



Wetlands Brasil

GRUPO DE ESTUDOS EM SISTEMAS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS APLICADOS AO
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Edição Especial

**DIMENSIONAMENTO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS NO BRASIL.
DOCUMENTO DE CONSENSO ENTRE PESQUISADORES E
PRATICANTES.**

Elaboração:

Marcos von Sperling (UFMG) e Pablo H. Sezerino (UFSC)

DEZEMBRO/2018



GRUPO DE ESTUDOS EM SISTEMAS *WETLANDS*
CONSTRUÍDOS APLICADOS AO TRATAMENTO DE
ÁGUAS RESIDUÁRIAS

WETLANDS BRASIL

BOLETIM – EDIÇÃO ESPECIAL

DEZEMBRO/2018

Esclarecimentos:

- ✓ Este documento de livre acesso refere-se a uma Edição Especial do Boletim *Wetlands Brasil*.
- ✓ Os autores ensinam que este documento de **consenso sobre dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil** seja amplamente divulgado e distribuído, podendo ser utilizado no todo ou em partes, desde que citada sua fonte.
- ✓ O link para download encontra-se em <http://gesad.ufsc.br/boletins/> e o mesmo poderá ser disponibilizado e hospedado em outros sites de interesse.

Como referenciar este documento:

von Sperling, M.; Sezerino, P.H. (2018). **Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil**. *Boletim Wetlands Brasil*, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359-0548. Disponível em: <<http://gesad.ufsc.br/boletins/>>.

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	4
2. INTRODUÇÃO	5
2.1. OBJETIVOS DO DOCUMENTO E TIPOS DE SISTEMAS DE <i>WETLANDS</i> INCLUÍDOS.....	5
2.2. TIPOS DE AFLUENTES TRATADOS E OBJETIVOS DE QUALIDADE PARA O EFLUENTE	6
2.3. ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO E APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE PROJETO.....	9
2.4. BASE CONCEITUAL UTILIZADA PARA A PROPOSIÇÃO DOS CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO	11
3. <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL.....	13
4. <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO VERTICAL.....	23
5. <i>WETLAND</i> CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO VERTICAL (SISTEMA FRANCÊS).....	35
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO 1.....	55
AUTORES DAS VERSÕES 1, 2 E 3	63
APOIO TÉCNICO.....	63
LISTA DE COLABORADORES E REVISORES	63

1. APRESENTAÇÃO

A **versão 1** do documento (minuta) sobre o dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil foi elaborada em março de 2018. Constituiu-se em um texto preliminar preparado por Marcos von Sperling e Pablo H. Sezerino, para servir de base para o recebimento de comentários e sugestões pela comunidade técnica e científica no Brasil.

A **versão 2** do documento buscou agregar o máximo possível das sugestões encaminhadas pelos revisores, buscando consolidar abordagens e dirimir divergências. Os revisores que enviaram suas respostas e contribuições estão listados ao final do documento, e os responsáveis por este documento agradecem por todo o empenho e dedicação nesta importante atividade de revisão.

Essa é a **versão 3** do documento, a qual se refere como **versão do consenso obtido até o momento**, podendo ser revista no futuro, sempre que houver justificativas para tal, baseadas em um aumento do conhecimento sobre os sistemas aplicados nas condições brasileiras.

Nessa “**Versão de consenso sobre o dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil**”, estão novamente listados os revisores, destacando-se ainda que este documento foi submetido para análise e manifestações de membros do comitê de direção da *Red Panamericana de Sistemas Humedales* - HUPANAM, os quais endossaram a iniciativa e não propuseram alterações adicionais.

2. INTRODUÇÃO

2.1. Objetivos do documento e tipos de sistemas de *wetlands* incluídos

O presente documento não pretende cumprir o papel de uma proposta de Norma Brasileira. Os pesquisadores sentem que a experiência acumulada nacional dará base, em um futuro próximo (mas não agora), para critérios de dimensionamento que venham a constituir uma futura norma.

O objetivo é de buscar uma consolidação, alcançada por meio de um consenso entre os pesquisadores e praticantes da área de *wetlands* (sistemas alagados construídos), dos principais critérios e parâmetros de projeto que podem ser utilizados para as **três principais variantes do sistema:**

- *Wetland construído de escoamento horizontal subsuperficial (recebendo esgoto pré-tratado);*
- *Wetland construído de escoamento vertical (recebendo esgoto pré-tratado);*
- *Wetland construído de escoamento vertical (Sistema Francês) (recebendo esgoto bruto).*

As configurações das três variantes são as tradicionais abordadas na literatura, **não se cobrindo aqui concepções inovadoras e com características peculiares**, ainda que sejam promissoras e que venham demonstrando sucesso em aplicações específicas. Reconhece-se a existência de sistemas híbridos e sistemas com características de projeto e operação distintas das três cobertas neste documento. No entanto, dada esta diversidade, a proposta explícita do documento é a de cobrir apenas as três variantes tradicionais na literatura e mais utilizadas em nível mundial. É importante destacar ainda que **não se inclui também a variante de *wetland* construído de escoamento horizontal superficial**, pela menor experiência existente no Brasil acerca desta modalidade.

Adota-se aqui a expressão “***wetlands* construídos**”, mas sabe-se que na literatura nacional há outras expressões, com destaque para “sistemas alagados construídos”, além de diversas alternativas, tais como “terras úmidas construídas”, “leitos plantados”, “leitos com macrófitas”, “filtros plantados com macrófitas”, “filtros com

macrófitas”, “leitões cultivados”, “sistemas de zonas de raízes”, “jardins filtrantes” etc. Este documento não entra no mérito da terminologia, mantendo, por simplicidade, o termo “*wetlands* construídos”, que tem sido usado nos seminários nacionais e publicações do grupo de pesquisadores que leva este mesmo nome. Em âmbito internacional, os termos mais utilizados, em inglês, são “*constructed wetlands*” e “*treatment wetlands*”.

2.2. Tipos de afluentes tratados e objetivos de qualidade para o efluente

A aplicação principal do documento é para **sistemas coletivos de pequeno porte** (pequenas comunidades), recebendo **esgotos domésticos**. Com a adoção de considerações especiais e adaptações pertinentes, pode-se também cobrir **sistemas individuais ou unifamiliares**, tratando **esgotos ou águas cinzas**. Em resumo, tem-se:

- **Esgotos domésticos em sistemas coletivos de pequeno porte.** Trata-se da aplicação principal do presente documento. Deve-se levar em consideração as características dos esgotos da comunidade, condomínio ou empreendimento, em função da provável maior variabilidade da vazão afluente (relação entre vazão máxima e vazão média), quando comparado aos sistemas de maior porte. Deve-se avaliar também se os esgotos são mais concentrados do que os esgotos domésticos tradicionalmente relatados pela literatura técnica, mais dedicada aos sistemas de tratamento de esgotos sanitários oriundos de localidades de maior porte. Os efluentes tratados poderão ser lançados em corpos de água, caso cumpram com as regulamentações aplicáveis no local, ou usados para outras finalidades, como irrigação. No entanto, deve-se destacar que os efluentes produzidos pelos sistemas de *wetlands* cobertos no presente documento não são especialmente eficientes na remoção ampla dos organismos patogênicos, e etapas adicionais e cuidados complementares no tratamento dos esgotos e no manuseio do efluente devem ser incorporados, de forma a que esta prática possa ser feita de forma segura.
- **Esgotos domiciliares de sistemas individuais ou unifamiliares.** Os princípios de funcionamento dos *wetlands* são similares aos dos sistemas coletivos de pequeno porte. No entanto, o perfil temporal de geração dos esgotos ao longo do dia poderá ser bem diferente, dada a variabilidade da vazão e do tipo de efluente produzido em uma residência (descarga de vasos sanitários, água de chuveiros, água de pias de banheiros, águas de pias de cozinha, águas de tanques ou máquinas de lavar

roupa etc). Neste caso, pressupõe-se a existência de caixa de gordura na saída dos esgotos da residência, além de uma unidade de pré-tratamento a montante do *wetland*, tipicamente representada por tanques sépticos, que propiciará remoção dos sólidos sedimentáveis e certo amortecimento na variação dos esgotos. Dada a provável localização do sistema de tratamento dentro do próprio lote, deve-se evitar sistemas de *wetlands* que tenham a disposição dos esgotos acima da superfície do leito filtrante (*wetlands* verticais com tubulações de distribuição acima do meio suporte e sistema francês) e que possibilitem contato direto dos moradores ou usuários, devido aos riscos sanitários, ou a própria rejeição dos moradores, em função de aspectos estéticos. Caso se deseje que o efluente tratado seja usado para irrigação no próprio lote, deve-se incorporar etapas no tratamento dos esgotos (não abordadas neste documento) que possibilitem a remoção dos organismos patogênicos e deem garantias de que o efluente produzido será sanitariamente adequado.

- **Águas cinzas de sistemas individuais ou unifamiliares.** As águas cinzas são as águas geradas pelas pias, tanques e chuveiros, ou seja, excluem-se as águas fecais (fezes e urinas) oriundas da descarga de vasos sanitários. Devido a sua especificidade, o presente documento não cobre as chamadas águas amarelas, que são produzidas em vasos sanitários que fazem a separação das urinas (águas amarelas) e das fezes. Por não incorporarem águas fecais, as águas cinzas possuem menores concentrações de matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos. No entanto, demandam tratamento, que pode ser feito pelo sistema de *wetlands*. Caixas de gordura são necessárias, mas usualmente não há necessidade de tanques sépticos a montante dos *wetlands*. Ainda que não haja águas de descarga de vasos sanitários, recomenda-se a manutenção dos cuidados sanitários e da verificação da adequabilidade do uso do efluente tratado, por exemplo, para irrigação no próprio lote. No caso de sistemas prediais, com perspectivas de outros usos para o efluente tratado, deve-se também levar em consideração os aspectos sanitários, estéticos e de aceitação dos moradores. As eficiências de remoção típicas esperadas para os principais poluentes, apresentadas no presente documento, não se aplicam às águas cinzas, uma vez que as próprias concentrações afluentes são distintas das concentrações dos esgotos domésticos ou domiciliares.

Devido às suas características totalmente específicas, o documento **não cobre o tratamento de: (a) efluentes industriais, (b) lodo de tanques sépticos, (c) lodo**

gerado em estações de tratamento de esgotos, (d) líquidos de drenagem pluvial e (e) cursos d'água.

Para a principal aplicação coberta neste documento (esgotos domésticos em sistemas coletivos de pequeno porte), o pressuposto usual é que os *wetlands* de escoamento horizontal e vertical recebam um afluente que tenha sido previamente tratado em nível primário em um tanque séptico ou, em alguns casos, em nível secundário com processos com eficiência limitada na remoção de matéria orgânica, como reatores anaeróbios compartimentados ou reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (reatores UASB). Não se inclui aqui a aplicação para polimento de sistemas de tratamento secundário de elevada eficiência, caracterizando a aplicação dos *wetlands* como tratamento terciário. Na terceira variante (**sistema francês**), assume-se o recebimento de **esgoto bruto** (após gradeamento) nas unidades de *wetlands*.

Os sistemas aqui descritos objetivam principalmente a **remoção de matéria orgânica** (DBO e DQO), sendo dimensionados para tal, além de sólidos em suspensão. Nos sistemas verticais, pode-se alcançar também uma satisfatória remoção de nitrogênio amoniacal. Não se apresentam critérios de projeto para sistemas que objetivem a remoção de nitrogênio total e fósforo total, bem como coliformes, embora se reconheça esta possibilidade.

Considera-se que cada aplicação específica deve buscar a adoção de dados de entrada e critérios de projeto que melhor reflitam a **realidade local**. Portanto, é natural que em determinados projetos possa haver a utilização de valores diferentes dos propostos no presente documento, desde que tenham uma base sólida ou referenciada para sua adoção, e que sejam respaldados por operações exitosas, em escala real, de longo prazo e com monitoramento adequado em suas respectivas regiões. A utilização de dados locais deve ser sempre valorizada, e neste sentido entende-se que este documento de consenso deva propor valores gerais, que possam cobrir uma ampla gama de situações, mas não ser exaustivo na busca de uma difícil completude.

O aumento da utilização de sistemas *wetlands* no Brasil, com monitoramento adequado e estudos de longo prazo, permitirá o eventual ajuste futuro dos valores propostos aqui, a partir da consolidação da experiência nacional.

Deve-se esclarecer que o presente documento busca refletir a **experiência nacional**, mas tem uma **forte influência da literatura internacional**, que já atingiu um nível de consolidação, tendo por base estudos abrangentes de milhares de sistemas em escala real operando há anos. Sempre que pertinente, adaptações em determinados valores são feitas, buscando uma melhor acomodação para nossas condições climáticas e características de esgotos.

2.3. Estruturação do documento e apresentação dos critérios de projeto

Para cada um dos três sistemas de *wetlands* cobertos no presente documento são apresentados os seguintes itens:

- **Configuração do sistema** (descrição, ilustração esquemática, características físicas);
- **Critérios e parâmetros de projeto** (critérios de projeto para se calcular as dimensões principais das unidades; faixas de eficiências de remoção esperadas).

Os critérios e parâmetros de projeto abrangem os seguintes elementos:

- Cálculos de processo: taxas de aplicação que permitam a determinação da área superficial requerida; critérios para especificação do número de unidades em paralelo a serem adotadas e das principais dimensões das unidades (comprimento, largura, profundidade);
- Detalhes hidráulicos: tubulações de entrada, distribuição, coleta e saída;
- Detalhes do meio filtrante: espessura, granulometria;
- Detalhes construtivos: taludes, borda livre, declividade de fundo, impermeabilização dos taludes e do fundo;
- Plantas: listagem de plantas comumente utilizadas;
- Estratégia operacional: alimentação contínua ou em bateladas (pulsos); eventual alternância entre leitos em paralelo;
- Pré-tratamento requerido;
- Eficiências de remoção esperadas para a etapa de *wetlands* e para o sistema, como um todo: faixas típicas esperadas para esgotos domésticos (não são efetuados cálculos usando modelos matemáticos).

O cálculo da área superficial requerida utiliza os conceitos simplificados de **taxas de aplicação orgânica superficial** ($\text{gDBO}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) e **taxa de aplicação hidráulica superficial** ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$). A DBO referenciada no presente documento é a DBO_5^{20} , ou seja, DBO de 5 dias a 20°C . Dentre estes dois critérios, para as águas residuárias cobertas no âmbito deste documento, usualmente a taxa de aplicação orgânica superficial é considerada a mais importante, e a taxa de aplicação hidráulica superficial pode ser adotada como um elemento de verificação. Não se apresentam aqui modelos matemáticos (ainda que simplificados) para a estimativa das concentrações efluentes, uma vez que eles estão associados aos fundamentos teóricos de cinética de reações e hidráulica de reatores, tópicos estes fora do escopo deste documento. No entanto, reconhece-se sua importância, e eles podem ser utilizados de forma complementar ao presente dimensionamento.

