



Análise de Viabilidade e Modelo de Gestão para Sistemas Descentralizados de Saneamento: Uma Proposta Baseada na Economia Circular em Comunidades Vulneráveis

Feasibility Analysis and Management Model for Decentralized Sanitation Systems: A Proposal Based on the Circular Economy in Vulnerable Communities

Paulo Henrique Garcez Machado

Universidade Unigranrio Afya, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Moacir Porto Ferreira

Universidade Unigranrio Afya, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo: Este estudo aborda a problemática do saneamento precário em áreas vulneráveis, propondo uma solução além da simples implantação técnica de biodigestores. O objetivo central é desenvolver e analisar a viabilidade técnica, econômica e operacional de um modelo de gestão sustentável para estes sistemas, com foco na Engenharia de Produção. A metodologia combina a pesquisa bibliográfica com uma análise de viabilidade de implantação (CAPEX) e operacional (OPEX), utilizando o caso de sucesso do Aterro de Seropédica (RJ) como benchmark para a valorização de subprodutos (biogás, biofertilizante). Os resultados culminam na proposta de um modelo de gestão operacional (MGO) e um Plano de Operação Padrão (POP) para comitês locais, visando garantir a sustentabilidade e replicabilidade do sistema. Conclui-se que a viabilidade de sistemas descentralizados depende menos da tecnologia em si e mais de um modelo de gestão robusto que integre a comunidade na economia circular.

Palavras-chave: biodigestores; saneamento básico; engenharia de produção; viabilidade econômica; economia circular.

Abstract: This article addresses the problem of precarious sanitation in vulnerable areas, proposing a solution beyond the mere technical implementation of biodigesters. The main objective is to develop and analyze the technical, economic, and operational feasibility of a sustainable management model for these systems, focusing on Production Engineering. The methodology combines bibliographic research with an implementation (CAPEX) and operational (OPEX) feasibility analysis, using the successful case of the Seropédica Landfill (RJ) as a benchmark for byproduct valorization (biogas, biofertilizer). The results culminate in the proposal of an operational management model (OMM) and a Standard Operating Procedure (SOP) for local committees, aiming to ensure the system's sustainability and replicability. It is concluded that the feasibility of decentralized systems depends less on the technology itself and more on a robust management model that integrates the community into the circular economy.

Keywords: biodigesters; basic sanitation; production engineering; economic feasibility; circular economy.

INTRODUÇÃO

O acesso ao saneamento básico configura-se como um direito fundamental e um pilar para a saúde pública, qualidade de vida e preservação ambiental, contudo, representa um desafio significativo no Brasil, especialmente em regiões periféricas. No estado do Rio de Janeiro, dados alarmantes indicam que uma parcela considerável da população ainda carece de infraestrutura sanitária adequada (Brasil, 2021). Este cenário de vulnerabilidade expõe as comunidades a riscos elevados de contaminação e proliferação de doenças de veiculação hídrica, impactando negativamente o bem-estar e o desenvolvimento local.

Nesse contexto, os biodigestores anaeróbios surgem como uma alternativa tecnológica promissora e sustentável para o tratamento de esgoto (Mixtura, 2023). Estes sistemas utilizam processos biológicos para decompor a matéria orgânica presente no esgoto (Chernicharo, 1997), transformando-a em biogás – uma fonte de energia renovável (BGS Equipamentos, [s.d.]; Renato *et al.*, 2024) – e em biofertilizante, um subproduto rico em nutrientes (Chernicharo, 1997). A implementação de biodigestores, portanto, não apenas trata o esgoto de forma eficiente, mas também agrega valor aos resíduos, alinhando-se aos princípios da economia circular (Sha *et al.*, 2024; Susana, [s.d.]).

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar e detalhar uma proposta de projeto, sob a ótica da Engenharia de Produção (BRK Ambiental, [s.d.]-b), para a criação e manutenção de biodigestores destinados ao tratamento de esgoto em comunidades carentes. A justificativa para a escolha do tema reside na urgência da questão sanitária, particularmente em regiões como o Rio de Janeiro (Cardoso, 2024; Instituto Trata Brasil, 2024), e no potencial dos biodigestores como solução descentralizada, de menor custo relativo e ambientalmente adequada (Mesquita, 2019; Sha *et al.*, 2024). O problema central de engenharia de produção abordado é, portanto, a ausência de um modelo de gestão de saneamento descentralizado que seja simultaneamente tecnicamente eficiente, economicamente viável e operacionalmente sustentável a longo prazo em comunidades vulneráveis. A metodologia adotada para a elaboração do projeto combina a pesquisa bibliográfica (Capítulo 2) com o desenvolvimento de uma proposta estruturada (Capítulo 4), característica da Engenharia de Produção, envolvendo desde o diagnóstico e parcerias até a implementação e acompanhamento comunitário. Para ancorar esta proposta em um contexto prático e de escala comprovada, este trabalho utiliza como benchmark de viabilidade de economia circular o bem-sucedido caso da planta de biometano do Aterro Sanitário de Seropédica (RJ), adaptando seus princípios de valorização energética para uma solução descentralizada e focada no esgoto comunitário (Seropédica Online, 2023; O Dia, 2023). Espera-se demonstrar a viabilidade técnica, econômica e gerencial da proposta como um caminho para mitigar os problemas de saneamento através de um modelo de gestão replicável.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Saneamento Básico: Conceitos e Desafios

