UM SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PROJETADO PARA ATENDER UMA RESIDÊNCIA

Bianca Teixeira da Cruz Sarot[(1)]
Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFPR.
Fernando Augusto Silveira Armani[(2)]
Engenheiro Ambiental, mestre e doutor pela UFPR. Professor de magistério superior da UFPR.

Endereço[(1)]: Rua Pau-Brasil, 621, Casa 9 - Pontal do Sul - Pontal do Paraná - Paraná - CEP: 83255-000 - Brasil - Tel: +55 (47) 99771-3745 - e-mail: bianca.teixiera@ufpr.br.

RESUMO

As comunidades rurais, isoladas e insulares enfrentam dificuldades para a implantação de sistemas convencionais de esgotamento sanitário devido a limitações de acesso, infraestrutura, disponibilidade de área e elevados custos de implantação e operação. Nesse contexto, este trabalho apresenta o dimensionamento, a implantação e a análise preliminar da viabilidade técnica de um sistema compacto de tratamento descentralizado destinado ao tratamento da fração de esgoto proveniente dos vasos sanitários de uma residência unifamiliar com até cinco habitantes. O sistema é composto por reatores anaeróbios em série, construídos com bombonas plásticas, seguidos de um wetland construído de fluxo vertical subsuperficial com aeração forçada. A vazão de projeto foi estimada em 150 L/dia, considerando exclusivamente as águas escuras, e o volume útil adotado para os biodigestores foi de 600 L, resultando em tempo de detenção hidráulica de 4 dias. O wetland foi implantado em uma caixa d'água de 500 L contendo camadas filtrantes de areia e pedrisco, com a presença de vegetação associada ao sistema. Com base em dados da literatura, o sistema apresenta potencial para remoção de matéria orgânica, sólidos e nutrientes, configurando uma alternativa de baixo custo e fácil operação para comunidades isoladas.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento descentralizado, Tecnologia social, Wetland construído.

INTRODUÇÃO

As regiões rurais e isoladas do Brasil enfrentam inúmeros desafios que dificultam a universalização do saneamento básico. A dispersão geográfica, o isolamento, a distância dos centros urbanos, os acessos precários, as limitações financeiras, a baixa participação social e a ausência de políticas públicas locais contribuem para os baixos índices de atendimento, especialmente no esgotamento sanitário (Figueiredo, 2019). Nesse contexto, os sistemas descentralizados surgem como alternativas viáveis, capazes de atender às especificidades dessas comunidades. No caso das residências unifamiliares, destacam-se tecnologias que permitem o tratamento eficiente do esgoto, com baixo custo de implementação e manutenção simplificada, características compatíveis com a realidade das áreas rurais brasileiras (Freire, 2022).

Embora áreas tipicamente rurais disponham de espaço para a implantação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto, essa realidade não ocorre de forma homogênea. Existem comunidades classificadas como rurais que apresentam adensamento populacional, restrições ambientais e dificuldades de acesso, o que torna a implantação desses sistemas mais complexa (FUNASA, 2021; Rodrigues, E. F. 2023). É o caso de comunidades pesqueiras da baía de Paranaguá, as quais estão localizadas em unidades de conservação e são acessíveis apenas por embarcação. Em geral, nessas localidades, a densidade de edificações e as condições territoriais exigem soluções específicas e adaptadas.

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como a NBR 7229 (ABNT, 1993), a NBR 13969 (ABNT, 1997) e sua atualização pela NBR 17076 (ABNT, 2024), apresentam diferentes tecnologias aplicáveis ao tratamento descentralizado de esgoto sanitário, incluindo tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios, equipamentos compactos de tratamento, tanques de evapotranspiração e wetlands construídos. A NBR 17076 consolidou e ampliou as diretrizes para sistemas de tratamento de esgoto de pequeno porte, incorporando oficialmente os wetlands construídos como alternativa tecnológica para o pós-tratamento de efluentes sanitários em áreas não atendidas por rede coletora.

Nesse contexto, as tecnologias sociais se destacam, pois são desenvolvidas e adaptadas conforme as necessidades e características das comunidades atendidas. Conforme Santos (2023), as tecnologias sociais podem ser entendidas como soluções desenvolvidas a partir da interação com a comunidade, voltadas à resolução de problemas concretos e à melhoria das condições de vida. Essas tecnologias estão associadas a processos participativos, valorização dos saberes locais e adaptação às realidades específicas dos territórios, sendo caracterizadas por sua simplicidade, baixo custo, replicabilidade e potencial de transformação social.

OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo apresentar o dimensionamento, a implantação e a análise preliminar da viabilidade técnica de um sistema unifamiliar de tratamento da fração de esgoto proveniente dos vasos sanitários, composto por reatores anaeróbios em série seguidos de wetland com aeração forçada.

METODOLOGIA

O sistema de tratamento proposto neste estudo foi concebido com base nos princípios da tecnologia social, visando uma solução de baixo custo, compacta, eficiente, de fácil transporte, instalação e manutenção, adequada para regiões sem acesso à redes coletoras de esgoto. Além disso, é destinado ao atendimento de uma unidade familiar composta por até 5 habitantes, sendo dimensionado exclusivamente para tratamento de esgoto proveniente do vaso sanitário, sendo excluídas as contribuições de águas cinzas, tais como aquelas oriundas de pias, chuveiros e lavanderia.

O sistema é destinado ao tratamento da fração de esgoto com maior carga orgânica e microbiológica, permitindo maior eficiência dos processos adotados. Além disso, evita-se a diluição excessiva do esgoto e a introdução de substâncias potencialmente inibidoras como detergentes e produtos de limpeza, que podem comprometer a atividade dos microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico.

