PROPOSIÇÃO DE SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM BIODIGESTOR E WETLAND CONSTRUÍDO: ESTUDO DE CASO NA ILHA DE EUFRASINA, PARANAGUÁ-PR

Nicolas Emanuel da Silva Caires[(1)]
Graduando em Engenharia Civil pela UFPR.
Fernando Augusto Silveira Armani[(2)]
Engenheiro Ambiental, mestre e doutor pela UFPR. Professor de magistério superior da UFPR.
Guilherme Phelipe Mendes da Cruz[(3)]
Técnico Ambiental, graduando em Engenharia Civil pela UFPR.

Endereço[(1)]: Rua Alameda das Pitangueiras, 5 - Pontal do Sul - Pontal do Paraná - Paraná - CEP: 83255-000 - Brasil - Tel: +55 (41) 99986-6904- e-mail: nicolas.caires@ufpr.br

RESUMO

O acesso ao saneamento básico em comunidades isoladas ainda representa um desafio relevante, especialmente em áreas insulares, onde dificuldades de acesso, restrições ambientais e ausência de infraestrutura convencional limitam a implantação de sistemas tradicionais de coleta e tratamento de esgoto. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso aplicado à Igreja Batista da Ilha de Eufrasina, em Paranaguá-PR, com a implantação de um sistema compacto e descentralizado para o tratamento do efluente proveniente dos vasos sanitários. O sistema é composto por biodigestores anaeróbios, unidade de aeração e wetland construído horizontal subsuperficial. O dimensionamento considerou a vazão gerada por uma residência anexa e pela igreja, contemplando apenas a parcela correspondente aos vasos sanitários, resultando em vazão diária de projeto de 90 L/dia. Foram utilizadas três bombonas plásticas recicladas de 250 L, com volume útil total de 600 L e tempo de detenção hidráulica de 6,67 dias. Para o wetland, adotou-se área de 10,00 m², conferindo maior segurança operacional. Assim, o sistema demonstrou-se eficiente, acessível e adequado à realidade local.

PALAVRAS-CHAVE: Comunidades isoladas; Tratamento descentralizado; Wetland construído.

INTRODUÇÃO

O acesso ao saneamento básico ainda representa um dos principais desafios enfrentados pelas comunidades afastadas e isoladas no Brasil. Nessas localidades, fatores como a dificuldade de acesso, às restrições geológicas, a elevada proximidade com corpos hídricos e a ausência de sistemas públicos de coleta e tratamento de esgoto favorecem o lançamento inadequado de efluentes sanitários, contribuindo para a contaminação ambiental e riscos à saúde pública (Rodrigues, 2022). Segundo o Instituto Trata, cerca de 43,3% de brasileiros ainda vivem sem acesso adequado à coleta e ao tratamento de esgoto sanitário, realidade frequente e observada em comunidades rurais, tradicionais e insulares.

De acordo com Alcântara et al (2023), a deficiência nos serviços de saneamento básico está diretamente relacionada à proliferação de doenças de veiculação hídrica, à degradação ambiental e à redução da qualidade de vida da população. No Brasil, estima-se que a precariedade ou ausência desses serviços seja responsável por cerca de 80% das doenças e por aproximadamente 65% das internações hospitalares, evidenciando a importância do saneamento como condição essencial para a promoção da saúde pública e da dignidade humana. Nesse contexto, torna-se indispensável a adoção de tecnologias acessíveis, sustentáveis e adaptadas às realidades de comunidades afastadas e isoladas, especialmente para o tratamento adequado dos efluentes domésticos.

A Ilha de Eufrasina, localizada no município de Paranaguá, apresenta características típicas de comunidades costeiras, onde as condições do solo, as restrições territoriais e a sensibilidade ambiental dificultam a implantação de sistemas tradicionais de esgotamento sanitário. Além disso, a presença da Igreja Batista da comunidade como espaço de convivência social intensifica a necessidade de soluções sanitárias adequadas, capazes de atender tanto as residências locais quanto às atividades comunitárias desenvolvidas na região.

Diante desse cenário, os biodigestores anaeróbios surgem como alternativas eficientes e sustentáveis para o tratamento preliminar do esgoto doméstico, especialmente em comunidades afastadas e sem acesso à infraestrutura convencional de saneamento (Silva, 2024). Esses sistemas promovem a degradação da matéria orgânica por meio da ação de bactérias anaeróbias, reduzindo a carga orgânica e os sólidos presentes no efluente. Além disso, apresentam baixo custo de implantação, simplicidade operacional e boa adaptação às condições de regiões rurais e isoladas, tornando-se uma solução viável para sistemas descentralizados de tratamento de esgoto (Spindler, 2016).

Após o tratamento inicial realizado no biodigestor, o efluente pode ser encaminhado para sistemas de wetlands construídos, também conhecidos como jardins filtrantes, responsáveis pela etapa complementar de polimento do tratamento. Esses sistemas utilizam a interação entre plantas macrófitas, substrato filtrante e microrganismos para promover a remoção de matéria orgânica remanescente, nutrientes e sólidos presentes no efluente (Von Sperling e Sezerino, 2018). Além da função sanitária, os wetlands também contribuem para o embelezamento e valorização paisagística da comunidade, integrando o sistema de tratamento ao ambiente natural e promovendo maior harmonia entre infraestrutura sanitária e preservação ambiental.

Dessa forma, a associação entre biodigestores anaeróbios e wetlands construídos constitui uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de esgoto sanitário, integrando processos anaeróbios e aeróbios capazes de melhorar significativamente a qualidade do efluente final, reduzir impactos ambientais e promover melhores condições sanitárias para a população atendida (Sezerino et al, 2015).

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o dimensionamento e a aplicação de um sistema de jardim filtrante destinado ao tratamento do esgoto sanitário de uma residência e de uma igreja localizadas na Ilha de Eufrasina, em Paranaguá-PR. O estudo busca demonstrar a viabilidade técnica e ambiental da solução proposta, além de analisar sua contribuição para a melhoria das condições sanitárias e para o desenvolvimento paisagístico e ambiental da comunidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido por meio de um estudo de caso aplicado à Igreja Batista localizada na Ilha de Eufrasina, município de Paranaguá, Paraná. O objeto de análise consistiu no projeto e na implantação de um sistema descentralizado de tratamento de esgoto dimensionado para atender às contribuições sanitárias geradas pela igreja e por uma residência próxima.

