

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS UNITÁRIOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NA VIA COSTEIRA

Sérgio José Motta de Carvalho Chagas Filho¹, Blake Charles Diniz Marques²

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo de viabilidade técnica, normativa e ambiental com objetivo de analisar e validar a exequibilidade da implementação de sistemas unitários de tratamento de esgoto em áreas de via costeira no Brasil. Considerando o contexto de deficiência de infraestrutura sanitária, especialmente em regiões litorâneas sujeitas à ocupação desordenada e sazonalidade populacional, foram avaliadas soluções descentralizadas capazes de atender demandas locais com eficiência, baixo custo e potencial de reúso da água. A metodologia adotada envolveu revisão bibliográfica especializada, análise comparativa entre diferentes tecnologias (fossa séptica com sumidouro, Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), biodigestores compactos e Wetlands construídos), além de simulações de estudo de caso simulado de empreendimentos turísticos e residenciais em zonas costeiras. Diante da análise de viabilidade desse estudo, foi possível concluir que os sistemas unitários descentralizados são soluções viáveis e sustentáveis para esses contextos, com bom desempenho sanitário e potencial de reúso, contribuindo para a saúde pública, proteção ambiental e resiliência hídrica dessas regiões.

Palavras-chave: Soluções descentralizadas; esgoto doméstico; reúso; zona costeira; sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os recursos hídricos, especialmente em regiões litorâneas, tem se configurado como um dos grandes desafios ambientais do século XXI. A água, elemento vital para os ecossistemas e indispensável às atividades humanas, encontra-se em constante ameaça devido ao uso inadequado, à poluição e à falta de planejamento urbano. Em áreas costeiras brasileiras, essa realidade se agrava pela expansão acelerada e muitas vezes desordenada de empreendimentos turísticos, comerciais e residenciais, que ampliam significativamente a demanda por infraestrutura de saneamento básico, frequentemente inexistente ou ineficaz.

A ausência de sistemas eficientes de coleta e tratamento de esgoto nessas regiões compromete não apenas a qualidade da água, mas também a integridade de ecossistemas frágeis, como manguezais, restingas e áreas marinhas. Os impactos são múltiplos: contaminação dos corpos hídricos, perda da biodiversidade, redução da atratividade turística e riscos à saúde pública. Além disso, a ocupação irregular, aliada à falta de políticas públicas adequadas, evidencia a urgência de soluções técnicas e sustentáveis para o enfrentamento desses problemas.

Nesse contexto, torna-se urgente a adoção de soluções descentralizadas e adaptáveis para o tratamento de esgoto, diante desse cenário, os sistemas unitários de tratamento de efluentes surgem como uma alternativa promissora, capazes de se adaptar às especificidades de diferentes empreendimentos desde pequenos comércios até grandes condomínios residenciais considerando variáveis como volume de esgoto gerado, área disponível, custo de implantação e operação.

Este trabalho tem como objetivo central demonstrar a viabilidade e a eficácia da implantação de sistemas unitários de tratamento de esgoto em áreas de via costeira. Busca-se evidenciar suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais, bem como sua adaptabilidade a distintos contextos de uso. Ao integrar o reúso da água tratada, a proposta se torna ainda mais robusta, promovendo uma abordagem integrada de desenvolvimento sustentável que concilia conservação ambiental e viabilidade operacional para os empreendimentos litorâneos.

2. O CENÁRIO BRASILEIRO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

2.1 Desafios no tratamento de efluentes nas zonas de via costeira no Brasil

A gestão do tratamento de efluentes no Brasil apresenta sérias lacunas, especialmente em zonas costeiras, onde a urbanização acelerada e o turismo sazonal pressionam os sistemas de saneamento básico. De acordo com o Atlas de Esgotos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA [1], mais de 45% do esgoto produzido no país ainda é lançado sem tratamento nos corpos hídricos, agravando a degradação ambiental, particularmente em regiões com ecossistemas sensíveis, como praias, manguezais e estuários.

Nas áreas litorâneas, os desafios são amplificados pela alta densidade demográfica sazonal, infraestrutura urbana deficiente e falta de planejamento integrado. O crescimento desordenado de edificações, muitas vezes à margem da legislação ambiental e urbanística, inviabiliza a instalação de redes convencionais de coleta e tratamento de esgoto, especialmente em áreas de ocupação irregular ou de difícil acesso técnico.

Além disso, a gestão pública enfrenta entraves operacionais e financeiros para a expansão e manutenção dos sistemas centralizados de esgotamento sanitário. Esse cenário cria um vácuo estrutural que afeta tanto a população residente quanto a atividade econômica local, como o turismo, que depende da preservação ambiental para sua sustentabilidade. O resultado é a contaminação recorrente de balneários e a perda da qualidade da água e dos recursos naturais, com impactos diretos à saúde pública e à imagem das cidades costeiras.

Outro obstáculo é o despreparo técnico de muitos municípios para implementar soluções adaptadas à realidade local. Estudos do Instituto Trata Brasil [2] apontam que pequenas e médias cidades litorâneas carecem de planos diretores de saneamento atualizados, o que dificulta a captação de recursos e a adoção de tecnologias compatíveis com as especificidades regionais. A ausência de dados precisos sobre produção de esgoto, topografia e vocação de uso do solo também compromete o planejamento de soluções descentralizadas mais eficazes.

Diante desse cenário, os sistemas unitários de tratamento de efluentes se apresentam como uma alternativa técnica e economicamente viável para mitigar os efeitos da ausência de infraestrutura convencional. Sua adoção em contextos litorâneos pode ser estratégica, especialmente por sua flexibilidade, baixo custo de operação e possibilidade de implantação em empreendimentos de pequeno e médio porte, sem a necessidade de grandes obras ou interferências no tecido urbano existente.

2.2 Legislação e políticas públicas

A legislação ambiental e de saneamento no Brasil estabelece fundamentos importantes para o tratamento de efluentes, especialmente em regiões costeiras, consideradas áreas sensíveis. No entanto, a aplicação efetiva dessas normas ainda enfrenta diversos entraves, como limitações estruturais, orçamentárias e institucionais, além da complexidade das dinâmicas urbanas. A Lei nº 11.445/2007 [3], atualizada pelo Novo Marco Legal do Saneamento Lei nº 14.026/2020 [4], define diretrizes para a universalização dos serviços de saneamento básico e promoção de soluções sustentáveis. Apesar disso, sua implementação nas zonas costeiras é dificultada por condições locais adversas.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/2011 [5] estabelece exigências para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, determinando a necessidade de tratamento prévio. Contudo, a fiscalização e o cumprimento da norma são irregulares, especialmente nas regiões litorâneas, onde o crescimento urbano desordenado compromete o controle ambiental e o acesso à infraestrutura. O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) [6], embora proponha metas para a expansão do tratamento de esgoto, carece de articulação eficaz com as políticas urbanas locais, o que dificulta a aplicação de soluções descentralizadas, como os sistemas unitários de tratamento.