Os critérios adotados para o dimensionamento foram baseados nas normas técnicas e literatura especializada, como a ABNT NBR 17076/2024 (Projetos de sistema de tratamento de esgoto de menor porte - Requisitos) e Marcos Von Sperling (2005), considerando os parâmetros apresentados na Tabela (1).

Tabela 1 - Parâmetros iniciais

Parâmetro	Valor
População	5 habitantes
Contribuição per capita de esgoto	100 L/hab.dia
Fração do vaso sanitário	30%

Fonte: Rebelo (2011) e ABNT NBR 17076 (2024).

A partir dos parâmetros iniciais (Tabela 1), calculou-se inicialmente a vazão diária total do sistema, considerando a população atendida, que pode ser encontrado a partir da Equação (1):

$$Q_{total} = N \times q \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde:
Q_{total} - Vazão diária total do sistema (L/dia);
q - Contribuição per capita de esgoto (L/hab.dia);
N - População atendida (hab).

Como o sistema proposto foi dimensionado exclusivamente para o tratamento do esgoto proveniente do vaso sanitário, adotou-se a fração de 30% da vazão total correspondente às águas escuras. Dessa forma, a vazão de projeto destinada ao biodigestor foi calculada conforme a Equação (2):

$$Q_{vaso} = Q_{total} \times F \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:
Q_{vaso} - Vazão das águas negras (L/dia);
Q_{total} - Vazão diária total do sistema (L/dia);
f - Fração do vaso sanitário.

De forma complementar, a estimativa da vazão da fração do vaso sanitário foi verificada por meio de uma abordagem prática baseada no número diário de acionamentos da descarga sanitária, conforme apresentado na Equação (3):

$$q_{vaso} = n \times V \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:
q_{vaso} - Contribuição diária por habitante (L/hab.dia);
n - Número de descargas por dia;
V - Volume de água da caixa de descarga (L).

Para a população estimada no estudo, a vazão diária total de água do vaso sanitário foi determinada conforme a Equação (4):

$$Q_{vaso} = N \times q_{vaso} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:
Q_{vaso}- Vazão das águas escuras (L/dia);
N - População atendida (hab).
q_{vaso}- Contribuição diária por habitante (L/hab.dia);

Assim, o sistema proposto inicia o tratamento do esgoto por meio de um processo anaeróbio, utilizando reatores anaeróbios em série, capazes de promover o tratamento primário e secundário parcial do efluente. Nessa etapa, ocorre inicialmente a decantação dos sólidos sedimentáveis, seguida da degradação biológica da matéria orgânica por microrganismos anaeróbios presentes no interior do reator (Lima, 2006). Esse processo contribui para a redução da carga orgânica, especialmente da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além da estabilização parcial do lodo gerado.

O dimensionamento dos reatores foi realizado com base no Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), parâmetro que representa o tempo médio de permanência do efluente no interior da unidade de tratamento, conforme Equação (5):

$$V = Q_{vaso} \times TDH \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:
V - Volume do reator (L);
Q_{vaso} - Vazão das águas escuras (L/dia)
TDH - Tempo de detenção hidráulica (dias);

Almeja-se complementar o tratamento do efluente com um sistema aeróbio, de aeração forçada a fim de reduzir a área demandada, promover a oxidação do enxofre e do nitrogênio, e usufruir de plantas para filtração final. Para isso, dimensionou-se um Wetland de fluxo vertical.

Para o dimensionamento do wetland construído, a área do sistema foi estimada a partir da taxa de aplicação hidráulica, conforme a literatura (Von Sperling, 2005; Von Sperling; Sezerino, 2018), estando expressa na Equação (6).

$$A = \frac{Q_{vaso}}{T_a} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:
A - Área wetland (m²);
Q_{vaso} - Vazão das águas escuras (L/dia);
T_a - Taxa de aplicação hidráulica (L/m².dia).

Por fim, o sistema é constituído por camadas de material filtrante, formadas por pedrisco e areia, associadas à presença de vegetação, operando com fluxo vertical subsuperficial e aplicação intermitente do efluente.

Além disso, foi incorporado ao sistema um mecanismo de aeração forçada por meio de bomba de ar, com o objetivo de intensificar a transferência de oxigênio no meio filtrante. A presença de oxigênio nos vazios do leito favorece o desenvolvimento do biofilme aeróbio, contribuindo para o aumento da eficiência na remoção de matéria orgânica e na oxidação de compostos nitrogenados (Marcos Von Sperling e Sezerino 2018).

Considerando a aplicação em locais isolados, a bomba de ar pode ser alimentada por energia elétrica convencional ou, alternativamente, por sistema fotovoltaico. A possibilidade de utilização de placa solar amplia a autonomia operacional do sistema e reduz a dependência de infraestrutura elétrica local, reforçando seu potencial como tecnologia social de baixo custo e fácil replicabilidade.

Por fim, a eficiência do tratamento foi estimada com base em dados na literatura para sistemas semelhantes. Para a etapa anaeróbia, composta por reatores anaeróbios em série, foram considerados valores de remoção de matéria orgânica apresentados por Chernicharo (1997) e Von Sperling (2005) para sistemas anaeróbios aplicados ao tratamento de esgoto doméstico. Para a etapa complementar, composta por wetland construído de fluxo vertical subsuperficial com aeração forçada, foram considerados estudos sobre wetlands aplicados ao pós-tratamento de efluentes domésticos.

ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos critérios adotados e da metodologia previamente descrita, foram obtidos os resultados referentes ao dimensionamento do sistema de tratamento de esgoto proposto. Inicialmente, foram determinadas as vazões de projeto. Com base na população considerada de 5 habitantes e na contribuição per capita de esgoto de 100 L/hab.dia, a vazão diária total do sistema foi estimada em 500 L/dia, conforme a Equação (1). Considerando a fração correspondente às águas escuras provenientes do vaso sanitário, adotada como 30% (Tabela 1), e substituindo na Equação (2), obteve-se a vazão proveniente do vaso sanitário de aproximadamente 150 L/dia. Os valores encontrados estão compatíveis com sistemas descentralizados de pequeno porte, conforme indicado pela ABNT NBR 17076/2024, que indica vazão diária total de até 12000 L/dia.

De forma complementar, essa estimativa foi verificada a partir de uma abordagem prática baseada no número de acionamentos de descarga. Considerando que cada descarga utiliza aproximadamente 6 L de água e que cada habitante aciona o vaso sanitário, em média, 5 vezes ao dia, tem-se uma contribuição diária de 30 L/hab.dia. Para uma população de 5 habitantes, a vazão diária estimada é de 150 L/dia, conforme Equação (3) e (4).

A partir da vazão do esgoto proveniente do vaso sanitário, procedeu-se para o dimensionamento do reator anaeróbio.

Segundo Farias (2021), o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) recomendado para sistemas anaeróbios varia de 4 a 6 dias. Como trata-se de um sistema unifamiliar de pequeno porte destinado exclusivamente ao tratamento do esgoto proveniente dos vasos sanitários, adotou-se TDH de 4 dias, valor considerado adequado para promover a estabilização da matéria orgânica e favorecer o desempenho do processo anaeróbio.

Com foco em soluções de menor custo, esses sistemas podem ser construídos a partir de bombonas de PEAD recicladas, constituindo uma alternativa às manilhas de concreto comercializadas, tipicamente utilizadas como fossas. Esse material é leve e resistente, sendo mais adequado para regiões com acesso exclusivamente por

embarcação. Ressalta-se que o sistema não deve receber águas provenientes de chuveiros, pias ou outros usos domésticos, pois o elevado volume e a presença de produtos químicos podem prejudicar o processo de biodigestão. Dessa forma, recomenda-se a aplicação exclusiva para esgoto oriundo de vasos sanitários (Farias, 2021; Lima, 2016). Como as bombonas de 250 L são amplamente disponíveis, foram adotadas três unidades em série, resultando em um volume útil total de 600 L, suficiente para garantir um TDH de 4 dias.

Essa sequência de reatores anaeróbios é comumente denominada biodigestor. Dessa forma, visando garantir a viabilidade prática de implantação e a aplicação em condições reais, o dimensionamento foi baseado em biodigestores comercialmente disponíveis no mercado. A Tabela 3 apresenta os volumes típicos desses equipamentos.

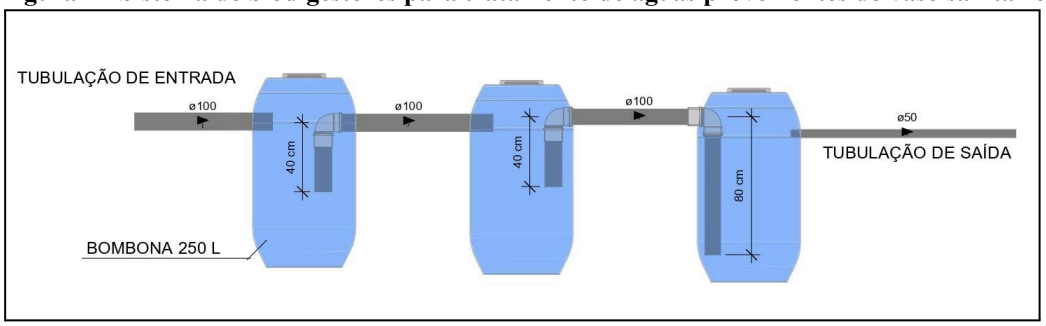
Tabela 3 - Biodigestores comerciais

Volume (L)	Atendimento típico (pessoas)
600	5-6
1000	8-10
2000	15-20

Fonte: Hydrotech Brasil (2026) e Sanear Brasil (2026).

O sistema foi configurado com unidades de biodigestão dispostas em série, formando um sistema similar a um tanque séptico seguido de filtro anaeróbio. De acordo com Chernicharo (1997), sistemas compartimentados melhoram a eficiência do tratamento, uma vez que a disposição em série favorece o aumento do tempo de detenção hidráulica e promove uma separação mais eficiente das etapas de sedimentação e digestão da matéria orgânica. Além disso, sistemas anaeróbios compartimentados tendem a apresentar melhor desempenho na remoção de sólidos e matéria orgânica, em razão da redução da turbulência hidráulica e da maior estabilidade do processo biológico. A configuração esquemática do biodigestor formado pela sequência de reatores neste estudo, encontra-se apresentada na Figura (1).

Figura 1 - Sistema de biodigestores para tratamento de águas provenientes do vaso sanitário



Fonte: Os autores (2026).

Os biodigestores referem-se a estruturas vedadas, nas quais os resíduos são submetidos a processos de digestão anaeróbia, ou seja, à decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Nesse processo, os dejetos passam por transformações biológicas que contribuem para a redução da carga orgânica e estabilização do material (Chernicharo, 1997; Farias, 2021).