A adoção de uma solução descentralizada foi motivada pelas características territoriais e logísticas da comunidade insular, cujo acesso ocorre exclusivamente por via aquática. Além disso, as restrições ambientais associadas ao ambiente estuarino e as limitações operacionais relacionadas à implantação e manutenção de infraestrutura convencional de saneamento demandam a utilização de tecnologias de reduzida complexidade de manutenção. Nesse contexto, o sistema proposto foi concebido para compatibilizar os requisitos de tratamento de esgoto com as condições locais de implantação e operação.

O dimensionamento do sistema de tratamento foi realizado a partir da estimativa da vazão diária de esgoto gerada pela Igreja Batista da Ilha de Eufrasina e por uma residência anexa. Dessa forma, foram consideradas as contribuições de efluentes provenientes tanto da residência quanto da igreja, caracterizando um sistema de uso misto devido à combinação entre ocupação residencial e comunitária, permitindo definir a vazão total necessária para o dimensionamento do sistema de tratamento. A metodologia adotada baseou-se nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 17076 (2024) e em referências técnicas de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto doméstico, como Von Sperling (2005).

Para a estimativa da contribuição de esgoto proveniente da residência anexa, foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 1, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 17076 (2026) para sistemas individuais de tratamento de esgoto sanitário. Os cálculos consideraram uma população contribuinte de um habitante, correspondente à ocupação permanente da residência.

Tabela 1 - Parâmetros iniciais da residência

Parâmetro	Valor	Unidade
Contribuição de efluente	100	L/hab.dia
População	1	habitante

Fonte: ABNT NBR 17076 (2024).

Diferentemente da igreja, na residência foi considerada a contribuição do efluente gerado no banheiro, contemplando as águas escuras provenientes do vaso sanitário e as águas cinzas provenientes do chuveiro. Calculou-se inicialmente a vazão diária total de efluente da residência, considerando o número de habitantes e a contribuição unitária recomendada pela ABNT NBR 17076 (2024), conforme apresentado na Equação (1).

$$Q_r = N \times q \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

Q_r - Vazão diária total da residência (L/dia);
q - Contribuição per capita de esgoto (L/hab.dia);
N - População atendida (hab).

Quanto à contribuição de esgoto proveniente da igreja, considerando sua capacidade de ocupação e o padrão intermitente de utilização característico de locais de curta permanência, adotou-se o critério de contribuição por assento, conforme recomendações da ABNT NBR 17076 (2024). Dessa forma, utilizaram-se os parâmetros apresentados na Tabela (2) para o dimensionamento da vazão de esgoto da edificação.

Tabela 2 - Parâmetros para estimar a vazão de efluente da igreja

Parâmetro	Valor	Unidade
Quantidade de bancos	20	bancos
Quantidade de lugar por banco	5	assentos
Contribuição de efluente por assento	2	L/hab.dia
Fração do vaso sanitário	30	%

Fonte: ABNT NBR 17076 (2024), Rebêlo (2011) e Os autores (2026).

A população máxima estimada para a igreja foi determinada por meio da Equação (2), considerando a quantidade de assentos disponíveis e a capacidade média de ocupação por assento.

$$P = N \times C \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

P - População máxima estimada (pessoas);
N - Número de assentos;
C - Capacidade de pessoas por assento (pessoas).

Assim, após a estimativa da população máxima da igreja e considerando a contribuição unitária de efluente por assento, calculou-se a vazão diária total proveniente da igreja, conforme apresentado na Equação (3).

$$Q_{igreja} = P \times q_i \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

Q_{igreja} - Vazão diária total da igreja (L/dia);
P - população máxima estimada (pessoas);
q_i - Contribuição de efluente por assento (L/dia.hab).

Considerando que a contribuição da igreja é destinada exclusivamente ao tratamento de águas provenientes do vaso sanitário, tornou-se necessária a estimativa específica dessa parcela do efluente. Dessa forma, considerou-se apenas a contribuição correspondente às águas do vaso sanitário, conforme apresentado na Equação (4).

$$Q_i = Q_{igreja} \times F \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

Q_i - Vazão das águas escuras da igreja (L/dia);
Q_{igreja} - Vazão diária da igreja (L/dia);
f - Fração do vaso sanitário.

Como o sistema recebe contribuições de esgoto tanto da residência anexa quanto da igreja, realizou-se a soma das vazões estimadas de cada edificação, a fim de determinar a vazão total diária de projeto utilizada no dimensionamento do sistema de tratamento, conforme apresentado na Equação (5).

$$Q_t = Q_r + Q_i \quad \text{(Equação 5)}$$

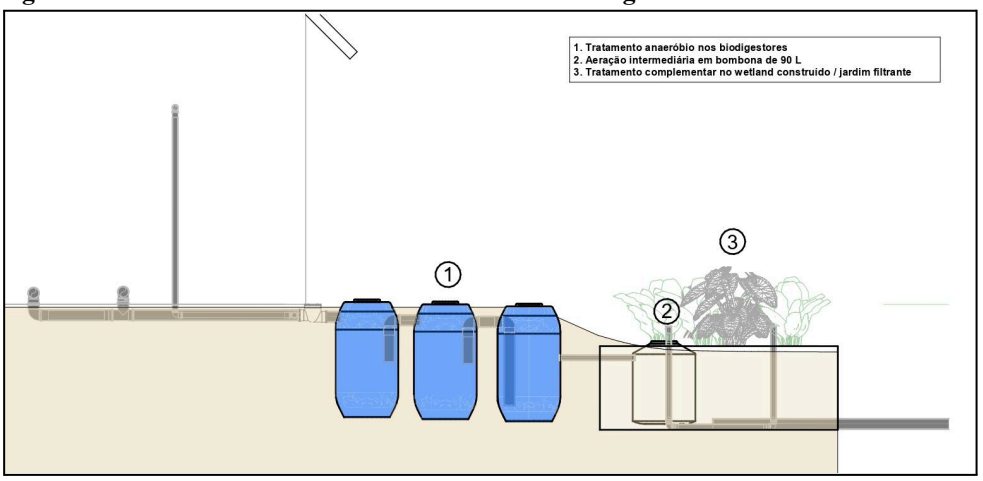
Onde:

Q_t - Vazão total diária do sistema (L/dia);
Q_r - Vazão diária da residência anexa(L/dia);
Q_i - Vazão diária da igreja (L/dia).

