GESAD
ENS - UFSC
GRUPO DE ESTUDOS EM SANEAMENTO DESCENTRALIZADO

FUNASA

WETLANDS CONSTRUÍDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção

PABLO HELENO SEZERINO
BENNY ZUSE ROUSSO
CATIANE PELISSARI
MAYARA OLIVEIRA DOS SANTOS
MONIQUE NUNES FREITAS
VICTOR YBARZO FECHINE
ANA MARIA BEIMS LOPES

WETLANDS CONSTRUÍDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção

GESAD
ENS - UFSC
GRUPO DE ESTUDOS EM SANEAMENTO DESCENTRALIZADO

FUNASA

WETLANDS CONSTRUÍDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção

PABLO HELENO SEZERINO

BENNY ZUSE ROUSSO

CATIANE PELISSARI

MAYARA OLIVEIRA DOS SANTOS

MONIQUE NUNES FREITAS

VICTOR YBARZO FECHINE

ANA MARIA BEIMS LOPES

GESAD

ENS - UFSC

GRUPO DE ESTUDOS EM SANEAMENTO DESCENTRALIZADO

Copiart

Tubarão-SC, 2018

2018. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.

2018. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.
Essa obra é disponibilizada nos termos da Licença Creative Commons – Atribuição – Não Comercial – Compartilhamento pela mesma licença 4.0 Internacional. É permitida a reprodução parcial ou total dessa obra, desde que citada a fonte.

A coleção institucional do Ministério da Saúde pode ser acessada, na íntegra, na Biblioteca Virtual em Saúde do Ministério da Saúde: <http://www.saude.gov.br/bvs>; e no Site da Fundação Nacional de Saúde: <http://www.funasa.gov.br/site/publicacoes>

Tiragem: 1ª edição - 2018 - 500 exemplares

Elaboração, distribuição e informações:
MINISTÉRIO DA SAÚDE
Fundação Nacional de Saúde
Departamento de Engenharia de Saúde Pública (Densp)
Coordenação Geral de Cooperação Técnica em Saneamento (Cgcot)
Coordenação de Informação e Tecnologia em Saneamento (Codet)
Edifício PO 700 - Setor de Rádio e Televisão Norte (SRTVN) - Quadra 701 - Lote D - 2º andar - CEP: 70.719-040 - Asa Norte - Brasília/DF - Tel.: (61) 3314-6233
Home page: http://www.funasa.gov.br

Elaboração:
Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado - UFSC
Pablo Heleno Sezerino[1]
Benny Zuse Rousso
Catiane Pelissari
Mayara Oliveira dos Santos
Monique Nunes Freitas
Victor Ybarzo Fechine
Ana Maria Beims Lopes[2]
[1] *Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado - UFSC*
[2] *Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - UFSC*

Apoio:
Esta publicação é um dos produtos da pesquisa "FILTROS PLANTADOS COM MACRÓFITAS (WETLANDS CONSTRUÍDOS) EMPREGADOS NO TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTOS", desenvolvida com recursos do Programa de Pesquisa em Saúde e Saneamento da Funasa

Capa, projeto gráfico e diagramação:
Rita Motta, sob coordenação da Gráfica e Editora Copiart

Impresso no Brasil / ***Printed in Brazil***

Ficha Catalográfica

Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.
Cartilha Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção/ Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2018
56 p. : il.

ISBN 978-85-8388-127-8

1. Saneamento básico. 2. Esgotos. 3 Acessórios de Redes de Água e de Esgoto. I. Título.

CDU.628.3

Catalogação na fonte – Divisão de Museu e Biblioteca – Funasa

Títulos para indexação
Em inglês: Constructed wetlands applied to urban wastewater treatment.
Recomendations for deployment and good operation and maintenance practices.
Em espanhol: Humedales construidos aplicados en el tratamiento de aguas residuales urbanas.
Recomendaciones para la implementación de buenas prácticas de operación y mantenimiento.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO 4

1 ESGOTAMENTO SANITÁRIO COMO DIMENSÃO DO SANEAMENTO BÁSICO 5
2 *WETLANDS* CONSTRUÍDOS 8
3 MODALIDADES DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS 10
3.1 Sistema híbrido: *wetland* construído vertical descendente seguido por *wetland* construído horizontal 11
3.2 *Wetland* Construído Vertical com Fundo Saturado 14
4 ELEMENTOS ATUANTES NO TRATAMENTO DE ESGOTOS UTILIZANDO OS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS 15
4.1 Material Filtrante 16
4.2 Macrófitas 17
4.3 Microrganismos 18
5 CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO 20
6 ASPECTOS CONSTRUTIVOS 22
6.1 Estrutura 23
6.2 Impermeabilização 25
6.3 Assentamento das tubulações e do material filtrante 26
6.4 Transplantio das macrófitas 29
7 CONTROLE OPERACIONAL 33
7.1 Regime Hidráulico 33
7.2 Manejo das macrófitas 40
7.3 Monitoramento do desempenho 44
8 CUSTOS ASSOCIADOS 46
9 DESEMPENHO GLOBAL 49

SUGESTÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR 51

APRESENTAÇÃO

Este material é um produto relacionado às atividades de pesquisa desenvolvidas junto ao projeto "*Filtros plantados com macrófitas (wetlands construídos) empregados no tratamento descentralizado de esgotos*", enquadrado na área temática "Esgotamento Sanitário", do Edital de Convocação n° 001/2011 do Programa de Pesquisa em Saúde e Saneamento, Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde (FUNASA).

A pesquisa supracitada teve como instituição proponente a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), representada pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS), sendo o Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD) responsável pelo projeto de pesquisa, o qual foi realizado durante o período compreendido entre o final do segundo semestre de 2013 até o segundo semestre de 2017.

Este documento aborda fundamentos básicos sobre a ecotecnologia dos *wetlands* construídos, suas aplicações, modalidades de tratamento, aspectos de projeto, de implantação e de operação e desempenho de tratamento de esgoto sanitário. Ao longo do documento, apresenta-se o caso de estudo específico conduzido nesta pesquisa, onde destaca-se a implantação e operação initerrupta de uma estação experimental em escala real, composta por três modalidades de *wetlands* construídos.

O objetivo maior deste material é aproximar os resultados técnicos obtidos com um público mais amplo, destacando-se estudantes, engenheiros (as), agentes municipais e tomadores de decisão, com vistas a subsidiá-los de informações sobre a ecotecnologia estudada, a qual pode ser mais uma opção para a busca pela universalização do esgotamento sanitário nos municípios brasileiros.

1 ESGOTAMENTO SANITÁRIO COMO DIMENSÃO DO SANEAMENTO BÁSICO

Saneamento básico pode ser definido como o conjunto de ações que visam oferecer a toda população, desde os mais ricos até os mais humildes, infraestrutura relacionada a água, ao esgoto, a drenagem ou manjeno de águas pluviais e aos resíduos sólidos (lixo). Estas quatro dimensões do saneamento devem ser empregadas tanto na zona urbana quanto na zona rural, sendo de responsabilidade de todos os cidadãos e, sobretudo, da municipalidade.

Dentre as dimensões do saneamento básico, os serviços de coleta, transporte, tratamento e disposição final dos esgotos produzidos, também conhecidos como serviços de **esgotamento sanitário**, tornam-se objeto de intensiva preocupação por parte da população e dos gestores municipais, pois estes quando lançados ao meio ambiente sem tratamento adequado, poderão comprometer a qualidade ambiental e a saúde das pessoas e animais.

Esgotamento sanitário é, portanto, o conjunto de ações que contemplam desde a coleta dos esgotos gerados na residência (ou outra instalação predial), passando pelo transporte em redes coletoras até chegar na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), onde será tratado de forma que possa ser disposto corretamente sob o ponto de vista sanitário no ambiente, quer seja este ambiente um corpo d'água ou o solo.

Os serviços de esgotamento sanitário poderão ser disponibilizados de forma que todos os esgotos gerados em uma região sejam encaminhados para um único ponto, promovendo assim uma **centralização** do sistema, ou podem ser subdivididos para pequenos aglomerados em uma mesma bacia de escoamento, caracterizando-se em uma **descentralização** dos serviços, reduzindo assim custos com o transporte dos esgotos gerados.

A inexistência de sistemas de esgotamento sanitário centralizado em municípios de pequeno porte está associada ao alto custo de implantação e, principalmente, operação e manutenção. Devido a reduzida densidade populacional destes municípios, bem como as potenciais particularidades de relevo, a tarifação do serviço, provavelmente, não seria suficiente para cobrir os custos deste modal de saneamento. Assim, torna-se imperativo a busca por alternativas de esgotamento sanitário descentralizado, notadamente aqueles que possam atender as demandas no próprio lote do gerador. Este modelo de esgotamento sanitário caracteriza-se como um sistema **no lote (*on site*)**, ou como relacionado por algumas literaturas de **sistema individual**.

Dessa forma, a compreensão, consolidação e difusão de tecnologias de tratamento descentralizado no lote são imprescindíveis para se atender os diferentes cenários existentes nos municípios brasileiros e, assim, aproximar-se da universalização do saneamento básico no país. A Figura 1 evidencia as principais características das tecnologias descentralizadas de tratamento de esgoto.

Figura 1 – Características de tecnologias descentralizadas de tratamento de esgoto.

No Brasil não há uma legislação específica para sistemas descentralizados de esgotos, cabendo assim a cada município legislar sobre a questão. Em alguns municípios onde a Vigilância Sanitária atua na regulação e controle do lançamento dos

esgotos sanitários, há instruções normativas que indicam alternativas de tratamento que devem ser combinadas com o tanque séptico (também conhecido por fossa) para a promoção do tratamento de esgotos nas residências ou estabelecimentos comerciais, tomando-se como base normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A ABNT apresenta duas normas técnicas que vêm sendo empregadas para a configuração de sistemas descentralizados de tratamento de esgotos, quais são:

(i) NBR7229. Projeto, construção e operação de tanques sépticos. Rio de Janeiro: ABNT. 15p. 1993;

(ii) NBR13969. Projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes de tanques sépticos: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT. 57p. 1997.

Inúmeras são as alternativas tecnológicas que podem ser empregadas no tratamento descentralizado de esgotos, destacando-se desde os sistemas naturais até os sistemas compactos. Dentre estas, destacam-se a ecotencnologia dos *wetlands* construídos.

2 *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

Wetlands construídos (WC) são sistemas concebidos para replicar e otimizar processos naturais de transformação da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, que ocorrem em ambientes alagados, como pântanos e mangues. Normalmente são utilizados como sistemas de tratamento de efluentes de diversas origens, destacando-se os efluentes industriais, agrícolas, domésticos ou pluviais. Contudo, os WC também podem ser aplicados para o controle de enchentes, retenção de sedimentos e restauração de rios urbanos poluídos. A Figura 2 apresenta as principais características dos *wetlands* construídos empregados no tratamento de esgotos.