A lacuna entre o arcabouço legal e a realidade prática nas regiões costeiras se agrava com a inexistência ou desatualização de planos municipais de saneamento, além da escassez de recursos técnicos e financeiros. Mesmo onde há legislações locais, sua aplicação é parcial e desconectada das necessidades socioambientais do território. Estudos da ANA [1] e do Instituto Trata Brasil [2] indicam que a ausência de integração entre os diferentes níveis de governo gera sobreposição de funções, morosidade nos processos de licenciamento e indefinição de competências, comprometendo a gestão dos sistemas de esgotamento sanitário.

Diante disso, destaca-se a necessidade de fortalecer políticas públicas que priorizem soluções técnicas descentralizadas e ambientalmente sustentáveis, como os sistemas unitários, especialmente em localidades litorâneas com baixa cobertura de saneamento. Para ampliar sua adoção, é fundamental que os marcos legais sejam acompanhados de políticas específicas que considerem as particularidades regionais e ofereçam incentivos normativos, técnicos e financeiros adequados.

2.3 Impactos socioambientais devidoa a falta de tratamento de efluentes em regiões costeiras

Desde os primeiros processos de urbanização próximos a corpos hídricos, a disposição inadequada de esgoto tem sido associada à degradação ambiental e à disseminação de doenças. Com a industrialização e a urbanização desordenada ao longo do século XX, esse problema se agravou, sobretudo nas regiões costeiras, que passaram a receber grande parte dos efluentes urbanos. O avanço do turismo e da expansão imobiliária intensificou a pressão sobre os ecossistemas litorâneos, especialmente em locais sem infraestrutura de saneamento, resultando na contaminação da água, perda da balneabilidade, eutrofização e aumento de enfermidades de origem hídrica [1].

A percepção das causas da degradação varia entre os atores envolvidos. Enquanto moradores e empreendedores frequentemente responsabilizam o poder público, estudos indicam que a solução demanda ações integradas entre governo, setor privado e sociedade civil. Um elemento muitas vezes negligenciado é o reuso de águas tratadas, que poderia contribuir para a conservação hídrica em regiões de alta demanda, especialmente nos usos não potáveis como irrigação, limpeza urbana e descarga sanitária [7].

Nesse contexto, os sistemas unitários de tratamento de esgoto surgem como alternativas técnicas viáveis e sustentáveis para áreas sem coleta e tratamento adequados. No entanto, para que sejam efetivamente adotados, é necessário que as políticas públicas municipais incorporem essas soluções em seus instrumentos de planejamento, levando em conta as especificidades regionais, culturais e socioeconômicas. A integração entre regulação, educação ambiental e inovação tecnológica é essencial para promover a saúde pública e preservar os recursos naturais nas regiões litorâneas.

3. METODOLOGIA

O presente estudo adota uma abordagem de natureza qualitativa, exploratória e aplicada, com o intuito de avaliar a viabilidade e eficácia da implantação de sistemas unitários de tratamento de esgoto em áreas costeiras brasileiras. O estudo é estruturado em três etapas principais: revisão bibliográfica, análise comparativa e simulação de estudo de caso, com possibilidade de reutilização do efluente tratado para fins não potáveis.

3.1 Levantamento bibliográfico e documental

A primeira etapa do presente estudo de viabilidade consistiu na realização de um levantamento bibliográfico e documental com o objetivo de reunir fundamentos teóricos, técnicos e normativos que subsidiem a análise da viabilidade dos sistemas unitários de tratamento de efluentes em áreas litorâneas. Essa etapa permitiu construir um panorama abrangente sobre os principais desafios enfrentados pelas regiões costeiras brasileiras no campo do saneamento, bem como identificar alternativas tecnológicas e legais adequadas à realidade desses territórios.

O levantamento contemplou publicações científicas indexadas em bases como Scielo, Pubmed e Periódicos CAPES, além de referências bibliográficas e documentos técnicos emitidos por órgãos públicos, como o Ministério do Desenvolvimento Regional, a ANA, a ABNT e o IBGE. Também foram consideradas normativas e diretrizes nacionais relacionadas ao tratamento e ao reúso de águas residuárias, como a NBR 13969/1997 [8], que trata de edificações unifamiliares sem acesso à rede pública de esgoto, e a Resolução CONAMA nº 430/2011 [5], que define as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos. O estudo incorporou ainda as orientações do PLANSAB [6] no tocante à universalização do esgotamento sanitário e à adoção de soluções tecnológicas descentralizadas.

A revisão bibliográfica abordou temas fundamentais para o escopo deste trabalho, tais como: (i) a problemática da ausência de coleta e tratamento de esgoto em zonas costeiras e seus impactos ambientais, a degradação de ecossistemas sensíveis e a disseminação de doenças de veiculação hídrica; (ii) a caracterização, funcionamento e aplicabilidade de sistemas unitários de tratamento de esgoto, especialmente em ambientes com restrições de infraestrutura pública; (iii) os parâmetros de eficiência mais comumente utilizados na avaliação de desempenho dos sistemas, como a remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) e coliformes fecais; e (iv) o potencial de reúso dos efluentes tratados para fins não potáveis, como irrigação de jardins, lavagem de pisos e calçadas, uso em descargas sanitárias e fins paisagísticos.

Essa etapa foi fundamental para consolidar a base técnico-científica do estudo, validando a escolha das tecnologias propostas e evidenciando sua adequação ao contexto analisado. Além disso, o levantamento revelou que os sistemas descentralizados de tratamento, quando corretamente dimensionados e mantidos, podem alcançar níveis satisfatórios de eficiência, tornando viável o reúso da água tratada e contribuindo para a redução do consumo de água potável.

3.1.1 Parâmetros de eficiência de tratamento

A avaliação da eficiência dos sistemas unitários é essencial para garantir que o efluente tratado atenda aos padrões ambientais exigidos pela legislação brasileira. Os parâmetros mais utilizados para essa avaliação são o DBO, DQO, SST e os coliformes fecais.

A DBO representa a quantidade de oxigênio necessária para a decomposição biológica da matéria orgânica presente no esgoto. Valores elevados indicam alta carga poluente.

A DQO, por sua vez, inclui também a fração de matéria orgânica não biodegradável, sendo um parâmetro complementar à DBO.

Os sólidos suspensos totais compreendem a porção de partículas em suspensão no esgoto, que devem ser reduzidas para evitar a obstrução de leitos filtrantes e minimizar impactos ao solo e aos corpos hídricos.

Quanto aos coliformes fecais, que são indicadores da presença de microrganismos patogênicos, a literatura aponta que sua remoção eficiente ocorre principalmente nas etapas de polimento e desinfecção, sendo possível atingir reduções superiores a 99% com o uso de cloração ou luz ultravioleta.