Diante da necessidade de implantação de uma tecnologia sanitária de baixo custo, fácil execução e compatível com as condições locais da Ilha de Eufrasina, adotou-se uma adaptação do princípio das fossas sépticas biodigestoras, utilizando bombonas plásticas recicladas de 250 L como unidades de pré-tratamento. Essa solução possibilita o reaproveitamento de materiais e configura-se como uma alternativa viável para o tratamento do efluente sanitário misto gerado no banheiro da residência anexa, composto por águas escuras provenientes do vaso sanitário e águas cinzas provenientes do chuveiro, além da contribuição sanitária da igreja, especialmente em locais sem acesso à infraestrutura convencional de coleta e tratamento de esgoto.

O sistema proposto é composto por etapas sucessivas de tratamento. Inicialmente, o esgoto passa por biodigestores artesanais confeccionados com bombonas plásticas, responsáveis pelo pré-tratamento anaeróbio. Em seguida, o efluente é submetido à aeração por meio de tubo Venturi e encaminhado a um wetland, onde ocorre o pós-tratamento através da ação conjunta do meio suporte, dos microrganismos e das plantas adaptadas a ambientes úmidos, conforme ilustrado na Figura (1).

Figura 1 - Sistema de tratamento de efluente com biodigestores e wetland construído horizontal



Fonte: Os autores (2026).

O biodigestor pode ser compreendido, de forma simplificada, como um tanque fechado no qual o tratamento do esgoto ocorre em ambiente sem presença de oxigênio. Nesse sistema, o efluente entra por uma extremidade e permanece retido por determinado período, permitindo a atuação de microrganismos anaeróbios responsáveis pela decomposição da matéria orgânica. Após esse processo de fermentação anaeróbia, o efluente parcialmente tratado segue para a etapa complementar, composta pela aeração e pelo jardim filtrante, onde ocorrem processos aeróbios, filtração pelo meio suporte e ação das plantas, contribuindo para o polimento final do tratamento (Spindler, 2016).

Assim, fez-se necessário o dimensionamento de cada etapa do tratamento. Inicialmente, foi realizado o dimensionamento da etapa anaeróbia, composta pelos biodigestores, considerando a vazão diária de águas escuras gerada pela residência e pela igreja. A partir dessa vazão, foram definidos o volume útil dos biodigestores e o tempo de detenção hidráulica, parâmetros essenciais para garantir a permanência adequada do efluente no sistema e favorecer a degradação inicial da matéria orgânica.

Dessa forma, considerando a utilização de três bombonas plásticas recicladas para a etapa anaeróbia do sistema, considerou-se como volume útil o volume líquido efetivamente disponível até a altura da tubulação de saída das unidades. Como não há especificação normativa direta para o emprego de bombonas recicladas em sistemas anaeróbios, adotou-se, como um fator de segurança um aproveitamento correspondente a 80% do volume nominal das unidades, reservando-se a parcela restante para conexões hidráulicas, espaço livre operacional, acúmulo de gases e possíveis variações internas do nível do efluente. O cálculo do volume útil do biodigestor é apresentado na Equação (6).

$$V_{útil} = V_{total} \times 0,80 \qquad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

$V_{útil}$ - Volume útil do sistema de biodigestores (L);
V_{total} - Volume nominal total das bombonas (L);

Após a determinação do volume útil da etapa anaeróbia, calculou-se o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), parâmetro que indica o período médio de permanência do efluente no interior dos biodigestores. É necessário que o esgoto permaneça no reator neste tempo, a fim de garantir o contato adequado do esgoto com os microrganismos anaeróbios responsáveis pela degradação inicial da matéria orgânica (Chernicharo, 2007). A Equação (7) define o Tempo de Detenção Hidráulica.

$$TDH = \frac{V_{útil}}{Q_t} \qquad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

TDH - Tempo de detenção hidráulica (dias);
$V_{útil}$ - Volume útil do sistema de biodigestores (L);
Q_t - Vazão total diária do sistema (L/dia).

Após o dimensionamento da etapa anaeróbia, definiu-se a inclusão de uma unidade de aeração, composta por uma bombona plástica de menor volume equipada com tubo de Venturi, com a finalidade de promover a incorporação inicial de ar ao sistema e favorecer a oxigenação do efluente antes de seu encaminhamento ao wetland.

Para essa etapa, utilizou-se uma bombona com capacidade nominal de 90 L. Considerou-se como volume útil 80% do volume nominal da unidade, resultando em 72 L, de modo a manter uma margem operacional destinada às conexões hidráulicas, às variações internas do nível do efluente e ao adequado funcionamento do sistema de aeração. Ressalta-se que essa unidade não foi dimensionada com base no tempo de detenção hidráulica, pois sua função principal é atuar como etapa intermediária de oxigenação, e não como um reator aeróbio completo.

A partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, definiu-se para polimento final do efluente um wetland de escoamento subsuperficial horizontal. Essa unidade foi projetada considerando a vazão diária de projeto, a área superficial necessária, a relação entre comprimento e largura e a profundidade do leito filtrante, conforme os critérios recomendados por von Sperling e Sezerino (2018).

Para isso, considerou-se a vazão diária de projeto do sistema e a taxa de aplicação hidráulica superficial, uma vez que esse parâmetro permite verificar se a área adotada é suficiente para receber o efluente proveniente das etapas anteriores de tratamento, conforme Equação (8).

$$A = \frac{Q_t}{TAH} \qquad \text{(Equação 8)}$$

Onde:

A - Área superficial necessária da wetland (m²);
Q_t - Vazão total diária do sistema (L/dia);
TAH - Taxa de aplicação hidráulica superficial (m³/m².dia).

Von Sperling e Sezerino (2018) indicam como usual a relação comprimento:largura entre 2:1 e 4:1. Assim, a largura e o comprimento mínimo do wetland foram estimados a partir da área superficial calculada e da relação comprimento/largura adotada, conforme apresentado nas Equações (9) e (10).

$$L = \sqrt{\frac{A}{R}} \qquad \text{(Equação 9)}$$

Onde:

L - Largura do wetland (m);
A - Área superficial necessária da wetland (m²);
R - Relação comprimento/largura adotada.

$$C = R \times L \qquad \text{(Equação 10)}$$

Onde:

C - Comprimento do wetland (m);

Além da área superficial, do comprimento e da largura, também foram definidos os parâmetros de profundidade do wetland construído horizontal. Segundo von Sperling e Sezerino (2018), para esse tipo de sistema, devem ser considerados a altura do meio suporte, a profundidade útil da lâmina líquida, a distância entre o nível do efluente e o topo do meio filtrante, além da borda livre da unidade. Como apresentado na Tabela (3).

