórico a ser utilizado.

$$V = \frac{TDH \cdot Q}{\alpha} \quad (11)$$

Em que

V = volume mínimo demandado (m^3)

TDH = tempo de detenção hidráulico teórico (d)

Q = vazão média diária de esgoto (m^3/d)

α = porosidade do meio suporte

Considerando, então, um tempo de detenção hidráulico teórico (TDH) de 3 dias, vazão média diária (Q) de $2 m^3/d$, e porosidade do meio suporte (α) de 0,47, temos que o volume demandado para o tratamento é de $12,77 m^3$, em período de alta temporada, como descrito no cálculo a seguir:

$$V = \frac{TDH \cdot Q}{\alpha}$$

$$V = \frac{3 d \cdot 2 m^3/d}{0,47}$$

$$V = 12,76595745 m^3$$

Adotando-se 1 m de altura de saturação, e levando em consideração a área disponível para implantação, o *wetland* construído de fluxo vertical afogado proposto deverá possuir as seguintes dimensões internas: 2,5 m de largura, por 5 m de comprimento. Sendo assim, o volume real do *wetland* é de $12,5 m^3$, reduzindo, portanto, o tempo de detenção hidráulico teórico (TDH) para 2,93 dias.

A área do tanque projetado, portanto, possui $12,5 m^2$. Sendo assim, a taxa de carga hidráulica, fornecida ao sistema será de (KADLEC & WALLACE, 2009):

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

$$q = \frac{2}{12,5}$$

$$q = 0,16 m/d$$

Segundo Hoffmann et al. (2013), a carga hidráulica para estes sistemas de fluxo vertical, em climas frios, não deve ser superior a 100-120 mm/d. Porém, o autor salienta haver casos, em climas quentes, que mostram taxas de até 200 mm/d, de águas residuais pré-tratadas, podendo ser aplicadas sem influências negativas.

Wallace e Knight (2006) relacionam a taxa de carga orgânica (gDBO/m².d) aplicada à área de entrada do sistema com o fenômeno de colmatção. Para o *wetland* proposto, o fato da área superficial, de 12,5 m², ser maior que as áreas de secção dos sistemas de fluxo horizontal, o efluente será distribuído de maneira mais uniforme por todo o leito filtrante, apresentando um grande potencial de minimização da colmatção (NIVALA et al., 2013).

6.5. Proposta de implantação do sistema de tratamento de esgoto sanitário

A proposta do sistema de tratamento de esgoto sanitário (Figura 13) conta com um tanque séptico, como tratamento primário dos efluentes gerados pelos banheiros do empreendimento, e em seguida o sistema de *wetland* construído de fluxo vertical afogado.

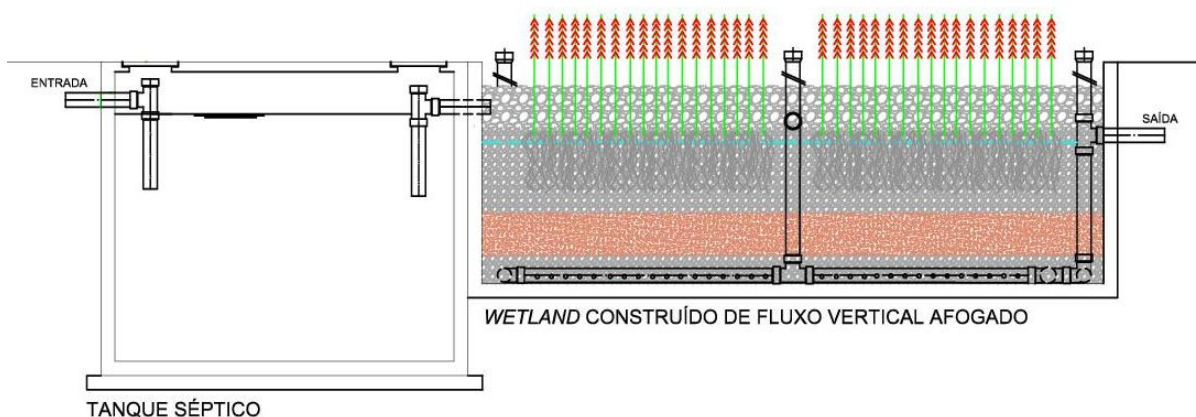


Figura 13 – Proposta do sistema de tratamento de esgoto (tratamento primário e secundário)
Fonte: Aatoria própria, 2015.