Figura 2 – Características da ecotecnologia dos *wetlands* construídos empregados no tratamento de esgotos.

Existem diferentes modalidades de *wetlands* construídos concebidos para realizar o tratamento de esgotos. A classificação é realizada normalmente em função do sentido em que o esgoto escoa no interior de cada unidade de tratamento. Contudo, uma característica que é comum a todas as modalidades é a presença de plantas (denominadas macrófitas) que auxiliam de diversas formas na remoção de poluentes presentes nos esgotos. Outros elementos atuantes presentes nos WC, tais como o material filtrante e os microrganismos, em conjunto com as condições operacionais empregadas são fundamentais no tratamento de esgotos, e serão melhor discutidos nos itens 4 e 7.

3 MODALIDADES DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

Neste documento serão abordadas as modalidades de WC estudadas na estação experimental de *wetlands* construídos do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

As modalidades foram estudadas em escala real e foram dimensionadas para atender uma população equivalente de 5 pessoas. Os módulos WC eram precedidos por um tanque séptico, e o esgoto bruto provinha da rede coletora de uma bacia de escoamento do município de Florianópolis/SC, por meio de uma estação elevatória. Após o esgoto ser tratado nos módulos WC, o efluente final retornava à rede coletora em um ponto a jusante da captação para o experimento. A Figura 3 apresenta o *layout* da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

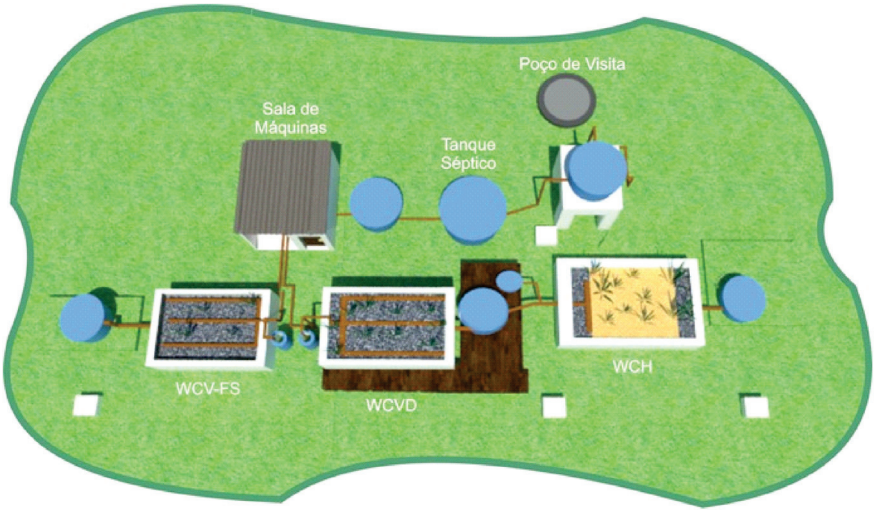

Figura 3 – *Layout* da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

Onde: WCV-FS = *wetland* construído vertical de fundo saturado;
WCVD = *wetland* construído vertical descendente;
WCH = *wetland* construído subsuperficial horizontal.

Maiores detalhes acerca das modalidades de *wetlands* construídos estudados são apresentadas no decorrer deste item. Especificidades construtivas e operacionais das modalidades são apresentadas no itens 6 e 7, respectivamente. Por fim, custos associados e desempenho global de tratamento dos sistemas de *wetlands* construídos estudados são descritos nos itens 8 e 9.

3.1 Sistema híbrido: *wetland* construído vertical descendente seguido por *wetland* construído horizontal

Os chamados sistemas híbridos são definidos como arranjos onde são dispôstas diferentes modalidades de *wetlands* em sequência. Isto é feito a fim de se otimizar a capacidade de remoção de poluentes ao se combinar as características de diferentes tipos.

O arranjo híbrido composto por um *wetland* construído vertical descendente (WCVD) seguido por um *wetland* construído subsuperficial horizontal (WCH), tem a finalidade de englobar processos complementares de tratamento em cada uma das unidades, gerando, assim, um efluente com um elevado nível de remoção de poluentes.

Nos WCVD, o esgoto é aplicado uniformemente na superfície e percola por meio do maciço filtrante, que se encontra não saturado, ou seja, sem esgoto acumulado no interior do módulo. O esgoto é então coletado no fundo do reator por meio de um conjunto de tubulações (Figura 4).

A aplicação de esgoto em um maciço insaturado de forma intermitente, ou seja, com intervalos de repouso entre as aplicações, favorece o arraste de oxigênio para dentro do WCVD. Dessa forma, são criadas condições favoráveis para processos oxidativos, como a nitrificação, a primeira etapa de transformação de poluentes nitrogenados, além da oxidação da matéria orgânica.

Contudo a modalidade de WCVD apresenta limitações quanto a eficiência de remoção de alguns poluentes. Especificamente em relação aos compostos nitrogenados,

pois o processo de remoção de nitrogênio não ocorre completamente em virtude da baixa ocorrência de desnitrificação, a etapa seguinte à nitrificação.

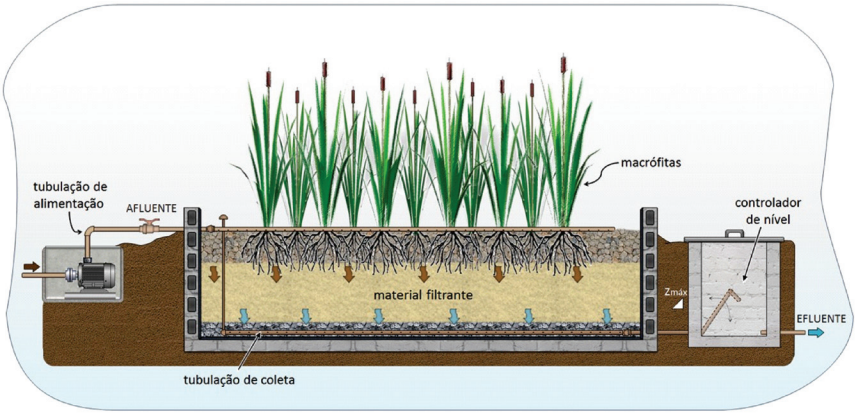

Figura 4 – Representação esquemática do perfil de um *wetland* construído vertical descendente.

Nota: Controlador de nível é opcional e empregado somente para iniciar o processo de operação, sendo rebaixado na sequência para o sistema trabalhar com drenagem livre.

Isto resulta em limitadas remoções de Nitrogênio Total (NT) no WCVD, quando essa modalidade ser aplicada isoladamente no arranjo técnologico. De forma simplificada, o WCVD consegue transformar compostos nitrogenados, através da nitrificação, mas possui baixa capacidade de remoção de nitrogênio.

Por sua vez, o *wetland* construído subsuperficial horizontal (WCH) apresenta condições favoráveis para a ocorrência da desnitrificação. Isto ocorre devido ao funcionamento hidráulico desta modalidade de *wetland* construído, onde o esgoto flui lentamente da zona de entrada até a zona de saída, passando através do meio filtrante. Na zona de saída há a presença de um controlador de nível – uma tubulação elevada – que permite a saturação do meio filtrante (Figura 5). A saturação do meio filtrante resulta na criação de um ambiente anaeróbio e anóxico, favorecendo a desnitrificação.

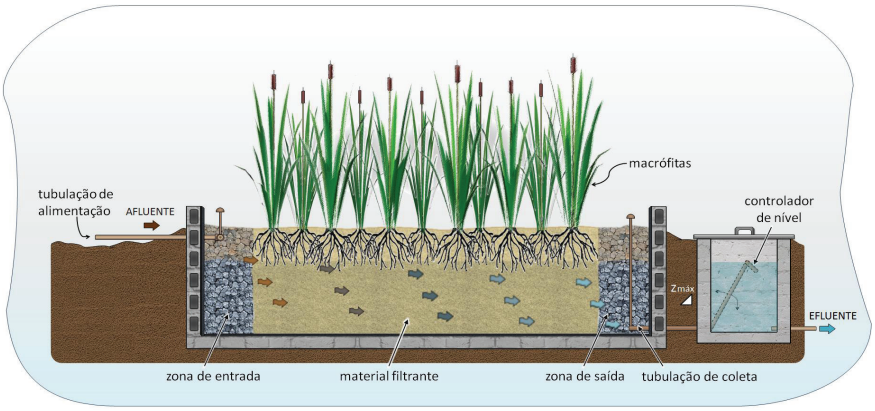

Figura 5 – Representação esquemática do perfil de um *wetland* construído subsuperficial horizontal.

Nota: Controlador de nível é empregado para manter um nível de saturação no maciço filtrante.

Destaca-se, também, que a presença de plantas resulta na passagem do esgoto em zonas aeróbias próximas às raízes, ainda que se predominem as zonas anóxicas e anaeróbias dentro do WCH, devido à saturação do meio filtrante.

Dessa forma, a combinação sequencial de um WCVD seguido por um WCH permite um tratamento avançado de esgotos, removendo matéria orgânica, sólidos e nutrientes (Figura 6).

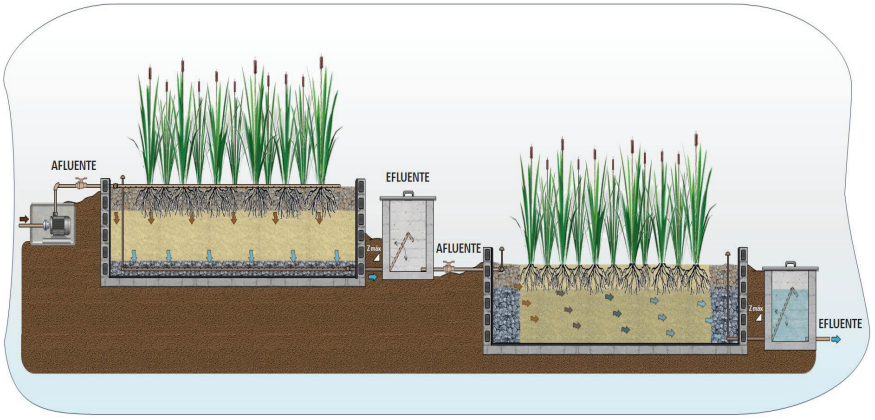

Figura 6 – Esquema representando o perfil de um sistema híbrido de *wetlands* construídos composto por um *wetland* construído vertical descendente seguido de um *wetland* construído subsuperficial horizontal.

3.2 *Wetland* Construído Vertical com Fundo Saturado

O *wetland* construído vertical de fundo saturado (WCV-FS) possui a mesma dinâmica operacional que o WCVD, com aplicações intermitentes de esgoto a ser tratado para aumento do arraste de oxigênio e percolação vertical do esgoto.

A principal diferença do WCV-FS em relação ao WCVD é uma modificação hidráulica realizada a fim de permitir uma maior remoção de nitrogênio em uma única unidade, sem incremento adicional de energia (por meio de aeradores, por exemplo) ou área (unidades adicionais na sequência da linha de tratamento).

