

**AVALIAÇÃO DO *START UP* DE WETLAND
CONSTRUÍDO VERTICAL DESCENDENTE COM
FUNDO SATURADO EMPREGADO NO
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Monique Nunes de Freitas

Orientador: Dr. Pablo Heleno Sezerino

2015/2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO *START UP* DE WETLAND
CONSTRUÍDO VERTICAL DESCENDENTE COM FUNDO
SATURADO EMPREGADO NO TRATAMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO**

MONIQUE NUNES DE FREITAS

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para
Conclusão do Curso de graduação
em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Heleno
Sezerino

FLORIANÓPOLIS - SC
DEZEMBRO/2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Freitas, Monique

Avaliação do start up de wetland construído vertical descendente com fundo saturado empregado no tratamento de esgoto sanitário / Monique Freitas ; orientador, Pablo Heleno Sezerino - Florianópolis, SC, 2015.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Tratamento descentralizado de esgoto. 3. Start up. 4. Wetland construído vertical descendente com fundo saturado. 5. Requerimento operacional. I. Heleno Sezerino, Pablo . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

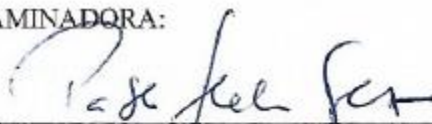
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO *START UP* DE WETLAND
CONSTRUÍDO VERTICAL DESCENDENTE COM FUNDO
SATURADO EMPREGADO NO TRATAMENTO DE ESGOTO
SANITÁRIO**

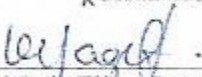
MONIQUE NUNES DE FREITAS

Trabalho submetido à Banca
Examinadora como parte dos
requisitos para conclusão do curso de
graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental – TCC II

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr
(Orientador)



Prof.ª Maria Eliza Nagel Hassemer, Drª
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Luiz Sérgio Philippi, Dr
(Membro da Banca Examinadora)

FLORIANÓPOLIS – SC
DEZEMBRO/2015

Àqueles que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade: meus pais.

AGRADECIMENTOS

No decorrer de tão longa caminhada, não me faltam pessoas especiais que me auxiliaram a trilhar este caminho da conquista do diploma.

Com imensa gratidão, agradeço aos meus pais Marta e Marcus, que nos momentos difíceis estiveram ao meu lado com seu amor incondicional, dando-me forças e incentivando-me tanto emocionalmente como financeiramente a prosseguir na jornada acadêmica.

Agradeço ao meu namorado Cássio Marcos que, como grande companheiro, esteve muito presente a cada esforço e conquista. Impossível não mencionar o apoio da empresa Cheesecake Labs, que nos tempos de greve da UFSC acolheu meu desamparo de BU e RU, proporcionando-me espaço físico para estudar, almoçar e praticar yoga.

À minha família, em especial à minha dinda Carol pelo apoio.

Aos meus amigos por cada risada que fizeram meu dia mais feliz, especialmente ao Daniel Linhares, que mesmo milhas de distância, esteve muito presente dedicando seu tempo para me auxiliar.

Ao meu orientador professor Dr. Pablo pela paciência, disponibilidade e por ter aberto as portas do GESAD para mim. Agradeço aos pesquisadores do respectivo grupo, pela parceria e acolhimento neste período de dedicação, em especial às doutorandas Mayara e Catiane.

Ao departamento ENS pela equipe de professores responsáveis pelos conhecimentos por mim adquiridos.

A todos que tiveram sua parcela de contribuição, o meu muito obrigada!

O saber se aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende com a vida e com os humildes.

Cora Corolina

RESUMO

Perante o quadro atual de esgotamento sanitário no Brasil, constata-se a necessidade de implantação de unidades de tratamento de esgoto voltadas para pequenas coletividades. Dentro deste contexto, esta pesquisa objetivou avaliar o desempenho de uma unidade *wetland* construído vertical descendente com fundo saturado (WCVD-FS) no tratamento de esgoto sanitário, durante seu início de operação (fase de *start up*), a fim de aplicá-los como alternativa tecnológica para o tratamento secundário e terciário de esgotos, empregados sob o contexto da descentralização. As unidades pilotos da estação, localizadas na UFSC, foram dimensionadas para tratar uma vazão de esgoto equivalente a 5 habitantes, o fluxo de alimentação do *wetland* é intermitente, com 4 (quatro) pulsos diários, operando com uma vazão média de 590,1 L/d, e taxa hidráulica de 80,8 mm/d. Para o material filtrante, utilizou-se areia grossa com $d_{10} = 0,29$ mm e $d_{60} = 1,16$ mm ($U = 4$). Ao longo de 19 semanas de monitoramento hidráulico e físico-químico, obteve-se valores médios de carregamento de 22 g DBO/m².d, 47,1 g DQO/m².d, 3,9 g SST/m².d e 5,4 g N-NH₄⁺/m².d. Diante das condições operacionais mencionadas, o arranjo tecnológico atingiu ao longo das 19 primeiras semanas de operação, eficiências médias globais de 87% de DQO, 91% de DBO, 86% de P-PO₄³⁻, 96% de SST e 48% de N-NH₄⁺. Sobre as macrófitas, estas tiveram desenvolvimento irregular em virtude da alimentação diferenciada na superfície do *wetland*, em função da disposição da tubulação de distribuição e 7 macrófitas tiveram que ser repostas no período. Observou-se que a ETE requer a atuação de um operador semanalmente, para aferir equipamentos, verificar o nível dos reservatórios, realizar limpeza manual em caso de obstrução da tubulação de alimentação e retirar macrófitas invasoras. Vale destacar que os equipamentos eletrônicos permitem a flexibilização na operação da ETE, para variação de taxas de aplicação hidráulica afluentes.

Palavras-chave: Tratamento descentralizado de esgoto. *Start up*. *Wetland* construído vertical descendente com fundo saturado. Requerimento operacional.

ABSTRACT

Facing the current situation of the sewerage system in Brazil, the need to implement sewage treatment plants aimed at small communities is observed. In this context, this research aims to evaluate the performance of constructed wetlands of vertical flow with a saturated zone to treat sewage during its start-up, in order to use them as an alternative technology for secondary treatment of sewage, employed in the decentralization context. The a pilot sewage treatment system, located at UFSC, were designed to treat a sewage flow equivalent to five (5) inhabitants. The *wetland* operated with an average flow of 590,1 L/d, and a hydraulic rate of 80,8 mm/d, with an average of four daily inputs, operating 3,5 days and not operating for the same period (intermittent flow). Through 19 weeks of hydraulic and physical-chemical monitoring, average values of 22 gBOD / m².d, 47,1 gCOD/m².d, 3,9 gTSS / m².and 5,4 gN-NH₄⁺/m².d were obtained. Under the aforementioned operational conditions, the system reached global average efficiencies 87% of COD, 91% of BOD, 86% of P-PO₄³⁻, 96% TSS, and 48% of N-NH₄⁺. Macrophytes presented irregular development due to the different feed on the wetland surface and the arrangement of the distribution pipe, consequently seven macrophytes had to be replaced in the period. It was observed that the sewer treatment station requires weekly maintenance for the following: equipment monitoring, reservoirs level checking, manual cleaning in case of pipe obstruction, and invasive algae removal. It is worth mentioning that electronic equipment would allow flexibility in the operation, to vary influent hydraulic loading rates.

Keywords: Decentralized wastewater treatment. Start up; Vertical flow constructed *wetlands* with saturated zone. Operational requirement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representando um WCVD	29
Figura 2 - Esquema representando o WCVD-FS.	31
Figura 3 - Mapa de localização da ETE.	40
Figura 4 - Estação Experimental de Tratamento de Esgoto Sanitário Empregando a Ecotecnologia dos <i>Wetlands</i> Construídos, onde A – WCVD-FS, B – WCVD e C – WCH.	41
Figura 5 - Fluxograma do sistema de tratamento.	42
Figura 6 – WCVD-FS com macrófitas recém-plantadas em 02/062015.	43
Figura 7 - Mangote a jusante do sistema (R3).....	43
Figura 8 - Macrófitas recém-extraídas do terreno alagado.....	44
Figura 9 - Curva granulométrica da areia utilizada.	44
Figura 10 - Amostras dos pontos 1, 2 e 3.....	46
Figura 11- a) Bombona 1 para aferição de vazão do WCVD-FS e bombona 2 para aferição do WCVD do sistema híbrido. b) Vista superior da bombona e do nível estabelecido para aferição.	47
Figura 12 - Equipamentos de aferição da estação de bombeamento.	48
Figura 13 - Tubulação de distribuição antes do plantio das macrófitas.	48
Figura 14 - Monitoramento semanal de vazão afluente.	49
Figura 15 - Gráfico <i>box plot</i> , destacando a mediana e valores referentes à 25 – 75% da taxa hidráulica aplicada no WCVD-FS.	50
Figura 16 – Carregamento afluente de DQO em g/m ² .d.	50
Figura 17 - Carregamento afluente de DBO em g/m ² .d.	51
Figura 18 - Carregamento afluente de SST em g/m ² .d.....	51
Figura 19 - Carregamento afluente de N-NH ₄ ⁺ em g/m ² .d.....	52
Figura 20 - Gráfico evolutivo de pH.	55
Figura 21 - Gráfico evolutivo de alcalinidade.....	55
Figura 22 – Gráfico tipo <i>box plot</i> , destacando a mediana e valores referentes à 25 – 75%, discrepantes, não discrepantes e extremos de DQO.	57
Figura 23 - Gráfico tipo <i>box plot</i> , destacando a mediana e valores referentes à 25 – 75%, discrepantes, não discrepantes e extremos de DBO.	58
Figura 24 - Gráfico evolutivo das concentrações de fração nitrogenada.	59
Figura 25 - Gráfico do monitoramento da relação C/N dos pontos afluente e efluente do wetland.....	60
Figura 26 - Gráfico evolutivo das concentrações de ortofosfato.....	61
Figura 27 - Gráfico evolutivo das concentrações de SST.	62

LISTA DE FIGURAS - Continuação

Figura 28 - Tubulação de distribuição.	69
Figura 29 - a) Macrófita readaptada próxima à saída do WC e b) macrófita readaptada próxima à entrada. Ambas após 24 horas de readaptação.	70
Figura 30 - Fotos de acompanhamento das macrófitas.	70
Figura 31 - Fotos de monitoramento das macrófitas.	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre desempenhos de WCVD-FS.....	33
Quadro 2- Comparativo entre o sistema de estudo e outros WCVD-FS.	63
Quadro 3 – Faixas prováveis de remoção dos poluentes, conforme o tipo de tratamento, consideradas em conjunto com tanque séptico (%)......	65
Quadro 4 - Registro do acompanhamento operacional.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processos de remoção de contaminantes em <i>wetlands</i> construídos.	35
Tabela 2 - Parâmetros utilizados para dimensionamento da unidade piloto.	45
Tabela 3 - Metodologia analítica empregada na análise dos parâmetros.	46
Tabela 4 – Valores médios das concentrações dos três pontos de análise.	53
Tabela 5 - Comparativo da eficiência requerida pela legislação vigente com o sistema avaliado.	64
Tabela 6 – Monitoramento das macrófitas.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA – *American Public Health Association*
CETESAN - Central Educacional de Tratamento de Esgoto Sanitário
CP – Caixa de passagem
 d_{10} – Diâmetro referente a 10% do material passante (diâmetro efetivo)
 d_{60} – Diâmetro referente a 60% do material passante
DBO_{5,20} – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
EB – Estação de Bombeamento
ETE – Estação de Tratamento de Esgotos
FUNASA – Fundação Nacional da Saúde
GESAD – Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIMA – Laboratório Integrado de Meio Ambiente
NBR – Norma Brasileira
pH – Potencial Hidrogênionico
PV – Poço de Visita
RBS – Reatores em bateladas sequenciais
R1 – Reservatório elevado de esgoto bruto
R2 – Reservatório de equalização pós-tanque séptico
R3 – Reservatório de efluente do *wetland*
SST – Sólidos Suspensos Totais
U – Coeficiente de Uniformidade
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
WC – *Wetland* Construído
WCH - *Wetland* Construído Horizontal
WCVD – *Wetland* Construído Vertical Descendente
WCVD-FS – *Wetland* Construído Vertical Descendente com Fundo Saturado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVOS	26
2.1	OBJETIVO GERAL	26
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	SISTEMA DESCENTRALIZADO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	27
3.2	<i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	28
3.2.1	<i>Wetland</i> Construído Vertical Descendente - WCVD	29
3.2.2	<i>Wetland</i> Construído Vertical Descendente com Fundo Saturado – WCVD-FS	31
3.3	COMPONENTES ATUANTES	35
3.3.1	Meio Filtrante	36
3.3.2	Macrófitas	36
3.3.3	Micro-organismos	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	LOCAL DA PESQUISA	39
4.2	A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	41
4.3	O WCVD-FS	43
4.3.1	Parâmetros de dimensionamento	45
4.4	MONITORAMENTO DA ESTAÇÃO.....	45
4.4.1	Coleta e análise laboratorial	46
4.4.2	Requerimento operacional	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	VAZÃO E TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA.....	49
5.2	CARGAS ORGÂNICAS	50
5.3	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	52
5.3.1	Atendimento aos parâmetros de lançamento	64
5.4	RESULTADOS OBSERVACIONAIS.....	65
6	CONCLUSÃO	73
6.1	RECOMENDAÇÕES.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

No Brasil ainda é necessário um forte empenho e grande investimento para a universalização do saneamento no país. Segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos (SNIS, 2013), pouco mais da metade dos municípios brasileiros (56,3%) possuíam rede coletora de esgoto sanitário na área urbana em 2013, dados esses similares aos observados na pesquisa anterior, realizada em 2012, que registrava 55,1% (SNIS, 2012). Nas áreas rurais a porcentagem de população atendida é consideravelmente inferior. De acordo com o PNAD (2012) somente 5,2% dos domicílios rurais possuem coleta de esgoto ligada à rede geral e 28,3% possuem fossa séptica ligada ou não à rede coletora.