Esses parâmetros são fundamentais para a definição do nível de tratamento necessário, especialmente em casos onde há intenção de reúso do efluente. A análise de indicadores como DBO, DQO, SST e coliformes fecais permite identificar se o tratamento primário é suficiente ou se há necessidade de etapas complementares, como polimento e desinfecção. O nível de exigência varia conforme o tipo de reúso pretendido, sendo maior para usos mais sensíveis. Dessa forma, o monitoramento desses parâmetros garante que o sistema seja eficiente, seguro e adequado às normas.

3.1.2 Potencial de reúso de efluentes tratados

O reúso de águas residuárias tratadas tem ganhado relevância em contextos de escassez hídrica e busca por práticas sustentáveis. Em áreas litorâneas, onde há pressão sobre os recursos hídricos e aumento sazonal da demanda por serviços urbanos, a reutilização do efluente tratado pode representar uma estratégia eficaz para reduzir o consumo de água potável e mitigar impactos ambientais.

Segundo a NBR 13.969 [8] e as diretrizes da Organização Mundial da Saúde, o efluente tratado pode ser reutilizado para fins não potáveis, como irrigação paisagística, lavagem de pisos e calçadas, abastecimento de bacias sanitárias, combate a incêndios e até em processos industriais.

Estudos realizados [9] demonstram que, em áreas urbanas e periurbanas, o reuso de efluente para irrigação ornamental e fins urbanos é uma alternativa viável e segura, desde que haja controle rigoroso dos parâmetros microbiológicos. Além disso, o reuso contribui para a valorização ambiental e paisagística de empreendimentos, gerando benefícios sociais, econômicos e ecológicos.

Dessa forma, o reuso de efluente tratado em contextos costeiros configura-se não apenas como uma medida de racionalização do uso da água, mas também como uma estratégia de resiliência frente às mudanças climáticas e à pressão turística sobre os serviços de saneamento.

3.1.3 Regulamentação e normas brasileiras relacionadas ao saneamento e reuso

A regulamentação do reuso de águas residuárias no Brasil tem avançado significativamente nos últimos anos, com a publicação de normas técnicas e diretrizes que buscam garantir a segurança sanitária e a viabilidade operacional desses sistemas. Dentre os principais marcos legais e normativos que orientam a aplicação dos sistemas unitários e o reuso do efluente tratado, destacam-se:

- **NBR 13969:1997 (ABNT)** – Estabelece os critérios para projetos, construção e operação de sistemas de tratamento de esgotos sanitários em edificações unifamiliares ou em conjuntos de edificações com até 20 pessoas. A norma contempla unidades como fossas sépticas, filtros anaeróbios e sumidouros, definindo parâmetros mínimos de segurança sanitária e eficiência.
- **NBR 17.076:2024 (ABNT)** – é uma norma técnica que estabelece os requisitos para projeto, instalação, operação e manutenção de sistemas de tratamento de esgoto de menor porte, tais como fossas sépticas, biodigestores e sistemas compactos destinados a locais sem rede de esgotamento sanitário, atendendo a até 12.000 L de esgoto/dia e 3,80 kg de DBO/dia, ou aproximadamente até 50 pessoas.
- **Resolução CONAMA nº 430/2011** – Regulamenta as condições e padrões para o lançamento de efluentes líquidos em corpos hídricos receptores. Essa resolução complementa a Resolução CONAMA nº 357/2005 e estabelece limites máximos para parâmetros como DBO, DQO, SST, óleos e graxas, além de exigir o monitoramento da eficiência do tratamento.
- **Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab)** – Documento estratégico que define metas de universalização do saneamento no Brasil, com foco em soluções tecnológicas adaptadas às realidades locais. O Plansab reconhece a importância das tecnologias descentralizadas, como os sistemas unitários, especialmente em áreas rurais, periurbanas e de difícil acesso à rede pública de esgoto.
- **Portaria GM/MS nº 888/2021** – Estabelece os padrões de qualidade da água para consumo humano e diretrizes de vigilância da qualidade da água, reforçando a importância do controle de riscos à saúde pública associados ao reuso.

A aplicação dessas normas e diretrizes é fundamental para garantir a segurança, eficácia e conformidade legal dos sistemas de tratamento analisados neste estudo. Além disso, o arcabouço normativo orienta o dimensionamento técnico, os critérios de reuso e os padrões de qualidade exigidos para cada tipo de aplicação, permitindo a formulação de propostas de gestão integrada e sustentável dos efluentes em áreas litorâneas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Classificação e caracterização dos sistemas unitários de tratamento de efluentes

Dentro do escopo da revisão bibliográfica, buscou-se compreender as diferentes tipologias dos sistemas unitários de tratamento de esgoto, que se caracterizam por operarem diretamente na fonte geradora do efluente, sem depender da rede pública de coleta. Esses sistemas são amplamente reconhecidos por sua aplicabilidade em contextos descentralizados e por exigirem menor infraestrutura de implantação, sendo especialmente viáveis em áreas costeiras com ocupações dispersas ou de difícil acesso.

Segundo Von Sperling [7], os principais sistemas unitários podem ser classificados em três categorias principais: sistemas de tratamento primário, secundário e terciário.

O tratamento primário é representado, sobretudo, pelos tanques sépticos, que promovem a sedimentação dos sólidos e a digestão anaeróbia da matéria orgânica. Embora de simples construção e manutenção, esses sistemas apresentam eficiência limitada para alguns parâmetros, sendo recomendados como etapa inicial do tratamento.

Já os sistemas de tratamento secundário englobam unidades como os filtros anaeróbios, reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), que complementam o processo iniciado no tratamento primário, promovendo maior remoção de carga orgânica e coliformes. O tratamento terciário, por sua vez, envolve o polimento final do efluente, com foco na remoção de nutrientes e agentes patogênicos, podendo incluir processos físicos (filtração), químicos (cloração, ozonização) ou biológicos avançados.

A escolha do sistema mais adequado depende de uma série de fatores, como volume de esgoto gerado, disponibilidade de área, tipo de solo, capacidade de manutenção, custos e possibilidade de reuso.

Fossa séptica + sumidouro: A combinação de fossa séptica com sumidouro é uma solução doméstica de tratamento primário de esgoto, adequada para áreas sem rede coletora pública. A fossa promove a sedimentação dos sólidos e a digestão anaeróbia parcial, enquanto o sumidouro infiltra o efluente tratado no solo.

Estudo indica que esse sistema remove em média 40–60% da DBO, 30–60% da DQO e 50–70% dos SST, com valores que podem chegar a 65% de DBO e 80% de SST em fossas dimensionadas adequadamente ou em série [10]. A NBR 13969/1997 [7] reforça essa faixa, apontando: DBO 40–75%, DQO 40–70% e SST 60–90%, dependendo da temperatura do ambiente (abaixo de 15 °C ou acima de 25 °C).