O **Anexo 1**, ao final do documento, apresenta uma proposição de uma sequência de dimensionamento simplificada e comum aos três tipos de wetlands, relacionada aos cálculos de processo, e que conduz à determinação da área superficial, número de unidades e principais dimensões das unidades de *wetlands*. Não se apresenta aqui o dimensionamento da etapa de tratamento prévio (tanques sépticos, reatores anaeróbios compartimentados, reatores UASB e outros). Para tanto, o projetista deverá consultar a literatura específica.

Deve-se destacar que a vazão afluente a ser considerada no dimensionamento é a **vazão média**. No caso de sistemas coletivos (tratamento de esgotos de pequenas comunidades), este valor deve incorporar o componente associado à vazão de infiltração (entrada na rede de coleta de água do subsolo, que aumenta a vazão, dilui a concentração, mas não altera a carga). Embora a entrada de água de chuva diretamente na rede de coleta (vazão parasitária) normalmente não seja considerada em projetos ao se estimar a vazão afluente, deve-se verificar se ela é importante no contexto local, e buscar corrigir os pontos de entrada, muitas vezes associados às ligações clandestinas de águas de chuva na rede de esgotos.

Ao se avaliar as **eficiências de remoção** resultantes de sistemas de *wetlands*, deve-se levar em consideração o balanço hídrico no sistema. Devido à evapotranspiração que ocorre em função das plantas, a perda de água para a atmosfera pode ser expressiva, causando um aumento da concentração dos poluentes no meio líquido. Assim, a eficiência de remoção, ao invés de ser calculada com base no conceito usual que

envolve as concentrações afluente e efluente, deve ser calculada com base na **carga afluente** (vazão afluente × concentração afluente) e na **carga efluente** (vazão efluente × concentração efluente).

2.4. Base conceitual utilizada para a proposição dos critérios e parâmetros de projeto

Por uma questão de simplicidade neste documento, optou-se pela apresentação de um número bem reduzido de referências. Reconhece-se a existência de livros-texto internacionais bastante aprofundados no tema de *wetlands* construídos, além de publicações consolidadas e didáticas em periódicos científicos, mas buscou-se evitar aqui o caráter essencialmente acadêmico de uma revisão de literatura. Estas publicações dão a base conceitual para a proposta, mas não são referenciadas de forma explícita, para evitar um excesso de textos, vários deles de acesso mais difícil, e que poderiam trazer dificuldades para a interpretação por parte de vários usuários deste documento de consenso. Desta forma, com relação à experiência internacional, utilizou-se o relato consolidado mais recente disponível da experiência e de normativas de projeto de diversos países (principalmente Estados Unidos, Reino Unido, Espanha, República Tcheca, Dinamarca, Alemanha, Áustria e França), apresentado de forma sintetizada no livro-texto do grupo de trabalho da IWA (IWA Task Group, 2017)¹, que teve como autores e revisores um elenco bem amplo de grandes especialistas internacionais no tema, e que se encontra disponível em versão livre, para *download* gratuito. Em locais específicos do texto, outras referências foram citadas, de forma a endossar ou esclarecer algum dado ou informação inserido nas tabelas-resumo. Sempre que julgado necessário ou possível, alguns parâmetros de projeto sofreram certa adaptação, em comparação com a literatura internacional, visando adequá-los às nossas condições brasileiras.

Com relação à experiência nacional, uma importante contribuição veio dos textos e pesquisas do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado da Universidade Federal de Santa Catarina, coletivamente aqui denominados de GESAD/UFSC, bem como da Universidade Federal de Minas Gerais, além da experiência coletiva acumulada ao longo dos seminários nacionais organizados pelo Grupo Wetlands Brasil.

¹ DOTRO, G., LANGERGRABER, G., MÖLLE, P., NIVALA, J., PUIGAGUT, J., STEIN, O., VON SPERLING, M. (2017). *Treatment wetlands*. Volume 7. Biological Wastewater Treatment Series. IWA Task Group on Mainstreaming the Use of Treatment Wetlands. IWA Publishing. 154 p. ISBN 9781780408767. Disponível para download em: <http://www.iwapublishing.com/open-access-ebooks/3567>.

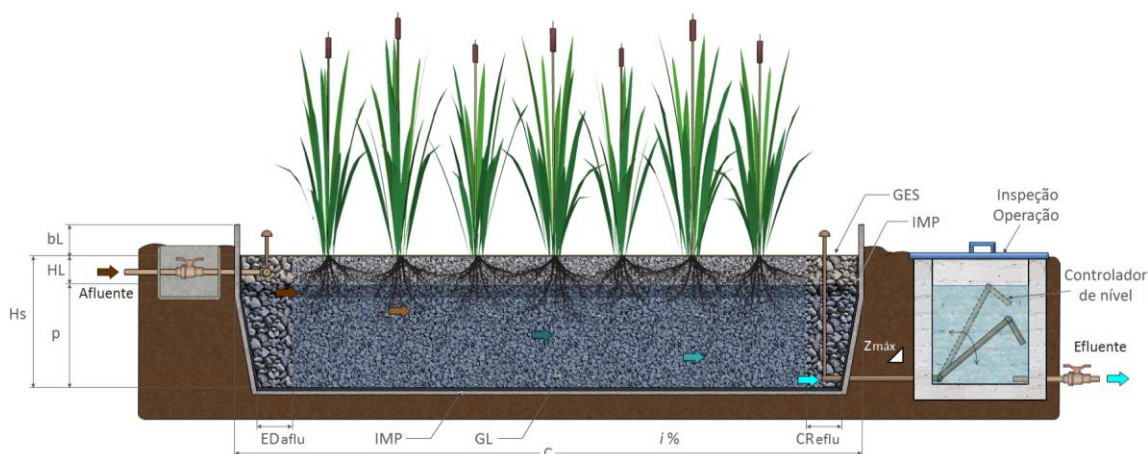
Ademais, a estratégia utilizada de se encaminhar o documento para revisão pelos pares, em duas etapas de revisão e adequação, objetiva garantir que a versão final realmente reflita o conhecimento disponível e consolidado em nosso país, no presente momento.

3. WETLAND CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL

3.1. Configuração do sistema

No *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial (WCH), o líquido a ser tratado é disposto na porção inicial do leito, denominada “zona de entrada” (geralmente composta por brita de maior porte ou material similar), atingindo a zona principal do leito, por onde irá escoar vagarosamente através do material filtrante (também denominado meio suporte ou substrato; geralmente brita ou cascalho), até atingir a porção final, na extremidade oposta (também composta por brita de maior porte), denominada de “zona de saída”. O escoamento predominante do líquido ocorre de forma horizontal, ao longo da seção longitudinal, e o nível do líquido fica abaixo do nível superior do material filtrante. O escoamento ocorre, portanto, em um meio saturado hidráulicamente, em que os espaços vazios entre os grãos do meio suporte estão preenchidos pelo líquido em tratamento (Figura 1).

Figura 1. Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial.



Legenda:

<p>Hs - altura do meio suporte; p - profundidade útil do líquido; HL - distância vertical entre o nível superior do esgoto e o topo do meio suporte; Hs - altura do meio suporte (substrato); bL - borda livre; distância vertical entre o nível superior do meio suporte e o topo do talude ou parede. C - comprimento longitudinal; Zmáx - declividade máxima do talude interno (quando necessário);</p>	<p>IMP - impermeabilização (fundo e laterais); GES - granulometria da zona de entrada e saída; GL - granulometria do leito filtrante; ED aflu - zona de entrada e distribuição do afluente; CR eflu - zona de coleta e retirada do efluente; i % - declividade longitudinal de fundo.</p>
--	--

Tabela 1. Características de dimensionamento relacionadas ao *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial.

Item	Sigla	Valor	Comentários
Altura do meio suporte	Hs	0,50 a 0,90 m	Como os <i>wetlands</i> são dimensionados com base na área superficial, maiores profundidades implicarão maiores volumes do meio suporte a serem adquiridos. Os maiores valores de altura estão normalmente associados a granulometrias mais finas do meio filtrante, de forma a se ter uma maior área da seção transversal (altura x largura) e, conseqüentemente, reduzir a perda de carga hidráulica. Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Profundidade da lâmina de esgoto	p	0,40 a 0,80 m	Os maiores valores de profundidade estão normalmente associados a granulometrias mais finas do meio filtrante, de forma a se ter uma maior área da seção transversal (altura x largura) e, conseqüentemente, menor perda de carga hidráulica. Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Distância entre o nível de esgoto e o topo do meio suporte	HL	~ 0,10 m	Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Borda livre (distância entre o topo do meio suporte e o nível do terreno fora da unidade ou da parte superior da parede, caso existente)	bL	~ 0,10 a 0,20 m	Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Relação comprimento : largura	C : L	2:1 - 4:1	Estes são valores usuais, e podem ser modificados, em função de características específicas do projeto. Maiores valores da relação C:L (leitões mais alongados) são mais eficientes como reatores biológicos, mas estão associados a maiores perdas de carga hidráulica. Visando à redução da perda de carga, principalmente quando se têm elevadas taxas de aplicação hidráulica superficial, há sistemas que possuem a entrada distribuída ao longo da maior dimensão, com o líquido percorrendo longitudinalmente a menor dimensão. Neste caso, opcionalmente, cada unidade pode ser subdividida internamente em módulos paralelos, alongados, ao longo da menor dimensão do <i>wetland</i> , com entradas individuais. Ref (relação C:L): IWA Task Group (2017)
Largura máxima de cada módulo	Lmax	25 a 30 m	Objetivo: facilitar a distribuição equânime da vazão ao longo da largura da unidade ou módulo. Ref: IWA Task Group (2017)

Continua...

Tabela 1. Características de dimensionamento relacionadas ao *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor	Comentários
Número de unidades em paralelo	N	-	A divisão da área total requerida em mais de uma unidade propicia maior flexibilidade operacional, no caso da necessidade de manutenção e limpeza em uma das unidades. Em sistemas maiores, poderá haver um maior número de unidades em paralelo, de forma a evitar que haja unidades individuais de grandes dimensões. Em sistemas de tratamento de esgotos individuais ou de pequeno porte, muitas vezes se adota apenas uma unidade, mas a possibilidade da adoção de pelo menos duas unidades em paralelo pode ser considerada. Em sistemas de pequeno porte, alguns projetistas incorporam uma segurança adicional, calculando a área requerida para uma unidade, mas adotando outra unidade igual, em paralelo, que pode ser operada com alternância da alimentação entre as duas unidades.
Inclinação das paredes ou taludes internos (horizontal/vertical)	Z	Variando de 0:1 a 2:1	Em sistemas de pequeno porte ou individuais, é frequente a adoção de paredes verticais, de alvenaria ou concreto, ou mesmo o emprego de unidades pré-fabricadas, por exemplo, de fibra de vidro. Neste caso de paredes verticais, não há inclinação, ou seja, $Z = 0:1$. Em sistemas com taludes internos e escavação em solo, a inclinação do talude dependerá do tipo de solo, a ser definido com base em conhecimentos geotécnicos do solo local ou do solo de empréstimo a ser utilizado. Neste caso, valores usuais de Z situam-se entre 1:1 e 2:1, mas poderão ser diferentes, em função do conhecimento geotécnico do solo.
Declividade longitudinal do fundo	i	0 a 1 %	Alguns sistemas, principalmente com elevadas taxas de aplicação hidráulica, adotam declividades longitudinais para compensar a perda de carga advinda da colmatação dos poros. O nível d'água na saída é ditado pela altura da tubulação de saída, ao passo que o nível d'água na entrada é mais elevado, pois é acrescido da perda de carga hidráulica, que aumenta à medida que a colmatação no leito progride com o tempo. Caso a taxa de aplicação hidráulica superficial seja baixa, é possível que a perda de carga seja reduzida, mesmo com a progressão da colmatação. Nestes casos, e também em sistemas de pequeno porte, a inclusão de uma declividade de fundo pode ser desnecessária. Em sistemas com maiores taxas de aplicação hidráulica, pode-se considerar a inclusão da declividade de fundo. Caso seja adotada a declividade, ela deve ser apenas no fundo, e o topo do meio suporte permanece nivelado.

Tabela 2. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentários
Leito filtrante			
Granulometria do leito	GL	Poderão ser usados brita, cascalho, escória siderúrgica ou outros materiais que possuam resistência física e que não sofram desagregação devido às atividades químicas e biológicas que ocorrem no leito. A granulometria destes materiais é referenciada em termos da britagem: brita 0 (4,8 a 9,5 mm); brita 1 (9,5 a 19 mm); ou brita 2 (19 a 25 mm).	<p>Granulometrias menores propiciam melhor capacidade de filtração, mas conduzem a entupimentos (colmatção) mais rápidos.</p> <p>Granulometrias menores devem estar associadas a maiores alturas do meio suporte e a menores taxas de aplicação hidráulica.</p> <p>Não se deve misturar materiais com granulometrias diferentes no leito, pois os grãos menores podem ocupar os espaços vazios dos grãos maiores e possibilitar colmatção mais rápida.</p> <p>Usualmente a especificação da granulometria do material é feita em termos do diâmetro efetivo d_{10} e do coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}). A literatura cita especificações neste sentido, e que poderão ser utilizadas no projeto. No entanto, no presente texto, optou-se por uma descrição mais simplificada, em termos apenas da classificação granulométrica ou britagem do material, reconhecendo que, em vários casos, será difícil a obtenção de um material que cumpra com especificações rigorosas acerca da granulometria. Em termos gerais, o material deve ser limpo e isento de solos e finos, e deve ser uniforme, ou seja, deve-se evitar valores elevados do coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}).</p> <p>Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017).</p>
Granulometria do leito nas zonas de entrada (distribuição do afluente) e saída (coleta do efluente)	GES	Britagem correspondente a brita 4 (50 a 76 mm) ou pedra de mão (granulometria superior a 76 mm)	

Continua...