O biodigestor deve permanecer devidamente vedado, e, quando corretamente dimensionado e operado, não apresenta emissão de odores nem necessidade frequente de esvaziamento. Embora o efluente tratado apresente nutrientes, sua utilização direta como fertilizante não é recomendada, devido à possível presença de microrganismos patogênicos. Assim, indica-se sua destinação a um tratamento secundário, onde ocorre a etapa final de tratamento no solo (Lima, 2016; Chernicharo, 1997).

Após a etapa do tratamento primário, o efluente segue para o wetland construído, responsável pelo polimento do esgoto e pela remoção complementar de matéria orgânica e nutrientes. Para a construção do wetland, foi

empregada uma caixa d'água autolimpante com volume de 500 L, escolhida por seu formato construtivo, que promove o escoamento do efluente em direção ao ponto de extravasamento central situado no fundo do tanque. Além disso, esse tipo de estrutura apresenta vantagens como resistência mecânica e facilidade de instalação, características importantes para aplicação em áreas isoladas.

O dimensionamento do wetland foi realizado a partir da área requerida para o sistema, a fim de garantir que a carga hidráulica aplicada fosse compatível com a capacidade de tratamento da unidade, evitando sobrecargas que possam comprometer sua eficiência.

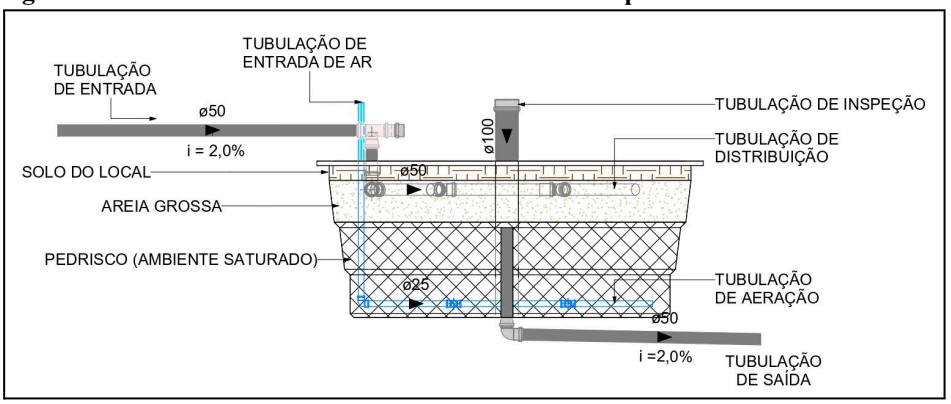
A partir da Equação (6), considerando uma taxa de aplicação hidráulica de 120 L/m².dia (von Sperling; Sezerino, 2018), obteve-se uma área aproximada de 1,25 m². A área reduzida está associada à baixa vazão de projeto do sistema, destinado exclusivamente ao tratamento do esgoto proveniente dos vasos sanitários, bem como à adoção de biodigestores anaeróbios em série como etapa preliminar de tratamento, promovendo redução parcial da carga orgânica e de sólidos afluentes ao wetland construído.

Embora o dimensionamento teórico tenha indicado área de 1,25 m², o projeto físico foi adaptado para a utilização de uma caixa d'água autolimpante de 500 L, apresentando área útil entre 1,10 e 1,20 m², valor próximo ao obtido no dimensionamento, conforme especificações da Bakof Tec (s.d). Essa diferença implica apenas pequeno aumento da taxa de aplicação hidráulica, sem comprometer o desempenho do sistema, considerando o pré-tratamento anaeróbio e a presença de aeração forçada no wetland construído.

A escolha da taxa de aplicação hidráulica foi fundamentada nas recomendações da literatura para wetlands construídos de fluxo vertical subsuperficial aplicados ao tratamento de esgotos domésticos. De acordo com Marcos von Sperling e Antonio Sezerino (2018), valores típicos situam-se na faixa de 50 a 120 L/m².dia. Neste estudo, adotou-se o valor correspondente ao limite superior dessa faixa, porém o sistema recebe efluente previamente tratado em biodigestor anaeróbio, o que resulta em menor carga orgânica afluente. Além disso, a proposta de um sistema compacto, aliada à incorporação de aeração forçada, justifica a utilização de uma taxa mais elevada, sem prejuízo à eficiência do tratamento.

Nos wetlands construídos de fluxo vertical subsuperficial (FPMV), o nível de água permanece abaixo da superfície do meio filtrante. Esses sistemas podem ser implantados escavados no solo ou elevados, sendo preenchidos com materiais como brita e areia, além de apresentarem impermeabilização lateral e de fundo para evitar a percolação do efluente para o subsolo. As macrófitas emergentes são plantadas no material filtrante, enquanto o efluente é aplicado na superfície e percola verticalmente pelo leito. A aplicação intermitente favorece a entrada de ar nos vazios do meio filtrante, aumentando a disponibilidade de oxigênio. Esse processo contribui significativamente para a remoção de matéria orgânica e para a nitrificação, mantendo condições aeróbias no sistema (Rodrigues, M. M. V. Z. 2016). A Figura (2) ilustra a configuração do sistema de wetland construído aerado utilizado como etapa de pós-tratamento do efluente anaeróbio.

Figura 2 - Wetland Construído de Fluxo Vertical como pós tratamento do efluente anaeróbio



Fonte: Os autores (2026).