Tabela 3 - Parâmetros de profundidade do wetland construído horizontal

Parâmetro	Faixa recomendada
Altura do meio suporte	0,50 a 0,90 m
Profundidade útil do líquido	0,40 a 0,80 m
Distância entre o nível de efluente e o topo do meio suporte	aproximadamente 0,10 m
Borda livre	0,10 a 0,20 m

Fonte: von Sperling e Sezerino (2018).

Por fim, após o dimensionamento hidráulico das unidades, realizou-se a definição dos elementos construtivos do wetland. O sistema foi construído com fundo e laterais impermeabilizados, de modo a evitar a infiltração do efluente no solo, e com camadas de material filtrante, compostas por brita, areia e camada superficial para suporte das plantas. O efluente proveniente da etapa de aeração percorre o leito filtrante de forma horizontal, permanecendo abaixo da superfície, enquanto ocorre a ação conjunta do meio suporte, dos microrganismos e das macrófitas. Segundo von Sperling e Sezerino (2018), no wetland horizontal subsuperficial o líquido escoa lentamente através do material filtrante, geralmente formado por brita ou cascalho, com o nível do efluente abaixo do topo do meio suporte.

As macrófitas foram consideradas como parte integrante do tratamento, pois contribuem para a adaptação do sistema ao ambiente, favorecem a atuação microbiológica no leito filtrante e agregam valor paisagístico à proposta. A análise do sistema foi realizada a partir da comparação entre os valores calculados e os valores adotados em projeto.

Para a análise da eficiência do sistema, considerou-se que a remoção de matéria orgânica ocorre de forma sequencial, iniciando-se nos biodigestores anaeróbios e sendo complementada pela unidade de aeração e pelo wetland construído horizontal subsuperficial. Segundo von Sperling e Sezerino (2018), no dimensionamento de wetlands construídos, pode-se estimar previamente a eficiência de remoção de DBO da etapa que antecede o wetland, como tanque séptico, reator anaeróbio ou outro sistema de pré-tratamento, para então calcular a carga afluente ao wetland.

Dessa maneira, a análise teórica não foi baseada em ensaios laboratoriais, mas na estimativa do desempenho esperado do sistema a partir de dados apresentados na literatura. Essa abordagem permite avaliar, de forma preliminar, o potencial da associação entre biodigestores, aeração por tubo de Venturi e wetland construído na redução das concentrações de DBO e DQO do efluente tratado.

Portanto, a metodologia adotada permitiu dimensionar e avaliar tecnicamente o sistema proposto, considerando a integração entre as etapas anaeróbia e aeróbia, a configuração geométrica das unidades, o uso de materiais filtrantes e macrófitas, além da estimativa teórica da eficiência de remoção da matéria orgânica.

RESULTADOS

A partir da metodologia adotada, foram obtidos os parâmetros necessários para o dimensionamento do sistema descentralizado de tratamento de esgoto proposto para a Igreja Batista e a residência anexa da Ilha de Eufrasina. Os resultados foram organizados de acordo com as etapas do sistema, iniciando-se pela estimativa da vazão de projeto, seguida do dimensionamento dos biodigestores, da unidade de aeração e do wetland

construído horizontal subsuperficial. Posteriormente, os valores obtidos foram comparados com os critérios recomendados na literatura, a fim de verificar a adequação técnica da proposta.

Dessa forma, realizou-se inicialmente a determinação da vazão diária de esgoto gerada pela residência anexa à igreja. Para isso, calculou-se a vazão total da residência por meio da Equação (1), utilizando-se os dados apresentados na Tabela 1. Nessa estimativa, considerou-se uma população de 1 morador e uma contribuição unitária de esgoto de 100 L/(hab.dia), valor correspondente a edificações residenciais de baixo padrão, conforme indicado pela ABNT NBR 17076 (2024). Assim, a vazão total diária de esgoto estimada para a residência anexa foi de 100 L/dia.

Na sequência, calculou-se a vazão total de efluente gerada pela igreja, considerando sua capacidade máxima de ocupação. Para isso, utilizaram-se os dados apresentados na Tabela 2, na qual foram adotados 20 bancos, com capacidade de 5 pessoas por banco. Aplicando esses valores na Equação (2), obteve-se uma população estimada de 100 pessoas.

A partir da população estimada, determinou-se a vazão total de efluente da igreja, considerando a contribuição unitária de 2 L/assento.dia, conforme a ABNT NBR 17076 (2024). Assim, aplicando-se a população estimada de 100 pessoas e a contribuição unitária por assento, e substituindo os valores na Equação (3), obteve-se uma vazão total de 200 L/dia para a igreja. Entretanto, como o sistema foi dimensionado exclusivamente para o tratamento do efluente proveniente do vaso sanitário, adotou-se a fração de 30% da vazão total, de acordo com Rebélo (2011), conforme indicado na Equação (4). Dessa forma, obteve-se uma vazão de 60 L/dia referente apenas aos vasos sanitários da igreja.

Por fim, a partir da Equação (5), determinou-se a vazão total diária de projeto do sistema, considerando a soma da contribuição proveniente da residência anexa e da igreja. Dessa forma, obteve-se uma vazão total de 90 L/dia, valor adotado para o dimensionamento das etapas seguintes do sistema de tratamento.

Após a determinação da vazão total diária de projeto, iniciou-se o dimensionamento da etapa anaeróbia do sistema, composta pelos biodigestores. Para essa etapa, considerou-se a utilização de três unidades com capacidade nominal de 250 L cada, devido à facilidade de aquisição, ao baixo custo, à simplicidade de instalação e à adequação da proposta às condições locais da Ilha de Eufrasina. Dessa forma, o sistema de biodigestão apresentou um volume nominal total de 750 L, obtido pela associação das três unidades de 250 L.

Como as bombonas plásticas não são unidades comerciais padronizadas especificamente para tratamento anaeróbio de esgoto, adotou-se um critério conservador para a determinação do volume útil. Dessa forma, considerou-se o aproveitamento de 80% do volume nominal das unidades, reservando-se os 20% restantes para a instalação das conexões hidráulicas, variações internas do nível do efluente, acúmulo de gases e margem operacional do sistema. Assim, buscou-se evitar que as bombonas trabalhassem completamente cheias, garantindo melhores condições de funcionamento e segurança operacional.