Deste modo, serviços de esgotamento sanitário, que possam ser disponibilizados sem que haja necessidade de captação deste para um único ponto centralizador de tratamento, podem e devem ser priorizados para pequenos conglomerados urbanos, caracterizando uma descentralização dos serviços, reduzindo assim, custos para o transporte dos esgotos gerados (DEVI; DAHIYA, 2008).

Na literatura o tratamento descentralizado é apresentado na forma coletiva (pequenas comunidades, loteamentos, etc), e na forma individual (residências unifamiliares). Algumas tecnologias são comumente aplicadas no Brasil como os tanques sépticos e filtros anaeróbios, os quais, dentre outras formas de tratamento, são apresentados nas normas NBR 7229/93 e NBR 13969/97 (ABNT, 1993; ABNT, 1997). Cabe salientar que o efluente proveniente de tanque séptico necessita de um tratamento complementar, em virtude de sua qualidade insuficiente para lançamento.

Como tratamento secundário, em muitas situações, há a necessidade de se projetar e implantar unidades que promovam também, o nível de tratamento avançado, ressaltando-se a remoção e transformação de nutrientes presentes nos esgotos (METCALF; EDDY, 2003). À vista disso, alternativas ambientalmente sustentáveis, empregadas sob a óptica da descentralização, são apontadas na literatura, salientando-se a utilização de sistemas naturais para o tratamento de esgoto (LENS *et al.*, 2001; SEZERINO *et al.*, 2004).

Dentre elas destacam-se os *wetlands* construídos, também conhecidos na literatura nacional como filtros plantados com macrófitas ou sistemas de tratamento por zona de raízes. Estes são considerados uma ecotecnologia empregada no tratamento de água residuária, utilizando-se de macrófitas aquáticas, das propriedades do solo e do

meio filtrante para alcançar suficientes remoções de matéria orgânica, nutrientes e patógenos.

O presente trabalho trata da avaliação do desempenho de uma unidade *wetland* construído vertical descendente com fundo saturado, no tratamento de esgoto sanitário, durante seu início de operação (fase de *start up*).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o *start up* de uma unidade *wetland* construído vertical descendente com fundo saturado (WCVD-FS) no tratamento de esgoto sanitário.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a eficiência de remoção de matéria orgânica carbonácea, sólidos suspensos e nutrientes;
- Avaliar a demanda de requerimento operacional do sistema de tratamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SISTEMA DESCENTRALIZADO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

O esgotamento sanitário conta com basicamente duas variantes: o sistema individual ou estático e o sistema coletivo ou dinâmico (VON SPERLING, 2005). O sistema individual para tratamento descentralizado segundo Hoffman *et al.* (2004 *apud* Lanzer; Wolff, 2005), é utilizado em pequenas unidades de tratamento de esgoto, que visam solucionar o problema com custos reduzidos.

Baseando-se na topologia de Larsen *et al.* (2013) para a infraestrutura de saneamento básico, os sistemas de tratamento de esgoto descentralizados podem ser enquadrados como sistemas autônomos utilizados para tratamento de pequenas vazões, tais como, residências, condomínios, construções isoladas e pequenas comunidades, nas quais, os efluentes podem ser tratados no local ou em outras unidades.

Segundo Philippi (1997), a problemática do saneamento descentralizado insere-se no campo da abordagem do planejamento e gestão urbana participativa, onde a comunidade produz ações rotineiras de saneamento, visando: a racionalização do uso dos recursos públicos, humanos e naturais; a ativação de capacidades ociosas disponíveis nas comunidades; e o incentivo à criatividade social voltada para a formação e adoção de tecnologias apropriadas às condições específicas da comunidade.

Dentre as tecnologias para atendimento das condições específicas do local e recursos financeiros das comunidades isoladas incluem-se as fossas sépticas, sistemas de infiltração e lagoas de estabilização em combinação com *wetlands* construídos (NHAPI, 2004).

A NBR 7229/93 (ABNT, 1993) apresenta os critérios para projeto, construção e operação adequados para tanque sépticos e é complementada pela NBR 13696/97 (ABNT, 1997). A última foi elaborada com o objetivo de ampliar e detalhar as alternativas técnicas viáveis ao tratamento complementar e disposição final de tanques sépticos.

O tratamento em tanques sépticos envolvem mecanismos físicos e biológicos de sedimentação e digestão anaeróbica, respectivamente. O aumento dos resíduos desta digestão e a velocidade em que esse processo ocorre regulam a taxa de acumulação, a qual determinará a frequência de limpeza do tanque séptico (PHLIPPI, 1993).

As normas técnicas são uma recomendação e não impedem a utilização de outros processos mais compactos, econômicos e eficientes. Como a incorporação de tanque anaeróbio em substituição ao tanque séptico; reator biológico o qual faz uso da membrana filtrante para obtenção direta do efluente para reuso; sistema incorporando aproveitamento de biogás; sistema de desinfecção por ultravioleta compacto, entre outros, desde que devidamente comprovados (ABNT, 1997).

Não obstante, diversas tecnologias de tratamento não normatizadas vêm sendo utilizadas em sistemas descentralizados tais como *wetlands* construídos (WC) e reatores em bateladas sequenciais (RBS). Com relação aos WC, estes reproduzem as condições ótimas de tratamento que ocorrem em *wetlands* naturais, mas possuem a flexibilidade de serem construídos em quase todas as localidades e de poderem ser usados para o tratamento de diversos tipos de efluentes, tais como, esgotos domésticos a níveis secundários e terciários, efluentes industriais e agroindustriais, líquidos percolados de aterros sanitários, efluente de drenagem ácida de mina e enxurradas (IWA, 2000).

3.2 WETLANDS CONSTRUÍDOS

Wetlands construídos (WC) são uma ecotecnologia empregada no tratamento de águas residuárias que objetivam simular as condições ideais de um *wetland* natural, utilizando-se de macrófitas aquáticas, das propriedades do solo e dos micro-organismos (TREIN *et al.*, 2015).

As vantagens do sistema estão em torno da flexibilidade quanto à escolha do local de implantação, às condições de otimização da eficiência de remoção de matéria orgânica e de nutrientes, ao maior controle sobre as variáveis hidráulicas e à maior facilidade quanto ao manejo da vegetação (KADLEC; KNIGHT, 1996).

Quanto à classificação, os WC são classificados, de acordo com a literatura, em dois grandes grupos, chamados sistemas de lâmina livre ou de escoamento superficial e sistemas de escoamento subsuperficial. Subdivisões dentro destes grupos foram propostas pelos pesquisadores, com o propósito de relacionar às finalidades de usos, ou seja, diferentes configurações e princípios de funcionamento foram associados aos objetivos como redução de matéria carbonácea, nitrificação, retenção/remoção de fósforo, entre outros (PHILIPPI; SEZERINO, 2004).

Os WC de escoamento subsuperficial são dimensionados a fim de proporcionar a percolação do efluente no material filtrante,

diferentemente dos módulos de escoamento superficial, os quais, não possuem um material filtrante, permanecendo uma lâmina de água na superfície.

Para os WC de escoamento subsuperficial existe uma subclassificação quanto ao sentido do seu escoamento hidráulico, como sendo horizontal, vertical com ciclos de enchimento e drenagem, vertical ascendente e vertical descendente (FONDER; HEADLEY, 2013).

A seguir, descreve-se com mais detalhes o sistema de *Wetland* Construído Vertical Descendente (WCVD), em virtude de contemplar o objeto de estudo deste trabalho.

3.2.1 *Wetland* Construído Vertical Descendente - WCVD

Dos arranjos tecnológicos que possibilitam o tratamento complementar, os WCVD destacam-se por serem uma tecnologia que envolve processos naturais de depuração do esgoto, por serem sistemas tecnicamente simples de operar e manter, além de apresentarem-se acessíveis às diversas situações de aplicação (HOFFMANN; WINKER, 2011).

Nos WCVD a alimentação do esgoto é realizada de forma intermitente, percolando verticalmente ao longo de todo perfil e a coleta é realizada ao fundo pelo sistema de drenagem. Conforme Hoffmann e Winker (2011), esta concepção demanda menor área em relação aos WC horizontais. A Figura 1 apresenta um esquema do WCVD.

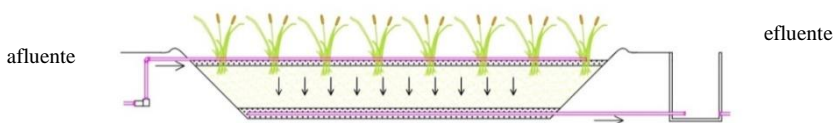


Figura 1 – Esquema representando um WCVD

Fonte: Acervo GESAD.

Quando todo o esgoto já foi drenado após a alimentação, o leito filtrante livre permite a reentrada de ar no leito. Na próxima alimentação, nova quantidade de oxigênio é introduzida dentro da unidade devido à alimentação intermitente, resultando em uma maior transferência de oxigênio. Esta transferência de oxigênio permite a decomposição da matéria orgânica e nitrificação do nitrogênio amoniacal (IWA, 2000).

O processo de desnitrificação ocorre parcialmente em *wetlands* de fluxo vertical. Como observou Paing & Voisin (2005) *apud* Prigent

(2013), no clássico modelo francês¹ de *wetland* vertical, uma elevada taxa de nitrificação com remoção de 90% de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), e o não atendimento às expectativas no processo de desnitrificação, com uma remoção de 20% de nitrogênio total.

Philippi e Sezerino (2004) e Hoffmann e Winker (2011), pontuaram alguns fatores relevantes para se levar em conta em um projeto de WCVD:

- Produzir um leito que permita a passagem de águas residuárias, a fim de manter o líquido tempo suficiente em contato com as bactérias para permitir seu crescimento no meio e alcançar o tratamento requerido;
- Fornecer área superficial suficiente para permitir a transferência de oxigênio e crescimento das bactérias;
- A superfície deve ser plana e horizontal impedindo a distribuição desigual;
- A borda livre para acumulação de água na superfície deve ser de pelo menos 15 cm;
- A camada de areia deve ser de pelo menos 50 cm;
- A tubulação de drenagem localizada na camada inferior do filtro deve ser envolvida por uma camada de 20 cm de cascalho;
- A inclinação inferior em direção à saída deve ser de 0,5 a 1%;
- A seleção correta dos materiais é fundamental;
- É indispensável a impermeabilização das paredes laterais e do fundo do sistema; e
- Manutenção periódica.

Conforme Hoffmann e Winker (2011), os WCVD necessitam de mais operação e manutenção que os de fluxo horizontal, isto posto, recomenda as seguintes atividades de operação e manutenção que se devem realizar para *wetlands* verticais:

- É importante a distribuição do efluente pré-tratado em toda a superfície, que deve ser especialmente controlado;
- Os intervalos de alimentação têm de ser controlados por um sistema automático de bombas ou sifões;

¹ O clássico *wetland* construído francês concebido para pequenas comunidades (casos de 200 a 2000 habitantes) consiste tratamento do esgoto bruto em duas etapas em série, a primeira etapa utilizando-se WCVD com brita como meio filtrante e a segunda utilizando-se WCVD com areia como meio filtrante (MOLLE *et al.*, 2005)

- Em caso de obstrução, devem-se tomar ações imediatas. A recuperação pode ser realizada através de um período de descanso que varia de acordo com o clima do local;

3.2.2 *Wetland* Construído Vertical Descendente com Fundo Saturado – WCVD-FS

Algumas estratégias têm sido aprimoradas para atingir a remoção completa de nitrogênio, sólidos suspensos e matéria orgânica alcançada pela combinação do WCVD seguido por WC horizontal (também chamada de sistema híbrido), que requerem grandes áreas e custos elevados de implantação. Dentre as estratégias, menciona-se os *wetlands* construídos verticais modificados sob diferentes modalidades, tais como: (i) com ciclos de enchimento e drenagem – *Tidal Flow*, (ii) com unidades de repouso – modelo francês, (iii) com aeração, (iv) com fundo saturado (WU *et al.*, 2011; MOLLE *et al.*, 2006; HEADLEY *et al.*, 2013; KIM *et al.*, 2014).

Os *wetlands* construídos com fundo saturado foram concebidos com a finalidade de se elevar as taxas de desnitrificação em *wetlands* verticais, uma vez que a camada saturada no fundo proporciona a formação de uma zona anóxica, atendendo aos requisitos do processo biológico (Figura 2).

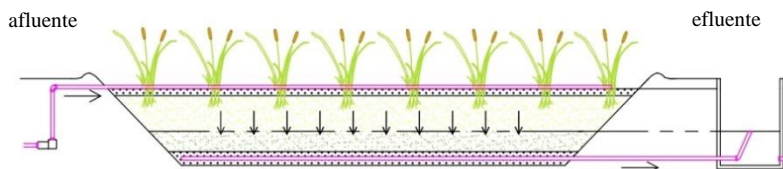


Figura 2 - Esquema representando o WCVD-FS.

Fonte: Acervo GESAD.

A utilização de saturação em WCVD tem o intuito de aumentar o tempo de contato entre águas residuárias e os microrganismos (MOLLE *et al.*, 2008; LANGERGRABER *et al.*, 2009 *apud* PRIGENT, 2013). Nesta disposição, a transformação do nitrogênio não é direta, com adsorção de amônia durante o período de alimentação e de nitrificação durante período de descanso.

Assim, o fluxo de nitrato para a camada saturada torna-se irregular (a liberação ocorre durante o início do período de alimentação) e pode afetar o desempenho na remoção de nitrogênio (SILVEIRA *et*

al., 2015). Kim *et al.*, (2015) pontuou a importância da configuração da camada de saturação, bem como o arejamento da camada insaturada para garantir desempenho estável na remoção de nitrogênio.