O saneamento básico, compreendendo o abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais, é um determinante crucial da saúde pública e da qualidade ambiental (Cardoso, 2024). Apesar dos avanços legais, o Brasil ainda enfrenta disparidades significativas no acesso a esses serviços (Cardoso, 2024), com cerca de 50 milhões de brasileiros residindo em domicílios com acesso precário ao esgotamento sanitário, segundo dados do Censo Demográfico de 2022 (Vieira et al., 2024).

No estado do Rio de Janeiro, a situação é particularmente desafiadora, com infraestrutura insuficiente de coleta e tratamento de esgoto (Cardoso, 2024). A Baixada Fluminense, por exemplo, enfrenta graves problemas de poluição hídrica, como a contaminação do sistema Guandu por esgoto e efluentes industriais, que resultou em crises de qualidade da água, como a da geosmina em 2020 e 2021 (CECIERJ, 2024). Essa região é frequentemente considerada uma “Zona de Sacrifício”, onde os riscos e danos ambientais, incluindo a falta de saneamento e drenagem eficiente, afetam desproporcionalmente as populações mais vulneráveis que residem em áreas marginalizadas (CECIERJ, 2024).

A carência de saneamento adequado tem implicações diretas na saúde pública, facilitando a transmissão de diversas doenças de veiculação hídrica e relacionadas à falta de higiene (Cardoso, 2024). Entre as principais enfermidades associadas estão a diarreia (por *Escherichia coli*, disenteria bacteriana), febre tifoide, cólera, leptospirose, hepatite A, verminoses (ascariídase, anquilostomíase), giardíase e arboviroses como dengue e zika, cujos vetores podem se proliferar em ambientes com água parada e contaminada (Habitat Brasil, [s.d.]). Além dos impactos na saúde, o lançamento de esgoto não tratado na natureza causa poluição do solo, comprometimento de fontes de água doce e danos aos ecossistemas aquáticos (Projesan, [s.d.]). Portanto, o fortalecimento da infraestrutura de saneamento no Rio de Janeiro é vital para a saúde da população e a proteção ambiental (WHO, 2010).

Tratamento de Esgoto: Tecnologias Convencionais e Alternativas

Tradicionalmente, o tratamento de esgoto em áreas urbanas consolidadas baseia-se em sistemas centralizados, que coletam o efluente através de extensas redes de tubulações e o transportam para grandes Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (Sha et al., 2024). No entanto, a implementação desses sistemas em áreas rurais, periurbanas ou de ocupação dispersa é frequentemente inviabilizada pelos altos custos de implantação das redes coletores (Mesquita, 2019).

Diante dessa realidade, os sistemas descentralizados de tratamento surgem como alternativas relevantes e eficazes (Mesquita, 2019). Esses sistemas tratam o esgoto próximo ao ponto de geração e geralmente apresentam menor custo de implantação e operação, menor requisito de energia e área, além de simplicidade

operacional (Massoud; Tarhini; Nasr, 2009; Vieira *et al.*, 2024). A abordagem descentralizada permite adequar a tecnologia às necessidades específicas de cada localidade (Muzioreva; Gumbo, 2024).

Diversas tecnologias podem ser aplicadas tanto em sistemas centralizados quanto descentralizados, buscando maior eficiência e sustentabilidade. Exemplos incluem processos avançados como biomassa aeróbica granular (Nereda®), reatores de leito móvel com biofilme (MBBR) e o uso de membranas filtrantes, que podem reduzir a área necessária para as estações de tratamento (BRK Ambiental, [s.d.]-a). Soluções baseadas na natureza (*Nature - Based Solutions* - NBS), como os *wetlands* construídos (jardins filtrantes), também são alternativas sustentáveis, especialmente para comunidades vulneráveis, utilizando processos naturais para tratar o esgoto com baixo custo e simplicidade (Vieira *et al.*, 2024; Muzioreva; Gumbo, 2024). Entre as tecnologias biológicas, a digestão anaeróbia se destaca como um processo eficiente para estabilizar a matéria orgânica e gerar subprodutos valiosos (Mixtura, 2023).