Para isso, uma saturação de fundo é realizada por meio da elevação da tubulação de saída na parte externa do WCV-FS. Esta tubulação é denominada controlador de nível, de forma similar ao realizado na unidade WCH do sistema híbrido (Figura 7).

Esta saturação resulta na criação de condições anaeróbias/anóxicas no fundo do WCV-FS. Assim, em uma única unidade de tratamento, há a presença tanto de condições aeróbias, mais próxima à superfície – o que favorece a oxidação da matéria orgânica e a nitrificação – tanto quanto a presença de condições anaeróbias/anóxicas, mais próxima ao fundo – o que favorece a redução da matéria orgânica e a desnitrificação.

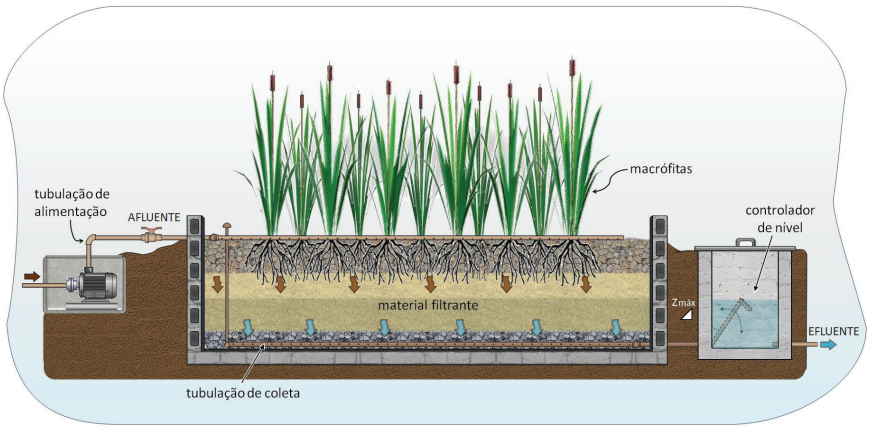

Figura 7 – Representação esquemática do perfil de um *wetland* construído vertical de fundo saturado.

Nota: Controlador de nível é empregado para manter um nível de saturação no maciço filtrante.

4 ELEMENTOS ATUANTES NO TRATAMENTO DE ESGOTOS UTILIZANDO OS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

A tecnologia dos WC replica processos físicos, químicos e biológicos que acontecem na natureza, especificamente em ambientes alagados.

De forma clássica, os processos de tratamento são divididos em físicos, químicos e biológicos. Nos WC, os três processos ocorrem, sendo alguns exemplos: filtragem dos sólidos em suspensão do esgoto pelo material filtrante (físico); adsorção na superfície dos grãos do material filtrante (químico); e, depuração da matéria orgânica pelos microrganismos e fitoextração pelas macrófitas (biológico).

Dessa forma, há uma combinação de vários fatores que influenciam o desempenho de remoção de poluentes em *wetlands* construídos (Figura 8). Neste item, são destacados 3 fatores destes, quais são: o material filtrante, as macrófitas e os microrganismos. Contudo, deve-se ressaltar que não somente estes fatores são responsáveis pela eficiência e determinação do desempenho do sistema. Outros fatores como o regime operacional e condições climáticas da localidade onde os *wetlands* construídos serão implementados, por exemplo, são fundamentais para consolidação do desempenho de cada sistema de *wetlands* construídos.

Figura 8 – Agentes responsáveis pelo tratamento de esgoto na ecotecnologia dos *wetlands* construídos.

4.1 Material Filtrante

O material filtrante, ou meio suporte, ou maciço filtrante, é o elemento de sustentação das macrófitas, aderência do biofilme e o agente responsável pela filtragem do esgoto nos *wetlands* construídos. Além de atuar de forma física através do processo de filtragem, este material também está envolvido na maioria das reações bioquímicas que se desenvolvem no interior dos *wetlands* construídos, pelo fato de atuar como suporte para o desenvolvimento do biofilme microbiano, além de realizar o processo de adsorção de poluentes (fenômeno químico) sobre seus grãos.

Idealmente, o material filtrante deve possuir características que conciliem uma boa permeabilidade através dos poros entre os grãos que constituem o material filtrante, bem como apresentar um bom potencial reativo de adsorção. A permeabilidade deve ser tal que permita a filtragem de sólidos suspensos presentes no esgoto

sem que o sistema colmate rapidamente, ou seja, apresenta-se com sinais de entupimento. Já o potencial reativo deve favorecer a adsorção de compostos inorgânicos presentes no esgoto, que consiste na retenção por atração química de alguns compostos sobre a superfície dos grãos do material filtrante.

Contudo, a associação de ambas as características em um único material, especialmente um que seja acessível economicamente, não é evidente. As areias, por exemplo, possuem ótima condutividade hidráulica, mas baixos teores de reatividade (capacidade de troca catiônica); as argilas, por sua vez, apresentam uma elevada capacidade de adsorção, mas são praticamente impermeáveis. A escolha do material é, portanto, uma ponderação entre estes fatores, condicionada à finalidade do tratamento.

A prática mais comum é a escolha de areias e britas, visando uma longevidade maior do sistema. Na literatura encontram-se recomendações de utilização de areias e britas para finalidades de tratamento secundário e terciário de esgotos domésticos. Sua escolha se dá, também, pela maior facilidade de caracterização destes materiais e experiências de sucesso relatadas na literatura direcionada.

4.2 Macrófitas

O termo macrófita inclui desde as plantas aquáticas vasculares (angiospermas, como exemplo clássico cita-se a taboa – *Typha* spp.), até algumas algas cujos tecidos podem ser visivelmente identificados. Na natureza, as macrófitas possuem elevada importância para a manutenção do equilíbrio ecológico em *wetlands* naturais. Em *wetlands* construídos aplicados no tratamento de esgotos, as plantas também possuem uma grande importância para operação e correto funcionamento da tecnologia (Figura 9).

Estudos científicos mostram que 10% do total de nitrogênio removido em *wetlands* construídos se dá pela ação de fitoextração das macrófitas. Também, é relatada uma capacidade de remoção de nitrogênio através da poda de 200 a 2500 kgN/ha.ano.

A nível global, observam-se três tipos de macrófitas mais empregadas em *wetlands* construídos: *Phragmites australis* ou popularmente conhecida como caniço, não nativa do Brasil; *Typha* spp. ou mais comumente chamada de taboa; e, *Juncus* spp, também chamada de junco. Todas são classificadas como emergentes, possuindo uma taxa de crescimento de muito rápida a moderada, e densidades classificadas como densas.

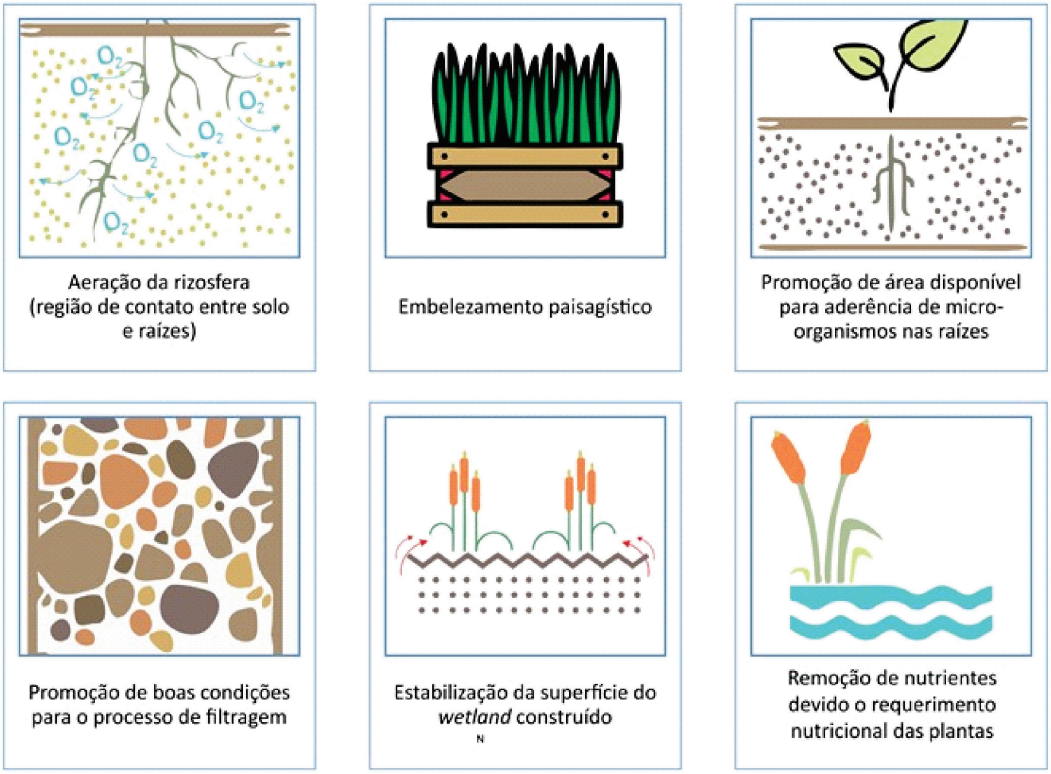

Figura 9 – Funções das macrófitas na ecotecnologia de *wetlands* construídos.

Apesar das macrófitas acima descritas serem as mais implantadas em *wetlands* construídos, a escolha da planta não se deve restringir a estas espécies. Os fatores determinantes para escolha da espécie, tendo em vista o caráter ecológico e de baixo custo dessa tecnologia, são a abundância das plantas na localidade e o custo de transplantio e de poda regular. Deve-se levar em consideração, também, a adaptabilidade da espécie, expressa pela tolerância da planta a ambientes alagados ou secos e ao contato com concentrações elevadas de matéria orgânica, nutrientes ou outros poluentes específicos do efluente a ser tratado. Por fim, destaca-se, também, que é possível conceber *wetlands* construídos com mais de uma espécie de macrófita.

4.3 Microrganismos

A ação dos microrganismos é reconhecida como o principal agente no tratamento dos compostos biodegradáveis presentes nos esgotos. Nos *wetlands* construídos,

a diversidade e abundância de microrganismos é enorme, destacando-se o grupo das bactérias e das arqueas.

O surgimento e predominância de comunidades específicas de microrganismos está intimamente ligado às condições do ambiente em seu entorno, em termos de disponibilidade de oxigênio e carbono, temperatura, potencial redox e material suporte.

O material filtrante é o responsável por propiciar o local de fixação das comunidades bacterianas, formando o chamado biofilme. O biofilme pode ser definido como um conjunto de microrganismos e de produtos extracelulares que se aderem sobre um suporte sólido, formando uma camada volumosa e espessa, com uma estrutura externa não totalmente regular e uniforme.