Portanto, embora o conjunto de biodigestores apresente volume nominal total de 750 L, adotou-se para o dimensionamento um volume útil de 600 L, conforme Equação (6). A partir desse valor, calculou-se o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) dos biodigestores, relacionando o volume útil disponível com a vazão total diária de projeto, conforme apresentado na Equação (7). Dessa forma, obteve-se um TDH de aproximadamente 6,67 dias para a etapa anaeróbia do sistema. Esse resultado indica que o efluente permanece, em média, cerca de 6,67 dias no interior dos biodigestores, favorecendo a ação dos microrganismos responsáveis pela degradação inicial da matéria orgânica. Além disso, o valor calculado encontra-se dentro da faixa recomendada por Farias (2021), que orienta tempos de detenção hidráulica entre 4 e 60 dias para sistemas anaeróbios. Assim, verifica-se que o volume útil adotado para os biodigestores é compatível com a vazão de projeto, possibilitando condições adequadas para o funcionamento da etapa anaeróbia do tratamento.

Após o dimensionamento dos biodigestores, realizou-se a caracterização da unidade de aeração, composta por uma bombona plástica de 90 L equipada com tubo de Venturi. Considerando o aproveitamento de 80% do volume nominal, adotou-se um volume útil de 72 L para essa etapa. Diferentemente dos biodigestores, essa unidade não foi dimensionada com base no tempo de detenção hidráulica, pois sua função principal não é atuar como reator aeróbio completo, mas promover a oxigenação inicial do efluente antes de seu encaminhamento ao wetland construído.

Segundo Nonaka (2019), sistemas baseados no princípio do tubo de Venturi podem favorecer a incorporação de ar ao líquido por meio da redução de pressão na região de estrangulamento, possibilitando a sucção e mistura do oxigênio ao efluente. Dessa forma, a bombona de 90 L foi adotada como uma etapa intermediária de transição entre o tratamento anaeróbio e o jardim filtrante, contribuindo para melhorar as condições de oxigenação do efluente e favorecer os processos biológicos posteriores no wetland.

Assim, a adequação da unidade de aeração está relacionada principalmente à sua função operacional de oxigenação e transição do efluente, e não ao cálculo de TDH. A remoção complementar de matéria orgânica ocorre posteriormente no wetland construído, por meio da interação entre o meio suporte, os microrganismos e as macrófitas.

Após a verificação da unidade de aeração, realizou-se o dimensionamento do wetland construído horizontal subsuperficial, responsável pela etapa final de polimento do efluente. Essa unidade foi dimensionada com base na vazão total diária de projeto, correspondente a 160 L/dia, considerando sua função de promover a remoção complementar de matéria orgânica, sólidos e nutrientes por meio da interação entre o meio filtrante, os microrganismos e as macrófitas.

Inicialmente, determinou-se a área superficial necessária para o wetland construído horizontal subsuperficial, utilizando a Equação (8), que relaciona a vazão diária de projeto com a taxa de aplicação hidráulica superficial adotada. Segundo von Sperling e Sezerino (2018), para wetlands horizontais recebendo efluente previamente tratado, a taxa de aplicação hidráulica superficial pode variar entre 0,02 e 0,08 $m^3/m^2.dia$.

No presente estudo, adotou-se o valor de 0,02 $m^3/m^2.dia$, correspondente ao limite inferior da faixa recomendada. Essa escolha foi realizada de forma conservadora, visando proporcionar maior segurança ao sistema, menor sobrecarga hidráulica, maior tempo de contato do efluente com o meio filtrante, os microrganismos e as macrófitas, além de favorecer o desempenho do tratamento em uma área ambientalmente sensível, como a Ilha de Eufrasina.

Para a realização do cálculo, a vazão total diária de projeto, correspondente a 160 L/dia, foi convertida para metros cúbicos por dia, resultando em 0,16 m^3/dia. Em seguida, aplicaram-se os valores na Equação (8), obtendo-se a área superficial mínima necessária para o wetland construído horizontal subsuperficial. Dessa forma, a área mínima calculada foi de 8 m^2, valor necessário para receber a vazão de projeto sem ultrapassar a taxa de aplicação hidráulica superficial adotada.

Entretanto, para a configuração física do sistema, foi adotada uma área superficial superior à mínima obtida no dimensionamento, com 5,00 m de comprimento e 2,00 m de largura, resultando em uma área total de 10,00 m^2. Dessa forma, observa-se que a área proposta atende ao critério hidráulico estabelecido, visto que ultrapassa a área mínima necessária de 8 m^2. Essa escolha é justificada pela recomendação de von Sperling e Sezerino (2018), que destacam que o dimensionamento de wetlands construídos deve considerar as cargas hidráulica e orgânica aplicadas, sendo possível adotar parâmetros mais conservadores para aumentar a segurança do sistema. Assim, a utilização de uma área maior reduz a carga aplicada por unidade de superfície, melhora a capacidade de adaptação do sistema a possíveis variações de vazão e contribui para o melhor desempenho do tratamento complementar do efluente.

Após a obtenção da área superficial mínima, definiu-se a geometria do wetland a partir da relação entre comprimento e largura. Para wetlands horizontais subsuperficiais, von Sperling e Sezerino (2018) indicam relações usuais entre 2:1 e 4:1. Neste trabalho, adotou-se a relação de 2,5:1, por representar uma condição intermediária entre as faixas recomendadas e favorecer o escoamento horizontal do efluente ao longo do leito filtrante.

Assim, considerando a área superficial mínima de 8 m^2 e a relação comprimento/largura de 2,5:1, a partir da Equação (9) e (10), obteve-se uma largura aproximada de 1,78 m e um comprimento aproximado de 4,45 m para o wetland construído horizontal subsuperficial. Entretanto, para fins construtivos, esses valores foram ajustados para dimensões mais adequadas à implantação do sistema, respeitando a disponibilidade de espaço, os materiais utilizados e a necessidade de facilitar a execução da unidade. Essa adaptação é compatível com a orientação de von Sperling e Sezerino (2018), que indicam que, após a definição da relação

comprimento/largura e da área superficial, as dimensões obtidas devem ser verificadas quanto à razoabilidade e à adequação ao terreno disponível.