O desempenho operacional de *wetlands* construídos recebe influência de uma diversidade de fatores operacionais, naturais e construtivos. O Quadro 1 apresenta um comparativo entre estudos de WCVD-FS sob aplicação de diferentes parâmetros.

Quadro 1 - Comparativo entre desempenhos de WCVD-FS

Autor	Descrição do sistema	Local / Tempo monitorado	Macrófita Empregada	Meio filtrante	Saturação de fundo (cm)	Cargas aplicadas (g/m ² .d)		TH (mm/d)	Eficiência			
						DQO			Parâmetro	(%)		
Trein (2015)	Reator anaeróbico compartimento + WCVD-FS para tratamento de esgoto.	Palhoça (Brasil) / 2 anos	<i>Cyperus papiro</i>	70 cm, sendo: 10 cm de brita + 50 cm de areia grossa + 10 cm de brita.	20	DQO	2	11,6	DQO	88		
						DBO	0,96		DBO5	94		
						SST	0,27		SST	88		
						N-NH ₄ ⁺	0,53		P-PO4 ³⁻	92		
Andrade (2012)	Sistema piloto – único módulo para tratamento de esgoto sintético.	Curitiba (Brasil) / 5 meses	<i>Canna x generalis</i>	95 cm, sendo: 15 cm de brita + 40 cm de areia + 40 cm de brita.	80	DQO	37,8	126	DQO	95		
									NTK	55		
									P-PO4 ³⁻	46		
Prigent et al. (2013)	Filtro biológico seguido de WCVD-FS de único estágio, para tratamento de esgoto doméstico.	Beaumont-la-Ronce (França) / 8 meses	<i>Phragmites australis</i>	105 cm, sendo: 40 cm de xisto expandido + 15 cm de calcário + 50 cm de xisto expandido.	20	DQO	293	380	DQO	64		
									SST	76		
									NT	21		
					40	DQO	293	380	DQO	88		
									SST	93		
									NT	39		
Kim et al. (2014)	Filtro biológico seguido de adição de cloreto férrico para precipitação de fósforo seguido de wetland construído - modelo Francês com fundo saturado, para tratamento de esgoto sanitário + água residuária da produção de vinho.	Vercia (França) / 8 anos	<i>Phragmites australis</i>	1º estágio: 80 cm de brita (d10: 1.6 mm; d60: 3.66mm)	40	DQO	560 a 1220	770	SST	99		
									DBO5	99		
									DQO	97		
				60 a 75	DQO				560 a 1220	770	PT	70
											NT	76
											NTK	98
Silveira et al. (2015)	Wetland construído - modelo francês de único estágio, para tratamento de esgoto sanitário.	Lyon (França) / 4 e 12 meses	<i>Phragmites communis</i>	70 cm, sendo: 15 cm de brita (20 - 40 mm) + 20 cm de brita (8 - 20 mm) + 35 cm de brita (2 - 6 mm)	15	DQO	26	230	DQO	39		
									SST	76		
									N-NH ₄ ⁺	36		
				25	DQO	25	230	NTK	46			
								DQO	50			
								SST	88			
								N-NH ₄ ⁺	51			
								NTK	60			

Quadro 1 - Comparativo entre desempenhos de WCVD-FS – Continuação

Referência	Descrição do sistema	Local	Macrófita Empregada	Meio filtrante	Saturação de fundo	Cargas aplicadas (g/m ² .d)		TH (mm/d)	Eficiência	
									Parâmetro	(%)
Langergraber <i>et al</i> (2008)	Wetlands construídos verticais em 2 estágios, o primeiro com camada de saturação e o segundo com drenagem livre.	Ernstshofen (Áustria)	<i>Miscathus gigantea</i>	1º estágio: 75 cm, sendo 50 cm de areia (1 - 4mm), d10: 0.2; d60: 0.8mm; 10 cm (4-8mm); e 15 cm (16-32mm)	20	DQO	80	-	NT	46
									N-NH4+	77.2
				2º estágio: 75 cm, sendo 50 cm, camada principal de areia (0.06 - 4mm), d10: 1mm; d60: 3mm; 10 cm (4-8mm); e 15 cm (16-32mm)	Drenagem livre	DQO	20		NT	46
									N-NH4+	99.8

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

3.3 COMPONENTES ATUANTES

O leito do *wetland* atua como filtro mecânico e biológico. Os sólidos suspensos do afluente são principalmente retidos mecanicamente, enquanto que a matéria orgânica solúvel é fixada e absorvida pelo biofilme. O tratamento biológico se baseia na atividade natural dos micro-organismos, bactérias aeróbias e facultativas principalmente, que se desenvolvem no biofilme e se aderem na superfície das partículas do meio suporte e nas raízes das macrófitas (HOFFMANN; WINKER, 2011). A Tabela 1 apresenta os processos de remoção de contaminantes em *wetlands*.

Tabela 1 – Processos de remoção de contaminantes em *wetlands* construídos.

Contaminante	Processo
Matéria orgânica (medida em DBO ou DQO)	- Particulada: Sedimentação e filtração - Solúvel: Fixação e adsorção pelo biofilme, seguida de degradação pelas bactérias aderidas nele
Sólidos suspensos	- Sedimentação e filtração - Decomposição por bactérias especializadas, após longo período de retenção
Nitrogênio	- Nitrificação/Desnitrificação - Assimilação pelas macrófitas - Assimilação pela biomassa fixa - Volatilização da amônia - Adsorção pelo solo
Fósforo	- Assimilação pelas macrófitas - Adsorção pelo solo - Precipitação química
Patógenos	- Sedimentação e filtração - Assimilação pela biomassa fixa - Predação - Eliminação por condições ambientais desfavoráveis (temperatura e pH)
Metais pesados	- Precipitação e adsorção - Assimilação pelas plantas
Compostos orgânicos	- Adsorção pelo biofilme e material filtrante - Decomposição por bactérias especializadas, após longo período de retenção

Fonte: Adaptada de Hoffmann e Winker (2011) e Cooper (1996).

3.3.1 Meio Filtrante

A escolha adequada do material filtrante é fundamental para proporcionar uma boa condutividade hidráulica, que promova a adsorção de compostos como o ortofosfato e o íon amônio (PELLISSARI, 2013). O meio filtrante em sistemas de WC está diretamente relacionado com o processo de filtração e adsorção, visto que influencia no desenvolvimento do biofilme, além de atuar na sustentação das macrófitas.

Os materiais utilizados no meio filtrante podem ser inorgânicos como: brita, cascalho, areia e outros materiais sintéticos ou orgânicos como: plástico, restos de folha, casca de crustáceos, agregados de bactérias e outros. Estes materiais suportes podem estar imersos completamente no líquido ou não imersos, com um espaço para a passagem de ar ou gás no biofilme acima da superfície do líquido (METCALF; EDDY, 2003).

O conhecimento das características granulométricas do material é muito importante por influenciar na condutividade hidráulica. Quanto menor a granulometria, menores são os espaços entre as partículas, menor a condutividade hidráulica, e mais fácil ocorre a colmatação do leito (PHILIPPI; SEZERINO, 2004).

Para *wetlands* de fluxo subsuperficial, Hoffmann *et al.* (2011) consideram, como substrato mais adequado, a aplicação de areia grossa, recomendando diâmetro efetivo (d_{10}) entre 0,1 e 0,4 mm, e condutividade hidráulica entre 10^{-4} e 10^{-3} m.s⁻¹. Já Suliman *et al.* (2006) indicam materiais com d_{10} entre 0,3 e 1,0 mm para filtros com alimentação intermitente (usualmente *wetlands* verticais).

3.3.2 Macrófitas

As macrófitas aquáticas constituem, em sua grande maioria, vegetais superiores que retornaram ao ambiente aquático. Dessa forma, apresentam ainda algumas características de vegetais terrestres e grande capacidade de adaptação a diferentes tipos de ambientes (ESTEVES, 1998).

As macrófitas exercem papel fundamental no tratamento, visto que proporcionam superfície para o desenvolvimento de biofilmes, facilitam a transferência de gases do sistema, estabilizam a superfície do solo e absorvem macronutrientes (N e P) e micronutrientes (incluindo metais) (BRIX, 1994; KADLEC; KNIGHT, 1996). Além de proporcionar melhoria no aspecto estético nas unidades de tratamento.

Em WC, são empegadas macrófitas do tipo emergentes (BRIX, 1994), destacando que a presença delas aliada ao regime intermitente de alimentação ajuda a evitar a colmatação do meio filtrante em WC verticais (BAHLO, WACH, 1990 *apud* BRIX, 1997).

3.3.3 Micro-organismos

Wetlands construídos propiciam um ambiente adequado para o desenvolvimento de micro-organismos. Bactérias, fungos e algas são organismos comuns em áreas úmidas, sendo o grupo das bactérias os mais representativos e os mais importantes na remoção de poluentes (SAEED e SUN, 2012).

As bactérias se aderem às superfícies de partículas sólidas — como raízes, material filtrante — formando o biofilme. A coexistência de zonas anóxicas, anaeróbias e aeróbias no biofilme é fundamental no processo de depuração do esgoto (IWAI; KITAO, 1994 *apud* VON SPERLING, 1996).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho encontra-se inserido no projeto de pesquisa intitulado “Filtros plantados com macrófitas (*wetlands* construídos) empregados no tratamento descentralizado de esgotos”. O projeto foi iniciado em 2014 e está em fase de operação, no presente ano, pelo Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado da UFSC (GESAD) em parceria com a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), responsável pelo financiamento.

O projeto contempla a aplicação de dois sistemas com funcionamento em paralelo, o sistema híbrido e o sistema de *wetland* construído vertical descendente com fundo saturado (WCVD-FS). Os dois sistemas estão funcionando como tratamento secundário e avançado, antecedido por tratamento primário por tanque séptico.

4.1 LOCAL DA PESQUISA

O desenvolvimento dessa pesquisa envolveu atividades de campo e análises em laboratório. As atividades de campo englobaram as coletas de amostras, bem como acompanhamento operacional do WCVD-FS. As atividades laboratoriais foram desenvolvidas nas dependências da UFSC, no Laboratório Integrado de Meio Ambiente – LIMA e no Laboratório do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado – GESAD, ambos localizados no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

O sistema está localizado na área da futura Central Educacional de Tratamento de Esgoto Sanitário (CETESAN), anexo ao Restaurante Universitário da UFSC – campus Trindade, em Florianópolis/SC nas coordenadas 27°36'12.64"S de latitude e 48°31'14.43"O de longitude.

A Figura 3 apresenta o mapa de localização da estação de tratamento de esgoto (ETE), dentro da área de 440 m² da CETESAN.

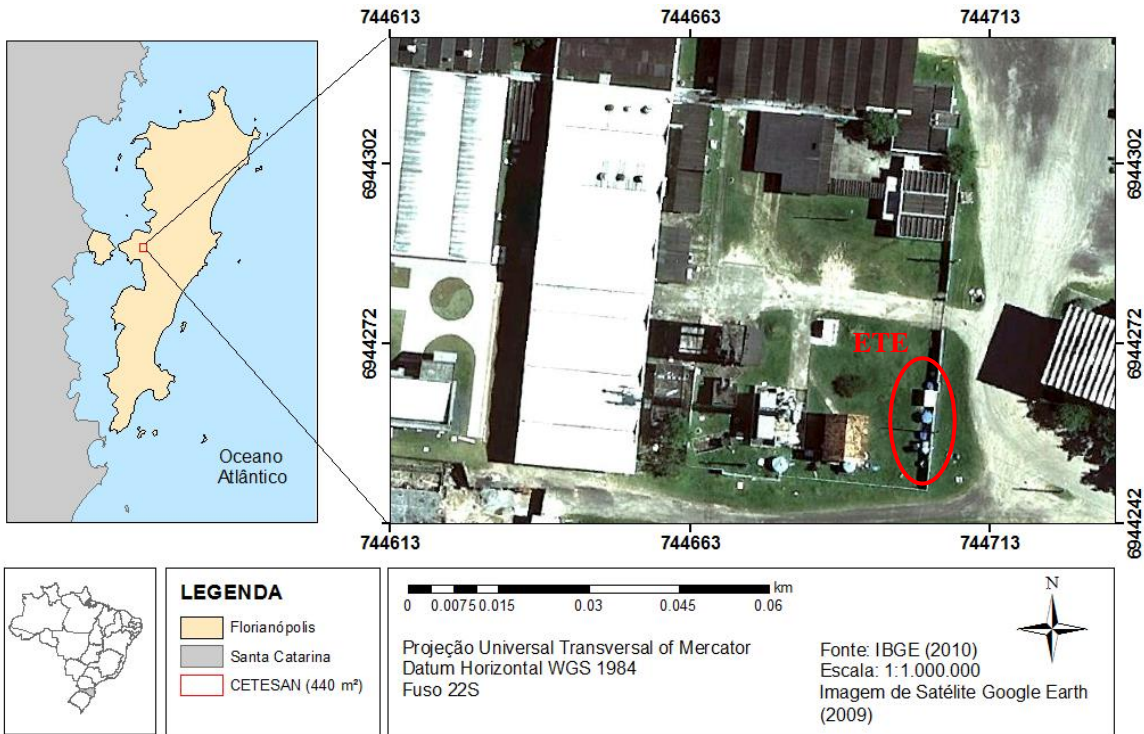


Figura 3 - Mapa de localização da ETE.

4.2 A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

As unidades pilotos da ETE foram dimensionadas para tratar uma vazão de esgoto equivalente a 5 habitantes.