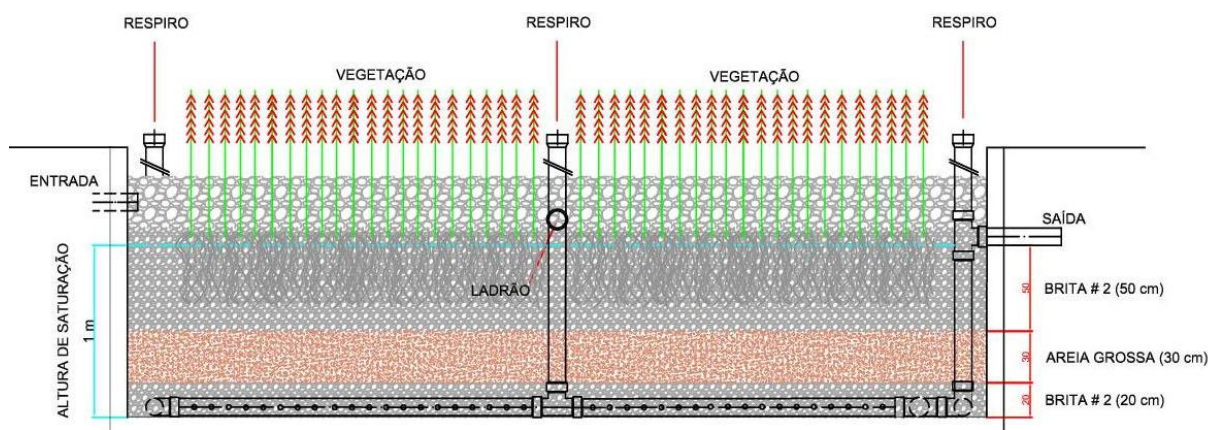


Figura 14 – Croqui do *wetland* construído de fluxo vertical afogado
Fonte: Autoria própria, 2015.

O meio suporte do *wetland* deve ser dividido em diferentes volumes, sendo distribuídos em alturas distintas, com base em Kaick (2002) e Hoffmann et al. (2013). Observa-se na Figura 14, que os primeiros centímetros de brita são para manter o esgoto em tratamento submerso no meio suporte, podendo ser utilizados britas de maior granulometria. Em seguida, nos próximos 50 cm de brita, onde inicia o processo de filtração, a vegetação deve ser plantada, proporcionando a zona de raízes atuante no tratamento. O próximo leito filtrante constitui-se de uma camada de 30 cm de areia grossa e mais 20 cm de brita, para drenagem da tubulação de saída do *wetland* construído, assim completando a altura de 1 m de saturação.

Tal distribuição dos meios filtrantes é atribuída por Kaick (2002), e vem sendo reproduzida em diversos estudos deste modelo de *wetland*, os quais, até hoje, não apresentaram problemas de colmatação, e possuem médias para remoção de DBO entre 77% e 98% de eficiência, entre 70% e 99% de remoção de coliforme total (KAICK et al., 2008), e remoção de nutrientes, Nitrogênio e Fósforo, com máximas de 89% de N amoniacal, 93,3% de N total e 99,6% de Fósforo (FERREIRA et al., 2013).