Além disso, a eficiência na remoção de coliformes termotolerantes varia entre 25–75%, embora a maioria dos sistemas não seja otimizada para esse parâmetro. Contudo, apesar de seus benefícios, existem limitações críticas que precisam ser consideradas em projetos de saneamento sustentável. Primeiramente, a eficiência microbiológica é baixa, com remoções de coliformes fecais variando entre 25 e 75% [10]. Isso representa um risco significativo à saúde pública, especialmente quando há proximidade com poços freáticos ou fontes de água potável.

Outro aspecto problemático é a dependência da permeabilidade do solo. Em terrenos com lençol freático elevado, solos argilosos ou com baixa capacidade de infiltração, o sumidouro pode se tornar ineficaz, resultando em escoamento superficial de esgoto bruto ou saturação do sistema. Além disso, a contaminação de águas subterrâneas por infiltração de patógenos e nutrientes (nitrogênio e fósforo) tem sido apontada como um dos maiores impactos negativos ambientais desse arranjo. Ademais, a ausência de manutenção regular, como a retirada de lodo acumulado na fossa, pode comprometer a funcionalidade do sistema, aumentando o risco de transbordamentos e odores, o que contribui para falhas sanitárias.

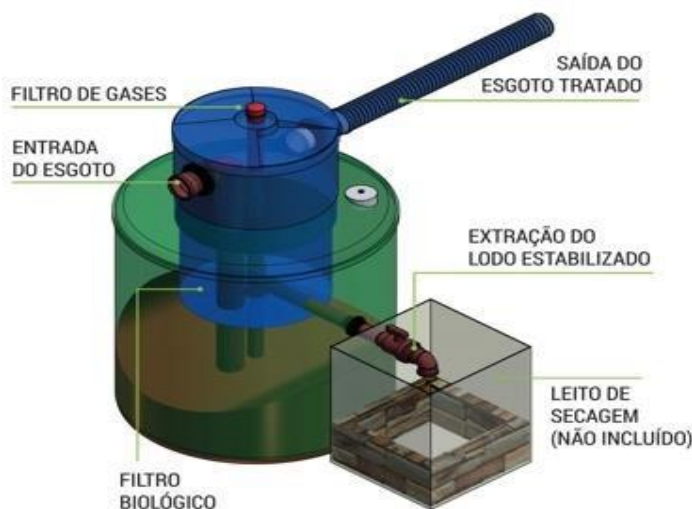
O sistema não possibilita reuso do efluente, uma vez que o esgoto tratado não passa por desinfecção ou polimento. Isso o torna incompatível com estratégias mais modernas de reaproveitamento de águas cinzas ou fertirrigação, perdendo relevância frente a soluções como filtros anaeróbios, wetlands construídas ou biodigestores com digestato aproveitável.

Biodigestores Compactos: Os biodigestores compactos são sistemas descentralizados de tratamento de esgoto e resíduos orgânicos que utilizam digestão anaeróbia para transformar matéria orgânica em biogás e digestato. São indicados para zonas rurais ou locais sem rede de esgoto, destacando-se pela eficiência, baixo custo operacional e geração de energia renovável.

Estudos mostram que esses sistemas podem remover até 90% da DQO, 70–90% da DBO e cerca de 67% dos SST, além de reduzir significativamente a carga microbiológica. [11], [12], [13] O biogás gerado pode ser usado para cocção, aquecimento ou eletricidade, e o digestato aplicado como fertilizante rico em nutrientes.

Apesar dos benefícios, os biodigestores compactos apresentam limitações importantes. O desempenho pode variar bastante conforme a temperatura, tempo de retenção e operação, o que compromete a eficiência do sistema. A gestão do digestato também é um desafio, pois seu uso agrícola exige cuidados com patógenos e contaminantes, mas nem sempre passa por pós-tratamento adequado. Além disso, muitos projetos falham por falta de capacitação técnica dos usuários, manutenção insuficiente ou ausência de normas técnicas específicas, o que compromete a segurança sanitária e a longevidade da tecnologia. A Figura 1 demonstra a estrutura de um Biodigestor Compacto e seus componentes.

Figura 1- Estrutura e componentes de um Biodigestor Compacto



Fonte: <https://www.maisambiente.eco.br/biodigestores>

RAFA/ UASB: Os sistemas RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) / UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) são reatores anaeróbios de alta eficiência utilizados para o tratamento biológico de esgotos domésticos e industriais com alta carga orgânica. O princípio básico de funcionamento consiste na introdução do efluente na base do reator, onde ele flui verticalmente para cima através de uma coluna densa de lodo anaeróbio granular.

Esse lodo granular é composto por comunidades microbianas especializadas que realizam a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, convertendo-a em biogás, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O movimento ascendente proporciona contato intenso entre o efluente e a biomassa, aumentando a eficiência da reação anaeróbia. O gás produzido forma bolhas que ajudam a manter a suspensão do lodo granular, facilitando a sua retenção e o processo de separação sólido-líquido por meio de flotação.

O sistema é equipado com um separador de gás-sólido-líquido no topo do reator, que retém os sólidos e recolhe o biogás para aproveitamento energético, impedindo que partículas em suspensão sejam descarregadas no efluente final. O efluente tratado sai pela parte superior do reator e pode ser submetido a etapas complementares para remoção de nutrientes e patógenos.

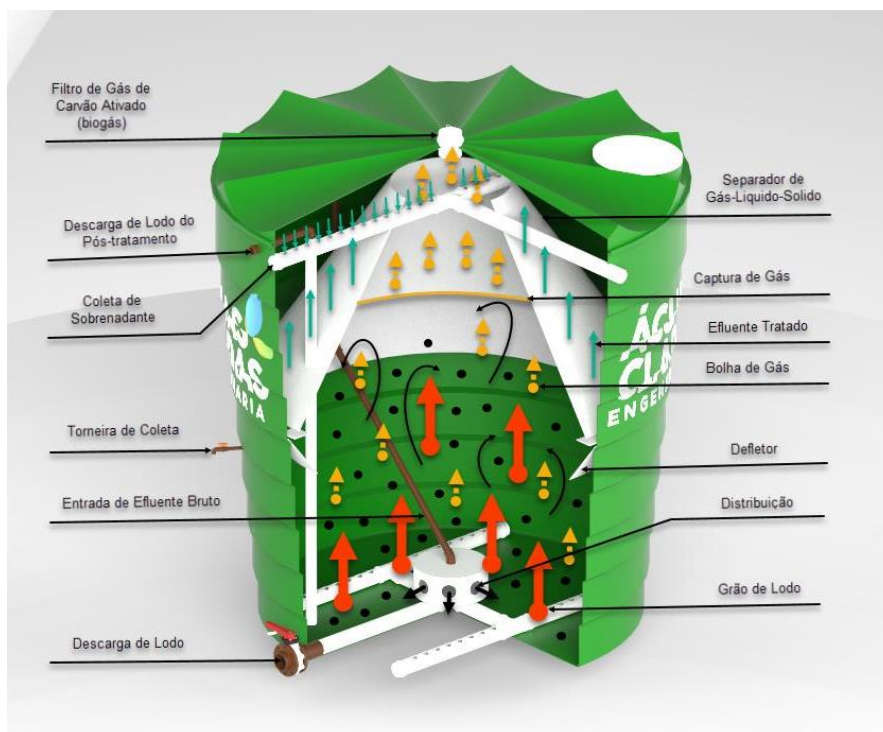
Em termos de desempenho, o UASB pode alcançar remoções de DBO entre 70% e 90%, DQO entre 60% e 85% e SST entre 60% e 90%, operando com tempos de retenção hidráulica de 6 a 12 horas e temperaturas ideais entre 20°C e 35°C [14]. A produção de biogás é significativa, podendo variar de 0,3 a 0,5 m^3 por kg de DQO removido, o que representa uma fonte energética renovável importante. Sistemas como reatores UASB são capazes de reduzir a DBO em até 80–90%. [7]