A ETE é alimentada por esgoto bruto da rede coletora da CASAN, a partir de um poço de visita (PV), instalado nas proximidades do sistema. O esgoto é bombeado até o reservatório de equalização (R1) e posteriormente segue para o tratamento primário por tanque séptico ($v = 3000L$). A alimentação do tanque séptico é intermitente, realizada por uma bomba de drenagem cuja programação dos pulsos diários mantém nível suficiente do reservatório a jusante (R2), de onde é realizada a alimentação dos sistemas paralelos (sistema híbrido e WCVD-FS) pela Estação de Bombeamento (EB). A Figura 4 apresenta uma visão geral da estação e a Figura 5 apresenta o fluxograma da ETE, com ênfase na unidade de estudo.



Figura 4 - Estação Experimental de Tratamento de Esgoto Sanitário Empregando a Ecotecnologia dos *Wetlands* Construídos, onde A – WCVD-FS, B – WCVD e C – WCH.

Obs: Foto referente ao 2º mês de operação (agosto/2015)

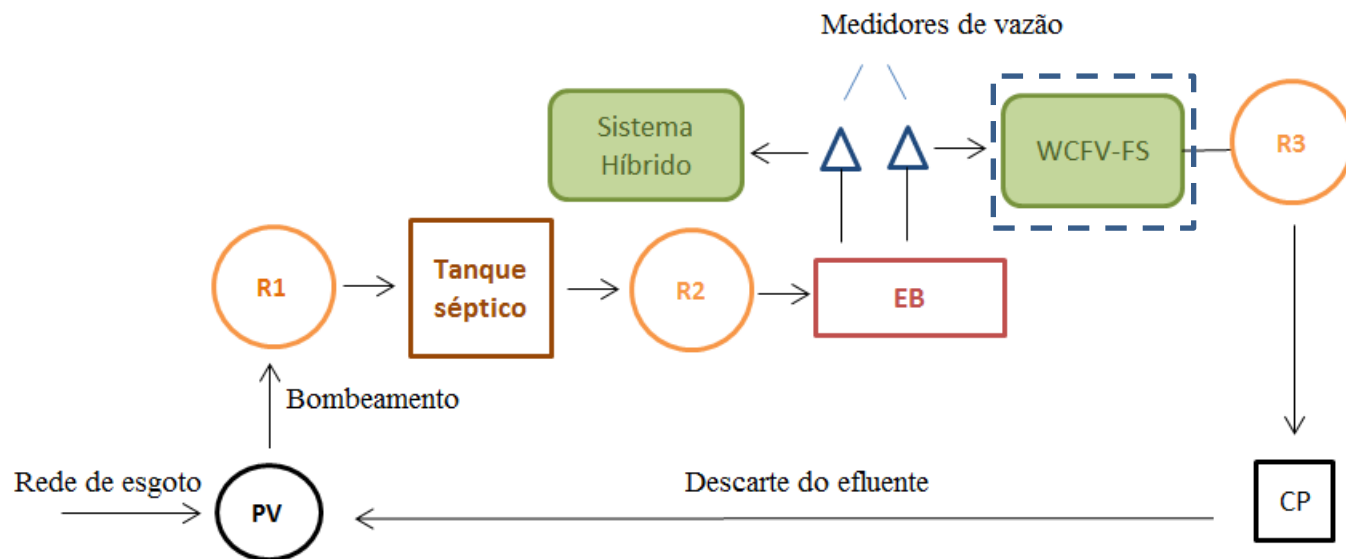


Figura 5 - Fluxograma do sistema de tratamento.

4.3 O WCVD-FS

A estrutura física do sistema de WCVD-FS é de alvenaria impermeabilizada, contornada por uma parede de blocos de concreto com altura de 83 cm e a área ocupada pelo sistema é de 7,3 m² (2,25 x 3.26)m (Figura 6).



Figura 6 – WCVD-FS com macrófitas recém-plantadas em 02/062015.

À jusante do WCVD-FS está localizado um reservatório de coleta (R3), que contém um controlador de nível (mangote) com altura pré-definida de 40 cm, a fim de manter a saturação do sistema (Figura 7).



Figura 7 - Mangote a jusante do sistema (R3).

Após o tratamento, o efluente percorre até uma caixa de passagem (CP), onde se encontra com o efluente do outro sistema e o descarte é realizado na própria rede coletora, à jusante do bombeamento do PV.

A espécie de macrófita utilizada foi a *Typha domingensis*, conhecida como taboa. As plantas foram retiradas do terreno alagado da

UFSC, localizado ao lado do Departamento de Arquitetura e Urbanismo. No processo de plantio, as macrófitas foram cortadas a 50 cm do rizoma para adaptação no novo ambiente, e foram plantadas com espaçamento de 40 cm entre cada macrófita, com densidade populacional de 4 mudas/m² (Figura 8).



Figura 8 - Macrófitas recém-extraídas do terreno alagado.

O filtro do WC é composto por uma camada de 10 cm de brita na zona de drenagem (fundo), seguida de uma camada 62 cm de areia grossa, e mais 3 cm de brita no topo, formando uma altura útil de 75 cm. Acima da última camada de brita acomodou-se a tubulação perfurada de distribuição do afluyente. Na Figura 9 apresenta-se a curva granulométrica da areia utilizada. Para $d_{10} = 0,29$ mm e $d_{60} = 1,16$ mm, obteve-se $U = 4$.

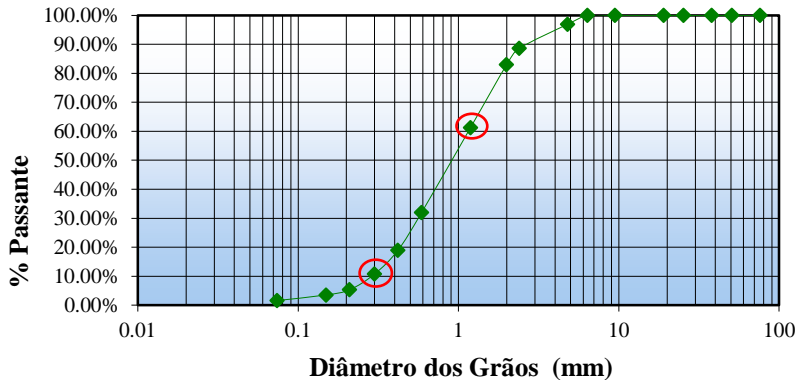


Figura 9 - Curva granulométrica da areia utilizada.

4.3.1 Parâmetros de dimensionamento

O fluxo de alimentação da unidade é intermitente, com 4 (quatro) pulsos diários das 8h às 17h, em intervalos regulares de 3h durante 3,5 dias por semana. Salienta-se que nas segundas não ocorre o primeiro pulso da manhã e nas quintas não ocorre o último pulso da tarde, a fim de manter o sistema 3,5 dias em repouso. A Tabela 2 apresenta os critérios utilizados para dimensionamento do *wetland*:

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para dimensionamento da unidade piloto.

Parâmetros de projeto	
Carga orgânica afluyente	41 gDQO/m ² .d Sezerino (2006)
Forma de alimentação	4 pulsos por dia Platzer (1999)
Repouso	3,5 dias Santos (2015)
Areia utilizada	$d_{10} = 0,29$ mm , $d_{60} = 1,16$ mm Santos (2015)
Altura saturação de fundo	40 cm Santos (2015)

Com o objetivo de manter o carregamento orgânico de 41gDQO/m².d, no dimensionamento do sistema realizou-se as seguintes considerações de projeto:

- Concentração de DQO no esgoto afluyente de 620 mg/L (SANTOS, 2015);
- Remoção média de 15% da concentração de DQO no tanque séptico (SEZERINO; PHILIPPI, 2003);
- A vazão média da bomba utilizada para alimentar o sistema é de 1,26 L/s (valor médio calculado a partir de inúmeros testes de vazão).

Desta forma, para as condições citadas, aplicou-se uma taxa de aplicação hidráulica de 80,3 mm/d e um volume diário tratado de 586,2 L.

4.4 MONITORAMENTO DA ESTAÇÃO

A estação piloto iniciou sua operação em 22/06/2015, data de início do monitoramento. Para a avaliação do desempenho, realizou-se uma visita por semana, que ocorreram no decorrer de 19 semanas (do

dia 22/06/2015 a 29/10/2015) nas quintas-feiras às 8h. A cada coleta semanal realizou-se registro de campo sobre as condições antecedentes a coleta, problemas operacionais, adaptação das macrófitas e equipamentos eletrônicos.

4.4.1 Coleta e análise laboratorial

Semanalmente, foram coletados amostras em 3 pontos , sendo o ponto 1, esgoto bruto, ponto 2 afluente do WCV-FS e ponto 3 efluente do WCV-FS (Figura 10). As amostras coletadas foram armazenadas em garrafas plásticas e as análises foram realizadas no mesmo dia das coletas.

Os parâmetros analisados seguem as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* – APHA (1998), APHA (2005) e Vogel (1981) e estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Metodologia analítica empregada na análise dos parâmetros.

Parâmetros	Metodologia Empregada	Unidade
pH	Direto, Potenciométrico (APHA,2005)	-
Alcalinidade	Método Titulométrico (APHA, 2005)	mg/L
DQO	Digestão em refluxo fechado (APHA, 2005)	mg/L
DBO ₅	Método Manométrico (APHA, 2005)	mg/L
SST	Método Gravimétrico (APHA, 2005)	mg/L
P-PO ₄ ³⁻	Método Colorimétrico do Ácido Vanadomolibdofosfórico (APHA,1998)	mg/L
N-NH ₄ ⁺	Método de Nessler (VOGEL, 1981)	mg/L
N-NO ₂ ⁻	Método da Alanafilamina (APHA, 1998)	mg/L
N-NO ₃ ⁻	Método Brucina (APHA, 1998)	mg/L
NT	Método Colorimétrico – Digestão de persulfato - kit Hach® (APHA, 2005)	mg/L



Figura 10 - Amostras dos pontos 1, 2 e 3.

4.4.2 Requerimento operacional

a) Aferição de vazões de alimentação

O procedimento consistiu na medição de vazão de esgoto a montante do WCVD-FS, com manipulação e controle do acionamento das bombas, de forma manual (Figura 11). A partir de volume conhecido (39,1L) da bombona, cronometrou-se o tempo de enchimento até chegar ao nível pré-estabelecido. A aferição ocorreu semanalmente, no mesmo dia da coleta de amostras.

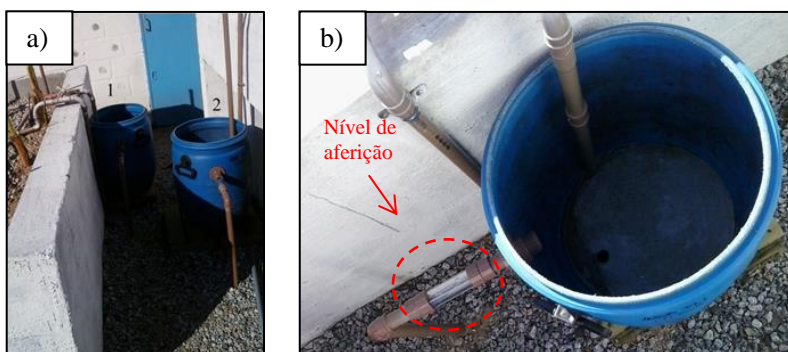


Figura 11- a) Bombona 1 para aferição de vazão do WCVD-FS e bombona 2 para aferição do WCVD do sistema híbrido. b) Vista superior da bombona e do nível estabelecido para aferição.

b) Aferição dos equipamentos eletrônicos que geram os pulsos de alimentação (*timer*)

Em virtude da automatização de alimentação da ETE, tornou-se necessário o controle do funcionamento dos aparelhos eletrônicos. Este controle consistiu na verificação do funcionamento da bomba, através do equipamento *datalogger*, responsável pelo registro dos pulsos diários que foram programados nos *timers* de cada bomba (4 pulsos/d). A importância do *datalogger* está vinculada ao registro em caso de ausência do pulso (Figura 12).



Figura 12 - Equipamentos de aferição da estação de bombeamento.

c) Observação da tubulação de distribuição

Em função da alimentação do sistema ser realizada por tubulações perfuradas, localizadas na superfície no WC, observou-se a uniformidade no fluxo dos pontos de alimentação. A fim de evitar sobrecarga, ausência de carga de esgoto em determinadas regiões do WC e realizar a desobstrução dos orifícios em caso de entupimento (Figura 13).



Figura 13 - Tubulação de distribuição antes do plantio das macrófitas.

d) Observação das macrófitas

Observou-se a necessidade de retirada de plantas invasoras no decorrer do tempo de monitoramento. E em decorrência do transplante do habitat natural para o WC, verificou-se a necessidade de reposição de macrófitas, e o tempo de duração entre uma reposição e outra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VAZÃO E TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA

A vazão média obtida dos pulsos de alimentação do WCVD-FS foi de 1,26 L/s, estando de acordo com a programação dos *timers* da estação de bombeamento, o que gerou uma vazão média de 590 L/d

A Figura 14 apresenta o gráfico referente à vazão afluyente diária e a vazão média durante o período de monitoramento compreendido entre 22/06 e 29/10.

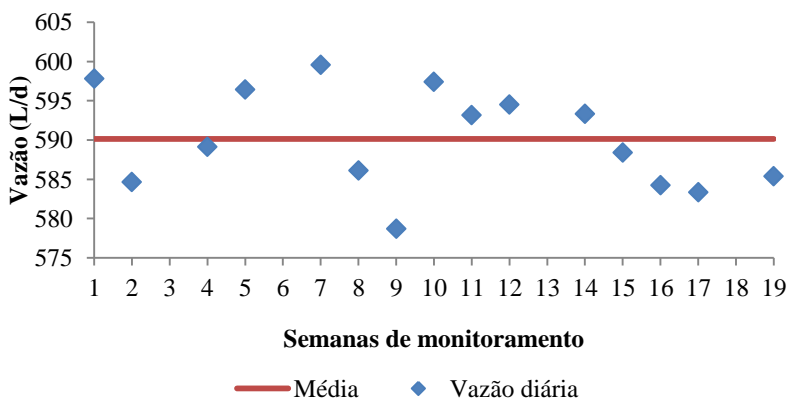


Figura 14 - Monitoramento semanal de vazão afluyente.