Tabela 2. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentários
Detalhes hidráulicos e construtivos			
Entrada e distribuição do afluente	ED aflu	<p>Comprimento da zona de entrada entre 0,5 e 1,0 m. Usualmente se adota entrada submersa no leito de distribuição, para evitar a exposição de esgoto acima da superfície. No entanto, há sistemas que têm a distribuição em tubulações ou canais abertos, de forma a facilitar a limpeza. Em qualquer situação, a estrutura de entrada deve cobrir toda a largura da unidade ou módulo.</p> <p>O dimensionamento das tubulações deverá seguir cálculos hidráulicos. Para sistemas de pequeno porte, usualmente se utiliza tubulação de distribuição DN 100 mm com furos de 20 mm de diâmetro, espaçados a cada 10 cm.</p>	
Coleta e retirada do efluente	CR eflu	<p>Comprimento da zona de saída entre 0,5 e 1,0 m. Para sistemas de pequeno porte, a coleta do efluente é por tubulação de drenagem DN 100 mm perfurada com furos de 20 mm de diâmetro espaçados a cada 10 cm, cobrindo a largura da unidade ou módulo, e situada próximo ao fundo do <i>wetland</i>. Podem ser conduzidos cálculos hidráulicos específicos para se dimensionar a tubulação de coleta. Na saída, introduzir uma forma de alterar o nível de água no final do <i>wetland</i> (controlador de nível) por meio de tubulação regulável, tubulação flexível ou válvula telescópica, usualmente colocada em caixa situada fora do <i>wetland</i>.</p>	
Impermeabilização do fundo e paredes ou taludes internos	IMP	<p>Utilização de materiais e métodos que garantam a impermeabilização do fundo e das paredes (alvenaria ou concreto) ou taludes internos (solo) e que garantam a resistência mecânica e aos impactos da radiação solar (em locais expostos).</p> <p>Materiais frequentemente utilizados são geomembranas ou camadas de lona plástica e bidim intercalados, quando escavados em solo. No caso de geomembranas de PEAD, a espessura mínima recomendada é de 1,0 mm, no caso de sistemas individuais ou tratando esgotos de poucas residências, e de 1,5 mm, no caso de ETEs atendendo populações superiores a cerca de 50 habitantes. Caso permitido por órgão licenciador, pode ser utilizada, alternativamente, argila compactada. As especificações do material sintético ou da camada de argila, incluindo sua espessura, devem garantir uma impermeabilização adequada, tal como estabelecida por critérios geotécnicos. Após a obra deverão ser realizados testes de estanqueidade.</p> <p>Sistemas pequenos podem utilizar unidades pré-moldadas de fibra de vidro, que, caso adequadamente construídas, são consideradas estanques.</p>	Ref: Espessura da geomembrana: DWA (2017).

Continua...

Tabela 2. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentários
Plantas			
Plantas potencialmente utilizáveis		<p><i>Typha</i> (taboa); <i>Cyperus papyrus</i> (papiro); <i>Zizania bonariensis</i> (<i>junco</i>); <i>Juncus spp</i> (<i>junco</i>); <i>Eleocharis spp</i>; <i>Alternanthera spp</i>; <i>Brachiaria spp</i>; <i>Cynodon spp</i> (capim Tifton 85); <i>Pennisetum purpureum</i> (capim-elefante); <i>Chrysopogon zizanioides</i> (<i>capim Vetiver</i>); <i>Canna generalis</i> (biri).</p>	Outras plantas podem ser potencialmente utilizáveis, desde que se adaptem bem às condições operacionais impostas. Pode-se valorizar a utilização de plantas com funções ornamentais ou que possibilitem alguma utilização do material após corte.
Manejo das plantas		<p>As plantas devem ter um manejo adequado, de forma a maximizar sua contribuição positiva. Usualmente são plantadas com cerca de 4 propágulos por m² (variável com a espécie) mas, com o passar do tempo, a densidade de plantas aumenta consideravelmente. Deve-se controlar o crescimento de espécies invasoras. Cortes mais frequentes, realizados durante a fase de crescimento da planta, potencializam uma maior capacidade de extração de nutrientes e outros compostos. A remoção das plantas, após o corte, evita a liberação no leito filtrante dos compostos absorvidos.</p> <p>Em sistemas de grande porte, a biomassa oriunda da poda das macrófitas poderá ser encaminhada para compostagem.</p>	

3.2. Critérios e parâmetros de projeto de *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial

Tabela 3. Critérios de projeto empregados no *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial.

Item	Valor	Comentários
Taxa de aplicação orgânica superficial máxima	6 a 15 gDBO.m ⁻² .d ⁻¹	<p>A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade.</p> <p>Calcular com a carga afluente baseada na vazão média.</p> <p>A área superficial requerida é o quociente entre a carga de DBO afluente ao <i>wetland</i> e a taxa de aplicação orgânica superficial adotada.</p> <p>Deve-se priorizar a taxa de aplicação orgânica com relação à taxa de aplicação hidráulica ou, caso se deseje ficar a favor da segurança, deve-se adotar o maior valor calculado para a área superficial, tendo por base as taxas de aplicação hidráulica e orgânica.</p> <p>Os maiores valores das taxas de aplicação orgânica superficial estão usualmente associados a condições climáticas mais favoráveis (temperaturas mais quentes), ao passo que os menores valores estão usualmente associados a condições climáticas menos favoráveis (temperaturas mais frias), dentro da faixa climática brasileira.</p> <p>Valores mais reduzidos da taxa de aplicação orgânica superficial (dimensionamentos mais conservadores) conduzem a maiores áreas superficiais requeridas. No entanto, deve-se levar em conta que, para uma determinada condição climática, a expectativa é de que se tenham, com menores taxas de aplicação, maiores eficiências de remoção e valores mais reduzidos das concentrações efluentes, ou seja, um melhor desempenho. Adicionalmente, espera-se uma operação mais longa, sem problemas de colmatação. A decisão do projetista deve levar em consideração, portanto, os requisitos de área, a expectativa com relação ao efluente final e à longevidade da operação, sem a necessidade de limpeza ou troca do meio filtrante.</p> <p>Valores da taxa de aplicação orgânica superficial mais próximos da faixa superior ou, eventualmente, mais elevados, poderão ser adotados, principalmente em locais quentes, desde que sejam respaldados por operações exitosas, em escala real, de longo prazo e com monitoramento adequado em suas respectivas regiões.</p> <p>Ref: adaptado de IWA Task Group (2017) e de resultados da aplicação de modelos matemáticos de dimensionamento, com coeficientes de remoção (K) elevados, buscando retratar condições tropicais.</p>

Continua...

Tabela 3. Critérios de projeto empregados no *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial - *Continuação*.

Item	Valor	Comentários
Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima	Tratamento de efluente primário, como tanque séptico: 0,02 a 0,08 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ ou pós-tratamento de efluente secundário advindo de processo pouco eficiente: 0,04 a 0,12 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$	<p>A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade.</p> <p>Calcular com vazão média.</p> <p>A área superficial requerida é o quociente entre a vazão afluente ao sistema e a taxa de aplicação hidráulica superficial adotada.</p> <p>Deve-se priorizar a taxa de aplicação orgânica com relação à taxa de aplicação hidráulica ou, caso se deseje ficar a favor da segurança, deve-se adotar o maior valor calculado para a área superficial, tendo por base as taxas de aplicação hidráulica e orgânica.</p> <p>Nas duas aplicações, foram adotados os mesmos valores da taxa de aplicação orgânica superficial (ver item acima), e adotadas as taxas de aplicação hidráulicas superficiais resultantes, levando em consideração que a segunda aplicação (tratamento de efluente secundário) teria um pré-tratamento com o dobro da eficiência de remoção de DBO da primeira aplicação (efluente primário).</p> <p>Comentários similares, feitos para a taxa de aplicação orgânica superficial, relativos à aplicabilidade dos valores da faixa e à possibilidade de se adotarem valores diferentes (ver acima), podem ser feitos também para a taxa de aplicação hidráulica superficial.</p>
Taxa de aplicação orgânica máxima na seção transversal	250 $gDBO.m^{-2}.d^{-1}$	<p>Calcular como o quociente da carga de DBO afluente (baseada na vazão média) e a área da seção transversal (largura x profundidade útil do líquido) na entrada (após a zona de distribuição).</p> <p>Este parâmetro de projeto visa evitar cargas aplicadas excessivas na seção transversal, que poderiam implicar maiores acúmulos de sólidos na zona próxima à entrada e colmatção mais rápida.</p> <p>A maior colmatção deverá ocorrer na saída da zona de entrada (com granulometria maior) e trecho inicial da zona filtrante principal (com granulometria menor, que induzirá um maior acúmulo de sólidos).</p> <p>Ref: IWA Task Group (2017).</p>

Tabela 4. Faixas esperadas de desempenho de tratamento relacionado ao *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial.

Item	<i>Wetlands</i> horizontais recebendo efluente de tratamento primário	<i>Wetlands</i> horizontais recebendo efluente de tratamento secundário de baixa eficiência	Comentário
Tipos de tratamento a montante dos <i>wetlands</i>			
Tratamento preliminar	Gradeamento e desarenação	Gradeamento e desarenação	
Tratamento primário ou secundário a montante do <i>wetland</i>	Tanques sépticos (várias configurações)	Exemplos: reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente; reatores anaeróbios compartimentados; 1º estágio do sistema francês de <i>wetlands</i> verticais	Poderá haver outras unidades ou sistemas na etapa anterior de tratamento biológico.
Eficiências de remoção			
<i>Eficiência de remoção assumida na etapa a montante do <i>wetland</i></i>			
DBO	25 a 35 %	60 a 75 %	As eficiências apresentadas retratam faixas esperadas, caso o projeto, a construção e a operação sejam adequados. Naturalmente, poderão ocorrer valores inferiores ou superiores. Caso desejado, o projetista poderá ficar a favor da segurança, assumindo valores mais próximos ao limite inferior da faixa. Este comentário é válido para todos os parâmetros de qualidade cobertos neste item.
DQO	20 a 30 %	55 a 70 %	
<i>Eficiências globais de remoção esperadas no sistema como um todo</i>			
DBO	> 85 %	> 90 %	Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC As eficiências apresentadas retratam faixas esperadas, caso o projeto, a construção e a operação sejam adequados. Naturalmente, poderão ocorrer valores inferiores ou superiores. Caso desejado, o projetista poderá ficar a favor da segurança, assumindo valores mais próximos ao limite inferior da faixa. Este comentário é válido para todos os parâmetros de qualidade cobertos neste item.

Continua...

Tabela 4. Faixas esperadas de desempenho de tratamento relacionado ao *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial - *Continuação*.

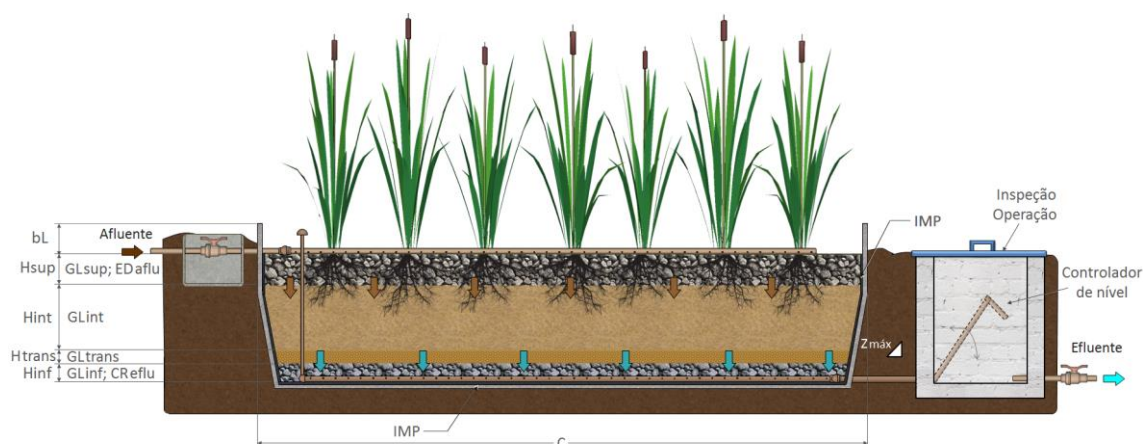
Item	Wetlands horizontais recebendo efluente de tratamento primário	Wetlands horizontais recebendo efluente de tratamento secundário de baixa eficiência	Comentário
<i>Eficiências globais de remoção esperadas no sistema como um todo</i>			
DQO	> 80 %	> 85 %	Ref: GESAD/UFSC
SST	> 85 %	> 90 %	Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group 2017; experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
N amoniacal	< 40 %	< 40 %	Em condições climáticas bem favoráveis, com o emprego de baixas taxas de aplicação superficial, com o cultivo de macrófitas eficientes na extração de nitrogênio e um manejo da vegetação que conduza a cortes mais frequentes, na fase de crescimento, podem-se alcançar eficiências de remoção mais elevadas. Ref: adaptado de IWA Task Group (2017).
N total	< 50 %	< 50 %	Ver comentário relativo a N amoniacal. Ref: adaptado de IWA Task Group (2017).
Fósforo total	< 20 %	< 20 %	Ref: adaptado de IWA Task Group (2017).
Coliformes termotolerantes	1 a 3 unidades log	1 a 3 unidades log	Ref: Maiga, von Sperling, Mihelcic (2017).

4. WETLAND CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO VERTICAL

4.1. Configuração do sistema

No *wetland* construído de escoamento vertical (WCV), o líquido a ser tratado é disposto uniformemente sobre toda a área superficial do módulo de tratamento, de forma intermitente, percolando em trajetória descendente por entre o sistema radicular das macrófitas e dos poros do material filtrante, o qual é usualmente composto por areia, até ser coletado no fundo por um sistema de drenagem (Figura 2). O meio permanece não saturado, isto é, os espaços vazios entre os grãos do meio suporte não estão preenchidos com líquido, mas com ar. Em decorrência, predominam condições aeróbias no leito filtrante.

Figura 2. Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de escoamento vertical.



Legenda:

Hsup - altura da camada superior do meio suporte (camada opcional);	GLsup - granulometria do leito na camada superior do meio filtrante;
Hint - altura da camada intermediária, principal, de filtração;	GLint - granulometria do leito na camada intermediária, principal, de filtração;
Htrans - altura da camada de transição;	GLtrans - granulometria do leito na camada de transição
Hinf - altura da camada inferior, de drenagem;	GLinf - granulometria do leito na camada inferior, de drenagem;
bL - borda livre; distância vertical entre o nível superior do meio suporte e o topo do talude ou parede	ED aflu - zona de entrada e distribuição do afluente, na camada superior do meio filtrante;
C - comprimento;	CR eflu - zona de coleta e retirada do efluente na camada de drenagem, no fundo.
Zmáx - declividade máxima do talude (quando necessário);	
IMP - impermeabilização (fundo e laterais);	

Tabela 5. Características de dimensionamento relacionadas ao *wetland* construído de escoamento vertical.