Entretanto, o sistema apresenta limitações relevantes. A queda de eficiência em temperaturas inferiores a 15°C restringe sua aplicação em climas frios sem aquecimento suplementar. O processo anaeróbio não remove nutrientes (nitrogênio e fósforo) e possui baixa eficiência na remoção de patógenos, requerendo tratamentos complementares e polimentos finais para adequação ambiental. Além disso, a presença de sólidos em excesso pode provocar entupimentos e perda de biomassa devido à formação de espuma e granulação inadequada do lodo, demandando manutenção especializada e monitoramento constante.

O controle operacional do sistema exige pessoal técnico capacitado para ajustar parâmetros como carga orgânica, tempo de retenção, mistura e extração de biogás, garantindo a estabilidade e eficiência do processo.

Em síntese, os reatores RAFA/UASB são tecnologias consolidadas e sustentáveis para o tratamento anaeróbio de efluentes com alta carga orgânica, principalmente em regiões tropicais. No entanto, a necessidade de sistemas complementares para remoção de nutrientes e patógenos, junto à capacitação técnica, é fundamental para assegurar a conformidade ambiental e a eficiência a longo prazo. A Figura 2 demonstra a estrutura de RAFA/UASB e seus componentes

Figura 2 – Estrutura e componentes de um RAFA/UASB



Fonte: <https://aguasclarasengenharia.com.br/como-funciona-reator-uasb/>

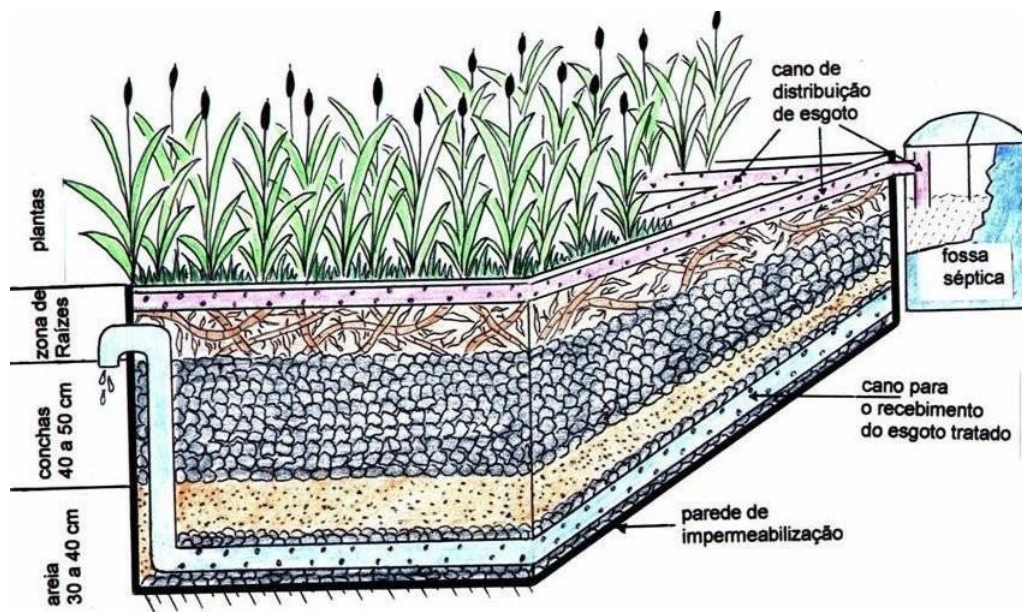
Wetlands construídos: Os Wetlands Construídos, também conhecidas como Sistemas Alagados Construídos (SACs), são tecnologias baseadas na simulação de ecossistemas naturais de áreas úmidas, projetadas para tratar esgotos de forma descentralizada, eficiente e sustentável. Seu princípio de funcionamento consiste na passagem do esgoto por um leito composto por substrato filtrante (como areia, cascalho ou brita), vegetação aquática e biofilme microbiano, que atuam conjuntamente na remoção de poluentes. O sistema pode operar com fluxo superficial (FWS), onde o esgoto passa por cima do leito, ou com fluxo subsuperficial, em que o líquido circula por dentro do meio poroso. Entre os subsistemas mais utilizados estão os de fluxo horizontal subsuperficial (SSFH), vertical (SSFV) e configurações híbridas que combinam ambas, proporcionando maiores taxas de remoção.

O desempenho do sistema depende do tempo de detenção hidráulica, da temperatura, do tipo de fluxo e da vegetação utilizada. Microrganismos presentes no meio e na rizosfera das plantas degradam a matéria orgânica, removem nutrientes (como nitrogênio e fósforo), reduzem sólidos em suspensão e promovem a sedimentação de partículas. A vegetação também contribui com oxigenação parcial do meio e serve como barreira física para patógenos e partículas, aumentando a eficiência geral do tratamento. Diversos estudos demonstram que Wetlands Construídas podem alcançar eficiências de remoção de DBO entre 80% e 95%, DQO de 60% a 85%, SST de 80% a 95%, e coliformes fecais entre 90% e 99,9%. A remoção de nitrogênio pode variar entre 30% e 80%, dependendo do tipo de fluxo, da presença de zonas aeróbias e anaeróbias e da temperatura média local. A eficiência microbiológica e de nutrientes pode ser aumentada com a utilização de zonas alternadas de oxidação e redução, além de plantas adaptadas ao clima e à salinidade, como as halófitas, particularmente úteis em regiões litorâneas [15]. Wetlands Construídas se destacam por sua economia energética e operacional. A implantação pode variar por metro quadrado de área construída, dependendo do tipo de material, mão de obra e escala do projeto. O custo operacional anual costuma representar de 1% a 10% do custo de capital, já que esses sistemas funcionam, em sua maioria, por gravidade, sem necessidade de bombas ou insumos químicos [16]. Contudo, esses sistemas também apresentam desafios. O principal é a necessidade de espaço físico considerável, com exigência entre 2 m² a 8 m² por habitante equivalente, o que pode ser um entrave em áreas compactas. Além disso, apesar de a operação ser relativamente simples, ela requer acompanhamento técnico mínimo para evitar entupimentos, controlar o crescimento da vegetação e manter o fluxo hidráulico adequado. Alterações sazonais como chuvas intensas ou secas prolongadas também podem afetar a eficiência do sistema [7].