A interação ao longo do biofilme com o esgoto se dá de forma diferenciada devido à variação do gradiente de oxigênio dissolvido no meio. De forma geral, o oxigênio que entra no biofilme é consumido gradualmente, até que o mesmo se extinga e surjam condições anóxicas ou anaeróbias, direcionando o desenvolvimento de outras comunidades microbianas. Assim, a coexistência entre condições aeróbias, anóxicas e anaeróbias é uma importante característica dos sistemas com biofilmes.

As regiões aeróbias serão responsáveis pela oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrito e em seguida a nitrato. Na camada anóxica ocorrerá a desnitrificação e nas regiões anaeróbias ocorrerá a formação de ácidos orgânicos e a redução de sulfatos.

Com o conhecimento de que determinado grupos de microrganismos se desenvolvem de acordo com o tipo de meio que se encontra, seja rico ou ausente de oxigênio (insaturado ou saturado de esgoto), com alta ou baixa carga orgânica ou com alto ou baixo teor de nutrientes, é possível conceber os *wetlands* construídos de forma que esses poluentes sejam mais eficientemente removidos por grupos específicos de microrganismos.

5 CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO

Há diversas formas que podem ser utilizadas para o dimensionamento de WC, as quais são diferenciadas dependendo da modalidade de *wetland* construído que se pretende implantar. Ressalta-se que este material não pretende apresentar um roteiro de cálculo para o dimensionamento de *wetlands* construídos. Destaca-se que existe muita literatura para este fim, as quais sugere-se leitura das referências indicadas no final deste documento.

Apresentamos aqui alguns modelos que podem ser empregados para o dimensionamento das diferentes modalidades de WC, tais como:

(i) cinética de primeira ordem aplicada a reatores pistão;

(ii) relação área *per capita*;

(iii) carregamento orgânico superficial e taxa hidráulica aplicados;

(iv) taxa de transferência de oxigênio.

Os módulos de WC componentes da estação experimental do GESAD/UFSC foram dimensionados a partir da experiência acumulada de mais de 15 anos de estudos com sistemas *wetlands*, além de ensaios prévios em escala laboratorial e ampla pesquisa bibliográfica. Deste trabalho resultou na aplicação dos critérios de dimenisionamentos dos módulos estudados.

- Quanto ao *wetland* construído vertical descendente – WCVD e ao *wetland* construído vertical de fundo saturado – WCV-FS:

Ambas as modalidades de WC foram projetadas para receber um carregamento orgânico médio de 41 g DQO m^{-2} d^{-1}, idealizado para ser aplicado uma vazão diária de

esgoto produzida por uma residência unifamiliar composta por 5 pessoas (150 L d^{-1} por pessoa), totalizando 600 L d^{-1}. A alimentação foi realizada de forma intermitente, com ciclos de repouso de 3,5 dias na semana, por meio de bombeamento com 3 a 4 pulsos d^{-1}, com duração aproximada de 2,5 minutos cada pulso, totalizando um volume aproximado de 150 L, com um intervalo de alimentação de 3 horas.

Destaca-se que ambos os WC possuem uma profundidade útil de material filtrante de 0,75m, sendo que o WCV-FS apresenta-se com uma altura de saturação de 0,40m.

- Quanto ao *wetland* construído subsuperficial horizontal – WCH:

Para o dimensionamento do WCH, a carga orgânica e hidráulica aplicada foram adotadas considerando o desempenho de tratamento do WCVD a montante, e considerou-se uma perda de água de 6 mm d^{-1} por evapotranspiração, conforme os estudos prévios conduzidos pelos pesquisadores GESAD/UFSC.

O dimensionamento do WCH foi realizado utilizando-se a equação de Monod modificada para cinética de primeira ordem, a qual resulta na expressão apresentada abaixo.

$$A = \frac{Q(lnC_o - lnC)}{K\ x\ p\ x\ n}$$

Onde: A = área superficial do WCH, em m^2; Q = vazão afluente, em $m^3\ d^{-1}$; C_o = concentração afluente, em g m^{-3}; C = concentração efluente, em g m^{-3}; K = coeficiente de degradação, em d^{-1}; p = profundidade média do WCH, em m; **η =** porosidade, m^3 vazios m^{-3} material.

O coeficiente de degradação utilizado foi de 0,36 d^{-1} e porosidade de areia grossa igual a 0,35. A profundidade útil de material filtrante é de 0,60 m. A eficiência esperada de tratamento foi de 80%. A alimentação do WCH foi realizada por gravidade de forma contínua nos dias que ocorreram alimentação do WCVD.

6 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Após a concepção e dimensionamento do sistema de *wetlands* construídos, chega a hora de passá-lo do papel para a realidade: dá-se início à etapa construtiva.

Este item aborda diferentes perguntas que devem ser realizadas antes e durante a execução do projeto de *wetlands* construídos, como por exemplo os questionamentos representados na Figura 10.

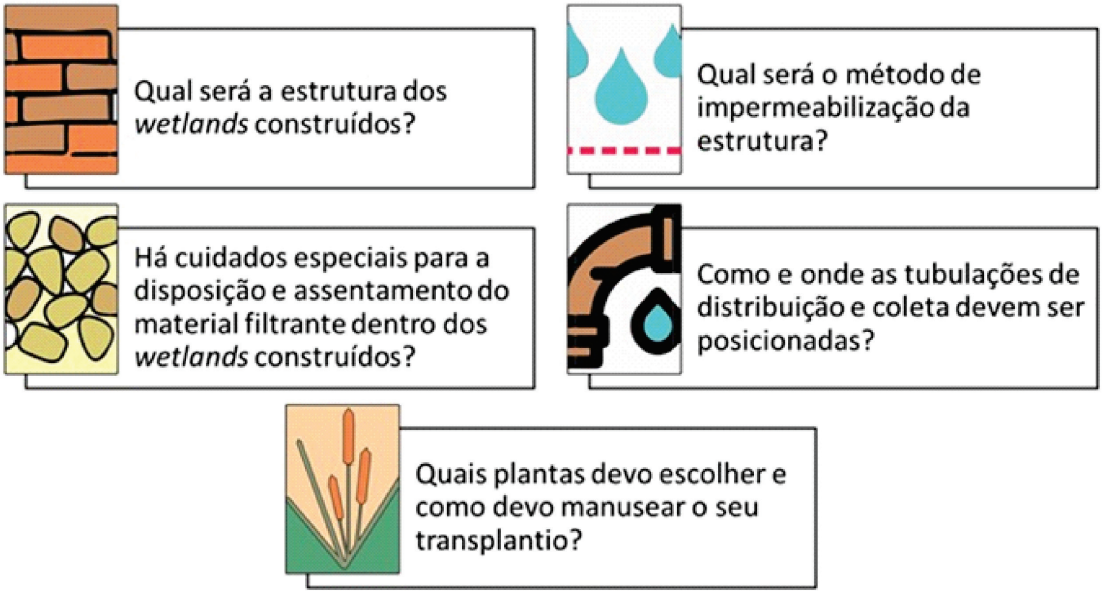

Figura 10 – Aspectos construtivos que devem ser considerados durante a execução de um sistema de *wetlands* construídos.

Claramente, não há uma única resposta para cada uma destas questões. Porém, há alguns princípios básicos que devem ser mantidos, mesmo dadas as diferentes especificidades de cada caso. Neste item, estas e outras questões serão trabalhadas de forma geral. Além disso, para exemplificação de um caso real, será apresentado o caso específico construtivo da estação experimental de *wetlands* construídos do Grupo de Estudos de Saneamento Descentralizado (GESAD) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

6.1 Estrutura

A estrutura dos *wetlands* construídos pode ser escavada no terreno ou ser erguida sobre o solo. Essa escolha vai ser função específica das condições de projeto de cada caso.

Via de regra, estruturas escavadas possuem um custo inferior às construções erguidas sobre o terreno. Para o caso de escavação, deve-se atentar unicamente para que os taludes sejam construídos de forma que eles não colapsem e que o terreno possua características mínimas para que não ceda com o peso do material filtrante e água. Essa alternativa é a mais comumente adotada devido ao seu menor custo e maior facilidade de implantação.

Contudo, em alguns casos, a escavação pode não ser indicada. Como por exemplo, de cenários onde o lençol freático é muito próximo à superfície e o rebaixamento do lençol freático pode se tornar muito oneroso ou difícil de se realizar tecnicamente. Nesses cenários, a construção de *wetlands* construídos sobre o terreno é uma solução adequada. A estrutura pode ser de alvenaria estrutural (blocos de concreto preenchidos com concreto e armadura) ou estruturas pré-moldadas de fibra de vidro (caixas de água ou piscinas, por exemplo). Também há de se considerar que, para estruturas acima do nível do terreno, usualmente se faz necessário o uso de conjuntos moto-bombas para recalcar o esgoto para entrada nos *wetlands* construídos.

No caso da estação experimental de tratamento de esgoto sanitário com *wetlands* construídos do GESAD, na UFSC, a estrutura das unidades de tratamento foi erguida utilizando-se blocos de concreto (Figura 11). Isto ocorreu devido ao fato da estação experimental possuir objetivos científicos e educacionais. Dessa forma, realizando a estrutura das unidades sobre o terreno, foi possível proporcionar aos visitantes a noção

do volume dos *wetlands*, além de permitir a inserção de pontos de coleta ao longo do perfil de escoamento do esgoto em cada unidade. Esta última característica permitiu uma análise da variação de qualidade e da hidrodinâmica do esgoto ao longo de cada módulo, abordadas em algumas das pesquisas de pós-graduação realizadas pelo GESAD.

Figura 11 – Fotos ilustrativas da etapa inicial de construção da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

Onde: (a) Terreno inicial; (b) Terreno após limpeza; (c) Material para construção estrutural; (d) Estaqueamento da localização dos WC; (e) Preparo da laje de fundo e contrapiso; (f) Elevação das paredes dos *wetlands* construídos.

6.2 Impermeabilização

Após a definição da estrutura, seja ela escavada ou erguida, a próxima etapa construtiva é a sua impermeabilização. Esse passo é essencial e deve ser realizada com muita atenção, uma vez que o funcionamento correto dos *wetlands* construídos depende muito da estanqueidade – em outras palavras, do isolamento da estrutura e não permissão de vazamentos.

Não existe uma única forma de garantir a estanqueidade em unidades de tratamento de esgoto, porém dois tipos são usualmente adotadas de acordo com o tipo de estrutura dos *wetlands* construídos. Em sistemas utilizando a escavação no terreno, onde o solo é a estrutura em si, é comum a utilização de mantas geotexteis associados às camadas de bidim, quando necessário, para garantir a não troca de água juntamente com resistência mecânica da camada impermeabilizante. Neste sentido, no momento de se posicionar as mantas, deve-se atentar para que elas cubram toda a superfície das paredes internas do *wetland* construído e que elas sejam capazes a se adaptar ao futuro peso e compactação devido ao material filtrante e água. Para isso, recomenda-se que as mantas não fiquem demasiadamente esticadas para que não rasguem nas próximas etapas construtivas.