Olijnyk (2008) cita estudos da literatura em que sistemas compostos por meio suporte de menor granulometria (0,06-4mm) apresentaram um melhor desempenho em termos de nitrificação, devido a menor velocidade do efluente no maciço filtrante e, conseqüentemente, maior tempo de contato do efluente com os microrganismos. Elementos que corroboram com o uso dos 30 cm de areia como meio filtrante na

presente proposta de implantação de *wetlands* de fluxo vertical, os quais também são sugeridos por Hoffmann et al. (2013).

De qualquer modo, Kaiser e Kunst (2005) destacam que em grande parte dos casos estudados na Europa a nitrificação é completada após os primeiros 0,05 m de profundidade nos filtros de fluxo vertical. Para Felde e Kunst (1997) a remoção de DQO e a conversão de $\text{NH}_4\text{-N}$ ocorreram simultaneamente na parte superior do tanque (até os 25 cm). Já Meuleman et al. (2003) observaram remoções de nitrogênio total somente em até 30 cm do leito.

A tubulação do sistema é composta por tubos de esgoto (PVC 100 mm), tanto na entrada como na saída, sendo que esta se encontra 20 cm abaixo da entrada. A captação do efluente tratado é realizada no fundo do tanque, onde se encontra a tubulação de drenagem, como é mostrado na Figura 15.