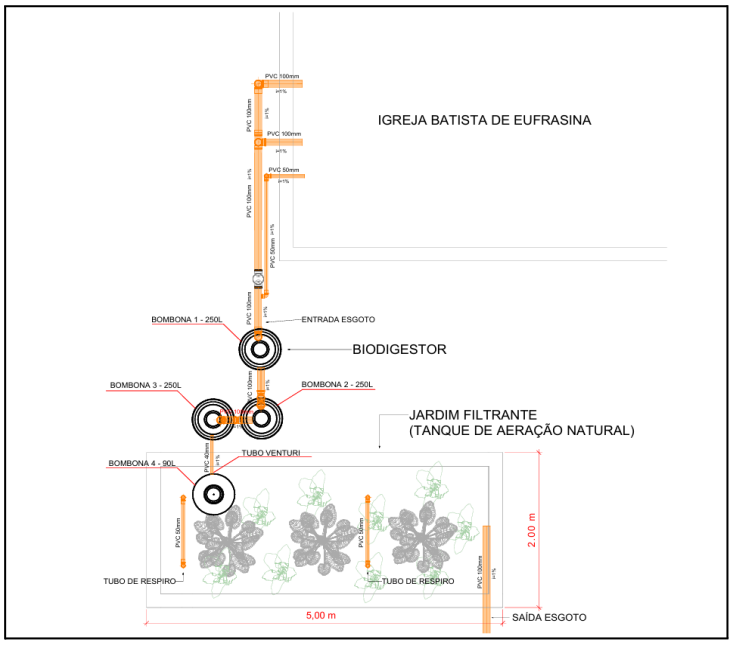
Dessa forma, no projeto físico, adotaram-se dimensões de 2,00 m de largura e 5,00 m de comprimento, totalizando uma área superficial de 10,00 m². Como a área adotada é superior à área mínima calculada, verifica-se que o dimensionamento atende ao critério hidráulico estabelecido, além de proporcionar maior margem de segurança operacional ao sistema.

Os valores adotados para a profundidade do wetland construído horizontal subsuperficial encontram-se dentro das faixas recomendadas por von Sperling e Sezerino (2018), conforme indicado na Tabela 3. A altura do meio suporte adotada foi de 0,80 m, valor situado entre 0,50 e 0,90 m, permitindo a formação de uma camada filtrante compatível com o escoamento subsuperficial do efluente. A profundidade útil da lâmina líquida foi definida em 0,70 m, também dentro da faixa recomendada de 0,40 a 0,80 m, favorecendo o contato do efluente com o material filtrante, os microrganismos e as raízes das macrófitas. Além disso, a diferença de 0,10 m entre a altura do meio suporte e a profundidade útil contribui para manter o nível do efluente abaixo do topo do leito filtrante, condição característica dos wetlands subsuperficiais.

Essa configuração é importante, pois, de acordo com a EPA (2000), manter a lâmina líquida abaixo da superfície do meio filtrante contribui para reduzir a ocorrência de odores, a proliferação de mosquitos e o contato direto das pessoas com o efluente parcialmente tratado. A borda livre de 0,20 m também atende ao intervalo recomendado por von Sperling e Sezerino (2018), contribuindo para maior segurança operacional da unidade em situações de variação de vazão ou acúmulo temporário de água.

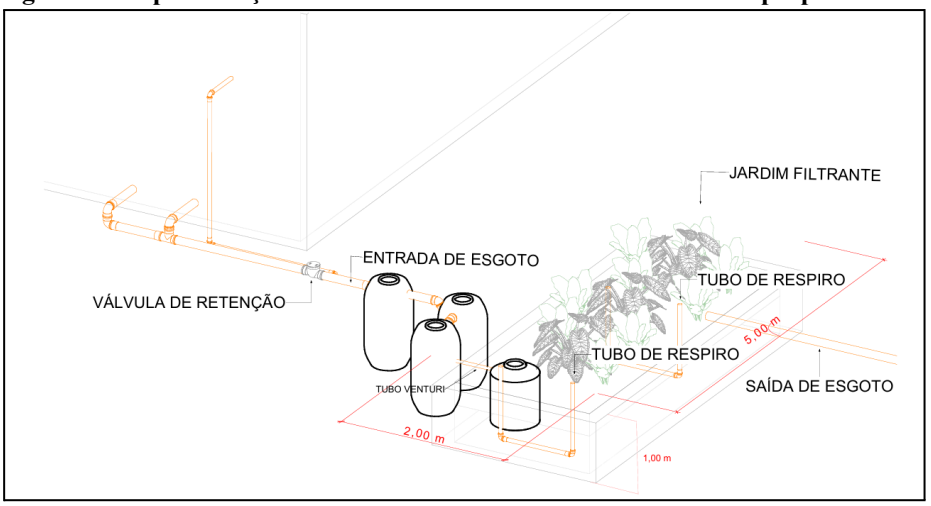
Dessa forma, a configuração final do sistema dimensionado encontra-se representada nas Figuras 2, 3, e 4, permitindo visualizar a organização das etapas de tratamento e a integração entre o pré-tratamento anaeróbio, a aeração intermediária e o polimento final realizado pelo wetland construído.

Figura 2 – Planta baixa do sistema de tratamento Jardim filtrante



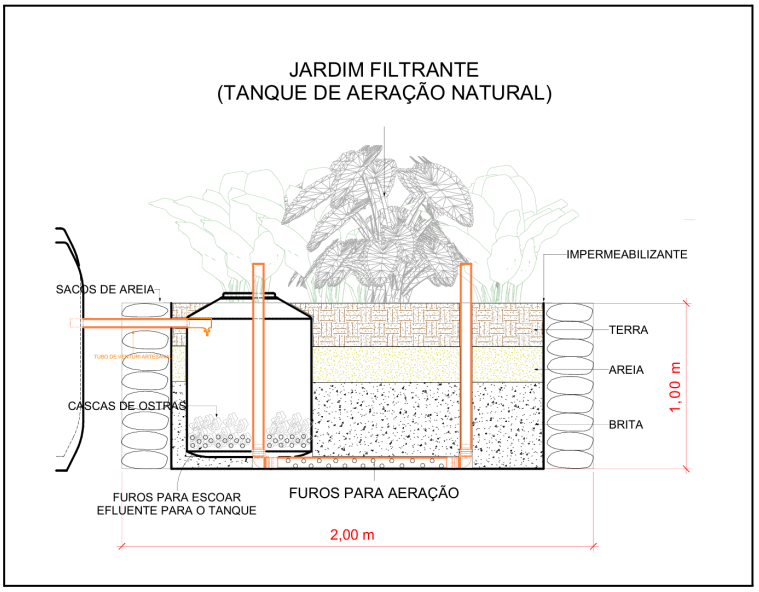
Fonte: Os autores (2026).

Figura 3 – Representação tridimensional do sistema de tratamento proposto



Fonte: Os autores (2026).