Item	Sigla	Valor	Comentário
Altura da camada superior do meio suporte	Hsup	0,05 a 0,10 m	A camada superior é opcional, e visa a prevenir erosão durante a alimentação intermitente, evitar a presença de uma lâmina d'água (esgoto com tratamento parcial) superficial acima do leito e possibilitar uma distribuição mais uniforme do afluente. Portanto, é recomendável sua implantação. Ref: IWA Task Group (2017); GESAD/UFSC; comentários de revisores.
Altura da camada de filtração	Hint	0,40 a 0,60 m	Esta é a camada principal do leito, responsável pela maior parte do tratamento. Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017) e Hoffmann et al (2011); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC.
Altura da camada de transição	Htrans	0,10 m	Esta camada visa a propiciar uma transição granulométrica entre a camada filtrante e a camada de drenagem, impedindo que os grãos da camada superior penetrem na camada inferior. Esta camada é opcional, e pode não ser adotada caso se considere que não haverá penetração da camada de filtração na camada inferior, em função de sua granulometria. Ref: IWA Task Group (2017)
Altura da camada inferior, de drenagem	Hinf	0,10 a 0,30 m	Esta camada proporciona a drenagem do líquido. Nela se insere o sistema de drenagem e coleta do efluente. Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Borda livre (distância entre o topo do meio suporte e o nível do terreno fora da unidade ou da parte superior da parede, caso existente)	bL	0,20 a 0,35 m	Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017), Hoffmann et al (2011) e DWA (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Relação comprimento / largura	C : L	-	Como se trata de um sistema de escoamento vertical, as relações geométricas entre comprimento e largura são menos importantes, e estão mais associadas a uma distribuição adequada da vazão afluente em toda a área superficial disponível.

Continua...

Tabela 5. Características de dimensionamento relacionadas ao *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor	Comentário
Número de unidades	N	Usualmente múltiplos de 2 ou 4	Em sistemas de maior porte, pode-se prever a flexibilidade de se permitir que, no mínimo, $\frac{1}{4}$ das unidades esteja em descanso e $\frac{3}{4}$ das unidades estejam em operação (alimentação). Em sistemas de pequeno porte e em alguns condomínios, pode-se adotar duas unidades, com uma em alimentação e a outra em descanso. Há ainda aplicações de pequeno porte que trabalham com unidades únicas. Ref: IWA Task Group (2017), Hoffmann et al (2011); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Área máxima de cada unidade	Amáx	400 m ²	Valor máximo para não haver dificuldades com a hidráulica associada à necessidade de distribuição homogênea do afluente em toda a área superficial. Ref: IWA Task Group (2017).
Inclinação das paredes ou taludes internos (horizontal/vertical)	Z	Variando de 0:1 a 2:1	Em sistemas de pequeno porte ou individuais, é frequente a adoção de paredes verticais, de alvenaria ou concreto, ou mesmo o emprego de unidades pré-fabricadas, por exemplo, de fibra de vidro. Neste caso de paredes verticais, não há inclinação, ou seja, Z = 0:1. Em sistemas com taludes internos e escavação em solo, a inclinação do talude dependerá do tipo de solo, a ser definido com base em conhecimentos geotécnicos do solo local ou do solo de empréstimo a ser utilizado. Neste caso, valores usuais de Z situam-se entre 1:1 e 2:1, mas poderão ser diferentes, em função do conhecimento geotécnico do solo.
Declividade longitudinal do fundo	i	0 a 1 %	Pode haver uma declividade longitudinal, na direção da saída, para facilitar a drenagem de fundo em sistemas de maiores dimensões. Caso seja adotada a declividade, ela deve ser apenas no fundo, e o topo do meio suporte permanece nivelado. Ref: Hoffmann et al (2011).

Tabela 6. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento vertical.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentário
Leito filtrante			
Granulometria do leito na camada superior do meio suporte	GLsup	Poderão ser usados brita, cascalho, escória siderúrgica ou outros materiais que possuam resistência física e que não sofram desagregação devido às atividades químicas e biológicas que ocorrem no leito. A granulometria destes materiais é referenciada em termos da britagem: brita 0 (4,8 a 9,5 mm) ou brita 1 (9,5 a 19 mm)	Camada opcional. Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC
Granulometria do leito na camada de filtração	GLint	Areia grossa (1,2 a 4,8 mm)	Usualmente a especificação da granulometria do material é feita em termos do diâmetro efetivo d_{10} e do coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}). A literatura cita especificações neste sentido, e que poderão ser utilizadas no projeto. No entanto, no presente texto, optou-se por uma descrição mais simplificada, em termos apenas da britagem do material, reconhecendo que, em vários casos, será difícil a obtenção de um material que cumpra com especificações rigorosas acerca da granulometria. Em termos gerais, o material deve ser limpo e isento de solos e finos, e deve ser uniforme, ou seja, deve-se evitar valores elevados do coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}). Caso seja possível solicitar um ensaio de curva granulométrica, recomenda-se que a areia apresente um $d_{10} \geq 0,20$ mm e coeficiente de desuniformidade ≤ 4 . Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017) e Hoffmann et al (2011); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC. Ref.: areia - ABNT NBR 13969 /1997
Granulometria do leito na camada de transição	GLtrans	Brita 0 (4,8 a 9,5 mm)	Ref: IWA Task Group (2017)

Continua...

Tabela 6. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentário
Leito filtrante			
Granulometria do leito na camada inferior, de drenagem	GLinf	Brita 0 (4,8 a 9,5 mm) ou Brita 1 (9,5 a 19 mm)	Ref.: brita - GESAD/UFSC A granulometria deve ser estabelecida de acordo com as necessidades hidráulicas de drenagem. Deve-se evitar a penetração dos grãos da camada de cima nesta camada. A brita 0 pode ser adotada, caso não haja a camada de transição acima.
Detalhes hidráulicos e construtivos			
Alternância entre os leitos	AL	Variável entre 3,5 a 30 dias	Outros ciclos operacionais poderão ser adotados, dependendo da experiência local, fatores climáticos e requisitos das plantas. Ref: Hoffmann et al (2011); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC.
Tipo de alimentação no leito em operação	TA	Intermitente	Utilizam-se bombas ou sifões dosadores.
Frequência da dosagem do afluente	FD aflu	Uma batelada a cada 2 a 8 h	Caso haja uma caixa de acumulação do afluente, ela poderá ser dimensionada para acumular o volume correspondente à vazão afluente de apenas uma hora, e ser esvaziada, portanto, a cada uma hora, reduzindo, portanto, o seu volume. Para cumprir com bateladas a cada 2 a 6 horas, a área do leito em operação poderá ser subdividida em subáreas, cada uma com um sistema de distribuição independente, e que operará na frequência desejada. Por exemplo, para alimentações a cada 3 horas, o leito poderá ser dividido em três subáreas, com três sistemas de distribuição independentes, um para cada subárea. Os sistemas independentes a partir da caixa de acumulação podem ser obtidos com a utilização de válvulas pneumáticas (neste exemplo, usar três válvulas, cada uma acionada a cada hora, garantindo, assim, o esvaziamento do tanque a cada uma hora, e alimentando um terço da área do leito em operação). Ref. relativa à frequência das bateladas: experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017) e Hoffmann et al (2011); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC.

Continua...

Tabela 6. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentário
Entrada e distribuição do afluente	ED aflu	<p>Tubulação de distribuição disposta de forma a permitir uma distribuição uniforme sobre toda a área superficial da unidade.</p> <p>Esta tubulação poderá ser assentada no interior da camada superior do leito (Hsup).</p> <p>Em sistemas pequenos e com alimentação com pressão satisfatória, sugere-se tubulação com diâmetro mínimo de 40 mm, perfurada com orifícios de diâmetro superior a 8 mm.</p> <p>No entanto, o ideal é que o diâmetro e o arranjo da tubulação sejam estabelecidos com base em cálculos hidráulicos, visando a garantir que a distribuição do afluente seja suficientemente uniforme, com uma diferença de vazão distribuída inferior a 30% entre os pontos extremos.</p> <p>Disponibilizar um orifício para cada 1 ou 2 m² de área superficial do leito.</p>	<p>Em sistemas individuais ou de porte bem pequeno poderão ser adotados valores inferiores do diâmetro.</p> <p>Ref: IWA Task Group (2017).</p> <p>Os cálculos hidráulicos deverão levar em conta os seguintes aspectos. Se os orifícios na tubulação tiverem diâmetro excessivamente grande, a vazão nos primeiros orifícios será elevada, e rapidamente se perderá a vazão na linha, resultando em ausência de vazão no final da linha. Caso os orifícios sejam demasiado pequenos, a perda de carga localizada será elevada. A perda de carga nos orifícios deve ser elevada, em comparação com a perda de carga dentro do tubo de distribuição, de forma a proporcionar uma distribuição mais homogênea.</p>
Detalhes hidráulicos e construtivos			
Coleta e retirada do efluente	CR eflu	<p>Sistema de drenagem no fundo, com tubulações com orifícios. As tubulações principais devem aflorar à superfície, com a extremidade aberta, para propiciar a entrada de ar e ventilação do leito e também possibilitar uma limpeza com jato.</p> <p>A distância (afastamento) entre as tubulações de drenagem é variável com o porte da unidade. Um valor máximo em torno de 5 m é usualmente adequado.</p>	<p>Ref.: afastamento entre tubulações de drenagem: Hoffmann et al (2011).</p> <p>A caixa de coleta do efluente deve incluir uma tubulação que permita a variação do nível d'água dentro da unidade. Usualmente esta tubulação é colocada em sua altura mínima, de forma a que o nível d'água dentro da unidade situe-se próximo ao fundo, garantindo que o meio suporte permaneça não saturado. Mas a operação deverá ter a flexibilidade de poder saturar uma certa camada do fundo do leito, o que será alcançado elevando-se o nível de saída da tubulação na caixa de coleta do efluente.</p>

Continua...

Tabela 6. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentário
Impermeabilização do fundo e paredes ou taludes internos	IMP	<p>Utilização de materiais e métodos que garantam a impermeabilização do fundo e das paredes (alvenaria ou concreto) ou taludes internos (solo) e que garantam a resistência mecânica e aos impactos da radiação solar (em locais expostos).</p> <p>Materiais frequentemente utilizados são geomembranas ou camadas de lona plástica e bidim intercalados, quando escavados em solo. No caso de geomembranas de PEAD, a espessura mínima recomendada é de 1,0 mm, no caso de sistemas individuais ou tratando esgotos de poucas residências, e de 1,5 mm, no caso de ETEs atendendo populações superiores a cerca de 50 habitantes. Caso permitido por órgão licenciador, pode ser utilizada, alternativamente, argila compactada. As especificações do material sintético ou da camada de argila, incluindo sua espessura, devem garantir uma impermeabilização adequada, tal como estabelecida por critérios geotécnicos. Após a obra deverão ser realizados testes de estanqueidade.</p> <p>Sistemas pequenos podem utilizar unidades pré-moldadas de fibra de vidro, que, caso adequadamente construídas, são consideradas estanques.</p>	<p>Ref.: lona e bidim - GESAD/UFSC</p> <p>Ref: Espessura da geomembrana: DWA (2017).</p>

Continua...

Tabela 6. Características dos elementos constituintes do *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Sigla	Valor ou descrição	Comentário
Plantas			
Plantas potencialmente utilizáveis		<p><i>Cynodon spp</i> (capim Tifton 85);</p> <p><i>Typha</i> (taboa), caso o período sem alimentação não seja longo;</p> <p><i>Cyperus Papyrus</i> (papiro);</p> <p><i>Zizanopsis bonariensis</i>.</p> <p><i>Chrysopogon zizanioides</i> (capim-vetiver).</p> <p><i>Eleocharis spp.</i></p> <p><i>Zantedeschia aethiopica</i> (conhecido por copo de leite)</p> <p><i>Canna L.</i> (conhecida por cana índica) da Família da <i>Cannaceae</i>.</p> <p><i>Heliconia spp.</i></p>	<p>Outras espécies podem ser utilizadas, desde que se adaptem às condições operacionais impostas.</p> <p>As plantas cumprem importante papel pela função de movimento do caule, proporcionando a existência de espaços livres na camada de sedimento acumulado no topo, por onde o líquido afluyente pode penetrar e dirigir-se ao leito.</p> <p>As plantas devem ser também resistentes aos períodos de descanso da unidade, em que não há alimentação.</p>
Manejo das plantas		<p>As plantas devem ter um manejo adequado, de forma a maximizar sua contribuição positiva. Usualmente são plantadas com cerca de 4 propágulos por m² (variável com a espécie) mas, com o passar do tempo, a densidade de plantas aumenta consideravelmente. Deve-se controlar o crescimento de espécies invasoras. Cortes mais frequentes, realizados durante a fase de crescimento da planta, potencializam uma maior capacidade de extração de nutrientes e outros compostos. A remoção das plantas, após o corte, evita a liberação dos compostos absorvidos.</p> <p>Em sistemas de grande porte, a biomassa oriunda da poda das macrófitas poderá ser encaminhada para compostagem.</p>	

4.2. Critérios e parâmetros de projeto de *wetland* construído de escoamento vertical

Tabela 7. Critérios de projeto empregados no *wetland* construído de escoamento vertical.

Item	Wetlands verticais recebendo efluente previamente tratado	Comentário
Taxa de aplicação orgânica superficial máxima	10 a 20 gDBO.m ⁻² .d ⁻¹	<p>A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade. Calcular com a carga afluyente baseada na vazão média.</p> <p>A área superficial requerida das unidades em operação é o quociente entre a carga de DBO afluyente ao <i>wetland</i> e a taxa de aplicação orgânica superficial adotada.</p> <p>Estes valores de taxa de aplicação orgânica superficial referem-se às unidades em operação (alimentação).</p> <p>Caso a estratégia operacional seja de ¾ das unidades em alimentação e ¼ das unidades em descanso, a área calculada com base na taxa de aplicação corresponde a ¾ da área total. Para se ter a área total (alimentação + descanso), deve-se multiplicar a área em operação por 4/3. Caso a estratégia operacional seja de ½ das unidades em alimentação e ½ em descanso, a área total deve ser obtida multiplicando-se a área em alimentação por 2.</p> <p>Deve-se priorizar a taxa de aplicação orgânica com relação à taxa de aplicação hidráulica ou, caso se deseje ficar a favor da segurança, deve-se adotar o maior valor calculado para a área superficial, tendo por base as taxas de aplicação hidráulica e orgânica.</p> <p>Os maiores valores das taxas de aplicação orgânica superficial estão usualmente associados a condições climáticas mais favoráveis (temperaturas mais quentes), ao passo que os menores valores estão usualmente associados a condições climáticas menos favoráveis (temperaturas mais frias), dentro da faixa climática brasileira.</p> <p>Valores mais reduzidos da taxa de aplicação orgânica superficial (dimensionamentos mais conservadores) conduzem a maiores áreas superficiais requeridas. Para uma determinada condição climática, a expectativa é de que se tenham, em decorrência, maiores eficiências de remoção e valores mais reduzidos das concentrações efluentes, ou seja, um melhor desempenho. A decisão do projetista deve levar em consideração, portanto, os requisitos de área e a expectativa com relação ao efluente final.</p> <p>Valores mais elevados da taxa de aplicação orgânica superficial poderão ser adotados, principalmente em locais quentes, desde que sejam respaldados por operações exitosas, em escala real, de longo prazo e com monitoramento adequado em suas respectivas regiões.</p> <p>Ref: Experiência internacional, expressa em IWA Task Group (2017), DWA (2017) e Hoffmann et al (2011); experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC.</p>

Continua...