Biodigestores Anaeróbios

A digestão anaeróbia é um processo biológico onde microrganismos, na ausência de oxigênio, decompõem a matéria orgânica complexa presente no esgoto ou outros resíduos (Mixtura, 2023; Chernicharo, 1997). Esse processo ocorre em equipamentos denominados biodigestores ou reatores anaeróbios. No Brasil, devido às condições climáticas favoráveis (temperaturas mais elevadas), o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB ou RAFA) é amplamente difundido para tratamento de esgoto (Chernicharo, 1997; Renato *et al.*, 2024).

Existem diferentes tipos de biodigestores, classificados geralmente pela forma de operação: contínuos (com alimentação e retirada de efluente constantes, como modelos tubulares) ou em batelada (onde o reator é carregado, fechado durante o processo e depois descarregado) (Chernicharo, 1997). Modelos comerciais pré-fabricados em polietileno, como os da Acqualimp, Fortlev e Tecnipar, também estão disponíveis para aplicações residenciais ou de pequeno porte, oferecendo praticidade na instalação (Leroy Merlin, 2021). O polipropileno também é citado como material vantajoso para tanques devido à sua resistência (Mixtura, 2023).

A eficiência do processo de digestão anaeróbia depende de fatores como temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica, alcalinidade e mistura adequada do substrato para garantir o contato entre os microrganismos e a matéria orgânica (Pires, 2019; Mixtura, 2023). A avaliação da eficiência geralmente envolve o monitoramento da remoção de matéria orgânica (medida como Demanda Química de Oxigênio - DQO e Sólidos Voláteis - SV) e da estabilidade do processo (pH, alcalinidade, ácidos graxos voláteis - AGV's) (Pires, 2019).

Os principais produtos da biodigestão anaeróbia de esgoto são:

1. Biogás: Uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4 , tipicamente 50-75%) e dióxido de carbono (CO_2), com traços de outros gases como gás sulfídrico (H_2S) (Chernicharo, 1997; BGS Equipamentos, [s.d.]). O

biogás é uma fonte de energia renovável que pode ser usada para cozimento, aquecimento ou geração de eletricidade (Mixtura, 2023; BGS Equipamentos, [s.d.]). O potencial energético é significativo; estima-se que o biogás do esgoto no estado de São Paulo poderia suprir cerca de 10% do consumo atual de gás natural (Renato et al., 2024). A produção de biogás inicia-se tipicamente entre 15 a 30 dias após a alimentação do biodigestor (BGS Equipamentos, [s.d.]).

2. Biofertilizante (ou digerido): O efluente líquido e/ou lodo estabilizado que resta após a digestão. É rico em nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio) e pode ser utilizado como fertilizante agrícola, substituindo ou complementando adubos químicos (Chernicharo, 1997).

Engenharia de Produção e Projetos de Saneamento Sustentável

A Engenharia de Produção possui ferramentas e conhecimentos aplicáveis à gestão e otimização de projetos e operações no setor de saneamento. Profissionais desta área estão aptos a gerenciar equipes e processos em diversos setores, incluindo a gestão do saneamento básico (BRK Ambiental, [s.d.]-b). A contribuição da Engenharia de Produção pode ocorrer em várias frentes, como apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Contribuições da Engenharia de Produção.

Ferramenta/Conceito da Eng. de Produção	Aplicação no Projeto
Gestão de Projetos	Aplicação de metodologias para planejamento, execução, monitoramento e controle de projetos de implantação de sistemas de saneamento, como a criação da Estrutura Analítica do Projeto (EAP) vista na proposta base deste trabalho.
Otimização de Processos	Análise e melhoria dos processos operacionais das estações de tratamento ou sistemas descentralizados, buscando maior eficiência, redução de custos e desperdícios. Ferramentas como a telemetria e a automação podem ser usadas para monitoramento em tempo real, detecção de vazamentos, controle de bombas e otimização do uso de energia e recursos hídricos (DROME, 2024).
Gestão da Cadeia de Suprimentos	Planejamento e controle dos fluxos de materiais (insumos químicos, peças de reposição) e informações necessárias para a operação e manutenção dos sistemas.
Gestão da Qualidade	Implementação de sistemas para garantir que a qualidade da água tratada e do efluente final atenda aos padrões regulatórios e às necessidades da comunidade.