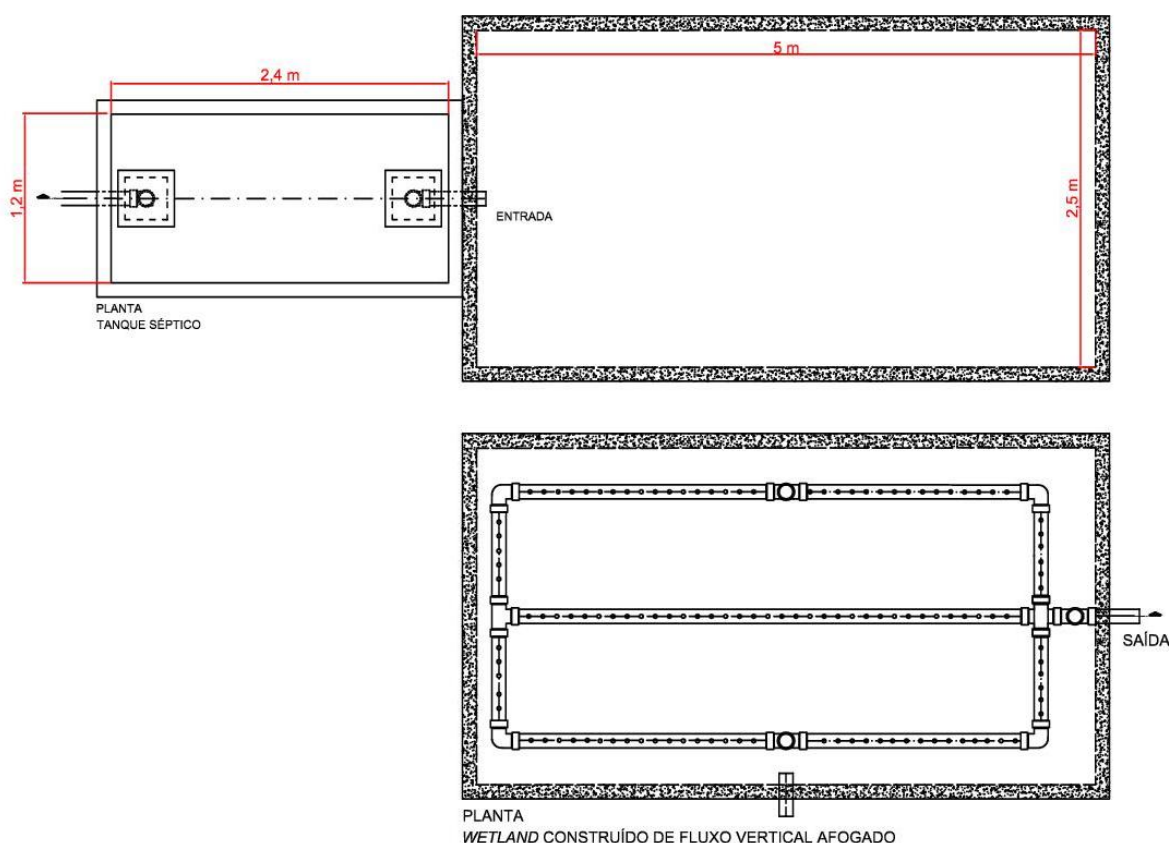


Figura 15 – Croqui do sistema de tratamento de esgoto proposto (Planta Baixa)
Fonte: Autoria própria (2015).

Segundo Dupoldt et al. (2000), as chuvas fortes aumentam rapidamente o fluxo do sistema e diminuem o tempo de detenção hidráulico do efluente, além de aumentarem a quantidade de materiais em suspensão. Alterações nessas características tendem a diminuir a eficiência do tratamento, sendo, portanto, necessário o controle da profundidade da água. Na proposta foi incluso, além de quatro pontos de respiração nas suas tubulações, para aeração passiva do sistema, um ladrão para situações de chuvas em que podem alterar a dinâmica do sistema.

A Figura 16, a seguir, aloca o sistema de tratamento de esgoto por *wetlands* construídos na área disponível para implantação. O local escolhido para a implantação da proposta é a parte frontal do empreendimento, área com boa quantidade de sol durante o dia e bloqueado de ventos fortes, potencializando o sucesso previsto para implantação.

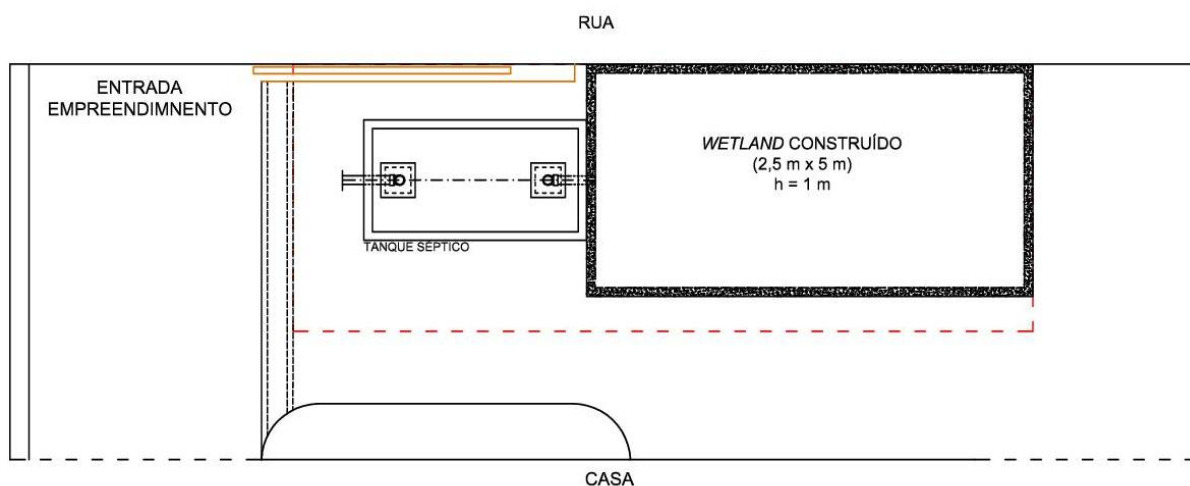


Figura 16 – Croqui do sistema de tratamento de esgoto proposto (Implantação)
Fonte: Autoria própria (2015).

7. CONCLUSÃO

A partir da caracterização do cenário, para o qual foi proposto o sistema de tratamento de esgoto por *wetlands* construídos, identificou-se as vantagens que o modelo de fluxo vertical afogado possui, quando comparado aos demais modelos. O fato de o sistema permanecer sempre alagado proporciona melhor mistura da água nos leitos filtrantes e maior disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, o que potencializa a eficiência do tratamento e muito se assemelha com os processos das *wetlands* naturais.