Sobre os valores referentes à TH aplicada, a mediana encontrada foi de 80,7 mm/d. Constata-se que a taxa hidráulica superou os valores de 82 mm/d e que 75% dos dados referentes à TH foram de 81,7 mm/d, representando uma diferença de 1,74% da taxa projeto de 80,3 mm/d e a média obtida foi de 80,8 mm/d (Figura 15).

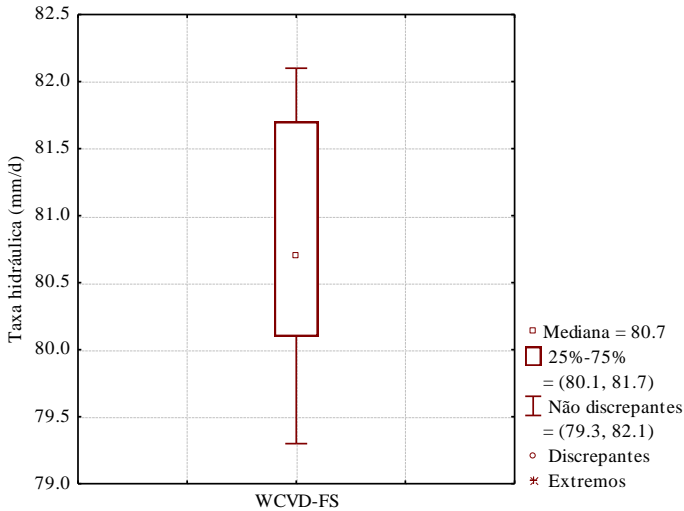


Figura 15 - Gráfico *box plot*, destacando a mediana e valores referentes à 25 – 75% da taxa hidráulica aplicada no WCVD-FS.

5.2 CARGAS ORGÂNICAS

Nas Figura 16, 17, 18 e 19 apresentam-se os gráficos dos carregamentos em termos de DQO, DBO, SST e N-NH_4^+ aplicados no WCVD-FS, respectivamente.

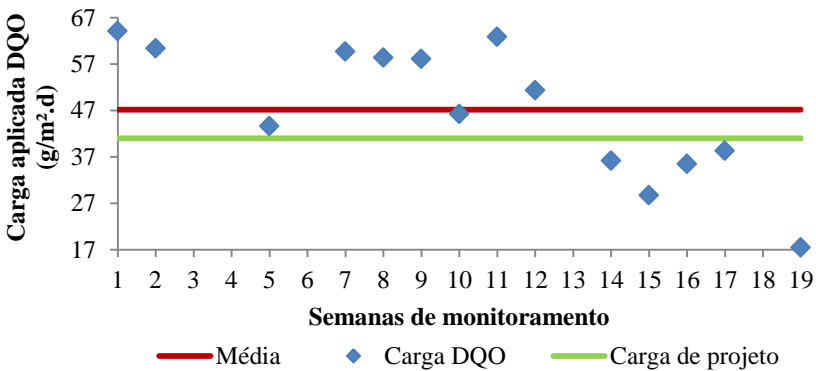


Figura 16 – Carregamento afluente de DQO em $\text{g/m}^2.\text{d}$.

Para DQO, o carregamento ficou com média de 47,1 gDQO/m².d, considerando concentração afluente de 583,2 mg/L. A carga média ficou acima do estabelecido no parâmetro de projeto, que neste caso foi de 41g DQO/m².d. Vale salientar que as concentrações afluente do esgoto bruto sofreram variações, que repercutiram no carregamento, resultando nessa diferença de 15% superior ao carregamento de projeto (DP = 14,40 e CV = 30,5%).

Na quinta semana, observou-se um carregamento de DQO de 43,6 gDQO/m².d, que foi a marca mais próxima da carga de projeto. O maior valor obtido foi na primeira semana, com 64 gDQO/m².d.

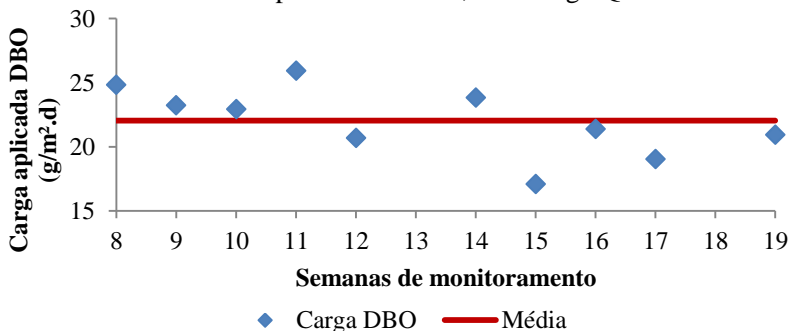


Figura 17 - Carregamento afluente de DBO em g/m².d.

Os dados considerados de DBO para a análise do carregamento foram a partir da oitava semana em diante, que por motivo de inconsistência dos dados anteriores, estes foram descartados. Obteve-se um carregamento médio de 22 gDBO/m².d, para uma concentração afluente de 272,6 mg/L. O menor carregamento obtido foi na semana 15, com 17,1 gDBO/m².d e o maior na semana 11 com 25,9 gDBO/m².d. Ambas as semanas com episódios de chuvas antecedentes.

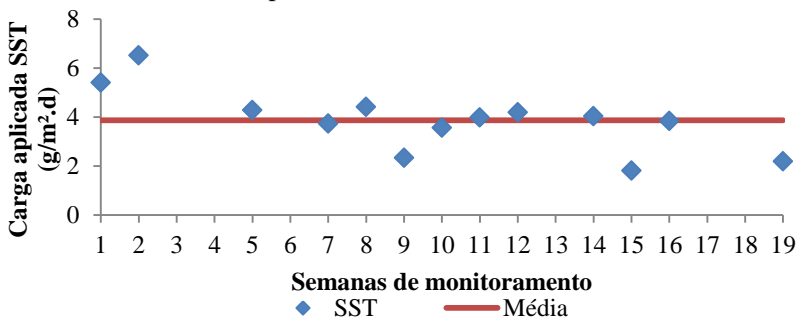


Figura 18 - Carregamento afluente de SST em g/m².d.

A carga média de SST foi de 3,9 g/m².d para uma concentração afluyente de 47,8 mg/L. Constatase que a menor carga de SST foi observada na semana 15 com 1,8 g SST/m².d, destacando que, houve indícios de precipitação anterior a coleta, podendo ser a causa da diluição da concentração. Enquanto a maior carga foi observada na semana 2, com 6,5g/m².d, e sem nenhum indício de chuva anterior a coleta.

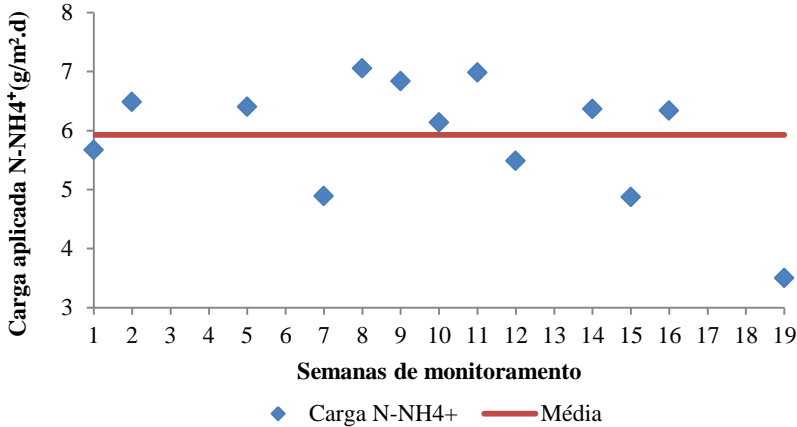


Figura 19 - Carregamento afluyente de N-NH₄⁺ em g/m².d.

Com relação ao N-NH₄⁺, o carregamento médio foi de 5,4 g/m².d para uma concentração afluyente de 67,1 mg/L. O carregamento máximo foi observado na semana 8 e o mínimo na semana 19, com 6,6 gN-NH₄⁺/m².d e 3,0 gN-NH₄⁺/m².d, respectivamente. Cabe ressaltar que na semana de menor carregamento houve indícios de chuva anterior a coleta, justificando os baixos valores obtidos, diferentemente da semana 8 que foi sem indícios de chuvas.

5.3 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e número de amostras (N) dos parâmetros físico-químicos analisados.

Tabela 4 – Valores médios das concentrações dos três pontos de análise.

Parâmetro	Ponto 1 - Afluente TS	Ponto 2- Afluente WC	Ponto 3 - Efluente WC	
pH	Média	7,9	7,2	7,1
	Máximo	8,2	7,4	7,6
	Mínimo	7,6	7,1	6,5
	DP	0,2	0,1	0,3
	CV	0,03	0,02	0,05
	N	12	13	13
Alcalinidade (mg/L)	Média	345	294	182
	Máximo	430	340	315
	Mínimo	130	195	75
	DP	83,1	40,4	74,9
	CV	0,24	0,14	0,41
	N	12	13	13
DQO (mg/L)	Média	760,1	584,9	96,2
	Máximo	1103,0	782,0	207,0
	Mínimo	341,0	217,0	13,9
	DP	258,2	178,6	62,4
	CV	0,34	0,31	0,65
	N	13	14	13
DBO (mg/L)	Média	302,5	272,6	26,7
	Máximo	315	319,0	45,4
	Mínimo	296	212,0	18,6
	DP	8,5	32,9	6,8
	CV	0,03	0,12	0,25
	N	4	10	11
NT (mg/L)	Média	-	80,4	44,3
	Máximo	-	105,0	65,0
	Mínimo	-	54,0	31,0
	DP	-	17,3	10,4
	CV	-	0,22	0,24
	N	-	7	7

Tabela 4 – Valores médios das concentrações dos três pontos de análise - Continuação.

Parâmetro	Ponto 1 - Afluente TS	Ponto 2 - Afluente WC	Ponto 3 - Efluente WC	
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	Média	76,1	67,1	39,9
	Máximo	103,2	81,6	62,8
	Mínimo	38,3	37,4	18,0
	DP	19,3	12,8	13,0
	CV	0,25	0,19	0,33
	N	12	13	12
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	Média	0,3	0,1	0,6
	Máximo	1,1	0,2	5,2
	Mínimo	0	0	0
	DP	0,4	0,1	1,4
	CV	1,34	0,60	2,36
	N	12	13	13
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	Média	1,6	2,6	10,5
	Máximo	3,4	13,7	18,4
	Mínimo	0	0	1,8
	DP	1,4	4,1	5,6
	CV	0,88	1,56	0,54
	N	12	13	11
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	Média	27,0	26,1	3,7
	Máximo	33,8	35,4	6,2
	Mínimo	13,8	1,73	1,5
	DP	6,0	9,0	1,6
	CV	0,22	0,34	0,44
	N	12	13	13
SST (mg/L)	Média	151,2	47,8	5,6
	Máximo	221,5	81,3	22,0
	Mínimo	66,5	22,5	0
	DP	54,3	15,7	7,5
	CV	0,36	0,33	1,34
	N	12	13	13

Os valores médios obtidos apresentaram, de maneira geral, coeficientes de variação elevados, em virtude da não estabilização do sistema natural aliada às precipitações ocorridas no período monitorado. A seguir, apresenta-se uma discussão sobre cada parâmetro analisado.

a) pH e Alcalinidade

As Figuras 20 e 21 apresentam os gráficos evolutivos de pH e alcalinidade nos três pontos de análise no período de monitoramento.

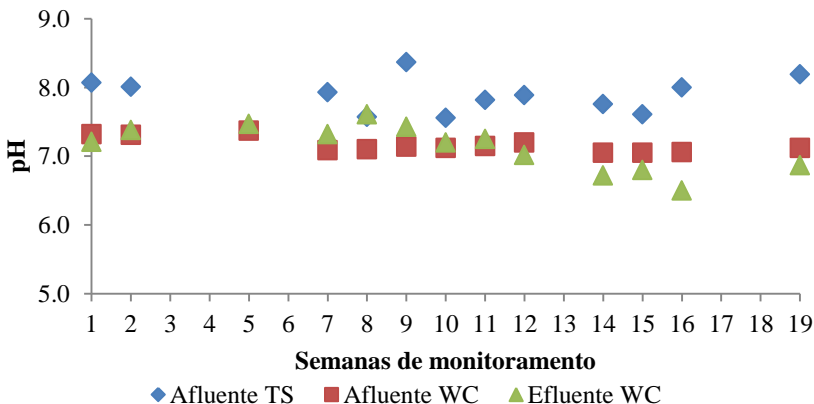


Figura 20 - Gráfico evolutivo de pH.

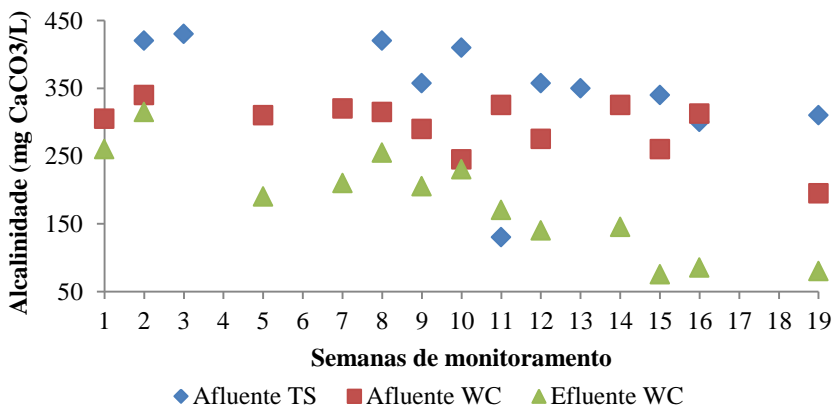


Figura 21 - Gráfico evolutivo de alcalinidade.