Além disso, foi incorporado ao sistema um mecanismo de aeração forçada por meio de bomba de ar, com o objetivo de aumentar a disponibilidade de oxigênio no leito filtrante e intensificar os processos aeróbios de

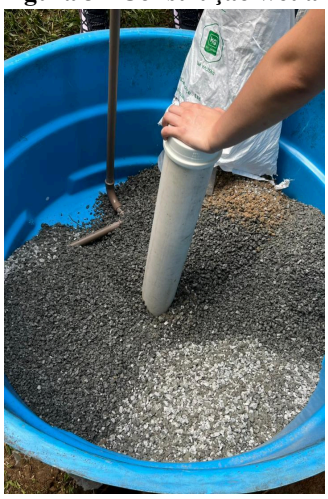
degradação da matéria orgânica. A presença de oxigênio nos vazios do meio suporte favorece o desenvolvimento do biofilme aeróbio, contribuindo para o aumento da eficiência na remoção de DBO e na oxidação de compostos nitrogenados (Walter et al, 2023).

A adoção da aeração também contribui para a redução da área necessária do wetland, uma vez que sistemas com maior disponibilidade de oxigênio apresentam maior capacidade de tratamento por unidade de área (CETESB, 2018). Essa característica torna a solução mais adequada para comunidades insulares e áreas com restrições espaciais. Além disso, a utilização de aeração forçada auxilia na minimização de odores e na melhoria das condições operacionais do sistema.

A possibilidade de alimentação da bomba de aeração por placa solar de 100 W foi considerada como alternativa energética complementar, especialmente pela localização insular da área de estudo. Em comunidades isoladas, soluções fotovoltaicas podem favorecer a autonomia do sistema, reduzir a dependência de infraestrutura elétrica local e facilitar a operação contínua da aeração, desde que o conjunto seja dimensionado de acordo com a potência da bomba, o tempo diário de funcionamento e a disponibilidade de radiação solar.

Após o dimensionamento do sistema, procedeu-se à montagem da unidade de wetland construída (Figura 3 e 4).

Figura 3 - Construção wetland



Fonte: Os autores (2026).

Figura 4 - Construção wetland



Fonte: Os autores (2026).

O meio filtrante foi constituído por camadas de pedrisco e areia, dispostas de forma a promover adequada filtração, suporte ao desenvolvimento do biofilme e eficiência na remoção de poluentes. A combinação desses materiais favorece tanto a retenção de sólidos quanto a ocorrência de processos físicos, químicos e biológicos ao longo do leito (Fochi, 2024)

De acordo com Sezerino (2018), a correta estratificação do meio filtrante é fundamental para garantir o desempenho hidráulico do sistema e evitar problemas como a colmatação, caracterizada pelo entupimento progressivo dos vazios do material filtrante devido ao acúmulo de sólidos, matéria orgânica e biomassa.

O wetland construído foi implantado em uma caixa d'água autolimpante de 500 L, com configuração adaptada às limitações físicas do reservatório, mantendo os princípios de funcionamento dos wetlands construídos verticais. A camada inferior foi composta por aproximadamente 0,40 m de pedrisco, atuando como zona drenante, suporte para a tubulação de coleta e região de fundo saturado. A adoção dessa espessura foi fundamentada em estudos de wetlands construídos verticais de fundo saturado, como o sistema avaliado por Santos et al. (2018), que possuía profundidade total de 0,75 m e mantinha os últimos 0,40 m do leito permanentemente saturados com esgoto.

Sobre o pedrisco foi adicionada uma camada de aproximadamente 0,05 m de areia grossa, utilizada como meio filtrante complementar. Segundo Von Sperling e Sezerino (2018), materiais granulares como a areia favorecem a filtração do efluente e o desenvolvimento do biofilme responsável pelos processos de tratamento.

Na superfície foi disposta uma camada de aproximadamente 0,20 m de solo para suporte da vegetação. Nessa camada foram plantadas helicônias (Figuras 5 e 6), com a finalidade de promover o desenvolvimento de um sistema radicular capaz de fornecer suporte à fixação de microrganismos e favorecer a formação da rizosfera. Dessa forma, as plantas contribuem para a atividade microbiológica responsável por parte dos processos de remoção de poluentes, além de auxiliar na estabilização do leito filtrante (FUNASA, 2018).

As plantas desempenham importante papel no funcionamento do sistema devido ao movimento dos caules e raízes, que contribui para a formação de espaços livres na camada superficial de sedimentos acumulados. Esses espaços favorecem a penetração do líquido afluente e sua distribuição ao longo do leito filtrante, auxiliando na manutenção da permeabilidade hidráulica do wetland construído. As raízes formam uma ampla superfície para o crescimento do biofilme microbiano, responsável pela degradação da matéria orgânica e de outros poluentes presentes no efluente. Além disso, as plantas contribuem para a transferência de oxigênio ao meio filtrante, favorecendo processos biológicos, como a nitrificação (von Sperling e Sezerino, 2018).

Figura 5 - Wetland com as macrófitas



Fonte: Os autores (2026).

O sistema completo de tratamento unifamiliar foi configurado conforme apresentado nas Figuras (6) e (7), integrando as etapas de tratamento primário (biodigestor anaeróbio) e secundário (wetland construído de fluxo vertical subsuperficial).