O modelo de sistema proposto apresentou-se como a melhor escolha para atender a situação específica estudada, onde as vazões de entrada variam ao longo de grandes períodos. O cálculo da vazão foi adequado ao número de hóspedes que contribuirão a geração de esgoto no local, levando em consideração a vazão máxima de água, em épocas de alta temporada. Nesses períodos, o sistema deverá operar com um tempo de detenção hidráulico mínimo de 2,93 dias. Para o modelo de dimensionamento proposto, é de extrema importância ter conhecimento da porosidade do meio suporte, garantindo as dimensões mínimas de boa operação.

O meio suporte escolhido para o processo de filtração do sistema é composto por camadas de brita nº 2 e areia grossa, onde serão cultivadas plantas das espécies *Zantedeschia aethiopica* (copo-de-leite), *Canna x generalis* (cana-índica), e a *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo).

A proposta deste trabalho apresentou um valor estimado de R\$ 8.214,30, para implantação de um sistema de tratamento de esgoto sanitário, para 25 pessoas. Uma vez que esse valor pode se distribuir em pelo menos cinco famílias (compostas por cinco pessoas), assegura-se a atribuição da tecnologia de baixo custo, sendo de grande potencial ao tratamento coletivo de pequeno porte, ou de empreendimentos semelhantes ao cenário descrito neste trabalho, como pousadas, escolas e condomínios residenciais.

Os sistemas de *wetlands* construídos, além de se portarem como tecnologias sociais e ambientais de tratamento de esgoto, atuam como jardins ecológicos, tendendo a valorizar o ambiente onde ele é proposto. A relação estética e funcional

destes sistemas garante seu potencial de aplicação na sociedade, e principalmente nas situações de falta da rede coletora de esgoto.

Acredita-se que o sistema de tratamento de esgoto do empreendimento atuará como ferramenta de educação ambiental, ampliando o diálogo social sobre a cultura da sustentabilidade nas empresas e proporcionando uma abertura significativa à pesquisa científica na área de tratamento de efluentes por *wetlands* construídos, uma vez que o sistema será passível de monitoramento e o empreendimento incentivador da tecnologia.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1992.

ALMEIDA, Rogério de A.; PITALUGA, Douglas P. da S.; REIS, Ricardo P. A. **Tratamento de esgoto doméstico por zona de raízes precedida de tanque séptico**. Revista Biociências, UNITAU. Taubaté, v. 16, n. 1. 2010.

ANDRADE, Helisson Henrique Borsato de. **Avaliação do Desempenho de Sistemas de Zona de Raízes (Wetlands Construídas) em Escala Piloto Aplicados ao Tratamento de Efluente Sintético**. 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UTFPR, Curitiba, 2012.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Water Works Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation. 20. ed. Washington D.C., 1998.

BETA FLORES. **Hedychium coronarium**. 2015. Fotografia. Disponível em: <<http://betaflores.blogspot.com.br/2013/05/plantas-aquaticas.html>> Acesso em: junho/2015.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2011.

DUPOLDT, Carl; EDWARDS, Robert; GARBER, Lamonte; ISAACS, Barry; LAPP, Jeffrey; MURPHY, Timothy; RIDER, Glenn; SAYERS, Melanie; TAKITA, Charles. **A Handbook of Constructed Wetland: a guide to creating wetlands for Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region**. Vol. 1. USA, 2000.

ESTANQUES. **Zantedeschia aethiopica**. 2014. Fotografia. Disponível em: <<http://www.estanques.net/plantas-acuaticas/zantedeschia-aethiopica-la-cala/>> Acesso em: junho/2015.