Na Figura 20, observa-se a diminuição do pH ao se comparar o ponto 1 ao ponto 3, já o afluente e efluente do WC (pontos 2 e 3) mantiveram valores médios similares durante o monitoramento. Destaca-se que apesar de a nitrificação tender a baixar o pH na coluna de água através da formação de ácido carbônico, esta redução do pH

pode ser tamponada pela perda de dióxido de carbono a partir da coluna de água para a atmosfera (KADLEC; KNIGHT, 1996).

O afluente do tanque séptico obteve valor médio de 7,9, enquanto o afluente e o efluente do WC obtiveram valores médios de 7,2 e 7,1 respectivamente. A gama de pH ótimo observado para a nitrificação no tratamento está entre cerca de 7,2 e 9,0 (METCALF; EDDY, 2003). O WPCF (1983 *apud* KADLEC; KNIGHT, 1996) recomenda que o pH seja mantido acima de 7,2 para a estabilidade de nitrificação, fato observado neste estudo.

Com relação à alcalinidade, observou-se redução na concentração de mg CaCO_3/L do primeiro ponto de análise com 344,6 mg CaCO_3/L , ao último ponto com 181,5 mg CaCO_3/L . Uma vez que a alcalinidade é consumida no processo de nitrificação, a redução da mesma é indicativo de ocorrência da nitrificação.

As medições de redução de alcalinidade em sistemas de tratamento por *wetlands* são entre 6,3 e 7,4mg/L de alcalinidade na forma de CaCO_3 por mg/L de nitrogênio-amoniaco oxidado (USEPA, 1993). Aproximadamente 7,14 mg/L (como CaCO_3) de alcalinidade são consumidos para cada mg/L de N-NH_4 nitrificado (KADLEC; KNIGHT, 1996).

b) Matéria orgânica – DQO e DBO

O esgoto sanitário afluente da estação apresentou relação DBO/DQO média de aproximadamente 0,4, considerando os valores médios de concentração de DBO e DQO. Esta relação obtida representa característica de biodegradabilidade do efluente.

A Figura 22 apresenta o gráfico do tipo *box plot* das concentrações de DQO para os três pontos analisados. Para o afluente do tanque séptico, a concentração mediana foi 797 mg/L e 75% dos dados amostrados foram de 948 mg/L. Para o ponto 2 a mediana foi de 597 mg/L, e os valores de 25-75% foram de 444 mg/L e 750 mg/L respectivamente. Com relação ao efluente WC, obteve-se mediana de 90 mg/L e 75% das amostras foi 137 mg/L.

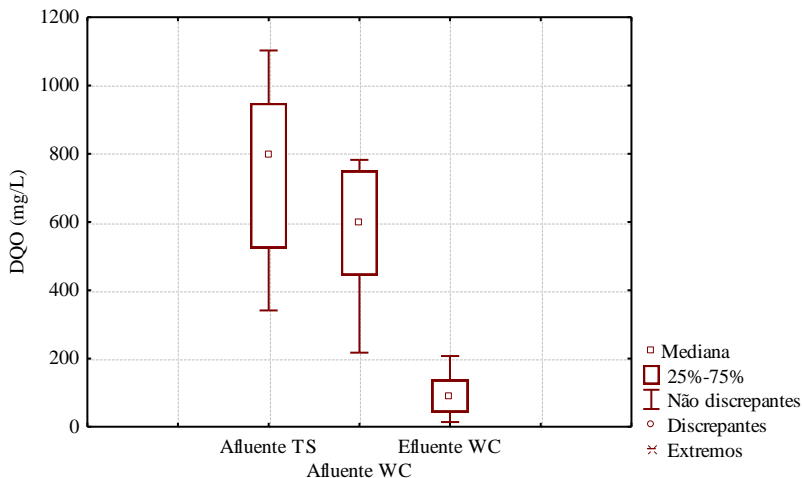


Figura 22 – Gráfico tipo box plot, destacando a mediana e valores referentes à 25 – 75%, discrepantes, não discrepantes e extremos de DQO.

O tanque séptico obteve eficiência de remoção de 23%, considerando os valores médios de concentração do afluente TS com 760,1 mg/L e o afluente WC com 584,9 mg/L. Trabalhando com um carregamento médio de 47,1g/m².g de DQO no WCVD-FS, obteve-se uma eficiência de 84% , considerando valor médio do efluente WC de 96,2 mg/L. A remoção média global do arranjo foi de 87%.

Andrade (2012), com aplicação de carga de DQO semelhante (37,8 g/m².d), apresentou eficiência de remoção 95%. Prigent (2014), com um filtro biológico seguido de um WCVD-FS com 40 cm de saturação de fundo, apresentou eficiência de 88% apesar de a carga aplicada ter sido bem superior (293 g/m².d). O mesmo autor, aplicando a mesma carga de DQO em um piloto de WCVD-FS com saturação de fundo de 20cm, apresentou resultados de eficiência de remoção menores em relação aos 40cm de saturação. Constatado também por Santos (2015), em estudo em colunas de areia.

A Figura 23 apresenta o gráfico do tipo *box plot* das concentrações de DBO para o afluente e efluente do WC.

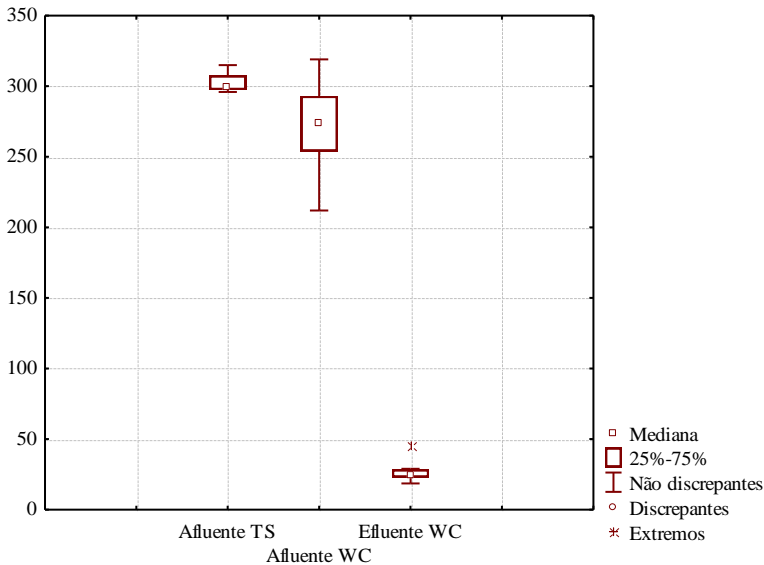


Figura 23 - Gráfico tipo box plot, destacando a mediana e valores referentes à 25 – 75%, discrepantes, não discrepantes e extremos de DBO.

O ponto afluente TS apresentou mediana de 299,5, e os valores de 25-75% dos dados foram de 297,5 mg/L e 307,5 mg/L, respectivamente. No ponto afluente WC, a mediana foi de 273,5 mg/L, e os valores de 25-75% dos dados foram de 254 mg/L e 293 mg/L, respectivamente. Com relação ao efluente WC, obteve-se mediana de 24,1 mg/L e 25% das amostras foi 23 mg/L e 75% foi 28,4 mg/L. A unidade *wetland* atingiu uma eficiência de 90% sob uma carga aplicada de 22 g/m².d de DBO, considerando valor médio do afluente de 272,6 mg/L e efluente de 26,7 mg/L. Enquanto o TS apresentou eficiência de 10%, considerando concentração média afluente TS de 302,5 mg/L.

c) Fração nitrogenada

A Figura 24 apresenta o gráfico evolutivo das concentrações de N-NH₄⁺ afluente e efluente do WC, N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻ efluente do WC.

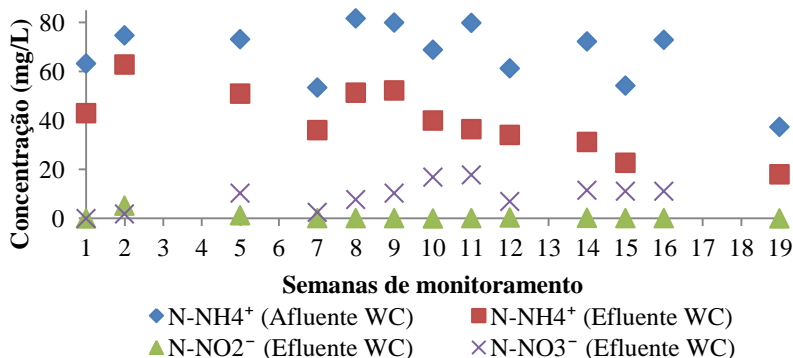


Figura 24 - Gráfico evolutivo das concentrações de fração nitrogenada.

O WCVD-FS apresentou 41% de remoção de amônia, considerando concentrações médias afluente de 67,1 mg/L e efluente de 39,9 mg/L, sob uma carga de 5,4 g/m².d de N-NH₄⁺. Silveira (2015) obteve remoção equivalente durante o *start up* de 4 meses de operação de um piloto de modelo francês de único estágio, com 36% de remoção para 15 cm de saturação.

O tanque séptico apresentou remoção de 12% de amônia, para concentração média no esgoto bruto de 76,1 mg/L. Contudo, a eficiência global obtida no sistema foi de 48%.

A amônia não ionizada pode ser removida nos *wetlands* através de reações de adsorção ao material filtrante, porém não consiste em uma via de remoção permanente, uma vez que pode ser novamente liberada quando houver variação nas condições químicas da água/efluente (IWA, 2000). Cooper *et al.* (1996) relatam que apenas sistemas de alimentação intermitente demonstram rápida remoção de amônia da massa líquida devido a adsorção do material filtrante.

Constatou-se a ocorrência do processo de nitrificação através da formação de nitrato no efluente, que alcançou valores máximos de 18,4 mg/L e concentração média de 10,5 mg/L; além dos valores de nitrito próximo de zero, sendo um indicativo do processo de nitratação (conversão nitrito a nitrato). Diante disso, a partir dos valores médios, verificou-se que dos 41% de remoção de amônia, aproximadamente 38,6% foi devido à nitrificação.

Com relação ao nitrogênio total, o WCVD-FS apresentou eficiência de 45%, considerando concentrações médias de 80,4 mg/L para afluente e 44,3 mg/L para efluente WC.

d) Relação C/N

A Figura 25 apresenta o gráfico da relação C/N afluente e efluente da unidade *wetland*, em que se considerou a razão DQO/NT.

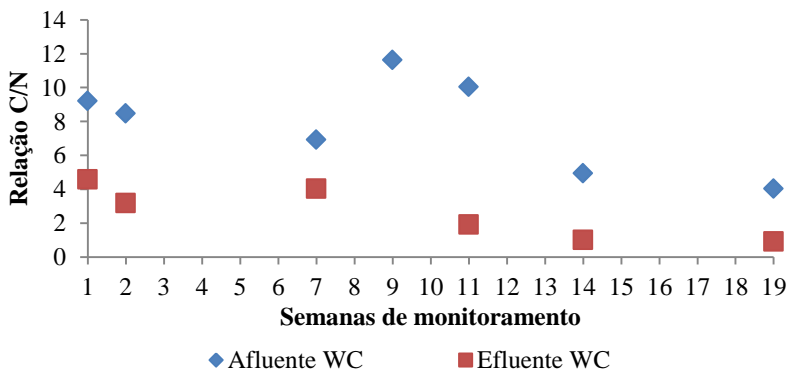


Figura 25 - Gráfico do monitoramento da relação C/N dos pontos afluente e efluente do *wetland*.

Observou-se um decréscimo da relação C/N comparando-se o afluente com o efluente do WC. Para Aquino *et al.* (2005), este decréscimo ocorre à medida que os microrganismos vão consumindo carbono e liberando CO₂.

O afluente do *wetland* manteve uma relação C/N média de 7,9 (DP = 2,7 e CV = 0,35), enquanto o efluente manteve uma média de 2,6 (DP = 1,6 e CV = 0,60). Os valores máximos e mínimos obtidos da relação C/N do afluente foram 11,6 e 4,0, respectivamente. Segundo Borille *et al.* (2005) uma relação C/N de 10,3 indica boas condições de decomposição da matéria orgânica e a conseqüente liberação de nitrogênio para absorção pela planta.

Estudos conduzidos por Her e Huang (1995), demonstram que o uso de uma relação C/N abaixo da ideal, pode acarretar no acúmulo de nitrato, já que a ausência de doador de elétrons impede a completa desnitrificação. Diante disso, infere-se que a concentração remanescente de nitrato, apresentada no item anterior (c), pode ser tanto em função da oscilação da relação C/N, como também da não estabilização da biota microbiana.

e) Fósforo inorgânico

A Figura 26 apresenta o gráfico evolutivo das concentrações de $P-PO_4^{3-}$ nos três pontos amostrados.

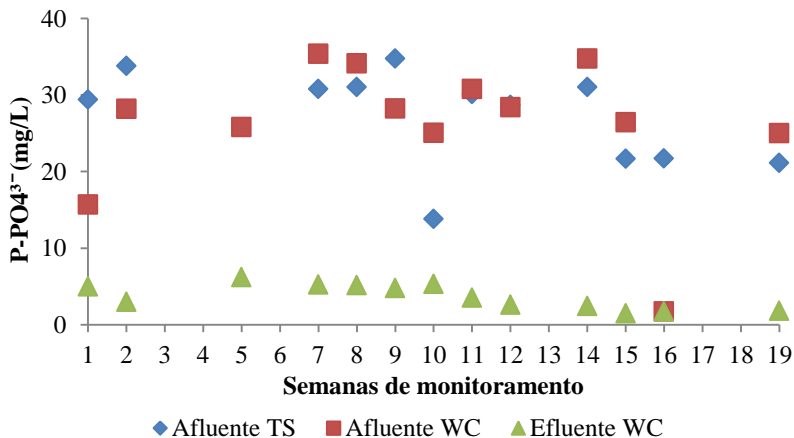


Figura 26 - Gráfico evolutivo das concentrações de ortofosfato.