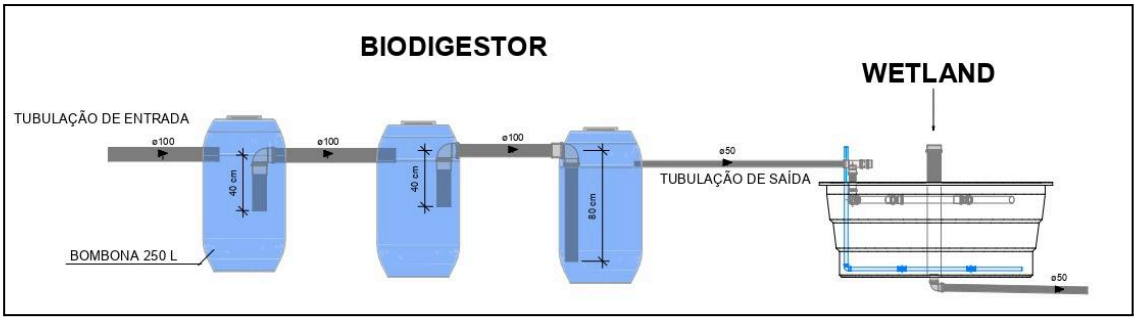
Figura 6 - Sistema de tratamento (biodigestores + wetland)



Fonte: Os autores (2026).

Nesse contexto, a combinação entre biodigestor anaeróbio e wetland construído com aeração forçada (Figura 7) segue a lógica dos sistemas híbridos de tratamento descentralizado, nos quais a etapa anaeróbia atua na redução inicial da carga orgânica, enquanto a etapa aeróbia promove o pós-tratamento e o polimento do efluente. Estudos envolvendo sistemas combinados anaeróbio-aeróbios indicam que essa associação pode favorecer elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, além de apresentar vantagens como baixa produção de lodo, operação simplificada e adequação a sistemas de pequeno porte (Chernicharo, 1997; von Sperling; Sezerino, 2018).

Figura 7 - Combinação entre biodigestor anaeróbio e wetland construído aerado para tratamento de efluente



Fonte: Os autores (2026).

Silva (2016), ao avaliar um sistema combinado composto por filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso, obteve remoções médias globais de 97% de DBO_5 e 94% de DQO no tratamento de esgoto doméstico unifamiliar. Embora a configuração analisada pelo autor seja distinta da proposta neste estudo, os resultados demonstram o potencial de sistemas descentralizados que associam uma etapa anaeróbia a uma etapa aeróbia de pós-tratamento.

Para a etapa anaeróbia, Chernicharo (1997) indica que sistemas anaeróbios aplicados ao tratamento de esgoto doméstico podem apresentar eficiências satisfatórias de remoção de DBO e DQO, especialmente em reatores UASB, com valores da ordem de 65% a 75%. De forma complementar, Von Sperling aponta remoções de DBO e DQO em torno de 60% a 70% para reatores UASB tratando esgotos sanitários. Apesar de o biodigestor utilizado neste estudo apresentar configuração construtiva diferente desses reatores, tais valores reforçam o potencial dos processos anaeróbios como etapa inicial de redução da carga orgânica.

Além disso, dados técnicos de fabricantes de biodigestores comerciais também indicam desempenho semelhante. A Fortlev (2026), por exemplo, reporta remoção de até 80% de DBO quando adequadamente operado.

A etapa complementar do sistema, composta pelo wetland construído de fluxo vertical subsuperficial com aeração forçada, também apresenta potencial significativo de remoção de poluentes. Ferreira et al. (2013 apud Morais, 2014), ao realizarem levantamento de pesquisas envolvendo wetlands construídos de fluxo vertical subsuperficial aplicados ao tratamento de esgoto sanitário no Brasil, identificaram remoções de DBO entre 77% e 99%, além de remoções de até 99% de coliformes totais. Para nitrogênio amoniacal e nitrogênio total, foram reportadas remoções de até 89% e 93,3%, respectivamente. Em alguns estudos, a remoção de fósforo total atingiu valores próximos de 99,6%.

Esses resultados evidenciam que wetlands construídos podem atuar de forma eficiente como etapa de pós-tratamento, principalmente na remoção complementar de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e microrganismos indicadores. No caso do sistema proposto, a presença de aeração forçada tende a favorecer a disponibilidade de oxigênio no meio filtrante, ampliando as condições para degradação aeróbia da matéria orgânica e oxidação de compostos nitrogenados.

A análise de custos do sistema proposto considerou os principais materiais empregados na implantação das unidades de tratamento, incluindo as bombonas plásticas utilizadas como biodigestores, conexões hidráulicas, tubulações, caixa d'água para composição do wetland, materiais filtrantes, helicônias, bomba de aeração e demais acessórios necessários à montagem, conforme mostra a Tabela (4).

Tabela 4 - Materiais empregados na implantação das unidades de tratamento

Material	Quantidade	Custo aproximado
Bombonas (250 L)	3	R$450,00
Caixa d'água (500 L)	1	R$570,00
Tubulação (100 mm)	9 metros	R$228,00
Tubulação (50 mm)	8 metros	R$65,00
Tubulação (25 mm)	5 metros	R$31,00
Cruzeta de PVC soldável (25 mm)	2	R$60,00
Joelho de PVC soldável (25 mm)	1	R$0,80
CAP de PVC para esgoto (50 mm)	1	R$11,00
CAP de PVC para esgoto (100 mm)	1	R$16,00
Joelho ou luva para esgoto (50 mm)	7	R$35,00
Joelho ou luva para esgoto (100 mm)	4	R$40,00
Tê de PVC para esgoto (50 mm)	2	R$10,00
Areia, pedrisco	35 sacos	R$209,00
Bomba de aeração	1	R$410,00
Placa solar (100 W)	1	R$285,00
Helicônias	10	R$250,00

Total estimado	-	R$2670,80

Fonte: Os autores (2026), com base em preços levantados no mercado.