Tabela 7. Critérios de projeto empregados no *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Wetlands verticais recebendo efluente previamente tratado	Comentário
Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima	0,05 a 0,12 m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	<p>A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade.</p> <p>A área superficial requerida é o quociente entre a vazão afluente ao sistema e a taxa de aplicação hidráulica superficial adotada.</p> <p>Sabe-se que a capacidade hidráulica dos filtros verticais é muito superior à taxa hidráulica indicada. Este fato faz que os sistemas de escoamento vertical sejam bem capacitados para absorver picos hidráulicos. No entanto, para fins de dimensionamento, deve-se calcular a aplicação máxima com a vazão média, conforme explicado anteriormente.</p> <p>Estes valores de taxa de aplicação hidráulica superficial referem-se às unidades em operação (alimentação).</p> <p>Caso a estratégia operacional seja de $\frac{3}{4}$ das unidades em alimentação e $\frac{1}{4}$ das unidades em descanso, a área calculada com base na taxa de aplicação corresponde a $\frac{3}{4}$ da área total. Para se ter a área total (alimentação + descanso), deve-se multiplicar a área em operação por $\frac{4}{3}$. Caso a estratégia operacional seja de $\frac{1}{2}$ das unidades em alimentação e $\frac{1}{2}$ em descanso, a área total deve ser obtida multiplicando-se a área em alimentação por 2.</p> <p>Deve-se priorizar a taxa de aplicação orgânica com relação à taxa de aplicação hidráulica ou, caso se deseje ficar a favor da segurança, deve-se adotar o maior valor calculado para a área superficial, tendo por base as taxas de aplicação hidráulica e orgânica.</p> <p>Nas duas aplicações, foram adotados os mesmos valores da taxa de aplicação orgânica superficial (ver item acima), e adotadas as taxas de aplicação hidráulicas superficiais resultantes, levando em consideração que a segunda aplicação (tratamento de efluente secundário) teria um pré-tratamento com o dobro da eficiência de remoção de DBO da primeira aplicação (efluente primário).</p> <p>Comentários similares, feitos para a taxa de aplicação orgânica superficial, relativos à aplicabilidade dos valores da faixa e à possibilidade de se adotarem valores diferentes (ver acima), podem ser feitos também para a taxa de aplicação hidráulica superficial.</p>

Tabela 8. Faixas esperadas de desempenho de tratamento relacionados ao *wetland* construído de escoamento vertical.

Item	<i>Wetlands</i> verticais recebendo efluente de tratamento primário	<i>Wetlands</i> verticais recebendo efluente de tratamento secundário de baixa eficiência	Comentário
Tipos de tratamento a montante dos <i>wetlands</i>			
Tratamento preliminar	Gradeamento e desarenação	Gradeamento e desarenação	
Tratamento primário ou secundário a montante do <i>wetland</i>	Tanques sépticos (várias configurações)	Exemplos: reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente; reatores anaeróbios compartimentados	Poderá haver outras unidades ou sistemas na etapa anterior de tratamento biológico.
Eficiências de remoção			
<i>Eficiência de remoção assumida na etapa a montante da <i>wetland</i></i>			
DBO	25 a 35 %	60 a 75 %	As eficiências apresentadas retratam faixas esperadas, caso o projeto, a construção e a operação sejam adequados. Naturalmente, poderão ocorrer valores inferiores ou superiores. Caso desejado, o projetista poderá ficar a favor da segurança, assumindo valores mais próximos ao limite inferior da faixa. Este comentário é válido para todos os parâmetros de qualidade cobertos neste item.
DQO	20 a 30 %	55 a 70 %	
<i>Eficiências globais de remoção esperadas no sistema como um todo</i>			
DBO	> 85 %	> 90 %	Ref: Experiência internacional, adaptado de IWA Task Group 2017; experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC. As eficiências apresentadas retratam faixas esperadas, caso o projeto, a construção e a operação sejam adequados. Naturalmente, poderão ocorrer valores inferiores ou superiores. Caso desejado, o projetista poderá ficar a favor da segurança, assumindo valores mais próximos ao limite inferior da faixa. Este comentário é válido para todos os parâmetros de qualidade cobertos neste item.

Continua...

Tabela 8. Faixas esperadas de desempenho de tratamento relacionados ao *wetland* construído de escoamento vertical - *Continuação*.

Item	Wetlands verticais recebendo efluente de tratamento primário	Wetlands verticais recebendo efluente de tratamento secundário de baixa eficiência	Comentário
<i>Eficiências globais de remoção esperadas no sistema como um todo</i>			
DQO	> 80 %	> 85 %	Ref.: GESAD/UFSC
SS	> 85 %	> 90 %	Ref: Experiência internacional, adaptado de IWA Task Group 2017; experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC.
N amoniacal	> 85 %	> 90 %	Ref: Experiência internacional, adaptado de IWA Task Group 2017; experiência nacional, expressa em GESAD/UFSC.
N total	< 40 %	< 40 %	Eficiências mais elevadas de remoção de N total podem ser obtidas incluindo-se um fundo com meio saturado, proporcionando condições anóxicas e a ocorrência de desnitrificação. No entanto, esta adaptação no funcionamento dos <i>wetlands</i> verticais não é abordada no presente documento. Ref: adaptado de IWA Task Group (2017).
Fósforo total	< 20 %	< 20 %	Ref: adaptado de IWA Task Group (2017).
Coliformes termotolerantes	1 - 2 unidades log	1 - 2 unidades log	Ref: Maiga, von Sperling, Mihelcic (2017).

5. WETLAND CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO VERTICAL (SISTEMA FRANCÊS)

5.1. Configuração do sistema

Os *wetlands* verticais do Sistema Francês clássico são compostos por uma sequência de dois estágios, sendo que o primeiro estágio recebe esgoto bruto (após gradeamento), e o segundo estágio recebe o efluente tratado no primeiro estágio. Portanto, não há necessidade de tratamento primário (tanque séptico) ou secundário, como os outros sistemas horizontais e verticais descritos neste documento. Os esgotos são aplicados na superfície do leito e o escoamento é vertical descendente. O primeiro estágio objetiva principalmente a remoção da matéria orgânica e sólidos em suspensão, além da remoção parcial do nitrogênio amoniacal por nitrificação. O segundo estágio proporciona um polimento no tratamento, também em termos de remoção complementar de matéria orgânica e sólidos em suspensão, mas, principalmente, na remoção de nitrogênio amoniacal por nitrificação, dadas as condições aeróbias do meio.

Na concepção clássica do sistema francês, o primeiro estágio é composto por três unidades em paralelo (uma unidade em operação e duas unidades em descanso), ao passo que o segundo estágio é composto por duas unidades em paralelo (uma unidade em operação e uma unidade em descanso). As unidades em operação de ambos os estágios são alimentadas de forma intermitente (várias bateladas ou pulsos por dia), e todas as unidades possuem ciclos operacionais que incluem dias em operação (alimentação) e dias em descanso, com estratégias diferentes para o 1º e o 2º estágios. As bateladas na unidade em operação ocorrem entre 6 e 24 vezes por dia, ou seja, em média, a cada 1 a 4 horas. No primeiro estágio, que recebe esgoto bruto, em locais de clima frio pode haver um intervalo entre bateladas ainda maior, mas em locais de clima quente deve-se levar em consideração que o esgoto bruto sofrerá decomposição no tanque de acumulação, e deve-se evitar a geração de maus odores. Entre uma batelada e outra, o meio filtrante permanece não saturado, isto é, os espaços vazios entre os grãos do meio suporte não estão preenchidos com líquido, mas com ar. Em decorrência, predominam condições aeróbias no leito filtrante.

Com o passar do tempo, desenvolve-se uma camada de lodo na superfície do leito. Devido à alternância de operação entre os leitos, este lodo sofre mineralização e

secagem durante o período de descanso. A presença desta camada é importante, pois auxilia no processo de filtração. O lodo se acumula ao longo de vários anos, e só necessita ser removido quando atinge uma espessura em torno de 0,20 m.

Atualmente são analisadas possibilidades de redução de área em regiões de clima quente e com requisitos de qualidade menos exigentes para o efluente, como a adoção de apenas o 1º estágio (sem a complementação do tratamento no 2º estágio), e até a redução do número de unidades no 1º estágio. Em regiões de clima quente, há experiências utilizando apenas o 1º estágio, com este composto por apenas duas unidades em paralelo. Estas experiências estão relatadas em um guia francês para aplicação em áreas tropicais². As experiências brasileiras, ainda que limitadas, endossam esta abordagem. Embora, com esta versão simplificada de estágio único e mais compacto, as eficiências de remoção possam ser inferiores à concepção clássica, elas podem ser suficientes em várias aplicações. O presente documento incorpora a concepção clássica francesa, mas apresenta também a possibilidade de utilização de versões mais simplificadas.

Com relação ao 2º estágio, na concepção clássica francesa ele é composto por duas unidades em paralelo, que objetivam a complementação do tratamento. Este polimento pode ser alcançado também por meio de outras configurações que substituem o 2º estágio clássico. Em resumo, pode-se ter as seguintes possibilidades:

- Adoção apenas do primeiro estágio (com dois ou três filtros verticais em paralelo, com operação alternada), sem pós-tratamento;
- Pós-tratamento do efluente do 1º estágio por meio do 2º estágio clássico do sistema francês (dois filtros verticais em paralelo, com operação alternada);
- Pós-tratamento do efluente do 1º estágio por meio de wetlands de escoamento horizontal subsuperficial;
- Pós-tratamento com filtros verticais com leito parcialmente saturado no fundo, objetivando a obtenção de condições anóxicas e consequente desnitrificação;
- Pós-tratamento com filtros verticais com recirculação;
- Pós-tratamento por meio de outros processos.

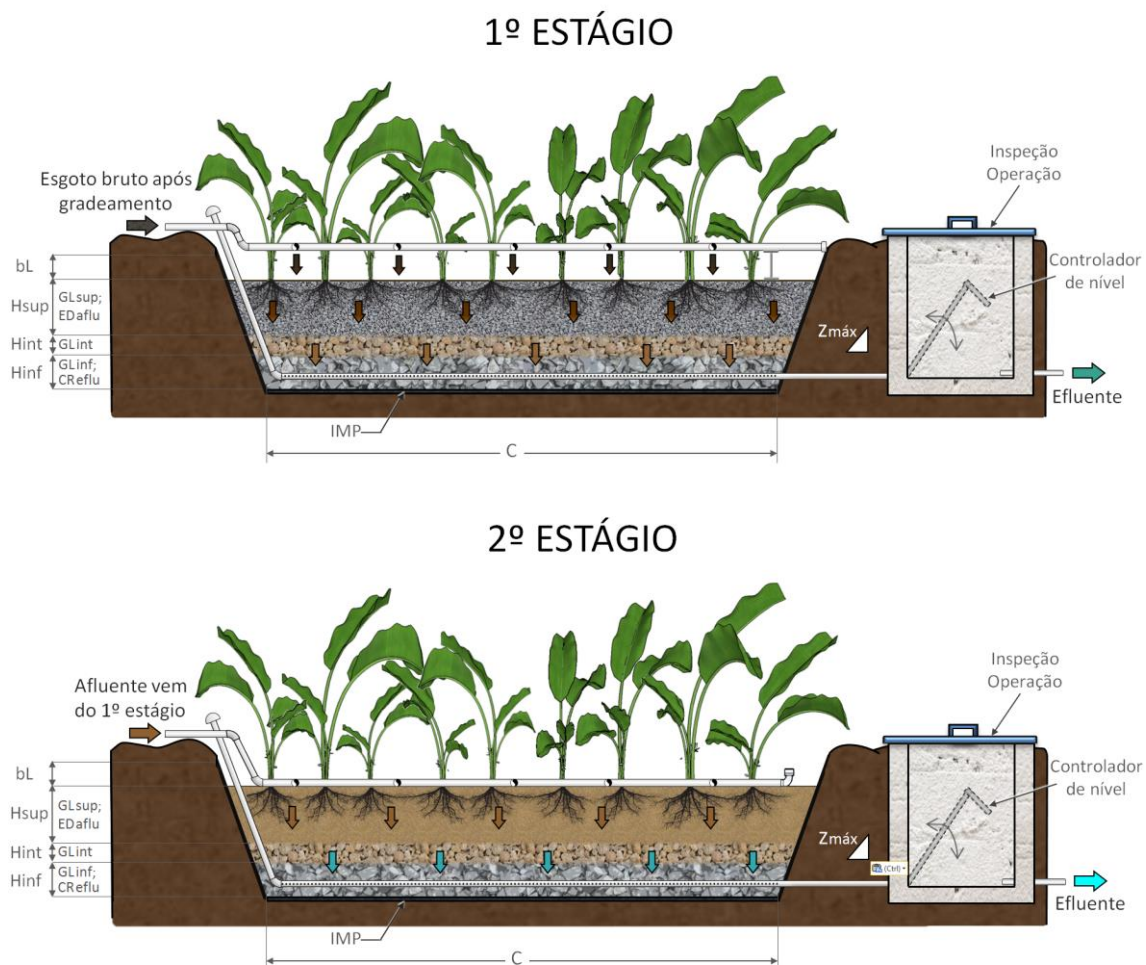
² Lombard Latune, R., Molle, P. Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical. Guide de dimensionnement de la filière tropicalisée. Agence française pour la biodiversité, collection *Guides et protocoles*, 72 p. 2017.

As duas opções de pós-tratamento do efluente do 1º estágio mais comuns são a adoção de filtros verticais (segundo a concepção francesa) ou leitos horizontais subsuperficiais (frequentemente com o sistema tendo a designação pouco específica de “sistema híbrido”). O dimensionamento do leito horizontal é coberto no capítulo 3 do presente documento. O dimensionamento do 2º estágio do sistema francês é abordado no presente capítulo.

A experiência brasileira com o sistema francês existe, mas é ainda limitada em termos de números de estações. No entanto, há milhares de sistemas em operação na França e outros países europeus, além de sistemas sendo implementados em regiões tropicais. A aplicação principal é para pequenas comunidades, usualmente entre 100 e 1000 habitantes, embora existam sistemas maiores e menores. A utilização para sistemas individuais ou unifamiliares, dentro do lote, é mais restrita, devido ao fato de se dispor esgoto bruto sobre a superfície do leito, o que pode trazer implicações estéticas ou sanitárias para os moradores ou usuários da propriedade, além de demandar uma operação um pouco mais complexa, com bombas ou sifões, comparada a sistemas que envolvem tanques sépticos.

A Figura 3 apresenta o perfil longitudinal de módulos de *wetland* construído de 1º e 2º estágios, segundo a concepção francesa.

Figura 3. Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de escoamento vertical (sistema francês - 1º e 2º estágios).