Já em sistemas construídos acima do solo, a impermeabilização vai depender do tipo de material utilizado. Por exemplo, utilizando fibra de vidro, a estrutura em si já é impermeável. No caso de alvenaria, como a utilizada no caso da estação experimental do GESAD (Figura 12), a impermeabilização pode ser realizada com uso de aditivo impermeabilizante no reboco interno. Não se recomenda o uso de manta asfáltica para impermeabilização em unidades de tratamento de esgoto. Como cuidados específicos para estruturas erguidas, deve-se atentar para a estabilidade da estrutura antes e depois da aplicação do impermeabilizante. Este cuidado se refere especificamente para que a mesma não ceda, com o aumento do peso devido ao material filtrante e peso da água, e acarrete em fissuras que comprometeriam a estanqueidade da estrutura.

Após finalizar a impermeabilização, recomenda-se a realização de testes hidráulicos com água para verificação da estanqueidade da estrutura antes de se dar

início a próxima etapa construtiva: o assentamento das tubulações de distribuição e coleta de esgoto e do material filtrante.

Figura 12 – Foto ilustrativa da aplicação de reboco com aditivo impermeabilizante em um *wetland* construído da estação experimental de wetlands construídos do GESAD/UFSC.

6.3 Assentamento das tubulações e do material filtrante

A próxima etapa construtiva é a preparação das tubulações de distribuição e coleta de esgoto. As tubulações de distribuição devem ser perfuradas de forma a otimizar a distribuição em seu comprimento, além de serem dispostas no *wetland* construído a fim de maximizar o tratamento de esgoto. Recomenda-se a realização de furos de forma alternada ao longo dos lados da tubulação, para que o jato de aspersão seja maior em cada furo.

Nas modalidades de *wetlands* construídos verticais (WCVD e WCV-FS), as tubulações de distribuição devem ser distribuídas de forma que o esgoto seja aplicado em toda a área superficial. Para aumento de desempenho de remoção de poluentes, recomenda-se que a tubulação fique sobre a superfície da unidade para que, no momento de aplicação de esgoto, haja aspersão de esgoto e, assim, um aumento do arraste de oxigênio para dentro do material filtrante da unidade de tratamento. Porém, em casos onde pode haver contato de pessoas com o *wetland* construído – como é o caso de uma pousada, onde o sistema de tratamento possa ser alocado próximo às habitações e que eventualmente alguma pessoa possa adentrar no jardim – é possível posicionar a tubulação de distribuição sob a superfície para minimizar riscos sanitários, mesmo que haja uma perda de desempenho devido ao menor arraste de oxigênio.

Na modalidade de *wetland* construído horizontal (WCH, última unidade da sequência do sistema híbrido), a tubulação de distribuição também deve ser perfurada. Contudo, ela deve posicionada de forma que abranja a totalidade da área transversal do *wetland* construído ao invés da área superficial.

As tubulações de coleta são normalmente idênticas às tubulações de distribuição, mas são posicionadas no final dos *wetlands* construídos. No caso das modalidades verticais (WCVD e WCV-FS), são posicionadas no fundo (Figura 13), enquanto que na unidade horizontal (WCH), são alocadas no fundo na zona de saída. Recomenda-se que estas tubulações sejam tubulações de PVC rígido classe 12 ou superior (modelo marrom para água) para que não exista o risco da tubulação colapsar devido ao peso do material filtrante e coluna d'água sobre o mesmo.

Figura 13 – Foto ilustrativa da tubulação de coleta da unidade WCV-FS da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

O material filtrante deve ser assentado cautelosamente por dois motivos principais. O primeiro se refere ao início de assentamento. Deve-se atentar para que a

colocação da primeira camada de material filtrante não comprometa a estrutura impermeabilizada nas etapas anteriores. O segundo motivo é que o assentamento deve ser lento e gradual para que haja uma boa caracterização de diferentes camadas de material filtrante (quando for o caso), e para que o material filtrante não seja demasiadamente compactado e reduza a quantidade de vazios. No caso de areias, pode ser recomendado o cuidado de não se caminhar sobre o material filtrante para minimizar ainda mais compactações precoces.

Recomenda-se, também, que o material filtrante esteja limpo e com o menor teor de impurezas possível, a fim de se minimizar o risco de colmatações precoces. Para isso, deve-se cuidar para que o mesmo, ao chegar no local da obra, seja posicionado sobre lonas e que, em alguns casos, seja lavado. Destaca-se, principalmente, a necessidade de lavagem das britas, uma vez que é muito comum que as mesmas sejam adquiridas em lojas de materiais de construção não direcionadas à aplicações em filtros, mas sim para construção civil em geral, e sejam entregues com alto teor de pó de britagem. Se não há remoção deste pó de britagem, ao entrar em contato com a água, é comum a formação de uma espécie de pasta que acarreta em colmatação precoce de filtros.

No caso da estação experimental do GESAD na UFSC (Figura 14), o material filtrante utilizado foi a areia grossa (Figura 15), com camadas de brita nas seções iniciais e finais de cada *wetland* construído.

Figura 14 – Fotos ilustrativas do assentamento do material filtrante na unidade WCH do sistema híbrido na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

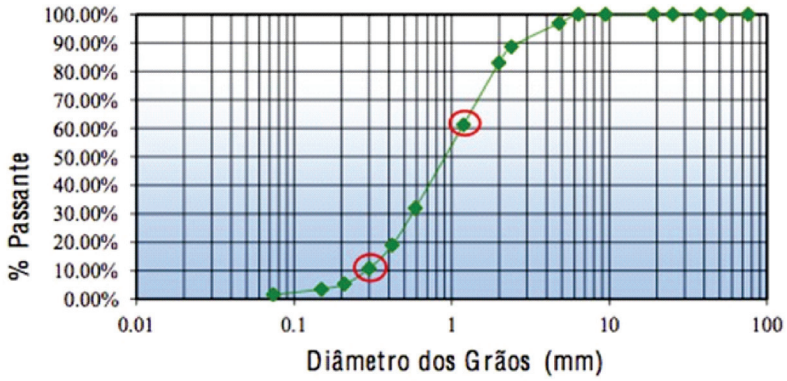

Figura 15 – Curva granulométrica da areia comercial utilizada nos *wetlands* construídos da estação experimental do GESAD/UFSC.

6.4 Transplantio das macrófitas

Finalizada a estrutura e preenchimento dos *wetlands* construídos com material filtrante, pode-se dar início ao transplantio de macrófitas para cada uma das unidades.

O transplantio possui basicamente três etapas: retirada e seleção das macrófitas de seu ambiente natural, preparação dos indivíduos selecionados para transplantio e transplantio em si para as unidades de tratamento de *wetlands* construídos (Figura 16).

A retirada e seleção das macrófitas de seu ambiente natural deve ser realizada utilizando pás de corte adequadas para este tipo de serviço. De forma geral, deve-se dar prioridade para plantas jovens e que apresentem folhagem tenra. No caso da macrófita taboa (também chamada de rabo-de-gato), uma forma de se identificar plantas com maior probabilidade de adaptação para o transplantio, é a verificação da existência de clones nas raízes dos indivíduos retirados do ambiente natural. Os clones (Figura 17) são caracterizados como pequenas extensões brancas nas raízes das plantas, e indicam que um novo indivíduo crescerá a partir dele.

A preparação das macrófitas selecionadas ocorre pela retirada de excesso de solo argiloso no entorno da raiz e pela poda de parte da folhagem da macrófita. O corte da parte aérea deve ser realizado de forma inclinada, para evitar que ocorra acúmulo de água e assim, impossibilite o crescimento da planta. No caso da estação experimental do GESAD, na UFSC, o corte foi realizado a 40 cm da raiz.

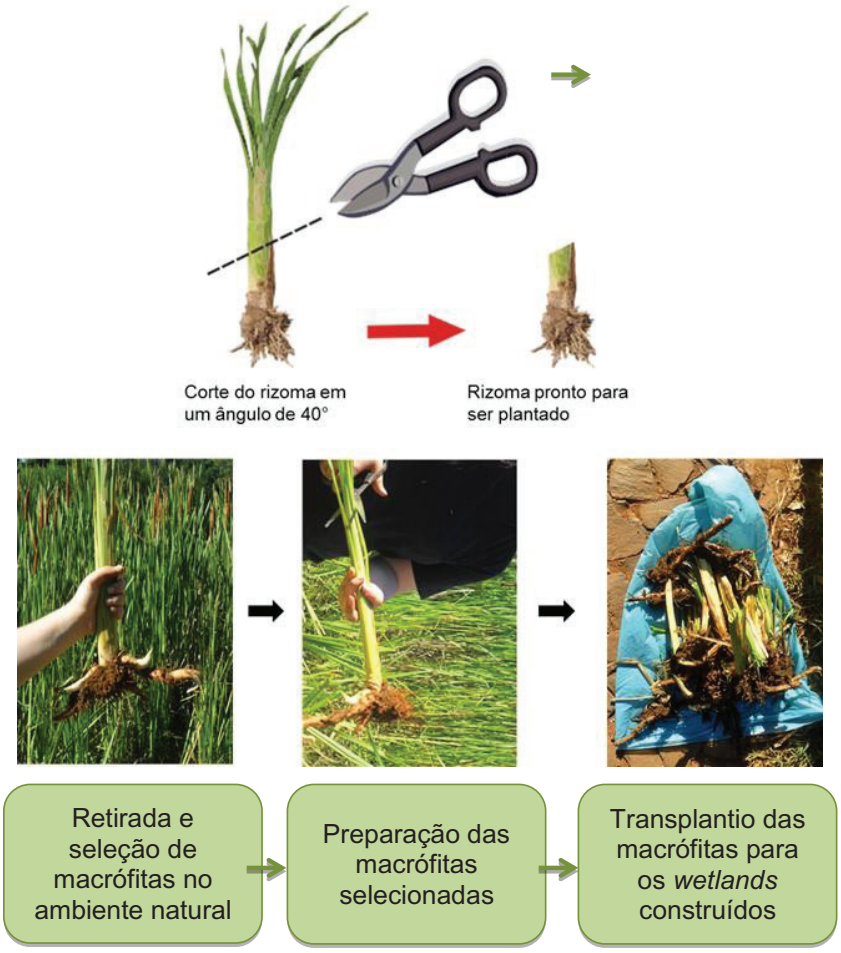

Figura 16 – Fotos ilustrativas das etapas de transplantio das macrófitas.

Figura 17 – Fotos ilustrativas da seleção de macrófitas para transplantio na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

Onde: Foto a esquerda apresenta um exemplo de macrófitas transplantadas. Foto a direita apresenta o detalhe do clone (extensão branca).

Por fim, ocorre o transplantio em si das macrófitas selecionadas e preparadas, o qual deve ser feito de forma que a planta esteja firme no material filtrante para que possa se desenvolver de maneira estável.

Um cuidado que deve ser tomado é, em casos de alimentação prévia das unidades de tratamento com esgoto para testes hidráulicos, a realização do transplantio usando luvas adequadas para proteção dos operadores.