Apesar dessas limitações, as Wetlands Construídas oferecem um alto potencial para reúso do efluente tratado, especialmente em irrigação, jardinagem, lavagem de vias ou fins urbanos não potáveis, desde que o efluente passe por desinfecção complementar. A tecnologia é particularmente indicada para comunidades pequenas, áreas rurais, empreendimentos ecológicos e regiões litorâneas, onde é possível aliar eficiência sanitária com benefícios ambientais, como promoção da biodiversidade e integração paisagística.

Em suma, as Wetlands Construídas constituem uma alternativa robusta e ecológica para o tratamento descentralizado de esgotos, com boa eficiência na remoção de matéria orgânica, sólidos e patógenos. Quando bem projetadas e adaptadas às condições locais, representam uma solução sustentável de baixo custo energético, embora suas limitações de espaço e exigências mínimas de manutenção devam ser consideradas no planejamento e implantação do sistema. A Figura 3 ilustra a estrutura de um Wetland construído e seus componentes.

Figura 3- Estrutura e composição de um Wetland construído



Fonte: <https://pt.linkedin.com/pulse/o-uso-de-wetlands-constru%C3%ADdos-como-sistema-tratamento-aline-arthuso>

4.2 Análise Comparativa dos Sistemas

Buscou-se elaborar uma tabela comparativa entre os sistemas de tratamento de esgoto apresentados anteriormente, com o objetivo de analisar tecnicamente suas principais especificidades e particularidades operacionais. A comparação foi estruturada com base em critérios relevantes para o planejamento e a tomada de decisão, como eficiência na remoção de carga poluidora (DBO, DQO, SST e coliformes), custo de implantação e operação, exigência de espaço físico, complexidade de operação e manutenção, além do potencial de reúso do efluente tratado em diferentes finalidades não potáveis.

Essa abordagem comparativa visa proporcionar uma avaliação mais objetiva e fundamentada, contribuindo para a seleção de soluções de tratamento mais adequadas às distintas realidades territoriais, ambientais e socioeconômicas. Em especial, considera-se a importância de alternativas compactas, eficientes e de fácil manejo para contextos litorâneos, onde frequentemente há limitações de espaço, sensibilidade ambiental e desafios no acesso à infraestrutura centralizada de saneamento.

A sistematização dos dados na Tabela 1 permite visualizar de forma clara os pontos fortes e as limitações de cada tecnologia, auxiliando gestores, projetistas e tomadores de decisão na escolha de sistemas mais eficientes, viáveis e sustentáveis para cada situação específica.

Tabela 1- Análise comparativa dos sistemas

Sistema	Eficiência de Tratamento	Custo Implantação/O&M	Espaço Físico médio (para o mesmo número de utilizadores)	Manutenção	Adaptabilidade e litorânea	Potencial de reúso do efluente
Fossa Séptica+ Sumidouro	DBO 40–60%, DQO 30–60%, SST ~50–70% (varia conforme HRT de 24–72 h)	3000-5000 R\$ O&M simples (limpeza + manutenção sumidouro)	Médio: 10 - 12m ² (depende do terreno)	Mediana; remoção de sólidos, limpeza de caixa e sumidouro	Moderada; salinidade descontada no sumidouro	Reuso limitado requer polimento final + desinfecção
RAFA / UASB	DBO 70-90%, DQO 60-85%, SST ~60–90%	Capital mais alto 8000-12000R\$; O&M técnico (HRT, temperatura, lodo)	Muito compacto: 1–4 m ²	Técnica; controle de temperatura, HRT, descarga lodo	Alta; funciona bem em clima tropical, sem salinidade direta	Alto com polimento e digestão para fertirrigação
Biodigestores Compactos	DBO 70-90%, DQO até 90%, SST ~67%	2000-5000R\$	Compacto: 3-5m ²	Baixa; controle de temperatura, saída de biogás	Média; sensível a salinidade, mas isolável	Muito alto: digestato rico pode ser usado como biofertilizante
Wetlands Construídos	DBO 80–95%, DQO 60-95%, SST 80-95%	600-700R\$/Utilizadores (valor por pessoa tende a diminuir em uma escala maior)	Demanda um maior espaço: 40-50m ²	Simples; poda plantas, remoção de sólidos, desobstrução	Alta; tolera salinidade, plantas halófitas	Muito alto: reúso em irrigação, descarga, reúso urbano após desinfecção

1. **HRT:** Tempo de Retenção Hidráulica.
2. **O&M:** Operação e manutenção

4.3 Estudo de cenários e o simulado

Com o intuito de ilustrar de forma aplicada a viabilidade técnica, econômica e ambiental proposta e apresentada neste trabalho, foram elaborados dois estudos de caso simulados com base em cenários hipotéticos, representativos da realidade de empreendimentos localizados em áreas litorâneas. A metodologia adotada considerou parâmetros de dimensionamento sanitário, eficiência de tratamento, exigência de área útil, custos aproximados e potencial de reuso dos efluentes tratados, conforme discutido nas seções anteriores.

Os cenários foram construídos de forma a representar diferentes tipologias de ocupação e restrições operacionais, permitindo avaliar a adaptabilidade dos sistemas unitários de tratamento às condições específicas de cada tipo de empreendimento:

- Primeiro cenário: Apresenta um modelo hipotético de empreendimento turístico de pequeno porte, uma pousada litorânea com 12 quartos, com uma área livre de 50 m². A pousada é localizada em zona de via costeira com ocupação sazonal elevada. O objetivo dessa simulação é demonstrar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação de um sistema unitário de tratamento de esgoto, com possibilidade de reuso de água tratada para fins não potáveis.

- O segundo cenário: Um condomínio residencial multifamiliar sem saneamento básico com limitação severa de área disponível (inferior a 35 m²). Esta simulação buscou evidenciar que, mesmo sob restrições físicas e estruturais, é possível implementar soluções eficazes e sustentáveis para o tratamento de esgoto com reaproveitamento seguro da água.