Legenda:

Hsup - altura da camada superior do meio suporte (camada principal, de filtração);	Glsup - granulometria do leito na camada superior do meio filtrante;
Hinf - altura da camada inferior, de drenagem;	GLint - granulometria do leito na camada intermediária;
bL - borda livre;	GLinf - granulometria do leito na camada inferior, de drenagem;
C - comprimento;	ED afl - zona de entrada e distribuição do afluente;
Zmáx - declividade máxima do talude (quando necessário);	CR efl - zona de coleta e retirada do efluente.
IMP - impermeabilização (fundo e laterais);	

Tabela 9. Características de dimensionamento relacionadas aos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês).

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Altura da camada superior, do meio filtrante	Hsup	0,30 a 0,80 m	0,30 a 0,80 m	Para remoção de matéria orgânica, o valor usualmente utilizado é de 0,40 m. Maiores alturas são utilizadas quando se deseja maiores eficiências, incluindo de remoção da amônia por nitrificação. Ref: IWA Task Group (2017).
Altura da camada intermediária, de transição	Hint	0,10 a 0,20 m	0,10 a 0,20 m	Ref: IWA Task Group (2017)
Altura da camada inferior, de drenagem	Hinf	0,20 a 0,30 m	0,20 a 0,30 m	Ref: IWA Task Group (2017)
Borda livre (distância entre o topo do meio suporte e o nível do terreno fora da unidade ou da parte superior da parede, caso existente)	bL	> 0,30 m	> 0,25 m	Ref: IWA Task Group (2017)
Relação comprimento / largura	C : L	-	-	Como se trata de um sistema de escoamento vertical, as relações geométricas entre comprimento e largura são menos importantes, e estão mais associadas a uma distribuição adequada da vazão afluyente em toda a superfície e na área disponível.

Continua...

Tabela 9. Características de dimensionamento relacionadas aos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Número de unidades em paralelo	N	<p>Concepção clássica francesa: 3 unidades (1 em operação e 2 em descanso).</p> <p>Concepção alternativa simplificada para climas quentes: 2 unidades (1 em operação e 1 em descanso)</p>	<p>Concepção clássica francesa: 2 unidades (1 em operação e 1 em descanso)</p>	<p>Notar que há a possibilidade de se usar apenas o 1º estágio, caso não haja necessidade das maiores eficiências obtidas com os dois estágios. Em condições climáticas favoráveis, e também caso não haja necessidade de elevadas eficiências de remoção, pode-se utilizar a versão alternativa simplificada para o 1º estágio, com apenas dois leitos em paralelo no 1º estágio.</p> <p>Pode-se adotar mais do que o número especificado de unidades em paralelo. Por exemplo, a concepção clássica do 1º estágio do Sistema Francês recomenda 3 unidades em paralelo, com 1 em operação e 2 em descanso. Em sistemas de maior porte, pode-se adotar valores múltiplos de 3, mas garantindo que 1/3 das unidades esteja em operação e 2/3 das unidades esteja em descanso.</p> <p>Referências para climas tropicais: Lombard Latune e Molle (2017) e experiência da UFMG</p>
Inclinação das paredes ou taludes internos (horizontal/vertical)	Z	Variando de 0:1 a 2:1	Variando de 0:1 a 2:1	<p>Em sistemas de pequeno porte, é frequente a adoção de paredes verticais, de alvenaria ou concreto, ou mesmo o emprego de unidades pré-fabricadas, por exemplo, de fibra de vidro. Neste caso de paredes verticais, não há inclinação, ou seja, $Z = 0:1$. Em sistemas com taludes internos e escavação em solo, a inclinação do talude dependerá do tipo de solo, a ser definido com base em conhecimentos geotécnicos do solo local ou do solo de empréstimo a ser utilizado. Neste caso, valores usuais de Z situam-se entre 1:1 e 2:1, mas poderão ser diferentes, em função do conhecimento geotécnico do solo.</p>

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês).

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Leito filtrante				
Granulometria do leito na camada superior, do meio filtrante	Glsup	Brita 0 (4,8 a 9,5 mm)	Areia média ou grossa (0,3 a 4,8 mm)	<p>Poderão ser usados brita, cascalho, escória siderúrgica ou outros materiais que possuam resistência física e que não sofram desagregação devido às atividades químicas e biológicas que ocorrem no leito.</p> <p>A granulometria recomendada pelas referências internacionais foi convertida à classificação granulométrica ou britagem tradicional mais próxima usada no Brasil.</p> <p>A granulometria da literatura francesa tradicional (IWA Task Group, 2017) especifica diâmetros um pouco menores (2 a 6 mm no 1º estágio e areia com d_{10} entre 0,25 e 0,4 mm no 2º estágio). No entanto, foram listados aqui os valores apresentados na norma alemã DWA (2017), que contou com a participação francesa em sua elaboração.</p>
Granulometria do leito na camada intermediária, de transição	Glint	Brita 2 (19 a 25 mm)	Brita 0 (4,8 a 9,5 mm)	<p>Ver comentário acerca dos materiais passíveis de utilização, efetuado acerca da camada superior.</p> <p>Os grãos da camada superior não deverão penetrar na camada inferior.</p> <p>A granulometria da literatura francesa tradicional (IWA Task Group, 2017) especifica diâmetros ligeiramente diferentes (5 a 15 mm no 1º estágio e 3 a 12 mm no 2º estágio). No entanto, foram listados aqui os valores apresentados na norma alemã DWA (2017), que contou com a participação francesa em sua elaboração.</p>
Granulometria do leito na camada inferior, de drenagem	Glinf	Brita 3 (25 a 50 mm)	Brita 2 (19 a 25 mm)	<p>Ver comentário acerca dos materiais passíveis de utilização, efetuado acerca da camada superior.</p> <p>Os grãos da camada superior não deverão penetrar na camada inferior.</p> <p>A granulometria da literatura francesa tradicional (IWA Task Group, 2017) especifica diâmetros ligeiramente diferentes (20 a 60 mm no 1º e no 2º estágios). No entanto, foram listados aqui os valores apresentados na norma alemã DWA (2017), que contou com a participação francesa em sua elaboração.</p>

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Detalhes hidráulicos e construtivos				
Alternância entre os leitos	AL	<p>Concepção clássica francesa, com 3 leitos em paralelo, alternando etapas de alimentação e descanso: alimentação durante cerca de 3,5 dias e descanso durante cerca de 7,0 dias, compondo um ciclo total de cerca de 10,5 dias (uma semana e meia).</p> <p>Concepção simplificada para climas quentes, com apenas 2 leitos em paralelo, alternando etapas de alimentação e descanso: alimentação durante cerca de 3,5 dias e descanso durante cerca de 3,5 dias, compondo um ciclo total de cerca de 7,0 dias (uma semana).</p>	<p>Concepção clássica francesa, com 2 leitos em paralelo, alternando etapas de alimentação e descanso: alimentação durante cerca de 3,5 dias e descanso durante cerca de 3,5 dias, compondo um ciclo total de cerca de 7,0 dias (uma semana).</p>	<p>Outros ciclos operacionais poderão ser adotados, dependendo da experiência local, fatores climáticos e resistência das plantas a períodos sem alimentação.</p> <p>A UFMG acumulou experiências ao longo de anos com ciclos mais longos de alimentação e descanso, com duas unidades no 1º estágio.</p> <p>As eficiências de remoção e as condições de drenagem variam ao longo dos dias que compõem o ciclo de alimentação.</p> <p>O período de descanso é importante para a digestão e secagem da camada de lodo que se acumula na superfície dos filtros.</p> <p>Referência para concepção clássica francesa: IWA Task Group (2017).</p> <p>Referências para climas tropicais: Lombard Latune e Molle (2017) e experiência da UFMG.</p>

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Detalhes hidráulicos e construtivos				
Tipo de alimentação no leito em operação	TA	Intermitente	Intermitente	Utilizam-se bombas ou sifões dosadores.
Altura da camada de líquido a ser formada sobre o leito, durante o pulso de dosagem da batelada (camada livre)	Hfws	0,02 a 0,05 m (2 a 5 cm)	-	<p>A lâmina formada, dentro dos limites de 2 a 5 cm, permite a visualização da uniformidade da distribuição do líquido sobre o leito. Valores inferiores a 2 cm dificultam esta visualização, e valores superiores a 5 cm podem estar associados a curtos-circuitos hidráulicos, de difícil detecção.</p> <p>Este é um valor especificado nos cálculos. A altura da lâmina d' água formada sobre o leito, durante a batelada, permite a determinação do volume de cada batelada.</p> <p>O volume de cada batelada (m³) é obtido multiplicando-se a área do leito em alimentação (m²) pela altura do líquido durante a batelada (m).</p>
Taxa de aplicação hidráulica instantânea, durante o pulso de dosagem (valor mínimo)	TAHinst	0,60 m ³ .m ⁻² .h ⁻¹ (equivalente a 10 L.m ⁻² .min ⁻¹)	0,36 m ³ .m ⁻² .h ⁻¹ (equivalente a 6 L.m ⁻² .min ⁻¹)	<p>Para o dimensionamento da bomba ou sifão responsável pela batelada no 1º estágio, a vazão durante a aplicação é calculada multiplicando-se o valor adotado da taxa hidráulica instantânea (m³.m⁻².h⁻¹) pela área do leito em operação (m²).</p> <p>A duração da batelada (em minutos) é calculada dividindo-se o volume de cada batelada (L) pela taxa de aplicação hidráulica instantânea (L.m⁻².min⁻¹).</p> <p>No 2º estágio, há a recomendação de que a pressão no último orifício da tubulação mais distante seja superior a 0,30 m.</p> <p>Ref: IWA Task Group (2017) e DWA (2017).</p>

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Detalhes hidráulicos e construtivos				
Número de bateladas por dia	Nbat	-	-	<p>O número de bateladas por dia é calculado dividindo-se a vazão diária ($m^3 \cdot d^{-1}$) pelo volume de cada batelada ($m^3/batelada$). Usualmente isto resulta em 6 a 24 bateladas por dia, ou seja, uma batelada a cada 1 a 4 h.</p> <p>No caso do 1º estágio, um menor número de bateladas por dia proporciona melhor aeração, mas requer uma maior caixa de acumulação do esgoto bruto. Deve-se analisar se longos tempos entre bateladas (poucas bateladas por dia) poderão causar problemas de maus odores, considerando-se a acumulação de esgoto bruto.</p> <p>Para evitar grandes volumes, a caixa de acumulação ou armazenamento do afluente poderá ser dimensionada para acumular o volume correspondente à vazão afluente de apenas uma hora, e ser esvaziada, portanto, a cada uma hora, reduzindo, portanto, o seu volume. Para cumprir com bateladas a cada 1 a 4 horas, a área do leito em operação poderá ser subdividida em subáreas, cada uma com um sistema de distribuição independente, e que operará na frequência desejada. Por exemplo, para bateladas a cada 3 horas, o leito poderá ser dividido em três subáreas, com três sistemas de distribuição independentes, um para cada subárea. Os sistemas independentes a partir da caixa de acumulação podem ser obtidos com a utilização de válvulas pneumáticas (neste exemplo, usar três válvulas, cada uma acionada a cada hora, garantindo, assim, o esvaziamento do tanque a cada uma hora, e alimentando um terço da área do leito em operação).</p>

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Detalhes hidráulicos e construtivos				
Entrada e distribuição do afluente	ED afl	Tubulação de distribuição com diâmetro nominal mínimo de 75 mm, dividida em tubulações laterais com saída do esgoto bruto na extremidade final de cada tubulação lateral, cobrindo homogeneamente a área superficial do leito. As tubulações são colocadas suspensas acima do leito (cerca de 0,30 a 0,40 m), e nos pontos de lançamento dos jatos deverá haver uma proteção da superfície do leito (usualmente com placa de concreto) para evitar distúrbios e erosão localizada. Como o 1º estágio recebe esgoto bruto, não devem ser utilizadas tubulações de distribuição perfuradas, pois elas são susceptíveis a entupimentos.	Tubulações de distribuição com diâmetro mínimo de 75 mm, com orifícios (> 8 mm). Na concepção clássica do sistema francês, as tubulações no 2º estágio são assentadas diretamente sobre a superfície do leito. No entanto, estações implantadas mais recentemente também estão adotando tubulações de distribuição suspensas, de forma similar ao 1º estágio.	A tubulação de distribuição é alimentada pela caixa de armazenamento, que funciona com ciclos de enchimento e esvaziamento, associados às bateladas. O esvaziamento da caixa é usualmente feito por bomba, sifão dosador ou válvula pneumática. O ideal é que o diâmetro e o arranjo da tubulação sejam estabelecidos com base em cálculos hidráulicos, visando a garantir que a distribuição do afluente seja suficientemente uniforme, e que a velocidade mínima de escoamento dentro da tubulação seja adequada para impedir sedimentação de sólidos (em torno de 0,6 m/s), no caso de esgotos brutos (1º estágio). Ref: IWA Task Group (2017). Informação sobre velocidades mínimas e sobre tubulações suspensas no 2º estágio: revisores.
Coleta e retirada do efluente	CR efl	Sistema de drenagem no fundo, com tubulações com orifícios. As tubulações principais devem aflorar à superfície, com a extremidade aberta, para propiciar a entrada de ar e ventilação do leito (aeração passiva). O afastamento entre as tubulações de drenagem/ventilação é em torno de 2,0 m, dependendo do tamanho da unidade. O diâmetro nominal mínimo deve ser de 100 mm, e a coleta do efluente se dá por aberturas na tubulação (comprimento: 1/3 da circunferência da tubulação; largura > 8 mm) a cada 10 cm do comprimento do tubo.	Sistema de drenagem no fundo, com tubulações com orifícios. As tubulações principais devem aflorar à superfície, com a extremidade aberta, para propiciar a entrada de ar e ventilação do leito. O diâmetro nominal mínimo deve ser de 100 mm, e a coleta do efluente se dá por aberturas na tubulação (comprimento: 1/3 da circunferência da tubulação; largura > 8 mm) a cada 10 cm do comprimento do tubo.	Ref: IWA Task Group (2017). A caixa de coleta do efluente deve incluir uma tubulação que permita a variação do nível d'água dentro da unidade. Usualmente esta tubulação é colocada em sua altura mínima, de forma a que o nível d'água dentro da unidade situe-se próximo ao fundo, garantindo que o meio suporte permaneça não saturado. Mas a operação deverá ter a flexibilidade de poder saturar uma certa camada do fundo do leito, o que será alcançado elevando-se o nível de saída da tubulação na caixa de coleta do efluente.