FELDE, Katrin von; KUNST, Sabine. **N- and COD- removal in vertical-flow systems.** *Wat. Sci. Tech.*, v. 35, n. 5, p. 79-85, 1997.

FERREIRA, Sheila C. da R.; BORBA, Aliny L. B.; ANDRADE, Helisson H. B.; KAICK, Tamara S. van. **Levantamento de pesquisas desenvolvidas com wetlands subsuperficial de fluxo vertical no Brasil para verificar as possibilidades de padronização do sistema.** In: Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de *Wetlands* Construídos no Tratamento de Águas Residuárias, 1, 2013, Florianópolis. Anais. Florianópolis: UFSC, 2013.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento.** 3. ed. Brasília: Funasa, 2004.

FLOWERS CANADA. **Canna X generalis.** 2015. Fotografia. Disponível em: <<http://www.po.flowerscanadagrowers.com/our-products/2043/canna/x-generalis>>. Acesso em: junho/2015.

HOFFMANN, Heike; PLATZER, Christoph; WINKER, Martina; MUENCH, Elisabeth von. **Technology review of constructed wetlands: Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment.** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Sustainable sanitation - ecosan program. Germany, 2011.

JORDÃO, Eduardo P.; PESSOA, Constantino A.. **Tratamento de esgotos domésticos.** 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2009.

KADLEC, Robert H.; WALLACE, Scott. **Treatment wetlands.** 2. ed. USA, 2009.

KAICK, Tamara S. van. **Estação de tratamento de esgoto por meio de zona de raízes: Uma proposta de tecnologia apropriada para saneamento básico no litoral do Paraná.** 2002. 116f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2002.

KAICK, Tamara S. van; MACEDO, Carolina; PRESZNHUK, Rosélis. **Jardim ecológico - Tratamento de esgoto por zona de raízes: Análise e comparação da eficiência de uma tecnologia de saneamento apropriada e sustentável.** In: Semana de Estudos da Engenharia Ambiental, 6., Irati, 2008.

KAYSER, Katrin; KUNST, Sabine. **Processes in vertical-flow reed beds: nitrification, oxygen transfer and soil clogging.** *Wat. Sci. Tech.*, v. 51, n. 9, p. 177-184, 2005.

KNOWLES, Paul; DOTRO, Gabriela; NIVALA, Jaime; GARCÍA, Joan. **Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: occurrence and contributing factors.** *Ecological Engineering*, v. 37, p. 99-112, 2011.

KONNERUP, Dennis; KOOTTATEP, Thammarat; BRIX, Hans. **Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia.** *Ecological Engineering*, 2009.

KUMAR, J.L.G; ZHAO, Y.Q. **A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands.** Journal of Environmental Management 92. Dublin, Irlanda. 2011.

LORENZI, Harri. **Plantas ornamentais no Brasil.** Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2001.

MASSOUD, Mary A.; TARHINI, Akram; NASR, Joumana A. **Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries.** Journal of Environmental Management, v. 90, n. 1, 2009.

MENDONÇA, Henrique V.; RIBEIRO, Celso B. M.; BORGES, Alisson C.; BASTOS, Ronaldo R. **Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas.** Ambi-Agua, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 75-87, 2012.

METCALF & EDDY, INC. **WASTEWATER engineering:** treatment, disposal, and reuse. 3. ed. New York, NJ: McGraw-Hill, 1991.

METCALF & EDDY, INC. **Wastewater engineering:** treatment and reuse. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

MEULEMAN, Arthur F. M.; LOGTESTIJN, Richard van; RIJS, Gerard B. J.; VERHOEVEN, Jos T. A. **Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment.** Ecological Engineering, v. 20, n. 1, p. 31- 44, Mar. 2003.

MITSCH, William J.; GOSSSELINK, James G. **Wetlands.** 3. ed. New York, US: J. Wiley, 2000.