Ambas as simulações foram conduzidas com base em parâmetros médios de geração de esgoto por habitante, valores de remoção de poluentes estabelecidos na literatura técnica e normas brasileiras, bem como estimativas de custo de implantação e operação. As análises comparativas geradas a partir desses estudos reforçam a importância da escolha adequada do sistema frente às características de cada empreendimento, demonstrando que a adoção de soluções descentralizadas é tecnicamente viável, economicamente acessível e ambientalmente vantajosa em áreas litorâneas.

Cenário 1:

Estimativa da Geração de Esgoto Diário:

Considerando uma ocupação média de 2 hóspedes por quarto e taxa de ocupação de 80%, estima-se uma média de 19 pessoas por dia. Com base na NBR 7229/1993 e em dados do Ministério das Cidades (BRASIL, 2006), a geração per capita de esgoto para uso residencial/turístico é de aproximadamente 150 L/hab/Dia. Assim, temos:

Geração diária estimada = 19 pessoas × 150 L = 2.850 litros/dia Escolha do

Sistema mais apropriado

Com base na análise comparativa realizada (seção 3.2), o sistema mais apropriado para esse cenário é o de Wetlands Construídos, dadas as seguintes vantagens:

- Alta eficiência de remoção de matéria orgânica e patógenos (DBO 80–95%; coliformes até 99,9%);
- Capacidade de reuso do efluente em atividades como irrigação de jardins, lavagem de áreas comuns e vasos sanitários;
- Adaptabilidade ao clima litorâneo, com uso de plantas halófitas nativas;
- Baixo custo operacional, sem necessidade de energia elétrica contínua.

Tabela 2- Projeção de custos

Elemento	Custo Estimado
Implantação (estrutura, substrato, vegetação, tubulação)	R\$ 13.000 a R\$ 15.000
Operação e Manutenção anual (limpeza, poda, verificação hidráulica)	R\$ 500 a R\$ 1.000
Substituição parcial de componentes (a cada 7 anos)	R\$ 3.000 a R\$ 4.000

Área necessária estimada: Cerca de 50 m² para atender aos 2.850 L/dia, considerando taxa de aplicação hidráulica média de 60 L/m²/dia para fluxo subsuperficial.

Tabela 3- Eficiência esperada

Parâmetro	Eficiência Média Esperada
DBO	85–95%
DQO	60–95%
SST	80–95%
Coliformes fecais	até 99,9%

A qualidade final do efluente permite seu reuso seguro para fins paisagísticos e sanitários, conforme a NBR 13.969 e orientações da OMS.

Volume Potencial de Reuso e Aplicações Práticas

Assumindo uma eficiência de remoção de sólidos e patógenos adequada e desinfecção complementar simples (como cloração):

Volume reutilizável diário ≈ 2.500 L/dia

Esse volume pode ser utilizado nas seguintes aplicações:

- Irrigação de jardins da pousada (área verde estimada em 200 m²);
- Lavagem de pisos e áreas comuns (pátios, corredores externos);
- Reabastecimento de bacias sanitárias dos quartos e áreas comuns.
-

Redução estimada no consumo de água:

Considerando que essas atividades anteriormente consumiam água potável, o reuso permitirá uma economia expressiva. Estima-se que:

Economia mensal de água potável = $2.500 \text{ L/dia} \times 30 \text{ dias} = 75.000$ litros/mês

Essa redução impacta diretamente na sustentabilidade hídrica da pousada e na diminuição da pressão sobre os sistemas públicos de abastecimento, especialmente em períodos de alta demanda turística.

Cenário 2:

Para expandir a aplicabilidade da proposta, elaborou-se outra simulação voltada a um condomínio residencial multifamiliar de pequeno porte, localizado em área litorânea com restrição espacial de até 35 m² para o sistema de tratamento. O objetivo é demonstrar a viabilidade técnica e ambiental da implantação de sistemas unitários eficientes em locais onde o espaço físico é um limitador significativo.

Estimativa da geração de esgoto diário:

O condomínio simulado possui 5 unidades habitacionais, com média de 4 moradores por unidade, totalizando 20 pessoas. A geração média de esgoto é estimada em 150 L/hab/Dia.

Geração diária estimada $20 \times 150 \text{ L} = 3.000$ litros/dia

Escolha do Sistema mais apropriado:

Com a limitação de espaço físico, especialmente em áreas urbanas ou empreendimentos compactos, sistemas que demandam grandes áreas, como os wetlands construídos, tornam-se inviáveis. Nesse contexto, destacam-se duas tecnologias que aliam compactidade, eficiência e adaptabilidade: o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA/UASB) e o biodigestor compacto.

O RAFA/UASB é uma tecnologia consolidada, eficiente na remoção de carga orgânica e com baixo consumo energético. Quando associado a sistemas de pós-tratamento igualmente compactos, como filtros de areia ou zonas de raízes superficiais, é capaz de atingir padrões adequados para o reuso não potável do efluente, como em irrigação paisagística, limpeza de áreas externas ou descargas sanitárias. Já o biodigestor compacto representa uma alternativa ainda mais acessível em termos de custo e simplicidade. É de fácil instalação, exige pouca manutenção técnica e pode ser operado com mínima capacitação, o que o torna ideal para áreas rurais, comunidades isoladas ou pequenas propriedades. Assim como o RAFA, permite o reaproveitamento do efluente tratado e, em alguns casos, a produção de biogás.

Dessa forma, ambos os sistemas se mostram tecnicamente viáveis em contextos com restrição de espaço. A escolha entre um ou outro deve considerar fatores como disponibilidade de recursos, perfil dos usuários, facilidade de operação e os objetivos específicos de reuso do empreendimento.

Opção 1: Sistema RAFA/UASB com Pós-tratamento Compacto para reuso

Descrição técnica:

O Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA/UASB) é uma tecnologia consagrada para o tratamento de esgoto doméstico, especialmente eficaz em regiões tropicais. O sistema promove a degradação anaeróbia da matéria orgânica com geração de biogás. Para alcançar padrões compatíveis com reuso não potável, é adotado um pós-tratamento compacto com filtro de areia e desinfecção (cloração ou UV).

Área ocupada estimada: 8–12 m²

Tabela 4 - Eficiência esperada

Parâmetro	Eficiência
DBO	80–90%
DQO	70–85%
SST	70–90%
Coliformes fecais	até 99% com polimento

Tabela 5 – Projeção de custos

Item	Valor (R\$)
RAFA/UASB (implantação)	R\$ 8.000 – 12.000
Polimento (areia + cloração)	R\$ 2.000 – 3.000
O&M anual (remoção de lodo, ajustes técnicos)	R\$ 1.000 – 1.500
Substituição eventual	R\$ 2.000 – 3.000

Reúso do efluente com o pós-tratamento:

Estima-se reuso de até 2.700 L/dia, aplicáveis à

- Lavagem de áreas comuns;
- Irrigação paisagística;
- Abastecimento de vasos sanitários.