De modo geral, o sistema apresentou baixo custo de implantação quando comparado a soluções convencionais de tratamento de esgoto, principalmente pela utilização de materiais de fácil aquisição e pela possibilidade de reaproveitamento de bombonas plásticas. Além disso, a simplicidade construtiva reduz a necessidade de mão de obra especializada, característica importante para comunidades isoladas, onde o transporte de materiais e a execução de obras podem representar limitações significativas.

A escolha por unidades compactas também contribui para a viabilidade econômica do sistema, uma vez que facilita o transporte por embarcação e reduz a necessidade de grandes intervenções no terreno. O uso de uma caixa d'água de 500 L como estrutura do wetland e de bombonas plásticas interligadas em série permitiu a composição de uma alternativa modular, adaptável e de menor complexidade operacional.

Outro ponto relevante refere-se ao custo operacional do sistema. O biodigestor opera por gravidade, sem necessidade de bombeamento entre as unidades, reduzindo significativamente o consumo energético. Assim, a principal demanda elétrica está associada ao sistema de aeração do wetland construído. Para o presente dimensionamento, estimou-se que essa demanda pode ser atendida por um sistema fotovoltaico de pequeno porte composto por uma placa solar de 100 W. Essa possibilidade amplia a autonomia operacional do sistema e favorece sua aplicação em áreas insulares ou localidades com infraestrutura elétrica limitada.

Dessa forma, o sistema proposto apresenta potencial como alternativa de baixo custo para o tratamento descentralizado de águas do vaso sanitário em residências unifamiliares. Além do menor custo de implantação, destacam-se a facilidade de transporte, a simplicidade de montagem, a baixa demanda de manutenção e a possibilidade de adaptação às condições locais. Esses fatores reforçam o caráter de tecnologia social da solução, especialmente para comunidades isoladas e com restrições de acesso a sistemas convencionais de saneamento.

Assim, além do potencial de remoção de matéria orgânica indicado pela literatura, o sistema proposto apresenta viabilidade econômica e operacional, por utilizar materiais acessíveis, ocupar área reduzida e demandar baixa complexidade de manutenção, características fundamentais para sua aplicação em comunidades insulares e descentralizadas.

CONCLUSÕES

O sistema proposto apresentou potencial como alternativa descentralizada para tratamento da fração do vaso sanitário em residência unifamiliar, especialmente por ser compacto e de baixo custo e adaptado a áreas com limitações de acesso e infraestrutura.

A combinação entre biodigestores anaeróbios em série e wetland construído aerado mostrou-se coerente com a proposta de tratamento em etapas, na qual o biodigestor atua na redução inicial da carga orgânica e o wetland realiza o pós-tratamento e polimento do efluente. O dimensionamento indicou compatibilidade com o atendimento de até cinco habitantes, considerando exclusivamente o esgoto proveniente do vaso sanitário.

Com base na literatura, o sistema apresenta expectativa de boa remoção de matéria orgânica, sólidos e nutrientes. Entretanto, como ainda não foram realizadas análises laboratoriais completas, a eficiência real deverá ser confirmada por meio do monitoramento de parâmetros como DBO, DQO, pH, sólidos e indicadores microbiológicos.

Dessa forma, o sistema demonstra viabilidade técnica, econômica e operacional, reforçando seu potencial como tecnologia social aplicável a comunidades isoladas e a contextos nos quais soluções convencionais de saneamento não são facilmente implementadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17076: projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte — requisitos.** Rio de Janeiro, 2024.

2. BAKOF TEC. **Produtos. Frederico Westphalen: Bakof Tec,** [s.d.]. Disponível em: <https://www.bakof.com.br/produtos/1>. Acesso em: 25 maio 2026.

3. BRASIL. **Fundação Nacional de Saúde (FUNASA).** Programa Nacional de Saneamento Rural: análise situacional do saneamento rural no Brasil. Brasília: FUNASA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/funasa/pt-br/centrais-de-conteudo/arquivos/subsidios_vol2_analise_situacional.pdf.>. Acesso em: 17 abr. 2026.

4. CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5).

5. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **CETESB.** São Paulo: CETESB, [2018]. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/cetesb>. Acesso em: 18 mai. 2026.

6. FARIAS, V. B. **Sistema biodigestor:** aplicação em uma residência unifamiliar. 2021. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/36655/1/biodigestorbiogasefluentes.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026.

7. FIGUEIREDO, I. C. S. **Tratamento de Esgoto na Zona Rural:** Diagnóstico participativo e aplicação de tecnologias alternativas. 2019. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019). Disponível em: <https://www.fecfau.unicamp.br/~saneamentorural/wp-content/uploads/2017/11/2019-Figueiredo-tese.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2026.

8. FOCHI, D. A. T. **Sequência de wetlands de fluxo vertical saturado com unidade de fluxo compartimentado de superfície livre associados com filtro concêntrico de argila expandida e material cerâmico para tratamento de efluente urbano.** 2024. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unisc.br/jspui/bitstream/11624/3811/1/Deison%20Antonio%20Taufer%20Fochi.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2026.

9. FORTLEV. **Manual/Catálogo Técnico: Biodigestor Fortlev**. Disponível em: catálogo técnico do Biodigestor Fortlev. Disponível em: <https://www.fortlev.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Manual-Catalogo-Tecnico-Biodigestor-Fortlev.pdf>. Acesso em: 23 mai 2026.