No caso da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC, as macrófitas foram plantadas com um distanciamento de aproximadamente 40 cm entre si, mantendo-se uma densidade entre 3 e 4 plantas.m^{-2} da área superficial de cada *wetland* construído (Figura 18).

Figura 18 – Fotos ilustrativas das ações no momento do transplantio das macrófitas na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

Após o transplantio, foi implementado na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD, na UFSC, um período de duas semanas com alimentação com água para verificação da adaptação das macrófitas. Visto que as mesmas se adaptaram bem, deu-se início a operação propriamente dita, com aplicação de esgoto. Na Figura 19 é apresentada a estação experimental de *wetlands* construídos imediatamente após o transplantio, em junho de 2015 e após 7 meses de operação, em fevereiro de 2016.

Figura 19 – Fotos ilustrativas dos módulos wetlands construídos do GESAD/UFSC, em diferentes momentos da operação.

Onde: Foto acima refere-se ao início de operação, após transplantio das macrófitas, em junho de 2015. Foto abaixo refere-se ao período após 7 meses de operação, em fevereiro de 2016.

7 CONTROLE OPERACIONAL

Finalizada a construção dos WC, chega o momento no qual o trabalho realmente se inicia: a estação de tratamento começa a operar. Junto com o início das atividades de tratamento propriamente ditas, trabalhos de controle operacional devem ser realizados.

Apesar dos sistemas *wetlands* construídos serem renomados por apresentarem um baixo requerimento, tanto técnico quanto econômico e energético para aspectos de operação, deve-se destacar que nenhum sistema funciona se não há cuidados na operação.

Neste sentido, os *wetlands* construídos não fogem à regra. O controle operacional é imprescindível para que todo o esforço aplicado nas etapas de concepção, dimensionamento e construção sejam efetivos. É a operação contínua o principal componente para sucesso de qualquer sistema, independente de quão bem o mesmo tenha sido concebido.

Dessa forma, neste item serão abordados as medidas de controle operacional necessárias para um correto e seguro funcionamento de um sistema de *wetlands* construídos, desde a forma de aplicação de esgoto, medidas de manutenção em possíveis conjuntos moto-bombas, poda e cuidado com as macrófitas e, por fim, o monitoramento para verificação do desempenho das unidades de tratamento.

7.1 Regime Hidráulico

O regime hidráulico e seu monitoramento são aspectos operacionais fundamentais em estações de tratamento de esgoto. Isso também se aplica para unidades de *wetlands* construídos. Alguns pontos são fundamentais para determinação do regime

hidráulico, enquanto que outros pontos são importantes para verificação se o mesmo está sendo realizado na prática. O regime hidráulico é definido por três aspectos que regem a forma de como o esgoto é aplicado em *wetlands* construídos:

- Se há intermitência de aplicação de esgoto, ou seja, se o esgoto entra nos *wetlands* construídos em forma de pulsos ou em forma contínua;
- Se há alternância de módulos, ou seja, se uma unidade de *wetlands* construídos fica sempre em operação ou se ela alterna entre períodos de operação com períodos em repouso. No segundo caso, é necessário que haja unidades em paralelo para operar enquanto uma unidade está em repouso;
- A quantidade de volume de esgoto que é aplicado em relação à área do *wetland* construído em um determinado período (normalmente usa-se o dia como referência), definindo a taxa de aplicação hidráulica.

Nas modalidades verticais, tanto no WCV-FS quanto no sistema híbrido que inicia sua linha de tratamento com um WCVD, a aplicação de esgoto recomendada é a intermitente, com pulsos espaçados periodicamente ao longo do dia.

A intermitência de aplicação pode ser obtida de diversas formas. É possível conceber sistemas hidráulicos – como sifões invertidos ou sistemas de básculas – que dosam o esgoto em pulsos quando um determinado volume é obtido. Também, e mais comumente observado pela facilidade de aplicação, é possível gerar intermitência de aplicação com uso de conjunto moto-bombas associados a sensores de nível (bóias) ou temporizadores de acionamento. Deve-se somente atentar para que o conjunto moto-bomba seja indicado para aplicações com águas servidas e/ou esgoto, possuindo rotores semi-abertos ou abertos e potências mínimas para reduzir a possibilidade de eventuais trancamentos devido à incrustação de biofilme microbiano nos rotores.

A alternância de módulos é uma excelente estratégia para aumento da longevidade de filtros, uma vez que permite que parte dos sólidos retidos nos poros do material filtrante se mineralize e, assim, aumente o número de vazios entre os grãos. E, como sabido, os *wetlands* construídos são também filtros, sendo então recomendada a alternância entre módulos.

Deve-se, porém, conceber intervalos de alternância que sejam espaçados de forma que permita uma mineralização da parte orgânica dos sólidos retidos no processo de filtragem do maciço filtrante, mas que não comprometa as plantas e, principalmente, a biota microbiana estabelecida dentro dos *wetlands* construídos. Estudos

mostram que períodos de até 30 dias de alternância não comprometem a ação dos microrganismos, uma vez que após reintroduzido esgoto nos *wetlands* construídos, o retorno de sua atividade é quase que imediato.

A alternância de módulos deve ser prevista desde o momento de concepção do projeto, de forma que a área superficial seja dividida em dois ou mais módulos com sistemas de distribuição e coleta individuais. A alternância pode ser feita de forma manual, com a abertura e fechamento de registros para alimentação de alguns módulos enquanto outros descansam, ou pode ser feita de forma automática, com uso de válvulas solenoides temporizadas de acordo com o tempo de alternância, por exemplo.

No caso da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD, na UFSC, a intermitência foi realizada com o uso de bombas centrífugas para águas servidas associadas a temporizadores digitais (Figura 20). A aplicação de esgoto possuiu duração aproximada de 2 minutos. Esta duração foi determinada a fim de que se atingisse a carga de projeto prevista.

Figura 20 – Foto ilustrativa do conjunto bomba-timer responsável pela aplicação de esgoto no sistema híbrido do GESAD/UFSC.

A alternância de módulos foi realizada de forma virtual, uma vez que havia somente uma unidade de *wetlands* construídos. Assim, utilizaram-se também os temporizadores digitais para que as bombas fossem acionadas periodicamente e que

permanecessem desligadas em períodos subsequentes. Foi estabelecido um período de alternância de metade da semana em operação e metade da semana em repouso, uma vez que este período foi o que apresentou melhores resultados de desempenho.

Outro aspecto importante em relação ao regime hidráulico é o monitoramento das vazões de entrada e de saída dos *wetlands* construídos. A aferição de vazão de entrada é importante para verificar se a carga e taxa hidráulica de projeto estão sendo mantidas durante a operação.

O controle de vazão de entrada pode ser feito de diversas formas, de acordo com especificidades de cada sistema de tratamento. É possível a inserção de sensores eletromagnéticos ou hidrômetros em casos onde a tubulação de distribuição esteja pressurizada, ou em outras palavras, em casos onde a aplicação é feita com uso de conjuntos moto-bombas ou que haja uma carga hidráulica significativa sob a tubulação de forma que ela se comporte como um conduto forçado. Pode-se, também, utilizar *dataloggers* que aferem o tempo de acionamento das moto-bombas ou sensores que registrem a frequência que os níveis máximos e mínimos de um poço de recalque antes do *wetland* construído sejam alcançados durante um dia, por exemplo.

Também, de uma forma mais simples, pode-se aferir a vazão aplicada de forma manual, com a utilização de proveta e cronômetro. Para tal, é necessário criar uma derivação da tubulação de distribuição para um ponto onde seja possível cronometrar o tempo de enchimento de um recipiente de volume conhecido. Este foi o método utilizado na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC (Figura 21). Devido ao fato da vazão ser relativamente alta, foi necessária a utilização de um proveta com volume grande o suficiente para permitir que o tempo de enchimento não fosse muito pequeno, e assim, permitir um maior grau de certeza na aferição de vazão. Para isso, adaptou-se uma bombona de 40 L como reservatório de forma que quando o volume conhecido fosse atingido, o nível dentro da bombona extravasasse por uma tubulação de acrílico transparente, facilitando a leitura do nível máximo atingido. A frequência de aferição de vazão aplicada na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC foi semanal.

Figura 21 – Fotos ilustrativas dos aparatos para medição de vazão aplicada na estação experimental de wetlands construídos do GESAD/UFSC.

Onde: Foto da esquerda apresenta o detalhe do nivelamento e registros para aferição da vazão. Foto da direita apresenta uma exemplificação de aferição e leitura na tubulação de acrílico transparente.

Para contabilização de todas as aplicações de esgoto nos *wetlands* construídos, foi também inserido um sistema eletrônico que contabilizou a quantidade e a duração de acionamento dos conjuntos moto-bombas responsáveis pela aplicação de esgoto nos *wetlands* construídos (Figura 22). Dessa forma, foi possível ter o registro contínuo do volume total aplicado de esgoto em cada sistema de *wetlands* construídos. O sistema eletrônico consiste de um *datalogger* que registra a data e duração dos momentos de acionamento do conjunto moto-bomba. Ao acioná-la, a corrente elétrica que circula pela moto-bomba é direcionada ao sistema eletrônico, que inicia a contagem de tempo. Quando a moto-bomba é desativada, a corrente elétrica no *datalogger* cessa, parando a contagem de tempo do pulso. Os sistemas eletrônicos também contabilizam o número de acionamentos diários, zerando a cada transição do dia (23:59:59 a 00:00:00).

Figura 22 – Foto ilustrativa do equipamento *datalogger* para registro de acionamento da bomba implantado na estação experimental de wetlands construídos do GESAD/UFSC.

Outro local importante para aferição de vazão é na saída dos *wetlands* construídos. Uma característica dos *wetlands* construídos é que os mesmos são sistemas abertos de tratamento de esgotos. Em outras palavras, isto quer dizer que fatores externos como a chuva, temperatura do ar, insolação solar, ventos e atividade das plantas, influenciam no comportamento do sistema. E, para o aspecto de regime hidráulico, ou mais especificamente, para o controle de massa de água no sistema, o mesmo se aplica. Além da chuva modificar a quantidade de água que passa pelo *wetland* construído, a evapotranspiração das plantas também o modifica.

A evapotranspiração das plantas, quantidade de água que as plantas utilizam para suas atividades metabólicas, associado da transpiração do solo, pode diminuir a quantidade de água que sai do *wetland* construído. Dessa forma, para quantificação da carga poluidora removida em um *wetland* construído, deve-se considerar também a quantidade de água removida nesse processo.

A aferição da vazão de saída nos *wetlands* construídos deve ser realizada por método que não dependa de pressão em condutos forçados, uma vez que a tendência é que o sistema de *wetlands* construídos amortize as vazões aplicadas, fazendo com que métodos como sensores eletromagnéticos ou hidrômetros tenham sua precisão reduzida. Assim, o método convencional de medição de vazão por volume e tempo é recomendado.