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Detalhes hidráulicos e construtivos				
Impermeabilização do fundo e paredes ou taludes internos	IMP	<p>Utilização de materiais e métodos que garantam a impermeabilização do fundo e das paredes (alvenaria ou concreto) ou taludes internos (solo) e que garantam a resistência mecânica e aos impactos da radiação solar (em locais expostos).</p> <p>Materiais frequentemente utilizados são geomembranas ou camadas de lona plástica e bidim intercalados, quando escavados em solo. No caso de geomembranas de PEAD, a espessura mínima recomendada é de 1,0 mm, no caso de sistemas individuais ou tratando esgotos de poucas residências, e de 1,5 mm, no caso de ETEs atendendo populações superiores a cerca de 50 habitantes. Caso permitido por órgão licenciador, pode ser utilizada, alternativamente, argila compactada. As especificações do material sintético ou da camada de argila, incluindo sua espessura, devem garantir uma impermeabilização adequada, tal como estabelecida por critérios geotécnicos. Após a obra deverão ser realizados testes de estanqueidade.</p> <p>Sistemas pequenos podem utilizar unidades pré-moldadas de fibra de vidro, que, caso adequadamente construídas, são consideradas estanques.</p>		<p>Estas recomendações se aplicam para o 1º e o 2º estágios.</p> <p>Ref: Espessura da geomembrana: DWA (2017).</p>
Plantas				
Plantas potencialmente utilizáveis		<p>Capim Tifton 85 (planta com registro de operação adequada por mais de 10 anos em uma ETE no Brasil)</p> <p>Como a experiência do sistema francês no Brasil ainda é limitada, a lista de plantas é também limitada. Mas, naturalmente, várias outras espécies podem ser utilizadas, desde que se adaptem às condições operacionais impostas.</p>		<p>Estas recomendações se aplicam para o 1º e o 2º estágios.</p> <p>As plantas cumprem importante papel pela função de movimento do caule, proporcionando a existência de espaços livres na camada de sedimento acumulado no topo, por onde o líquido afluente pode penetrar e dirigir-se ao leito.</p> <p>As plantas devem ser também resistentes aos períodos de descanso da unidade, em que não há alimentação.</p>

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Plantas				
Manejo das plantas		As plantas devem ter um manejo adequado, de forma a maximizar sua contribuição positiva. Usualmente são plantadas com cerca de 4 propágulos por m ² (variável com a espécie) mas, com o passar do tempo, a densidade de plantas aumenta consideravelmente. Deve-se controlar o crescimento de espécies invasoras. Cortes mais frequentes, realizados durante a fase de crescimento da planta, potencializam uma maior capacidade de extração de nutrientes e outros compostos. A remoção das plantas, após o corte, evita a liberação dos compostos absorvidos.		Em sistemas de grande porte, a biomassa oriunda da poda das macrófitas poderá ser encaminhada para compostagem.
Lodo				
Altura da camada de lodo		1,5 a 3,0 cm/ano (segundo a experiência francesa) A experiência brasileira, ainda que limitada, indicou valores próximos a 1,0 cm/ano nas unidades do 1º estágio.		A taxa de acumulação da camada superficial de lodo é relacionada às características climáticas do local de implantação do sistema, ao carregamento na etapa de partida e operação e à estratégia operacional de alimentação e descanso. Deve-se destacar que na França não se preconiza a utilização de desarenadores no tratamento preliminar do esgoto afluente a este sistema. De qualquer forma, a areia é responsável por apenas uma pequena fração da camada de sedimento. Ref: IWA Task Group (2017).

Continua...

Tabela 10. Características dos elementos constituintes dos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	Sigla	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Lodo				
Remoção da camada de lodo		Intervalo de 10 a 20 anos de operação		Eventuais casos de remoção com períodos menores que esses podem ser necessários, em função de altura desigual da camada de lodo, risco de transbordamento em períodos de sobrecarga hidráulica e orgânica, bem como condições operacionais. A expectativa é de que o lodo saia mineralizado e com baixo teor de umidade, e com possibilidades de utilização como condicionador de solo. Molle et al. (2005)

5.2. Critérios e parâmetros de projeto de *wetlands* construídos de escoamento vertical (Sistema Francês)

Tabela 11. Critérios de projeto empregados aos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês).

Item	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Taxa de aplicação orgânica superficial máxima no leito em operação	150 gDBO.m ⁻² .d ⁻¹	20 gDBO.m ⁻² .d ⁻¹	<p>A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade.</p> <p>Calcular a carga afluente com base na vazão média.</p> <p>A experiência nacional é limitada, mas está em sintonia com a recomendação francesa.</p> <p>A área superficial requerida para o leito em alimentação é o quociente entre a carga de DBO afluente ao <i>wetland</i> e a taxa de aplicação orgânica superficial adotada.</p> <p>Adotar a maior área calculada, tendo por base as taxas de aplicação hidráulica e orgânica. Notar que a área resultante é a de um leito. Caso o 1º estágio seja composto por 3 leitos em paralelo, adotar 3 leitos, cada um com a área calculada para um leito do 1º estágio. Caso o 1º estágio seja composto por 2 leitos em paralelo, adotar 2 leitos, cada um com a área calculada para um leito do 1º estágio. Para o 2º estágio, que é composto por 2 leitos em paralelo, adotar 2 leitos, cada um com a área calculada para um leito do 2º estágio.</p> <p>Para se comparar esta taxa de aplicação (que é para um leito) com as taxas de outros sistemas de tratamento, estes valores devem ser divididos pelo número de unidades em paralelo. Por exemplo, no caso do 1º estágio, caso este seja composto por 3 leitos em paralelo, o valor deve ser dividido por 3 (resultando em uma taxa máxima de 50 gDBO.m⁻².d⁻¹) e, caso seja composto por 2 leitos, deve ser dividido por 2 (resultando em 75 gDBO.m⁻².d⁻¹)</p> <p>Referência para concepção clássica francesa: IWA Task Group (2017).</p> <p>Referências para climas tropicais: Lombard Latune e Molle (2017) e experiência da UFMG</p>

Continua...

Tabela 11. Critérios de projeto empregados aos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês) - *Continuação*.

Item	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima no leito em operação	0,40 m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	0,40 m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	<p>A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade.</p> <p>Calcular com a vazão média.</p> <p>A experiência nacional é limitada, mas está em sintonia com a recomendação francesa.</p> <p>A taxa de aplicação hidráulica apresentada aqui foi corrigida do valor da literatura francesa (0,37 m³.m⁻².d⁻¹ no leito em operação) pelo fato de o dimensionamento francês assumir uma produção per capita de DBO de 60 g.hab⁻¹.d⁻¹, ao passo que no Brasil usualmente se adotam 50 g.hab⁻¹.d⁻¹ no caso de pequenos sistemas. Deve haver uma compatibilidade entre taxa orgânica e taxa hidráulica aplicadas.</p> <p>Adotar a maior área calculada, tendo por base as taxas de aplicação hidráulica e orgânica. Notar que a área resultante é a de um leito. Caso o 1º estágio seja composto por 3 leitos em paralelo, adotar 3 leitos, cada um com a área calculada para um leito do 1º estágio. Caso o 1º estágio seja composto por 2 leitos em paralelo, adotar 2 leitos, cada um com a área calculada para um leito do 1º estágio. Para o 2º estágio, que é composto por 2 leitos em paralelo, adotar 2 leitos, cada um com a área calculada para um leito do 2º estágio.</p> <p>Para se comparar esta taxa de aplicação (que é para um leito) com as taxas de outros sistemas de tratamento, estes valores devem ser divididos pelo número de unidades em paralelo. Por exemplo, no caso do 1º estágio, caso este seja composto por 3 leitos em paralelo, o valor deve ser dividido por 3 (resultando em uma taxa máxima de 0,13 m³.m⁻².d⁻¹) e, caso seja composto por 2 leitos, deve ser dividido por 2 (resultando em 0,20 m³.m⁻².d⁻¹)</p> <p>Referência para concepção clássica francesa: IWA Task Group (2017).</p> <p>Referências para climas tropicais: Lombard Latune e Molle (2017) e experiência da UFMG</p>

Tabela 12. Faixas esperadas de desempenho de tratamento relacionados aos *wetlands* construídos de escoamento vertical (sistema francês).

Item	1º estágio do Sistema Francês	Opção de adoção do 2º estágio do Sistema Francês	Comentário
Tipos de tratamento a montante dos <i>wetlands</i>			
Tratamento preliminar	Gradeamento	-	A concepção francesa não preconiza a inclusão da etapa de desarenação.
Tratamento primário ou secundário a montante do wetland	Inexistente	1º estágio do Sistema Francês	O Sistema Francês recebe esgoto bruto no 1º estágio. O 2º estágio recebe o efluente do 1º estágio.
Eficiências de remoção			
<i>Eficiências de remoção esperadas</i>	Eficiência do 1º estágio	Eficiência global (1º e 2º estágios)	
DBO	> 80 %	> 90 %	As eficiências apresentadas retratam faixas esperadas, caso o projeto, a construção e a operação sejam adequados. Naturalmente, poderão ocorrer valores inferiores ou superiores. Caso desejado, o projetista poderá ficar a favor da segurança, assumindo valores mais próximos ao limite inferior da faixa. Este comentário é válido para todos os parâmetros de qualidade cobertos neste item.
DQO	> 75 %	> 85 %	Morvannou et al (2015). No Brasil, experiências da UFMG: Cota (2011), Moraes (2012), Lana (2013), Manjate <i>et al.</i> (2015), Manjate (2016).
SS	> 80 %	> 90 %	Morvannou et al (2015). No Brasil, experiências da UFMG.
N amoniacal	> 50 %	> 80 %	Morvannou et al (2015). No Brasil, experiências da UFMG.
N total	< 40 %	< 50 %	
Fósforo total	< 20 %	< 30 %	
Coliformes termotolerantes	1 a 2 unidades log	1 a 2 unidades log	

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 13.969: Projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes de tanques sépticos: procedimentos. Rio de Janeiro: 60 p., 1997.

Cota, R. S. Hidrodinâmica e desempenho de filtros verticais com alimentação em pulso, plantados e não plantados, empregados no tratamento de esgoto sanitário bruto. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia, Belo Horizonte. 215 p., 2011.

Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., Reed, S.C. *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 552 p, 2006.

DWA. Standard DWA-A 262E: *Principles for dimensioning, construction and operation of wastewater treatment plants with planted and unplanted filters for treatment of domestic and municipal wastewater*. German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA): Hennef, Germany, 2017.

Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado- GESAD. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - ENS. <http://gesad.ufsc.br/publicacoes/>. Universidade Federal de Santa Catarina.

Hoffmann, H; Platzer, C.; Winker, M; Von Muench, E. *Technology review of constructed wetlands: subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Sustainable sanitation - Ecosan program, Eschborn, Germany, 2011.

IWA Task Group (2017) - referenciado como: DOTRO, G., LANGERGRABER, G., MOLLE, P., NIVALA, J., PUIGAGUT, J., STEIN, O., VON SPERLING, M. Treatment wetlands. Volume 7. Biological Wastewater Treatment Series. IWA Task Group on Mainstreaming the Use of Treatment Wetlands. IWA Publishing. 2017. 154 p. Disponível para download em: <http://www.iwapublishing.com/open-access-ebooks/3567>.

Kadlec R.H., Wallace S.D. Treatment Wetlands. Second Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2009.

Lana, L. C. O. Remoção de poluentes em um sistema alagado construído de escoamento vertical com alimentação em pulso. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 125 p., 2013.

Lombard Latune, R., Molle, P. Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical. Guide de dimensionnement de la filière tropicalisée. Agence française pour la biodiversité, collection guides et protocoles, 72 p. 2017.

Maiga, Y., von Sperling, M., Mihelcic, J. Constructed Wetlands. In: J.B. Rose and B. Jiménez-Cisneros, (eds) Global Water Pathogens Project. <http://www.waterpathogens.org> (C. Haas, J. Mihelcic and M. Verbyla) (eds) Part 4. Management of Risk from Excreta and Wastewater. Michigan State University, E. Lansing, MI, UNESCO. 2017. pp. 1-17. Disponível para download em: <http://www.waterpathogens.org/book/constructed-wetlands>.

Manjate, E. S. Behaviour evaluation of vertical flow constructed wetlands for treatment of domestic sewage and septic tank sludge. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 158 p., 2016.

Matos, A.T., Matos, M.P. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Editora UFV, Viçosa. 371 p., 2017.

Molle, P.; Liénard, A.; Boutin, C.; Merlin, G.; Iwema, A. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Water Science & Technology*, v. 51, n. 9, p. 11-21, 2005.

Moraes, D. C. Influência da sazonalidade e de plantas na redução da concentração de poluentes em sistema de alagados construídos de escoamento vertical, com alimentação em pulso, empregado para tratar esgoto doméstico bruto. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 127 pg., 2012.

Morvannou, A., Forquet, N., Troesch, S., Molle, P. Treatment performances of French constructed wetlands: results from a database collected over the last 30 years. *Water Science and Technology* 71 (9), 1333-1339. 2015.

Philippi, L. S., Sezerino, P.L. Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas. Florianópolis, Santa Catarina. Ed do autor. 144 p., 2004.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010. Cincinnati, USA. 165 p. 2000.

ANEXO 1

SEQUÊNCIA SIMPLIFICADA E UNIFICADA DE CÁLCULOS DE PROCESSO

(PRÉ-DIMENSIONAMENTO)

A principal etapa do pré-dimensionamento relaciona-se à determinação da área superficial requerida, do número de unidades em paralelo e das dimensões das unidades, bem como à estimativa das concentrações efluentes. Apresenta-se a seguir uma sequência simplificada, amplamente coberta pela literatura, aplicável para os três sistemas abordados neste documento (*wetlands* horizontais, *wetlands* verticais convencionais, *wetlands* verticais segundo o sistema francês). Os sistemas são dimensionados objetivando principalmente a remoção de matéria orgânica. Os valores dos parâmetros de projeto a serem adotados devem ser obtidos das tabelas constantes do presente documento. Para utilização da sequência listada a seguir, apesar de ela ser simplificada, pressupõe-se o conhecimento de princípios básicos de tratamento de esgotos pelo projetista.

Naturalmente que há outras rotinas de cálculo propostas pela literatura. No entanto, a sequência apresentada neste Anexo 1 é compatível com o caráter simplificado adotado para este documento de consenso, e se aplica, de forma geral, aos três sistemas de *wetlands*.

a) Dados de entrada relativos à vazão e à carga de DBO afluentes

Inicialmente, deve-se estimar o valor da carga de DBO do esgoto bruto afluente ao sistema de tratamento. Esta carga é obtida por meio do produto da vazão média afluente pela concentração de DBO do esgoto bruto, ou, preferencialmente, por meio do produto da população contribuinte pela carga per capita de DBO. Posteriormente, estipula-se a eficiência de remoção de DBO na etapa de tratamento que precede ao *wetland* (tanque séptico, reator anaeróbio compartimentado, reator UASB ou outro). Com base na carga de DBO removida no tratamento prévio, calcula-se a carga de DBO afluente à etapa de *wetlands*.