Verificou-se que o *wetland* atingiu consideráveis remoções de $P-PO_4^{3-}$, fato este observado pelas reduzidas concentrações no efluente WC. A unidade WC apresentou eficiência de 86% de remoção, para concentrações afluente de 26,1 mg/L e efluente de 3,7 mg/L.

Inferese-se que esta alta remoção de fósforo possivelmente foi devido à adsorção pelo material filtrante. Observado também por Trein (2015) que relatou obter remoção média percentual de 93% de uma unidade WCVD-FS.

f) Sólidos Suspensos Totais

A Figura 27 apresenta o gráfico evolutivo das concentrações de SST nos três pontos amostrados.

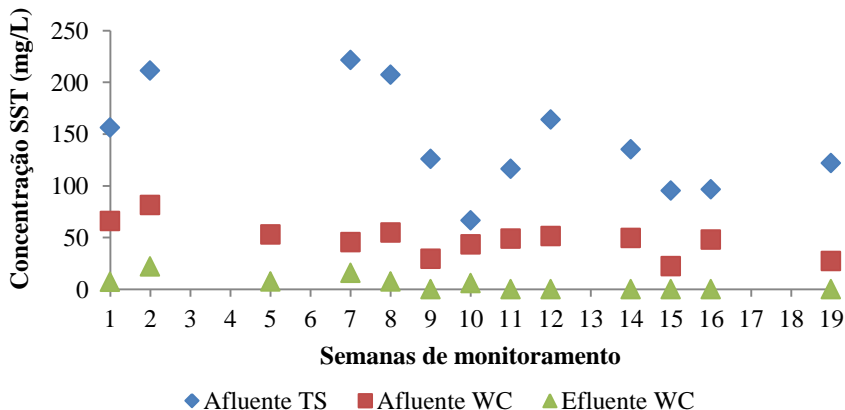


Figura 27 - Gráfico evolutivo das concentrações de SST.

No primeiro ponto de coleta, obteve-se uma concentração média de 151,2 mg/L e na entrada do WC o valor médio obtido foi de 47,8 mg/L, indicando uma eficiência média de remoção no tanque séptico de 68%. A concentração média obtida na saída do WC foi de 5,6 mg/L, correspondendo a uma eficiência de remoção de 88% na unidade *wetland*, referente a uma carga média aplicada de 3,9 g/m².d. O arranjo tecnológico atingiu uma eficiência global de 96%.

Kim *et al* (2014) também obtiveram altas remoções de SST, eficiência de 99%, em WCVD-FS com altura de saturação equivalente a da unidade de estudo.

O Quadro 2 apresenta um comparativo com outros estudos realizados empregando WCVD-FS.

Quadro 2- Comparativo entre o sistema de estudo e outros WCVD-FS.

Referência	Local / Tempo monitorado	Macrófita Empregada	Saturação de fundo (cm)	Carga aplicada (g/m ² .d)				Eficiência (%)				
				DQO	DBO	SST	N-NH ₄ ⁺	DQO	DBO	SST	N-NH ₄ ⁺	P-PO ₄ ⁺³
Presente estudo	Florianópolis / 4 meses	<i>Typha domingensis</i>	40	41	22	3,9	5,4	87	91	96	48	86
Trein <i>et al.</i> (2015)	Palhoça (Brasil) / 2 anos	<i>Cyperus papiro</i>	20	2	0,96	0,27	0,53	88	94	88	93	92
Andrade (2012)	Curitiba (Brasil) / 5 meses	<i>Canna x generalis</i>	80	37,8	-	-	-	95	-	-	-	46
Prigent <i>et al.</i> (2013)	Beaumont-la-Ronce (França) / 8 meses	<i>Phragmites australis</i>	20	293	-	-	-	64	-	76	-	-
			40					88		93		
Kim <i>et al.</i> (2014)	Vercia (França) / 8 anos	<i>Phragmites australis</i>	40	560 a 1220	-	-	-	97	99	99	-	-
			60 a 75									
Silveira <i>et al.</i> (2015)	Lyon (França) / 4 e 12 meses	<i>Phragmites communis</i>	15	26	-	-	-	39	-	76	36	-
			25	25	-	-	-	50	-	88	52	-
Langergraber <i>et al.</i> (2008)	Ernsthofen (Áustria)	<i>Miscathus gigantea</i>	20	80	-	-	-	-	-	-	77,2	-
			Drenagem livre	20	-	-	-	-	-	-	99,8	-

OBS.: As células em cinza escuro representam os parâmetros cujos valores são maiores ao sistema de estudo, enquanto as células em branco representam os parâmetros cujos valores são menores ou iguais ao sistema de estudo. Na ausência de dado comparativo, há o símbolo (-).

5.3.1 Atendimento aos parâmetros de lançamento

Compararam-se os resultados obtidos no sistema de tratamento com as determinações de lançamento de efluentes da legislação vigente e normativas (Tabela 5). Cabe salientar que o efluente da ETE retorna à rede coletora, e esta comparação objetivou avaliar a utilização desse sistema em uma situação de lançamento em corpo receptor.

Para avaliação do parâmetro fósforo total, utilizou-se a equação 1 sugerida por WPC (1983) para conversão de $P-PO_4^{3-}$ para PT:

$$[P-PO_4^{3-}] \approx 0,7[PT] \quad (1)$$

Tabela 5 - Comparativo da eficiência requerida pela legislação vigente com o sistema avaliado.

Parâmetro	CONAMA (430/2011)	Lei de SC: 14.675/2009	Sistema TS + WCVD-FS
DBO	120 mg/L ou remoção mínima de 60%	60 mg/L ou remoção mínima de 80%	24,6 mg/L e remoção de 91%
Sólidos em suspensão totais	Remoção de 20%	-	Remoção de 96%
Fósforo total	-	4mg/L ou remoção mínima de 75% *	5,3 mg/L e remoção de 86%
Nitrogênio amoniacal total	20 mg/L**	-	44,3 mg/L
pH	entre 5 e 9	entre 6 e 9	7,1

* Lançamentos em lagoas, lagunas e estuários

** Lançamento de efluentes de outras origens.

Constata-se que o efluente final da estação de tratamento atendeu ao padrão de lançamento referente à DBO, aos SST, ao pH e ao fósforo total. Com relação ao nitrogênio amoniacal total, não há valor limite de lançamento para efluente oriundo de tratamento de esgoto sanitário. Desta forma, para fins comparativos, considerou-se padrão de lançamento de efluentes de outras origens, observando-se que não houve atendimento ao padrão de lançamento exigido pela Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011).

Vale ressaltar que o efluente também deve respeitar ao padrão de lançamento conforme enquadramento do corpo receptor, de forma a avaliar a concentração dos parâmetros no ponto de mistura, de acordo com Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005).

O Quadro 3 apresenta um comparativo da eficiência obtida no arranjo tecnológico estudado, com as faixas prováveis de remoção

considerando tratamento em conjunto com tanque séptico de acordo com a Norma ABNT 13969/1997 (ABNT,1997).

Quadro 3 – Faixas prováveis de remoção dos poluentes, conforme o tipo de tratamento, consideradas em conjunto com tanque séptico (%).

Processo Parâmetro	Filtro anaeróbio submerso	Filtro aeróbio	Filtro de areia	Vala de filtração	Lodo ativado por batelada	Lagoa com plantas	WCVD-FS
DQO	40 a 75	60 a 95	50 a 85	50 a 80	70 a 95	70 a 90	87
DBO	40 a 70	50 a 80	40 a 75	40 a 75	60 a 90	70 a 85	91
SST	60 a 90	80 a 95	70 a 95	70 a 95	80 a 95	70 a 95	96
Nitrogênio amoniacal	-	30 a 80	50 a 80	50 a 80	60 a 90	70 a 90	48
Fosfato	20 a 50	30 a 70	30 a 70	30 a 70	50 a 90	70 a 90	86

OBS: As células em cinza caracterizam eficiências não alcançadas pelo sistema de tratamento, enquanto as células em branco representam eficiências iguais ou superadas pelo WCVD-FS.

Fonte: Adaptado de ABNT (1997).

De acordo com o quadro apresentado, constatou-se que o sistema de tratamento tanque séptico seguido de WCVD-FS obteve remoção de poluentes satisfatória na maioria dos parâmetros analisados, com exceção do nitrogênio amoniacal.

5.4 RESULTADOS OBSERVACIONAIS

a) Funcionamento dos aparelhos eletrônicos

Durante as primeiras semanas de operação, a ETE enfrentou alguns problemas com relação ao funcionamento dos equipamentos. Nas semanas 3, 4 e 6 não se realizou coletas de amostras, uma vez que o WCVD-FS não recebeu todos os seus pulsos de alimentação. A partir da sétima semana que a ETE passou a operar ininterruptamente.

Durante esse período de operação, constatou-se uma demanda operacional para limpeza manual no Poço de Visita, do tubo camisa que protege a bomba e da bomba de drenagem do reservatório superior (R1). Registraram-se 8 semanas em que foi necessária a intervenção do operador para limpeza manual em pontos específicos do bombeamento e

observou-se que tal demanda ocorreu nos dias pós precipitação, em decorrência do carreamento de sólidos para o PV.

Houve uma ocorrência de mau funcionamento da bomba e dos *dataloggers*. Os últimos não estavam registrando os pulsos de alimentação, o que acarretou na necessidade de verificação dos pulsos nos horários programados de alimentação do sistema.

O Quadro 4 apresenta um resumo das ocorrências durante as 19 semanas de monitoramento. Vale ressaltar que o registro de indícios de chuvas é em relação ao dia da coleta de amostras da semana de referência.

Quadro 4 - Registro do acompanhamento operacional.

Data coleta	Semana	Coleta?	Chuva? Quando/Duração	Ocorrência semanal	Solução
25/06	1	Sim	Não	ok	-
02/07	2	Sim	Não	Problemas no bombeamento na EB: ar na tubulação.	Escorvar a bomba
09/07	3	Não	1 dia antes/1 dia	Problemas no bombeamento do PV: obstrução do tubo camisa e da tubulação de alimentação; nível baixo de esgoto no R2	Limpeza manual, colocação de tela na entrada e saída do reservatório superior e redimensionamento dos pulsos de alimentação do reservatório superior
16/7	4	Não	1 dia antes/1 dia	Dia chuvoso, e reparos sendo feitos na estação, limpeza e prolongamento do tubo camisa	-
23/7	5	Sim	Não	Problemas no bombeamento na EB: nível baixo do R2 e bomba trabalhando a seco, sem coleta no ponto 1	Redimensionamento dos pulsos de alimentação do reservatório superior
30/7	6	Não	Não	A bomba da EB com problemas na parte elétrica e <i>datallogers</i> com mau funcionamento	Assistência técnica
6/8	7	Sim	Não	ok	-
13/8	8	Sim	Não	ok	-
20/08	9	Sim	2 dias antes/1 dia	ok	-

Quadro 5 - Registro do acompanhamento operacional – Continuação

Data coleta	Semana	Coleta?	Chuva? Quando/Duração	Ocorrência semanal	Solução
10/09	12	Sim	4 dias antes/3 dias corridos	Obstrução do tubo camisa no PV.	Limpeza manual.
17/09	13	Não	1 dia antes/2 dias	Obstrução da bomba do R1	Limpeza manual
24/09	14	Sim	5 dias antes/2 dias	Obstrução da bomba do R1	Limpeza manual
01/10	15	Sim	1 dia antes /1 dia	ok	-
08/10	16	Sim	1 dia antes/1 dia	Obstrução das bombas do PV e do R1.	Limpeza manual
15/10	17	Não	6 dias antes/6 dias	Obstrução das bombas do PV e do R1.	Limpeza manual
22/09	18	Não	4 dias antes/4 dias	Obstrução das bombas do PV e do R1.	Limpeza manual
29/10	19	Sim	6 dias antes/6 dias	Obstrução da bomba R1	Limpeza manual

b) Tubulação de distribuição

A tubulação de distribuição não apresentou entupimentos em seus orifícios durante o período de monitoramento. A disposição da tubulação, como consta na Figura 28, não é perfeitamente simétrica no WC, e esse pequeno deslocamento para a direita resultou em jatos mais intensos no lado favorecido.

Das três tubulações verticais de distribuição, a central é a que apresenta os jatos menos intensos e o lado esquerdo ocupou uma posição intermediária de intensidade de alimentação entre as duas regiões. Essa diferença na alimentação pode ser observada no próprio desenvolvimento das macrófitas, expresso no item “c” a seguir.



Figura 28 - Tubulação de distribuição.

c) Adaptação das macrófitas

Devido à distribuição irregular do esgoto no WC, houve desenvolvimento diferenciado das macrófitas. No lado direito que recebia maior contribuição do afluente, as macrófitas apresentaram maior tamanho e melhor adaptação ao meio. Todavia, na região central, com menor contribuição de esgoto, as macrófitas apresentaram menor tamanho e houve necessidade de maiores reposições. Com relação ao

lado esquerdo, o desenvolvimento das macrófitas foi intermediário entre a região central e a região da direita.

Durante o período de monitoramento, ocorreu reposição da macrófita *Typha domingensis* em 2 momentos. A primeira reposição foi em um mês após o plantio, onde 2 (duas) macrófitas foram transplantadas na região central do WC.