Uma forma de automatizar a medição de saída é a conciliação de um sistema de básculas com sensores eletrônicos. Na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC este método foi utilizado.

O equipamento basculante foi posicionado na saída de cada *wetland* construído. Seu funcionamento se dá da seguinte forma: os aparatos acumulam o esgoto tratado até um volume calibrado e, após atingí-lo, os equipamentos basculam e derramam o líquido, retornando instantaneamente para sua posição inicial (Figura 23). Destaca-se que se deve prever um volume morto que previne perda de volume de efluente durante a basculada.

Figura 23 – Fotos ilustrativas das posições de medição do equipamento basculante para aferição de volume de saída do WCVD implantados na estação experimental de wetlands construídos do GESAD/UFSC.

Onde: Foto a esquerda destaca a posição de enchimento até o volume calibrado. Foto a direita destaca a posição de esvaziamento.

Para registro contínuo do volume de saída, contadores digitais foram acoplados aos equipamentos volumétricos basculantes. Os mesmos consistem em dois sensores magnéticos situados nas posições de acúmulo e de esvaziamento do equipamento basculante, além de *dataloggers*.

Um imã foi acoplado ao contrapeso do equipamento basculante de forma que, ao realizar o movimento de esvaziamento, ele passa pelos dois sensores. Quando isto

ocorre, um sinal é enviado aos *dataloggers*. Os *dataloggers* registram, então, a data e hora de cada basculada.

Além do registro do tempo de cada basculada, o sistema eletrônico também contabiliza de forma contínua o número de cada uma. Esta aferição se dá em termos diários, ou seja, acumulando o volume de saída até o fim do dia (23:59:59). Ao se passar o dia (00:00:00), a contagem reinicia de zero. Dessa forma, é possível conhecer o volume total de saída de água do *wetland* construído e assim, estimar a evapotranspiração.

Outra análise que é possível ser feita com esse tipo de medição na saída do *wetland* construído, é o comportamento da vazão de saída ao longo da operação. A observação de como a vazão de saída varia ao longo da operação pode fornecer indícios de estágios de colmatação e crescimento do sistema de raízes das plantas. A diminuição das vazões de pico de saída e o aumento de tempo necessário para que as mesmas sejam atingidas, são resultados esperados de sistemas que estão amadurecendo em termos de crescimento de raízes ou que estejam apresentando indícios iniciais de colmatação (entupimento) de seu maciço filtrante.

Por fim, apesar de grande valor para compreensão e aferição do real desempenho dos *wetlands* construídos em termos de remoção de poluentes, o controle estrito dos volumes de saída do *wetland* construído não é essencial para a operação do sistema de *wetlands* construídos em situações onde não haja interesse científico ou educacional.

7.2 Manejo das macrófitas

O manejo das macrófitas é importante para que as mesmas tenham um desempenho ótimo na remoção de poluentes em *wetlands* construídos. Há, basicamente, 2 fatores a serem observados para o manejo das macrófitas: a poda regular e o controle de pragas.

A poda das macrófitas consiste na remoção de uma fração da parte aérea das plantas em todo o *wetland* construído. A poda tem como principal objetivo fornecer um estímulo de crescimento das plantas e, consequentemente, proporcionar uma maior remoção de poluentes por meio da fitoextração.

Em relação à poda, dois pontos devem ser observados. A frequência de poda e a forma como a poda deve ser realizada. A frequência de poda deve ponderar tempo

hábil para que a planta possa crescer e acumular nutrientes em seu tecido foliar e o tempo limite quando elas entram em processo de senescência, ou em outras palavras, quando começam a secar e morrer. A partir deste ponto, a capacidade de fitoextração, ou de remover poluentes pelas raízes para seu crescimento, diminui drasticamente. A realização de poda, então, deve ser realizada para estimular o crescimento da planta e assim, aumentar a fitoextração.

Não há um valor de frequência absoluto para a realização de poda. Deve-se sempre observar o sistema e verificar o estado das plantas. As macrófitas são altamente influenciáveis pelas temperaturas, regime de alimentação e eventuais pragas.

Na estação experimental do GESAD, na UFSC, a frequência de poda foi trimestral para todos os *wetlands* construídos, com exceção da primeira poda que foi realizada após 188 dias do transplantio. Na Figura 24 é ilustrado o procedimento de poda realizado nos *wetlands* construídos da estação experimental do GESAD, na UFSC.

Figura 24 – Fotos ilustrativas da primeira poda das macrófitas nos três WC implantados na estação experimental do GESAD/UFSC, realizada no período de 188 dias após o transplantio.

Em relação à forma da poda, ela deve retirar boa parte do tecido foliar, sem, porém, eliminar por completo a parte aérea da macrófita. Caso o último ponto aconteça, isso pode prejudicar a capacidade da macrófita se recuperar, levando-a a morte. Recomenda-se, também, que o corte das folhas seja feito de forma inclinada para evitar o acúmulo de água de chuva no caule da planta e impedir seu crescimento.

Na estação experimental do GESAD, na UFSC, as macrófitas foram podadas a uma distância de 40 cm da superfície dos *wetlands* construídos (Figura 25).

O controle de pragas deve ser feito para que não ocorra comprometimento das macrófitas. Este controle deve ser visual, sempre verificando se as plantas apresentam folhas tenras e sem sinais de patologias (doenças) relacionadas. No caso de verificação de praga, deve-se utilizar antídotos anti-pragas de preferência naturais para evitar contaminação com compostos de difícil degradação. Em casos avançados de praga, pode ser necessária a realização de uma poda excepcional e o replantio de plantas novas.

Figura 25 – Fotos ilustrativas detalhando o corte inclinado realizado durante a poda nos WC implantados na estação experimental do GESAD/UFSC.

Onde: Foto a esquerda apresenta as macrófitas antes da poda. Foto a direita apresenta a macrófita após a poda.

No caso da estação experimental da UFSC, um caso severo de infestação de afídeos (popularmente conhecidos como pulgões) ocorreu (Figura 26). As macrófitas da

espécie taboa foram fortemente impactadas e uma poda excepcional foi necessária. Para eliminação completa dos pulgões, utilizou-se uma solução de fumo em corda para eliminação da praga, que se deu de forma bem-sucedida.

Figura 26 – Fotos ilustrativas da infestação de pulgões nas macrófitas presentes nos *wetlands* construídos implantados na estação experimental do GESAD/UFSC.

Outra prática que foi realizada na estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD, na UFSC, foi o controle de espécies invasoras. De forma periódica, os *wetlands* construídos foram monitorados visualmente e plantas invasoras, ou seja, plantas de outras espécies que a avaliada na estação experimental, eram retiradas manualmente.

Isto ocorreu pelo fato da estação possuir objetivos científicos, em específico, de compreender o papel da macrófita *Typha domingensis*, popularmente conhecida como taboa na remoção de poluentes nas modalidades de *wetlands* construídos.

Contudo, em termos de eficiência de remoção de poluentes, a pluralidade de espécies de plantas nos *wetlands* construídos não implica a perda de desempenho. Assim, não é imprescindível o controle de espécies invasoras em casos onde o objetivo maior do *wetland* construído é somente tratar o esgoto, desde que elas não comprometam de forma efetiva o desenvolvimento da(s) macrófita(s) escolhida(s).

7.3 Monitoramento do desempenho

Por fim, após atentar para todos os aspectos de operação e manutenção dos *wetlands* construídos, deve-se avaliar propriamente o quanto de poluentes os *wetlands* construídos estão removendo. Esta aferição é feita por meio do monitoramento de desempenho que consiste na coleta e análise de qualidade de águas de forma periódica de amostras afluente (da entrada) e efluente (da saída) dos *wetlands* construídos.

A amostragem deve ser realizada com uso de frascos limpos e de tamanho suficiente para análise laboratorial. Por se tratar de esgoto, o operador deve sempre estar com luvas e demais equipamentos de proteção individual. No momento da coleta, o frasco deve ser enxaguado com o esgoto a ser analisado, pelo menos duas vezes, descartar o líquido, para então, coletar a amostra propriamente dita que será encaminhada para o laboratório de análises. Após a coleta, o frasco deve ser bem fechado e preferencialmente limpo em sua parte externa para minimizar eventuais riscos de contaminação por manuseio sem luvas.

A análise de qualidade deve ser realizada preferencialmente imediatamente após a coleta. Caso isto não seja possível, deve-se armazenar as amostras em local refrigerado e com abrigo da luz, como dentro de uma caixa de isopor ou em uma geladeira. Relembra-se que as amostras tiveram contato com esgoto, assim, não se deve utilizar equipamentos que tenham outros usos para estocar as amostras, uma vez que pode haver contaminação das amostras. Para condução das análises, deve-se seguir metodologias consolidadas de análise de parâmetros de qualidade da água, como as determinadas na *Wastewater analysis - Standard Methods* pela *American Public Health Association* (APHA).

Na Figura é exemplificado os frascos e amostras de esgoto bruto, após tanque séptico, após WCVD e após WCH do sistema híbrido da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD/UFSC.

Figura 27 – Fotos ilustrativas de amostras de esgoto afluente e efluente ao sistema híbrido da estação experimental do GESAD/UFSC.

Onde: Da esquerda para a direita: Esgoto Bruto, Pós-TS, Pós-WCVD, Pós-WH.

De forma geral, para avaliação do desempenho de sistemas de tratamento de esgoto, são monitorados os parâmetros relacionados com a matéria orgânica carbonácea, nutrientes e organismos patogênicos. Os parâmetros associados com a matéria orgânica são a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO), enquanto que, para os nutrientes, geralmente monitoram-se frações nitrogenadas (nitrogênio total, amônia, nitrito e nitrato) e fósforo. Por fim, referente aos organismos patogênicos, normalmente utilizam-se com indicadores os coliformes totais e fecais. Além destes parâmetros, o pH e alcalinidade também são monitorados.

8 CUSTOS ASSOCIADOS

Uma questão fundamental para adoção ou não de uma solução tecnológica para o tratamento de esgotos é o custo financeiro associado a ela. Dessa forma, a análise de custos para implantação e operação de sistemas tipo *wetlands* construídos também deve ser realizada antes da definição de sua adoção ou não.

Discutir e definir custos para construção e operação de qualquer sistema é passível de grandes incertezas em virtude das características específicas de cada localidade. No caso de *wetlands* construídos, especificidades locais podem fazer variar de forma significativa o custo associado para sua implementação e operação. Além disso, não somente as especificidades locais, mas também as de projeto, podem fazer os custos de um determinado projeto aumentarem ou diminuírem de forma considerável.

Alguns aspectos que podem fazer o custo variar grandemente são:

- Disponibilidade de material filtrante adequado na região;
- Disponibilidade de mão de obra e maquinário para execução do sistema;
- Disponibilidade de macrófitas para transplantio na região;
- Especificidades do local a ser implantado o *wetland* construído, como área disponível, valor por m^2 da área disponível, nível do lençol freático, presença ou não de eletricidade, entre outros;
- Concepções de projeto, como tipo de estrutura (erguida ou escavada), tipo de impermeabilização, necessidade de conjuntos moto-bombas, entre outros;
- Escala do *wetland* construído, seja para tratar o esgoto gerado para uma residência, um conjunto habitacional ou até mesmo para pequenos municípios.