Redução no Consumo de Água Potável

$$2.700 \text{ L/dia} \times 30 \text{ dias} = 81.000 \text{ litros/mês}$$

Opção 2: Biodigestor Compacto com Desinfecção para reuso

Descrição técnica:

O biodigestor compacto é um sistema anaeróbio de fluxo contínuo que trata o esgoto doméstico, podendo ser complementado com unidade de polimento leve (ex.: filtro de brita + cloração). É especialmente recomendado para áreas com baixa disponibilidade de espaço e necessidade de operação simplificada.

Área ocupada estimada: 5–6 m²

Tabela 6 – Eficiência esperada

Parâmetro	Eficiência
DBO	70–90%
DQO	até 90%
SST	~67%
Coliformes fecais	até 99% com desinfecção complementar

Tabela 7 - Projeção de custos

Item	Valor (R\$)
Biodigestor (implantação e instalação)	R\$ 5.000 – 8.000
Polimento e desinfecção	R\$ 1.000 – 2.000
O&M anual (remoção de lodo, verificação)	R\$ 400 – 700
Substituição eventual	R\$ 2.000

Reúso do Efluente:

Estimativa de 2.500 L/dia para:

- Irrigação de áreas verdes;
- Limpeza externa;
- Uso sanitário em áreas comuns.

Redução estimada no consumo de água:

2.500 L/dia × 30 dias = 75.000 litros/mês

Tabela 8 - Comparação entre RAFA/UASB e Biodigestor Compacto para 20 habitantes

Critério	RAFA / UASB	Biodigestor Compacto
Área necessária	8–12 m ²	5–6 m ² ☒
Custo total estimado	R\$ 10.000–15.000	R\$ 6.000–10.000 ☒
Operação e manutenção	Exige acompanhamento técnico	Baixa complexidade ☒
Eficiência (DBO/DQO)	Alta (80–90%)	Boa (70–90%)
Remoção microbiológica	Boa com polimento	Boa com desinfecção ☒
Potencial de reúso	Alto	Alto
Adequação ao espaço reduzido	Possível	Ideal ☒

☒ = vantagem no cenário simulado

Conclusão do cenário Simulado:

Ambos os sistemas demonstraram viabilidade técnica, operacional e econômica para o cenário do condomínio residencial litorâneo com área limitada. Contudo, o biodigestor compacto se destacou pela simplicidade de instalação, menor área ocupada e custo mais acessível. O sistema RAFA/UASB, embora mais robusto em termos de estabilidade e eficiência em cargas maiores, exige espaço ligeiramente maior e supervisão técnica contínua.

Dessa forma, para empreendimentos de pequeno porte com limitação espacial, o biodigestor compacto representa a solução mais prática e sustentável, enquanto o RAFA/UASB se mantém como uma excelente opção em cenários com maior capacidade técnica e disponibilidade física.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise integrada realizada neste estudo, foi possível achar um resultado satisfatório acerca dos sistemas unitários de tratamento de esgoto e suas tecnologias. As rotas tecnológicas analisadas representam alternativas técnicas viáveis, sustentáveis e adaptáveis à realidade simulada. Posteriormente, poderá ter a possibilidade atender a demanda de grande parte das zonas costeiras brasileiras, levando em consideração as características de cada região. Sua aplicação se mostra especialmente relevante diante da ausência ou precariedade dos sistemas públicos de esgotamento sanitário, agravada por fatores como crescimento urbano desordenado, limitação de espaço físico e pressões ambientais.

Os resultados evidenciam que tecnologias como biodigestores compactos, reatores anaeróbios (RAFA/UASB) e wetlands construídos apresentam elevado potencial de remoção de carga orgânica e coliformes, podendo atingir padrões adequados ao reuso não potável. A eficiência, associada à flexibilidade operacional, menor demanda energética e possibilidade de reaproveitamento hídrico, reforça a viabilidade desses sistemas para empreendimentos de pequeno e médio porte em áreas litorâneas.

A análise comparativa e os estudos de caso simulados demonstraram que, com o correto dimensionamento, manutenção e atendimento aos requisitos normativos, é possível aliar desempenho sanitário, economia de recursos hídricos e proteção ambiental. Destaca-se, ainda, a importância do suporte técnico, da regulamentação específica e da integração dessas soluções nas políticas públicas locais de saneamento, para garantir sua efetiva implementação e aceitação social. Portanto, a adoção de sistemas unitários descentralizados configura-se como estratégia válida e necessária para a promoção da saúde pública, preservação dos ecossistemas costeiros e fortalecimento da resiliência hídrica urbana.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. *Atlas de esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2021.
- [2] INSTITUTO TRATA BRASIL. *Ranking do saneamento 2023*. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br/>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- [3] BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 8 jan. 2007.
- [4] BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 jul. 2020.
- [5] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 maio 2011.
- [6] BRASIL. Ministério das Cidades. Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Brasília: Ministério das Cidades, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- [7] VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 2017.
- [8] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- [9] INSTITUTO REÚSO DE ÁGUA. *Diretrizes para o reúso de água no Brasil*. 1. ed. [s.l.: s.n.], 2025. Disponível em: <https://reusodeagua.org/wp-content/uploads/2025/05/Diretrizes-para-o-Reuso-de-Agua-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- [10] AGO, Mayara. Tratamento de esgoto por fossa séptica e unidades complementares: estudo de caso na cidade de Fraiburgo. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/469784328/Tratamento-de-esgoto-por-fossa-septica-e-unidades-complementares-estudo-de-caso-na-cidade-de-Fraiburgo-Mayara-Zago-2016>. Acesso em: 10 jul. 2025.

- [11] B. G. Mahendra, Sharadreddy Patil. Anaerobic digestion of domestic wastewater. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 2, n. 13, p. 286–287, nov. 2013. Disponível em: <https://ijret.org/volumes/2013v02/i13/IJRET20130213051.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- [12] PILILONI, Lorenzo et al. Design considerations for the operation of small-scale biogas digesters. *Bioresource Technology Reports*, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10789629/>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- [13] MAIS AMBIENTE. *Biodigestores*. [S.l.]: Mais Ambiente, [2025?]. Disponível em: <https://www.maisambiente.eco.br/biodigestores>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- [14] DUTTA, Abhishek; DAVIES, Charlotte; IKUMI, David S. Performance of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and other anaerobic reactor configurations for wastewater treatment: a comparative review and critical updates. *Journal of Water Supply: Research and Technology–Aqua*, v. 67, n. 8, p. 858–884, dez. 2018. DOI: 10.2166/aqua.2018.090.
- [15] KIVAISI, Alphonse K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, v. 16, n. 4, p. 545–560, 2001.
- [16] KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. *Treatment wetlands*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. Disponível em: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf. Acesso em: 15 jul. 2025.