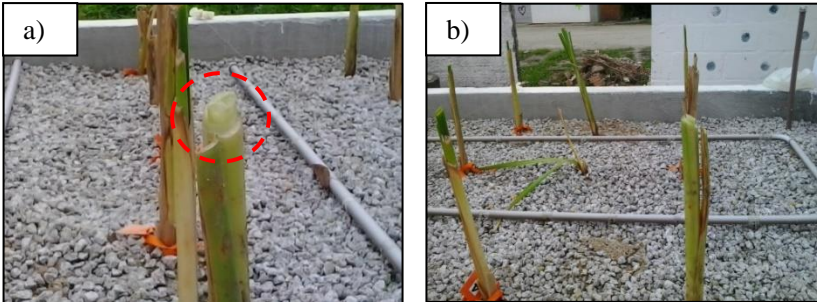


Figura 29 - a) Macrófita readaptada próxima à saída do WC e b) macrófita readaptada próxima à entrada. Ambas após 24 horas de readaptação.

Observou-se que após 24 horas do plantio da primeira reposição, as macrófitas apresentaram crescimento de 1 cm do cerne, representando uma boa adaptação no ambiente. A Figura 29 apresenta, com destaque no círculo vermelho, o crescimento do cerne.

A segunda reposição realizou-se após 90 dias do primeiro plantio, com reposição de 5 macrófitas, três na região central, uma na região esquerda e outra na direita. As Figuras 30 e 31 apresentam o desenvolvimento das macrófitas no decorrer dos meses de julho, agosto, setembro e outubro.



Figura 30 - Fotos de acompanhamento das macrófitas.

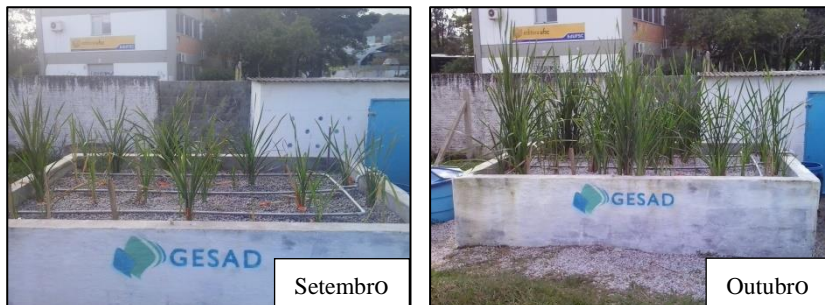


Figura 31 - Fotos de monitoramento das macrófitas.

A Tabela 6 apresenta o resumo do monitoramento das macrófitas.

Tabela 6 – Monitoramento das macrófitas.

Data	Ocorrência
02/06	Plantio das macrófitas
02/07	Reposição de 2 macrófitas
03/07	24h após o plantio, observou-se crescimento de 1 cm nas plantas recém plantadas.
23/7	Retirada de plantas invasoras
06/08	Retirada de plantas invasoras
31/08	Reposição de 5 macrófitas
24/09	Retirada de plantas invasoras
29/10	Retirada de plantas invasoras

6 CONCLUSÃO

Com base nas 19 semanas de monitoramento do arranjo tecnológico composto por tanque séptico seguido de WCVD-FS, conclui-se que:

Tanque Séptico

➤ Obteve-se 23% de remoção de DQO superando o previsto em projeto de concepção com 15%. Também, obteve-se 68% de SST e 10% de DBO.

WCVD-FS

➤ A unidade apresentou remoções de DBO, DQO, NT, P-PO₄³⁻ e SST de 90%, 84%, 45%, 86% e 88%, respectivamente. Com relação a N-NH₄⁺, a remoção foi equivalente a 41%, sendo que destes 41%, 38,6% foi devido à nitrificação.

➤ As cargas médias aplicadas no WCVD-FS foram 47,1 g DQO/m².d, 22 gDBO/m².d, 3,9 gSST/m².d e 5,4 gN-NH₄⁺/m².d. A carga aplicada de DQO diferenciou da carga de projeto em 15%;

➤ A taxa hidráulica média aplicada no WC foi 80,8 mm/d.

Arranjo tecnológico

➤ O arranjo tecnológico atingiu eficiências médias globais de, 87% de DQO, 91% de DBO, 86% de P-PO₄³⁻, 96% de SST e 48% de N-NH₄⁺.

Macrófitas

➤ As macrófitas tiveram desenvolvimento irregular em virtude da alimentação diferenciada na superfície do *wetland*, em função da disposição da tubulação de distribuição. Na região que recebeu maior contribuição, maiores e melhor adaptadas foram as macrófitas, uma vez que menos reposições foram necessárias;

➤ Realizou-se reposição de macrófitas em dois momentos, na primeira vez foram transplantadas 2 macrófitas (após 1 mês do plantio), e na segunda vez foram transplantadas 5 macrófitas (após 3 meses do plantio).

ETE

➤ A ETE requer a atuação de um operador semanalmente, para aferir equipamentos, verificar o nível dos reservatórios, realizar limpeza manual em caso de obstrução da tubulação de alimentação e

retirar macrófitas invasoras. A cada precipitação, verificou-se a necessidade de limpeza do tubo camisa para retirada de sólidos do PV;

➤ Os equipamentos eletrônicos de controle de bombeamento permitem a flexibilização na operação da ETE, para variação de taxas de aplicação hidráulica afluyente.

6.1 RECOMENDAÇÕES

Com o objetivo de proporcionar um melhor controle e monitoramento da estação de tratamento, sugere-se:

➤ A implantação de um sistema automatizado de medição eletromagnética da vazão de saída do *wetland*. Desta forma, a eficiência do tratamento poderia ser quantificada através das cargas aplicadas;

➤ A realização de um balanço hídrico das entradas e saídas da estação, como precipitação pluviométrica e evapotranspiração das macrófitas, submetidas a condições de clima subtropical; e

➤ O monitoramento das comunidades bacterianas no leito filtrante e nas raízes das macrófitas, para verificação do bom desenvolvimento das mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7229: **O Projeto, a Construção e a Operação de Sistemas Sépticos**. Rio de Janeiro. 1993.

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.

ANDRADE, H. H. B. **Avaliação do desempenho de sistemas de zona de raízes (*wetlands* construídas) em escala piloto aplicados ao tratamento de efluente sintético**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20st ed. APHA, Washington. 1998.

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. APHA, Washington. 2005.

AQUINO, A. M., SILVA, E. M. R, SAGGIN JUNIOR, O. RUMJANEK, N., DE POLLI, H., REIS, V. M. A biota do solo e processos relevantes num novo contexto da agricultura. In: Paulo G. S Wadt. (Org.). **Manejo do Solo e adubação para o Estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, Prelo. 2005. p.121-174.

BRASIL. **Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA, Brasília, DF, 17 mar 2005.

BRASIL. **Resolução CONAMA n° 430, de 13 de maio de 2011**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA, Brasília, DF, maio de 2011.

BRIX, H. **Functions of macrophytes in constructed wetlands**. Water Science Technology, n.4, v.29, p.71-78, 1994.

BRIX, H. Do Macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Wat. Sci. Tech.**, v.35, n.5, p. 11-17, 1997.

BORILLE, A. M. W., REISSMANN, C. B. e FREITAS, R. J. S. Relação entre compostos fitoquímicos e o nitrogênio em morfotipos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **B. CEPPA**, v.23, n.1, p.183-198, 2005.

COOPER, P.F.; JOB, G. D.; GREEN, M.B.; SHUTES, R.B.E. **Reed Beds an constructed wetlands for wastewater treatment**. Swindon:WR cplc. 1996. 184 p.

DEVI, R.; DAHIYA, R.P. COD and BOD removal from domestic wastewater generated in decentralized sectors. **Bioresource Technology**, v.99, p. 344–349, 2008.

ESTEVEZ, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: 1998. 602 p.

FONDER, N.; HEADLEY, T. The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. **Ecological Engineering**, v.51, p. 203-211, 2013.

HEADLEY, T.; NIVALA, J.; KASSA, K.; OLSSON, L.; WALLACE, S.; BRIX, H.; VAN AFFERDEN, M.; MULLER, R. Escherichia coli removal and internal dynamics in subsurface flow ecotechnologies: effects of design and plants. **Ecological Engineering**, v. 61, p. 565-574, 2013.

HOFFMANN, H.; WINKER, M. **Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment**. Eschborn: Rotaria, 2011.

IWA – International Water Association. **Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. Scientific and Technical Report** No. 8. London, England: IWA Publishing, 2000. 156 p.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R.L. **Treatment Wetlands**. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers. 1996. 893 p.

KIM, B.; GAUTIER, M.; PROST-BOUCLE, S.; MOLLE, P.; MICHEL, P.; GOURDON, R. Performance evaluation of partially saturated vertical flow constructed wetland with trickling filter and chemical precipitation for domestic and winery wastewaters treatment. **Ecological**

Engineering, v. 71, p. 41-47, 2014.

LANGERGRABER, G.; PRANDSTETTEN, C.; PRESSL, K. S.; LEROCH, K.; ROHRHOFER, R.; HABERL, R. Investigations on nitrogen removal in a two-stage subsurface vertical flow constructed wetland. In: VYMAZAL, J. **Wastewater treatment plant dynamics and management in constructed and natural wetlands**. cap. 18. 2008. 353 p.

LANZER, L. M.; WOLF, D. B. Saneamento básico em Nova Petrópolis/RS: implantação de sistemas descentralizados para o tratamento de esgoto sanitário. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.23-40, 2005. Disponível em: <<http://sites.unifra.br/Portals/36/tecnologicas/2005/Saneamento.pdf>>. Acesso em: 16 jun. de 2015.

LARSEN T. A.; UDERT. K. M.; LIENERT, J. **Source separation and decentralization for wastewater management**. IWA Publishing, London. 2013.

LENS, P.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. **Decentralised sanitation and reuse: Concepts, systems and implementation**. London: IWA Publishing. 2001. 650 p.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MOLLE, P., LIÉRNARD, A., BOUTIN, C., MERLIN, G., IWEMA, A. How to treat raw sewage with constructed wetlands, an overview of the French system. **Water Science and Technology** v.51, n. 9, p.11-21, 2005.

MOLLE, P., LIÉRNARD, A., GRASMICK, A.; IWEMA, A. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behavior of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. **Water Research**, v. 40, n. 3, p. 606– 612, 2006.

NAPHI, I. **A framework for the decentralised management of wastewater in Zimbabwe**. Physics and Chemistry of the Earth, Zimbabwe, v.29, p.1265–1273, 2004.

PELISSARI, C. **Tratamento de efluente proveniente da bovinocultura de leite empregando *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2013.

PHILIPPI, L. S. **Saneamento descentralizado como instrumento para o desenvolvimento sustentável**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 1997. 84 p.

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

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

PNAD - PESQUISA NACIONAL POR AMOSTRA DE DOMICÍLIOS (2012). Disponível em: <www.ibge.com.br>. Acesso em : 9 abr. 2015.

PRIGENT, S.; PAING, J.; ANDRES, Y.; CHAZARENCO, F. Effects of a saturated layer and recirculation on nitrogen treatment performances of a single stage Vertical Flow Constructed Wetland (VFCW). **Water Science And Technology**, Beaumont-la-ronce, v. 68, n. 7, p. 1461-1467, abr. 2013.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. **Journal of Environmental Management**, v. 112, p. 429- 448, 2012.

SANTA CATARINA. **Lei estadual de Santa Catarina nº 14.675, de 13 de abril de 2009**. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20_12_2013_14.30.40.b479cb7a256a963c9e0bbf87bd860d38.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2015.

SANTOS, M.O. **Definição da profundidade de saturação do maciço filtrante em *wetland* construído vertical empregado no tratamento de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação

em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015.

SEZERINO, P. H.; PHILIPPI, L. S. Filtro plantado com macrófita (wetlands) como tratamento de esgotos em unidades residenciais – critérios de dimensionamento. In: **22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Joinville. ANAIS. ABES. 2003.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (Brasil). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2012**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>>. Acesso em: 23 out. 2015.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (Brasil). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2013**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>>. Acesso em: 23 out. 2015.

SEZERINO, P. H. et al. Sistemas naturais para o tratamento descentralizado de esgotos nos municípios da Grande Florianópolis: Ferramenta para o desenvolvimento regional sustentável. In: **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**. Anais do ICTR. Florianópolis. 2004.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (*constructed wetlands*) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC. Florianópolis, 2006. 171 f.

SILVEIRA, D. D.; FILHO, P.B; PHILIPPI, L.S.; KIM, B.; MOLLE, P. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 257-264, jan. 2015.

SULIMAN, F.; FRENCH, H. K.; HAUGEN, L. E.; SOVIK, A. K. Change in flow and transport patterns in horizontal subsurface flow constructed wetlands as a result of biological growth. **Ecological Engineering**, n. 27, p. I24-I33, 2006.

TREIN, C. M.; PELISSARI, C.; HOFFMANN, H.; PLATZER, C. J.; SEZERINO, P. H. Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimentos comercial e residencial empregando a ecotecnologia dos *wetlands* construídos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.15, n.4, p. 351-367, out./dez. 2015.

VOGEL, A. **Química analítica qualitativa**. 5. ed. São Paulo : Editora Mestre Jou. 1981. 665 p.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: UFMG. v.2. 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.**, 3. ed. v. 1. Belo Horizonte: UFMG. 2005.

WPC – Water Pollution Control. **Nutrient Control**. Manual of Practice FD-7 Facilities Design. Water Pollution control Federation. 1983. 203 p.

WU, S.; ZHANG, D.; AUSTIN, D.; DONG, R.; PANG, C. Evaluation of a lab-scale tidal flow constructed wetland performance: oxygen transfer capacity, organic matter and ammonium removal. **Ecological Engineering**, v. 37, p.1789-1795, 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - **USEPA**. Nitrogen control manual. EPA/625/R-93/010, Office of Water, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1993. 311 p.