NIVALA, Jaime; KNOWLES, Paul; DOTRO, Gabriela; GARCÍA, Joan; WALLACE, Scott. **Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: measurement, modeling and management.** Water Research, v. 46, p. 1625-1640, 2012.

NIVALA, Jaime; HEADLEY, Tom; WALLACE, Scott; BERNHARD, Katy; BRIX, Hans; AFFERDEN, Von Manfred; MÜLLER, Roland Arno. **Comparative analysis of constructed wetlands: The design and construction of the ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany.** Ecological Engineering, 2013.

OLIJNYK, Débora Parcias. **Avaliação da nitrificação e desnitrificação de esgoto doméstico empregando filtros plantados com macrófitas (wetlands) de fluxos vertical e horizontal – sistemas híbridos.** 2008. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

ONU. **Perspectivas da Urbanização Mundial.** Departamento dos Assuntos Econômicos e Sociais (DESA). 2014.

PAROLIN, Mauro, CRISPIM, Jefferson de Q., KAICK, Tamara S. van. **Tratamento de esgoto por zona de raízes: análise e eficiência**. Rev. GEOMAE, Campo Mourão, PR v.3-n.1 p.45 – 57, 2012.

PHILIPPI, Luiz S.; SEZERINO, Pablo H. **Aplicação de Sistemas tipo Wetlands no tratamento de Águas Residuárias: Utilização de filtros plantados com macrófitas**. Florianópolis, SC: Ed. Do Autor, 2004.

PHILIPPI, Luiz S.; SEZERINO Pablo H.; OLJNIK, Débora P.; KOSSATZ, Bruno. **Eficácia dos sistemas de tratamento doméstico e de água para consumo humano utilizando *wetlands* considerando períodos diferentes de instalação e diferentes substratos e plantas utilizadas**. Relatório de pesquisa do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

PMCGS – Prefeitura Municipal de Campina Grande do Sul. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. 2013. Arquivos eletrônicos (on-line). Disponível em <<http://www.pmccgs.pr.gov.br/>>. Acesso em: janeiro de 2015.

SAMUEL, Paulo R. da S. **Alternativas Sustentáveis de Tratamento de Esgotos Sanitários Urbanos, Através de Sistemas Descentralizados, para Municípios de Pequeno Porte**. 2011. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANTOS, Maria de Lourdes Florêncio dos. **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB). Rio de Janeiro: ABES, 2006.

SANTOS, Roberto J. dos; FORTES NETO, Paulo; BATISTA, Getulio T. **Tratamento de efluentes por leito cultivado: Sistema para pequenas comunidades**. Repositório Eletrônico Ciências Agrárias, Coleção Ciências Ambientais, 2011.

SCHULZ, Guilherme. **Sistema de Tratamento de Efluentes com Plantas Aquáticas Emergentes (PAE) para o Processo de Parboilização de Arroz**. 2009. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2009.

SEZERINO, Pablo Heleno; SANTOS, Mayara Oliveira dos; PELISSARI, Catiane; CELIS, Giovana Sánchez; PHILIPPI, Luiz Sérgio. **Wetlands construídos horizontais aplicados no tratamento descentralizado de esgoto**. In: Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos. 2, 2015, Curitiba. Anais. Curitiba: UTFPR, 2015.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto – 2013**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=105>>. Acesso em: junho, 2014.

SPERLING, Marcos von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

TUNDISI, José G.; TUNDISI, Takako M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

WALLACE, Scott D.; KNIGHT, Richard L. **Small-scale constructed wetland treatment systems: Feasibility, Design criteria, and O&M requirements**. Water Environment Research Foundation (WERF): Alexandria, Virginia. 2006.

ZANELLA, Luciano. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: Wetlands Construídos utilizando brita e bambu como suporte**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2008.

ZANELLA, Luciano. **Vegetação em sistemas de wetlands construídos - Muitas opções, mesmas escolhas**. Boletim Wetlands Brasil, Florianópolis, n. 2. dez. 2014.