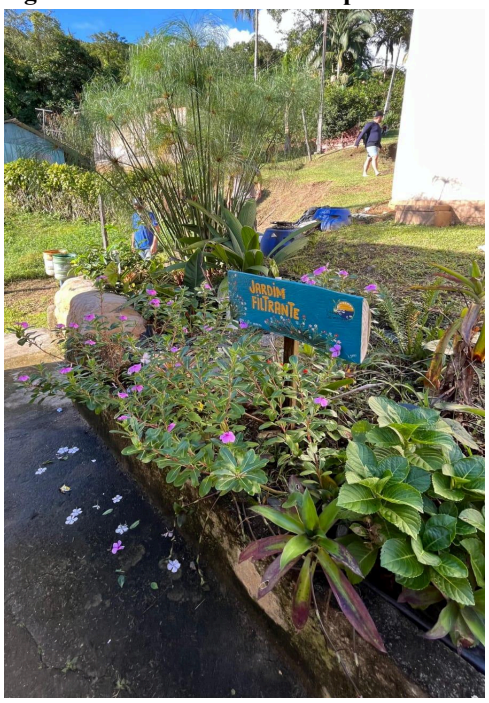
Figura 4 – Detalhamento interno do jardim filtrante com camadas filtrantes, impermeabilização e sistema de aeração natural.



Fonte: Os autores (2026).

Além das representações técnicas do sistema, a Figura 5 apresenta o jardim filtrante após sua implantação, evidenciando a integração da unidade de tratamento ao espaço físico da comunidade e sua contribuição paisagística para o ambiente local.

Figura 5 – Jardim filtrante implantado na Igreja Batista da Ilha de Eufrasina.



Fonte: Os autores (2026).

Nos wetlands construídos, a vegetação exerce papel fundamental no desempenho do tratamento, podendo ser utilizadas diferentes espécies de macrófitas aquáticas, classificadas como flutuantes, submersas ou emergentes, conforme suas formas de crescimento e fixação no meio (Zanella, 2008). Essas plantas contribuem para o sistema por meio da transferência de oxigênio para a região das raízes, favorecendo a formação de zonas aeróbias e estimulando a atividade de microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica e pela transformação de nutrientes, como o nitrogênio (Zinato e Guimarães, 2017).

A escolha das espécies vegetais deve considerar sua adaptação a ambientes úmidos, sua resistência às condições do efluente e sua capacidade de permanecer ativa durante longos períodos de operação (Zinato e Guimarães, 2017). Além disso, conforme Poças (2015), o uso de macrófitas em sistemas de tratamento de águas residuárias exige manejo periódico da vegetação, uma vez que o crescimento excessivo pode gerar acúmulo de biomassa e interferir na eficiência do sistema. Dessa forma, a biomassa vegetal removida pode ser reaproveitada em diferentes finalidades, como produção de biofertilizantes, energia ou outros usos compatíveis, contribuindo para o caráter sustentável da tecnologia.

Os wetlands construídos destacam-se como uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes, especialmente em pequenas comunidades e áreas com limitações de infraestrutura sanitária (Zinato e Guimarães, 2017). De acordo com von Sperling e Sezerino (2018), esses sistemas apresentam vantagens como baixo custo de implantação e manutenção, remoção de poluentes, ciclagem de nutrientes, redução da contaminação ambiental e harmonia paisagística, contribuindo para a melhoria da qualidade ambiental e para o atendimento da demanda por saneamento em áreas rurais e isoladas. Além disso, a configuração de fluxo horizontal subsuperficial é bastante adequada para esse tipo de aplicação, pois permite a operação por gravidade, reduzindo a necessidade de equipamentos mecânicos e evitando a exposição direta do efluente, o que diminui riscos de odores, vetores e contato com pessoas e animais.

Nesse contexto, Cáspar (2020) reforça que os wetlands construídos, além de promoverem a redução da concentração de poluentes por meio de processos físicos, químicos e biológicos, podem ser associados ao paisagismo, tornando o sistema mais agradável visualmente e favorecendo sua aceitação pela população. Assim, a presença de macrófitas no jardim filtrante não apenas contribui para o tratamento do efluente, mas também agrega valor estético ao espaço, permitindo que a unidade seja integrada ao ambiente de forma mais harmônica. Dessa forma, o sistema proposto apresenta benefícios sanitários, ambientais e sociais, configurando-se como uma solução viável para a melhoria da qualidade de vida da comunidade atendida.

A análise teórica da eficiência do sistema foi realizada considerando a remoção de matéria orgânica ao longo das etapas de tratamento propostas. Inicialmente, o esgoto passa pelos biodigestores, responsáveis pela etapa anaeróbia do sistema. Para essa unidade, adotaram-se valores de referência da literatura relacionados à remoção de DBO em sistemas anaeróbios simplificados. Em estudo realizado por Lotfi (2016) com fossas biodigestoras, foram estimadas eficiências médias de remoção de DBO da ordem de 73%, indicando o potencial desse tipo de unidade na redução inicial da carga orgânica presente no esgoto.

Após a etapa anaeróbia, o efluente segue para a unidade de aeração e, posteriormente, para o wetland construído, onde ocorre o tratamento complementar. Nessa etapa, a remoção de DBO e DQO ocorre pela ação conjunta do meio suporte, dos microrganismos e das macrófitas, que favorecem a filtração, a degradação biológica e a retenção de matéria orgânica. Nesse sentido, Martins (2020) observou, em sistemas plantados com taboa, remoções de 62% para DBO e 71% para DQO, evidenciando o potencial dos wetlands construídos como etapa complementar no tratamento de efluentes.

Dessa forma, a associação entre biodigestores, unidade de aeração e wetland construído mostrou-se uma solução adequada para o tratamento descentralizado de águas negras na Ilha de Eufrasina. O sistema implantado apresenta características importantes para comunidades isoladas, como simplicidade construtiva, baixo custo, facilidade de operação e possibilidade de reaproveitamento de materiais. Além disso, o uso de macrófitas no jardim filtrante contribui para a integração paisagística da unidade de tratamento, tornando o sistema mais harmônico com o ambiente comunitário onde está inserido.

Com a implantação e funcionamento do sistema, observa-se que a tecnologia adotada atende à realidade local, contribuindo para a melhoria das condições sanitárias e ambientais da área atendida. A combinação entre tratamento anaeróbio e wetland construído permite a redução da carga orgânica do efluente por meio de processos naturais e de baixa complexidade operacional, ao mesmo tempo em que valoriza o espaço por meio do aspecto paisagístico. Assim, o estudo de caso demonstra que soluções descentralizadas, sustentáveis e de baixo custo podem ser aplicadas de forma eficiente em comunidades isoladas, desde que dimensionadas conforme as características locais e acompanhadas por práticas adequadas de operação e manutenção.