Carga de DBO afluente ao sistema de tratamento de esgotos (esgoto bruto)

Preferencialmente:

$$\text{Carga de DBO do esgoto bruto } \left(\frac{g}{d}\right) = \text{Carga per capita } \left(\frac{g}{\text{hab.}d}\right) \times \text{População (hab)}$$

ou, alternativamente:

$$\text{Carga de DBO do esgoto bruto } \left(\frac{g}{d}\right) = \text{Vazão média } \left(\frac{m^3}{d}\right) \times \text{Concentração } \left(\frac{g}{m^3}\right)$$

Carga de DBO afluyente à etapa de *wetlands*

$$\begin{aligned} \text{Carga de DBO afluyente aos wetlands } \left(\frac{g}{d}\right) \\ = \text{Carga de DBO do esgoto bruto } \left(\frac{g}{d}\right) \times \left[1 - \frac{\text{Eficiência de remoção do tratamento prévio (\%)}}{100}\right] \end{aligned}$$

b) Cálculo da área superficial requerida usando o conceito da taxa de aplicação orgânica superficial

A área superficial requerida é calculada utilizando-se um valor adotado para a taxa de aplicação orgânica superficial.

$$\text{Área superficial requerida (m}^2\text{)} = \frac{\text{Carga de DBO afluyente aos wetlands } \left(\frac{g^{DBO}}{d}\right)}{\text{Taxa de aplicação orgânica superficial } \left(\frac{g^{DBO}}{m^2.d}\right)}$$

Deve-se observar se o valor da taxa de aplicação superficial se refere ao sistema, como um todo, ou às unidades em operação (alimentação). Caso a taxa de aplicação se refira apenas às unidades em operação (como é usual para os *wetlands* verticais, convencionais ou segundo o sistema francês), a área total requerida é obtida pela multiplicação da área das unidades em operação pelo fator “número total de unidades/número de unidades em operação”.

c) Verificação da taxa de aplicação hidráulica superficial resultante

Com base na área superficial calculada, verifica-se se o valor resultante para a taxa de aplicação hidráulica superficial encontra-se dentro da faixa usual.

$$\begin{aligned} \text{Taxa de aplicação hidráulica superficial resultante } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right) &= \\ &= \frac{\text{Vazão média afluyente aos wetlands } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)}{\text{Área superficial requerida } (\text{m}^2)} \end{aligned}$$

Deve-se observar se o valor da taxa de aplicação superficial se refere ao sistema, como um todo, ou às unidades em operação (alimentação). Caso a taxa de aplicação se refira apenas às unidades em operação (como é usual para os *wetlands* verticais, convencionais ou segundo o sistema francês), a área total requerida é obtida pela multiplicação da área das unidades em operação pelo fator “número total de unidades/número de unidades em operação”.

Caso a taxa de aplicação hidráulica esteja dentro de valores aceitáveis, a área requerida poderá ser considerada como a área superficial adotada. Caso a taxa de aplicação hidráulica esteja acima de valores típicos da faixa usual, a área superficial poderá ser aumentada, de forma a que a taxa de aplicação hidráulica seja reduzida e se torne adequada, ou seja, dentro da faixa típica. Deve-se notar que a correspondência entre as taxas de aplicação orgânica e hidráulica ocorre apenas no caso de esgotos domésticos. Para outros tipos de efluentes, a taxa orgânica continua sendo mais importante, e os valores da taxa hidráulica poderão ser distintos dos valores usuais.

Alternativamente, para o cálculo da área superficial requerida, pode-se considerar como igualmente importantes as taxas de aplicação orgânica e hidráulica. Esta abordagem utiliza as seguintes equações para a determinação da área requerida:

Critério da taxa de aplicação orgânica superficial:

$$\text{Área superficial requerida } (\text{m}^2) = \frac{\text{Carga de DBO afluyente aos wetlands } \left(\frac{\text{gDBO}}{\text{d}} \right)}{\text{Taxa de aplicação orgânica superficial } \left(\frac{\text{gDBO}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right)}$$

Critério da taxa de aplicação hidráulica superficial:

$$\text{Área superficial requerida } (\text{m}^2) = \frac{\text{Vazão média afluyente aos wetlands } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)}{\text{Taxa de aplicação hidráulica superficial } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right)}$$

Com base nos dois valores de área superficial calculados, adota-se o maior valor. Desta forma, automaticamente, cumpre-se com os critérios de taxa de aplicação orgânica superficial e taxa de aplicação hidráulica superficial.

Esta estratégia não deve ser usada para o tratamento de águas cinzas, pois os valores das taxas de aplicação hidráulica propostos aqui são para esgotos domésticos. Como as águas cinzas são mais diluídas do que os esgotos domésticos, a taxa de aplicação hidráulica é mais elevada, para um determinado valor de taxa de aplicação orgânica.

d) Determinação do número de unidades em paralelo

Após a definição da área superficial total, estipula-se o número de unidades operando em paralelo. Com base nesta definição, calcula-se a área superficial de cada unidade.

$$\text{Área de cada unidade (m}^2\text{)} = \frac{\text{Área total (m}^2\text{)}}{\text{Número de unidades em paralelo (-)}}$$

Deve-se notar que a área superficial requerida, calculada anteriormente, é relacionada às unidades efetivamente em operação (alimentação), e não cobre as unidades que estejam em descanso. No caso de **wetlands horizontais**, usualmente todas as unidades em paralelo estão em operação simultaneamente (a menos que se adote alternância entre os leitos, o que é uma prática menos comum).

No caso dos **wetlands verticais** (convencionais e sistema francês) há unidades em alimentação e unidades em descanso. Para estes sistemas, as taxas de aplicação orgânica e hidráulica dizem respeito ao cálculo da **área das unidades em operação (alimentação)**. Após a definição do número de unidades em operação, deve-se complementar a área total com a inclusão da área das unidades em descanso.

e) Determinação do comprimento e da largura de cada unidade

Com base na especificação de um valor para a relação comprimento/largura, e conhecendo-se a área superficial de cada unidade, determinam-se os valores do comprimento e da largura de cada unidade. Verifica-se se estas dimensões estão dentro de valores razoáveis e se se adequam bem ao terreno disponível.

$$\text{Comprimento (m)} \times \text{largura (m)} = \text{Área de cada unidade (m}^2\text{)}$$

$$\frac{\text{Comprimento (m)}}{\text{Largura (m)}} = \text{Relação comprimento/largura}$$

f) Determinação da profundidade útil e da altura do material filtrante

No caso de **wetlands horizontais**, especifica-se a profundidade útil do líquido e a altura total ocupada pelo meio filtrante.

No caso de **wetlands verticais**, incluindo o sistema francês, estipula-se a altura de cada camada do meio suporte (camadas de filtração, transição e de drenagem).

g) Cálculo do volume útil ocupado pelo líquido

No caso de **wetlands horizontais**, que possuem meio saturado, o volume útil ocupado pelo líquido é obtido levando em consideração o índice de vazios do meio filtrante, ou seja, a porosidade. O valor da porosidade é função da granulometria adotada para o meio filtrante, e deve ser consultada na literatura de materiais de construção ou nas especificações do material a ser utilizado. Usualmente, o valor situa-se entre 0,30 e 0,40 (30 a 40%), no caso do leito limpo. Com o passar dos anos de operação e o acúmulo de sólidos no meio filtrante, a porosidade se reduz.

$$\begin{aligned} \text{Volume útil do líquido (m}^3\text{)} \\ &= \text{Comprimento (m)} \times \text{Largura (m)} \times \text{Profundidade útil (m)} \\ &\times \text{Porosidade (-)} \end{aligned}$$

O tempo de detenção hidráulica é utilizado em alguns modelos matemáticos para a estimativa das concentrações efluentes. No caso de **wetlands horizontais** (meio saturado), o tempo de detenção hidráulica teórico corresponde ao quociente entre o volume útil e a vazão média. Em alguns dimensionamentos, o cálculo do tempo de detenção hidráulica leva em consideração as perdas de água no sistema, causadas pela evapotranspiração, e a vazão usada no cálculo é a média entre a vazão afluyente e a estimada para o efluente. Caso se adote esta abordagem, o memorial de cálculo deverá especificar claramente esta opção.

$$\text{Tempo de detenção hidráulica (d)} = \frac{\text{Volume útil do líquido (m}^3\text{)}}{\text{Vazão média (}\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\text{)}}$$

No caso dos **wetlands verticais**, os quais possuem meio não saturado (poros ocupados com ar), não se aplica o conceito de tempo de detenção hidráulica. Tem-se o que se pode denominar como “tempo de percolação” ou “tempo de passagem do líquido”, que não é calculado usando a equação tradicional acima.

h) Especificação da granulometria do leito filtrante

Especifica-se o material e o tamanho do grão a ser utilizado no meio suporte. Caso o meio suporte seja composto por várias camadas, como nos **wetlands verticais**, é feita a especificação para cada camada.

i) Detalhes adicionais relacionados aos cálculos de processo

Em função do tipo de *wetland* adotado, deve-se fazer ainda cálculos de processo complementares. No caso de **wetlands horizontais**, calcula-se a taxa de aplicação orgânica na seção transversal ($\text{gDBO}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), para se analisar a propensão a uma colmatação prematura. Podem ser efetuados ainda cálculos hidráulicos para a estimativa da perda de carga resultante do escoamento em meio poroso, ditada pela Lei de Darcy.

No caso de **wetlands verticais**, deve-se definir ainda o número diário de pulsos ou bateladas (bateladas/d) e o volume de cada batelada ($\text{m}^3/\text{batelada}$). No sistema francês, efetua-se ainda a verificação da taxa de aplicação hidráulica superficial instantânea, que ocorre durante a batelada ($\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), bem como a altura do líquido resultante sobre a superfície do leito durante cada batelada (cm). Estes cálculos, que são mais específicos, estão comentados nas respectivas tabelas deste documento de consenso.

j) Estimativa das concentrações efluentes

As concentrações efluentes podem ser estimadas, de forma simplificada, com base nas eficiências de remoção típicas apresentadas nas tabelas do documento. Deve-se notar

que estes valores de eficiências são aplicáveis apenas no caso de tratamento de esgotos domésticos.

Outra possibilidade para a estimativa das concentrações efluentes é por meio da utilização de modelos matemáticos do processo. Conforme comentado no corpo deste documento, a utilização destes modelos foge ao presente escopo, que adota, explicitamente, uma abordagem simplificada. No entanto, o usuário do documento é incentivado a estudar e eventualmente aplicar estes modelos na sua rotina de dimensionamento.

Há vários modelos matemáticos disponíveis na literatura para a estimativa simplificada da concentração efluente de DBO ou DQO e de outros constituintes. Estes modelos são aplicados principalmente para **wetlands de escoamento horizontal**. Para **wetlands de escoamento vertical**, devido à condição não saturada do meio filtrante, há a necessidade de modelos mais complexos.

Os modelos simplificados mais citados na literatura para **wetlands horizontais** baseiam-se na cinética de primeira ordem, e são listados a seguir: (a) modelo de fluxo em pistão (com e sem concentração residual no efluente); (b) modelo de fluxo em pistão com dispersão (com e sem concentração residual no efluente); (c) modelo com correção do coeficiente de reação K em função da redução da biodegradabilidade; (d) modelo de tanques em série N-TES (com e sem concentração residual no efluente); (e) modelo P-K-C*, que corresponde a uma adaptação do modelo N-TES. O projetista deverá estudar detalhadamente a aplicabilidade de cada modelo, e ter especial atenção na seleção do modelo e na adoção dos coeficientes de reação K, de forma a que eles possam representar bem as características do esgoto sendo tratado, a geometria dos *wetlands* e as condições climáticas no local. Detalhes de alguns destes modelos, com a definição da terminologia listada acima e das equações relevantes, podem ser encontrados em diversas referências, tais como USEPA (2000), Philippi e Sezerino (2004), Crites et al (2006), Kadlec e Wallace (2009), IWA Task Group (2017), Matos e Matos (2017).

Algumas rotinas de dimensionamento utilizam os modelos, logo no início dos cálculos, para estimar a área superficial requerida para os *wetlands*, após se estabelecer a concentração efluente desejada. Esta é também uma possibilidade, mas o projetista

deve avaliar se a área calculada não resultou em valores excessivos, principalmente quando se estabelecem valores desejados bem baixos para as concentrações efluentes.

k) Detalhes construtivos e operacionais

Alguns detalhes construtivos e operacionais estão apresentados nas tabelas constantes deste documento de consenso.

AUTORES DAS VERSÕES 1, 2 E 3

Marcos von Sperling, Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College London/Inglaterra. Professor e pesquisador do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/DESA, Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG;

Pablo Heleno Sezerino, Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor e pesquisador do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado/GESAD, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/ENS, Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC.

APOIO TÉCNICO

Catiane Pelissari, Doutora em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

LISTA DE COLABORADORES E REVISORES

Alexandre Antônio Jacob de Mendonça, Mestre em Ciências pela Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo;

Ana Maria Beims Lopes, Engenheira Sanitarista e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina;

Antônio Teixeira de Matos, Professor Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Minas Gerais;

Camila Maria Trein, Mestre em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Minas Gerais;

Cristiane Dias Poças, Mestre em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade; Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo;

Christoph Julius Platzer, Doutor em Saneamento. Rotária do Brasil Ltda;

Cynthia Franco Andrade, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal Minas Gerais;

Daniel Ferreira, Mestre em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina;

Daniele Damasceno Silveira, Doutora em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina;

Douglas Pereira da S. Pitaluga, Professor Mestre em Engenharia do Meio Ambiente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás;

Eduardo Bello Rodrigues, Professor Mestre em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Santa Catarina;

Ênio Leandro Machado, Professor Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade De Santa Cruz Do Sul;

Fernando Jorge Correa Magalhães Filho, Professor Doutor em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade Católica Dom Bosco;

Gabriel Vaconcellos, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal Minas Gerais;

Heike Hoffmann, Doutora em Ecologia. Rotária do Brasil Ltda;

João Eduardo Addad, Doutor em Geodinâmica Superficial e Geoquímica Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto;

Jorge Alejandro García Zumalacarregui, Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal Minas Gerais;

José Tavares de Sousa, Professor Doutor em Engenharia Civil, Universidade Estadual da Paraíba;

Luciano Zanella, Doutor em Engenharia Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo;

Marcelus Alexander Acorinte Valentim, Professor Doutor em Engenharia Agrícola, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza;

Ricardo Franci Goncalves, Professor Doutor em Engenharia do Tratamento de Águas, Universidade Federal do Espírito Santo;

Rodrigo de Almeida Mohedano, Professor Doutor em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina;

Rogério de Araújo Almeida, Professor Doutor em Agronomia, Universidade Federal de Goiás;

Selma Cristina Silva, Professora Doutora em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia;

Tamara Simone van Kaick, Doutora em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

Victor Ybarzo, Engenheiro Sanitarista e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.