Dessa forma, fornecer um único valor ou até mesmo uma estimativa de custo para implantação de um *wetland* construído pode resultar em expectativas falaciosas,

visto que há uma grande variabilidade de custos de localidade para localidade. Contudo, é possível exemplificar os custos de um sistema com a apresentação de um estudo de caso.

No caso da estação experimental de *wetlands* construídos do GESAD, na UFSC, houve um controle financeiro do total gasto para construção e para manutenção. Cabe ressaltar que a estação experimental de *wetlands* construídos possui duas linhas de tratamento em escala real (sistema híbrido e sistema WCV-FS), além de possuir objetivos científicos e educacionais, o que se difere do caso comum de adoção de *wetlands* construídos para o simples tratamento do esgoto gerado. Dessa forma, as particularidades da construção de ambos os sistemas elevou o custo quando comparado com o esperado em situações de adoção da tecnologia unicamente para tratamento de esgotos.

Levando estes pontos em consideração, o levantamento de materiais, serviços e custos associados para a execução de ambos sistemas híbrido e WCV-FS totalizou o valor de R$ 31.000,00.

Considerando que cada arranjo tecnológico foi dimensionado para uma população equivalente de 5 pessoas e que a soma das áreas superficiais das unidades *wetlands* totalizam aproximadamente 31 m^2, tem-se uma relação de custo de implantação R$ 1.000,00 reais por m^2.

Relembrando ainda a particularidade da operação proposta na ETE GESAD/UFSC, com alternância de módulos ou períodos de descanso, destaca-se que o total construído para ambos os arranjos tecnológicos 1 e 2 seria de aproximadamente 62 m^2. Dessa forma, o custo absoluto para implantação do sistema seria de aproximadamente R$ 63.500,00, desconsiderando possíveis economias em escala.

Por fim, destaca-se que as duas modalidades de *wetlands* construídos mostram-se capazes de aumento de carga, visto o desempenho de remoção de poluentes para até 15 pessoas equivalente, o que diminuiria o custo unitário de implantação.

Em relação aos custos operacionais, ao longo de dois anos de operação, um total de R$ 36.400,00 foram gastos com serviços de manutenção de tubulações, de conjuntos moto-bombas, estruturas de madeiras, controle anti-pragas, dentre

outros. Em termos relativizados para o período mensal e para a população atendida, o custo unitário foi igual a R$ 152,00 reais por pessoa^{-1}, conforme equação abaixo.

$$Custo\ unitário_{operação} = \frac{R\$36.400{,}00}{24\ meses \times 10\ pessoas} \cong R\$152\ /_{mês.pessoa}$$

Destaca-se que este elevado custo operacional per capita está relacionado às inúmeras intervenções operacionais diárias que garantiram a qualidade das informações científicas geradas. Ou seja, em escala real e sob uma operação rotineira e convencional de ETE, poder-se-ia ter redução nestes custos operacionais, necessitando-se assim, de levantamentos de dados continuados junto aos futuros sistemas *wetlands* a serem fomentados, para que se tenha um panorama mais fidedigno e direto em relação aos custos operacionais anuais.

9 DESEMPENHO GLOBAL

Baseado nas condições de contorno que os WC operaram na estação experimental do GESAD/UFSC, as quais são definidas pelos carregamentos orgânicos e inorgânicos e hidráulicos aplicados na área superficial dos WC (Figura 28), obteve-se para os primeiros 2 anos de operação um elevado desempenho de tratamento de esgoto sanitário (Figura 29), o que comprova a aplicabilidade de diferentes modalidades de *wetlands* construídos como alternativas tecnológicas para comporem o arcabouço de opções na busca da universalização do saneamento no Brasil.

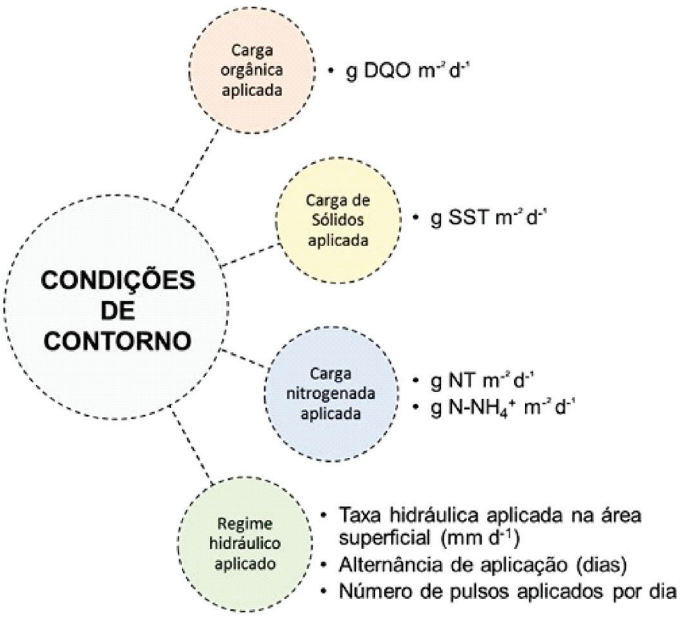

Figura 28 – Esquema representativo das condições de contorno associado as variantes operacionais dos *wetlands* construídos avaliados junto a estação experimental do GESAD/UFSC.

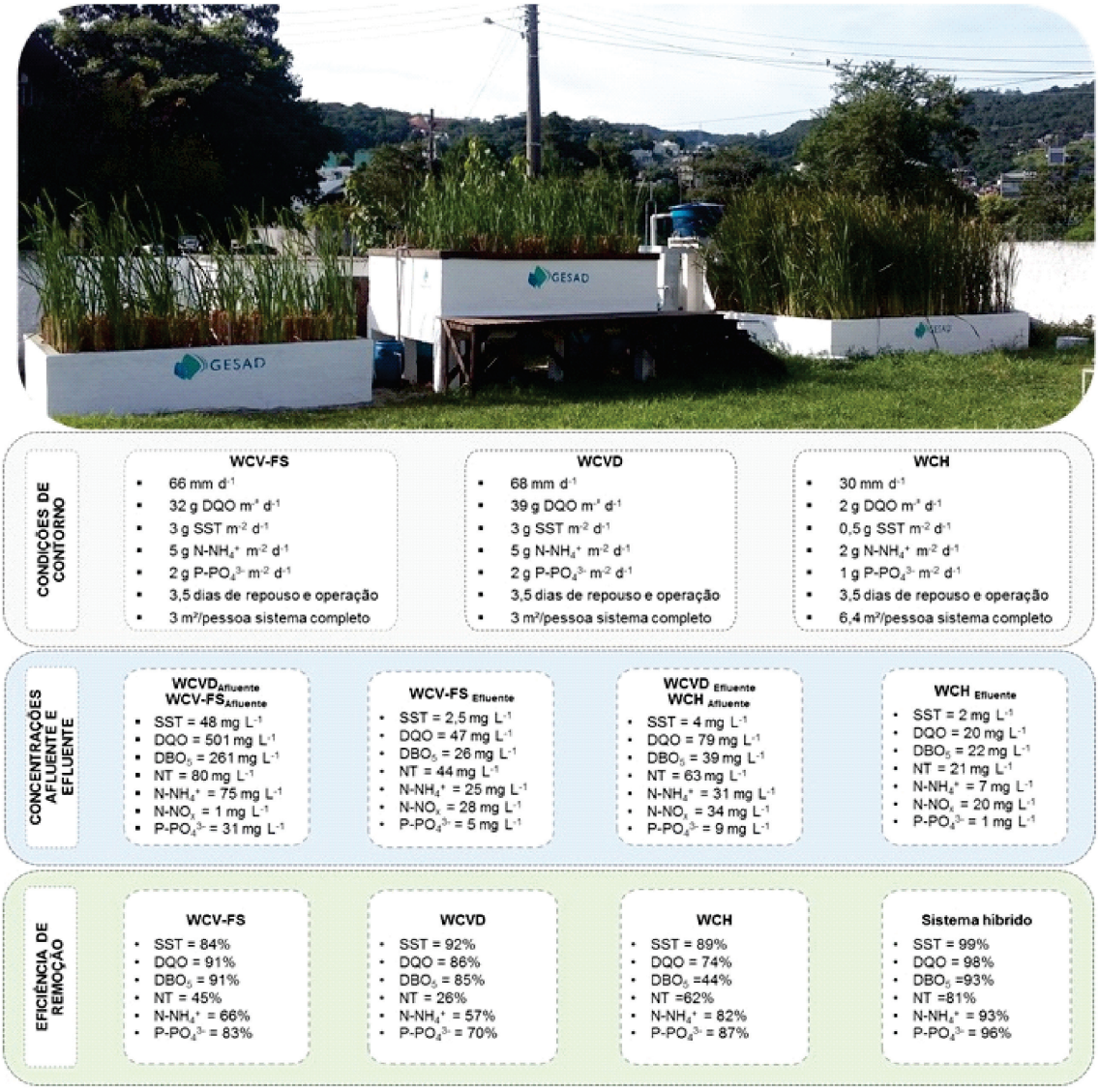

Figura 29 – Desempenho de tratamento associado as condições de contorno dos *wetlands* construídos avaliados durante os dois primeiros anos de monitoramento junto a estação experimental do GESAD/UFSC.

SUGESTÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7229:** Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro. 1993, 15p.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. de. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** v. 13, n. 3, p. 323-328, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.969:** Tanques sépticos – unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação. Rio de Janeiro. 1997, 60p.

DOTRO, G., LANGERGRABER, G., MOLLE, P., NIVALA, J., PUIGAGUT, J., STEIN, O., VON SPERLING, M., 2017. Treatment Wetlands. **IWA Publishing,** 154 p. Disponível *on line* em: https://www.iwapublishing.com/books/book-series/biological-wastewater-treatment-series

HOFFMANN, H.; PLATZER, C.; WINKER, M.; VON MUENCH, E. **Technology Review of Constructed Wetlands: Subsurface Flow Constructed Flow Constructed Wetlands for Greywater and Domestic Wastewater Treatment.** Deutsch Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, Eschborn, 2011, 35p.

PHILIPPI, L. S.; SEZERINO, P. H. **Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias:** utilização de filtros plantados com macrófitas. Ed. do Autor. Florianópolis, 2004, 144p.

PLATZER, C. Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. **Water Science and Technology,** v. 40, n. 3, p. 257-263, 1999.

SEZERINO, P.H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas constructed wetlands no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical.** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível on line em: http://www.tede.ufsc.br/teses/PGEA0245.pdf

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** v.2. Belo Horizonte, MG. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 1996. 211p.

ISBN: 978-85-8388-127-8