CONCLUSÕES

A implantação do sistema compacto de tratamento de esgoto composto por biodigestores anaeróbios, unidade de aeração e wetland construído horizontal subsuperficial mostrou-se adequada para a realidade da Ilha de Eufrasina, em Paranaguá-PR. A solução proposta apresenta baixo custo, simplicidade construtiva, facilidade de operação e possibilidade de utilização de materiais reaproveitados, características importantes para comunidades isoladas e sem acesso à infraestrutura convencional de saneamento.

O dimensionamento indicou uma vazão total diária de projeto de 90 L/dia, permitindo a definição das unidades de tratamento de forma compatível com a demanda local. Os biodigestores favoreceram a etapa inicial de degradação anaeróbia da matéria orgânica, enquanto a unidade de aeração contribuiu para a oxigenação inicial do efluente antes de sua chegada ao wetland construído. O jardim filtrante, além de complementar o tratamento do esgoto, também proporcionou integração paisagística ao ambiente.

Dessa forma, o estudo demonstrou que a associação entre biodigestores, aeração e wetland construído pode ser aplicada de forma eficiente em comunidades isoladas, contribuindo para a melhoria das condições sanitárias e ambientais da área atendida por meio de uma solução de baixo impacto ambiental e adequada às características locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALCÂNTARA, H. C. S.; BARBOSA, S. K. S.; SOUZA, I. G.; VALLE, C. Magalhães do. Saneamento básico e seus impactos sobre a saúde pública. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 14., 2023, Natal. Anais **[...]** Natal: IBEAS, 2023. p. 1-9. DOI: 10.55449/congea.14.23.IX-009. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2023/IX-009.pdf>. Acesso em: 22 abr 2026.

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

3. CÁSPAR, I. E. S. **O paisagismo em wetlands construídos**. 2020. 92 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Recursos Hídricos) – Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, 2020. Disponível em: <https://www.unincor.br/images/arquivos_mestrado_hidrico/producao-tecnica/paisagismo-em-wetlands.pdf>. Acesso em: 27 maio 2026.

4. CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5).

5. 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: 27 abr. 2026.

6. INSTITUTO TRATA BRASIL. **Instituto Trata Brasil**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2026. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/>. Acesso em: 22 abr 2026.

7. LOTFI, P. C. S. **Avaliação preliminar da eficiência de fossas biodigestoras no tratamento de esgoto unidomiciliar: assentamentos Nova São Carlos e Santa Helena, São Carlos (SP)**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/93ce7cb6-97c3-4af5-a8f1-7bcaa0aaaf2c/SztajnLotfi_PedroCarlos-tcc.pdf>. Acesso em: 20 maio 2026.

8. MARTINS, Lucas de Albuquerque. **Sistema de tratamento de efluente sanitário pela associação de tanque séptico e wetlands construídos**. 2020. 80 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Recursos Hídricos) – Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, 2020. Disponível em: <https://www.unincor.br/images/arquivos_mestrado_hidrico/sistema-de-tratamento-de-efluentesanitario-pela-associacao-de-tanque-septico-trabalho-de-conclusao.pdf>. Acesso em: 10 maio 2026.

9. NAZARO, M. S. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para processamento de resíduos sólidos orgânicos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/166781>. Acesso em: 22 abr 2026.

10. NONAKA, F. M. **Uso de tubos de Venturi na aeração de um reator de leito móvel aplicado na remoção de matéria orgânica e nitrogênio**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4079/1/LD_PPGEA_M_Nonaka%2C%20Fernanda%20Martins_2019.pdf>. Acesso em: 10 maio 2026.

11. POÇAS, Cristiane Dias. **Utilização da tecnologia de wetlands para tratamento terciário: controle de nutrientes**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6139/tde-23112015-122556/publico/CristianeDiasPocas.pdf>. Acesso em: 20 maio 2026.

12. REBÊLO, 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%20eficiência%20de%20reator%20anaer%C3%B3bio%20com%20chicanas.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2026.

13. RODRIGUES, V. L.; BOA VENTURA, E.; KITAHARA, E. K. I.; SILVA, F. A. da; NERY, T. C. S. Saneamento em comunidades isoladas: uma metodologia – caso de cinco comunidades quilombolas do estado de São Paulo. In: **SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 21., 2022, Recife. Anais eletrônicos [...] Recife: ABES, 2022. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/21silubesa_download/294_tema_xii.pdf>. Acesso em: 22 abr 2026.

14. SEZERINO, P. H.; SANTOS, M. O.; PELISSARI, C.; CELIS, G. S.; PHILIPPI, L. S. Wetlands construídos horizontais aplicados no tratamento descentralizado de esgotos. **Revista Engenharia e Construção Civil**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 1-10, jul./dez. 2015. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/recc/article/view/6637>. Acesso em: 22 abr. 2026.

15. SILVA, L. O. Uso de biodigestores em estação de tratamento de esgoto. **Uniciências**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 25-31, 2024. Disponível em: <https://uniciencias.pgsscogna.com.br/uniciencias/article/view/12040>. Acesso em: 22 abr maio 2026.

16. SPINDLER, K. S. Os benefícios da utilização de biodigestores no tratamento de efluentes oriundos do esgoto doméstico: uma ferramenta para gestão ambiental. **Redin - Revista Educacional Interdisciplinar**, Taquara, v. 7, n. 1, 2018. Disponível em: <https://seer.faccat.br/index.php/redin/article/view/1097>. Acesso em: 22 abr 2026.

17. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Wastewater Technology Fact Sheet: Wetlands: Subsurface Flow.** Washington, D.C.: EPA, 2000. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/wetlands-subsurface_flow.pdf>. Acesso em: 15 maio 2026.

18. VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. **Boletim Wetlands Brasil**, Edição Especial, dez. 2018. 65 p. ISSN 2359-0548. 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-2018-1.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2026.

19. ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: Wetlands-Construídos utilizando brita e bambu como suporte,** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Saneamento e Ambiente, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=464886>. Acesso em: 20 mai. 2026

20. ZINATO, T. M. C.; GUIMARÃES, M. M. Estudo sobre a utilização de “wetlands” construídas para tratamento de águas residuárias no Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 8., 2017, Campo Grande. *Anais [...]*. Campo Grande: IBEAS, 2017. p. 1-9. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/IX-001.pdf>. Acesso em: 27 abr 2026.