10. FREIRE, A. D. M. **Sistemas descentralizados para tratamento de esgoto na agricultura familiar.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022. Disponível em: <https://agriculturafamiliar.uff.br/wp-content/uploads/sites/518/2023/01/TCC_Adria_Daiane.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2026.

11. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. **Cartilha wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção**. Brasília, DF: Funasa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/542>. Acesso em: 9 jun. 2026.

12. HYDROTECH BRASIL. **Biodigestor 600 litros.** Disponível em:<https://biodigestornaweb.com.br/products/biodigestor-600-litros?srsltid=AfmBOooab5HJ2QW6YvSMwgXVc7s7a-oxX4mXYgrNLP6tRuE6RAkWLY9B>. Acesso em: 26 abr. 2026.

13. HYDROTECH BRASIL. **Biodigestor 2000 litros.** Disponível em: <https://biodigestornaweb.com.br/products/biodigestor-2000-litros?variant=41231676211286&country=BR&currency=BRL&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&gad_source=1&gad_campaignid=21632444361&gbraid=0AAAAA-CegGiUJU1I8e6YAmAA9RkInb-Te&gclid=Cj0KCQjw-pHPBhCdARIsAHXYWP_q3IPBSVWAdmwVRId2eGVUjglnmMxm8GotLukc8gfWZUl6ktyluPEaAqMaEALw_wcB>. Acesso em: 18 mai. 2026.

14. LIMA, A. B. B. V.. **Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio em sistema sequencial constituído de ozonização em processo biológico aeróbio**. 2006. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19032007-205446/publico/Lima.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026

15. MORAIS, C. J. **Avaliação de wetland construído de fluxo subsuperficial vertical tratando esgotos sanitários.** 2014. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Processos Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/9678/3/CT_COPAM_2015_1_02.pdf>. Acesso em: 24 maio 2026.

16. RÊBELO, M. M. P. S. **Caracterização de águas cinzas e negras de origem residencial e análise da eficiência de reator anaeróbio com chicanas**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/5264/1/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20de%20%C3%A1guas%20cinzas%20e%20negras%20de%20origem%20residencial%20e%20an%C3%A1lise%20da%20efici%C3%AAncia%20de%20reator%20anaer%C3%B3bio%20com%20chicanas.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026.

17. RODRIGUES, E. F. **Saneamento rural:** estudo sobre a implantação de um sistema descentralizado de coleta e tratamento de esgoto doméstico na zona rural do Ceará. 90 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76589>. Acesso em: 17 abr. 2026.

18. RODRIGUES, M. M. V. Z. **Utilização de wetlands construídos no tratamento de águas residuais: uma visão geral**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2016. Disponível em: <https://repositorio2.utfpr.edu.br/items/0856b1c4-3333-4b7c-b23b-a00c10bf449d >. Acesso em: 25 abr. 2026.

19. SANEAR BRASIL. **Biodigestor 1000 litros.** Disponível em: <https://sanearbrasil.com.br/products/biodigestor-1000l-sanear-brasil?variant=43053214302242&country=BR&currency=BRL&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_term=&utm_id=23179496773--&utm_campaign=Pmax_Superbiodigestor&gad_source=1&gad_campaignid=23169925353&gbraid=0AAAADCtOCmLMagRpKX-QrJrMV8F9hnLt&gclid=Cj0KCQjw-pHPBhCdARIsAHXYWP8uQJKVvPdOeFWprKxAlG0jZ8VWJCIOb3PoL3Jzf9vkftZVSAQYpGAaAidfEALw_wcB>. Acesso em: 18 mai. 2026.

20. SANTOS, E. L. Tecnologias sociais: um novo modo de fazer e pensar é possível. **Extraprensa - Cultura e Comunicação na América - Latina**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 46-69, 2023. Disponível em: <https://revistas.usp.br/extraprensa/pt_BR/article/view/219246/205051>. Acesso em: 17 abr. 2026.

21. SANTOS, M. O. dos; PELISSARI, C; ROUSSO, B. Z.; FREITAS, M. N.; SEZERINO, P. H. Avaliação dos dois primeiros anos de operação de um wetland construído vertical de fundo saturado aplicado no tratamento de esgoto sanitário. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 22, n. 1, p. 25-29, 2018. Disponível em: <https://seer.unisc.br/index.php/tecnologica/article/view/10500>. Acesso em: 09 jun. 2026.

22. SILVA, T. M. R. da. **Aplicação do sistema combinado por filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso ao tratamento de esgotos sanitários de unidades residenciais unifamiliares**. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia,

Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2017/03/Aplicação-do-sistema-combinado-por-filtro-anaeróbio-seguido-de-biofiltro-aerado-submerso-ao-tratamento-de-esgotos-sanitários-de-unidades-residenciais-unifamiliares.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2026.

23. VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

24. VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil: documento de consenso entre pesquisadores e praticantes. **Boletim Wetlands Brasil**, edição especial, dez. 2018. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2018/12/Boletim-Wetlands-Brasil-Edi%C3%A7%C3%A3o-Especial-Dimensionamento-de-Wetlands-Constru%C3%ADdos-no-Brasil-von-Sperling-Sezerino-2018-2.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2026.

25. WALTER, R. H.; PAIXÃO, M. A.; POLETO, C.; SILVA, M. C. de A. Avaliação das condições de aeração e da eficiência do sistema modular utilizado para tratamento de efluente sanitário de universidade. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 2099-2116, 2023. Disponível em: <https://revistacaribena.com/ojs/index.php/rccs/article/view/2883>. Acesso em: 18 maio 2026.