Ferramenta/Conceito da Eng. de Produção	Aplicação no Projeto
Sustentabilidade e Economia Circular	Integração de práticas sustentáveis no projeto e operação, como a valorização de subprodutos (biogás, biofertilizante), a minimização do impacto ambiental e a análise do ciclo de vida das tecnologias (SHA <i>et al.</i> , 2024). A Engenharia de Produção pode auxiliar na concepção de sistemas que reciclam nutrientes e energia contidos nos resíduos (Susana, [s.d.]).
Melhoria Contínua (Lean Management)	Aplicação de princípios Lean, como identificar valor para o “cliente” (a comunidade atendida), mapear o fluxo de valor (o processo de tratamento), criar fluxo contínuo, implementar sistemas “puxados” (produzir/tratar conforme a demanda) e buscar a perfeição através da melhoria contínua, pode levar a serviços de saneamento mais eficientes e eficazes (AHDB, [s.d.]).

Contudo, a aplicação prática desses conceitos em saneamento descentralizado enfrenta desafios de sustentabilidade a longo prazo, principalmente na gestão operacional (OPEX) e na garantia do engajamento comunitário, fatores cruciais para a viabilidade econômica de longo prazo (Silva *et al.*, 2024). O sucesso de um projeto piloto não depende apenas da eficiência técnica do biodigestor, mas da criação de um modelo de negócio social que viabilize sua manutenção. O caso do Aterro de Seropédica, embora em macro escala, demonstra que a viabilidade econômica é alcançada através da comercialização de subprodutos (biometano) para indústrias (Seropédica Online, 2023), um princípio que precisa ser adaptado para a microescala comunitária.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Este estudo configura-se como uma pesquisa aplicada, de natureza propositiva, utilizando abordagens qualitativa e quantitativa para desenvolver um plano de projeto para a criação e manutenção de biodigestores. A metodologia empregada na elaboração desta proposta envolveu as seguintes etapas:

Pesquisa Bibliográfica

Realizou-se um levantamento e análise crítica da literatura científica e técnica pertinente aos temas de saneamento básico, tecnologias de tratamento de esgoto (com foco em biodigestão anaeróbia) e aplicação de conceitos de engenharia de produção na gestão de projetos de saneamento sustentável. Foram consultados artigos científicos, normas técnicas relevantes (por exemplo, ABNT, 1996), dados

de sistemas de informação oficiais (como Brasil, 2021) e publicações que discutem o contexto do saneamento no Rio de Janeiro e modelos de parceria (como Heller; Castro, 2007; Instituto Trata Brasil, 2024). Esta etapa fundamentou a contextualização do problema e a base teórica do trabalho.

Estruturação da Proposta

Com base no referencial teórico levantado e nos princípios da engenharia de produção, foi delineado um plano de projeto detalhado. Este plano abrange desde a identificação de áreas prioritárias e o estabelecimento de parcerias até as fases de desenvolvimento técnico, construção, testes, implementação e acompanhamento contínuo dos sistemas de biodigestores. A proposta foi estruturada em fases, com atividades, cronograma e estimativas de custo definidas, visando apresentar um modelo de intervenção claro e gerenciável.

DETALHAMENTO

Esta seção detalha a proposta para a implementação do projeto de criação e manutenção de biodigestores como solução para o tratamento de esgoto em comunidades carentes.

Planejamento do Projeto

Propõe-se a identificação inicial de comunidades no estado do Rio de Janeiro com os maiores déficits de esgotamento sanitário, utilizando como base os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (Brasil, 2021) e indicadores epidemiológicos locais. Áreas com desafios reconhecidos, como a Baixada Fluminense (Instituto Trata Brasil, 2024), podem ser consideradas prioritárias na fase inicial.

Parcerias e Financiamento

A viabilização do projeto prevê a busca ativa por parcerias estratégicas com Organizações Não Governamentais (ONGs) atuantes nas comunidades, empresas privadas (via responsabilidade social ou modelos de negócio associados) e órgãos públicos. Modelos como Parcerias Público-Privadas (PPPs), conforme discutido por Heller e Castro (2007), podem ser explorados, além da captação de recursos via editais de fomento e doações.

Cronograma e Metodologia

Sugere-se a adoção de uma metodologia de gestão de projetos ágil, com entregas incrementais (sprints), permitindo adaptações e aprendizados ao longo do processo. Estima-se uma duração total de 9 meses para a implementação das unidades piloto, conforme detalhado na tabela 3.

Capacitação da Equipe

É fundamental a formação de uma equipe técnica multidisciplinar, com treinamento específico em tecnologia de biodigestores (instalação, operação, manutenção), normas de segurança e uso adequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs).

Estimativa de Custos de Implantação (CAPEX)

A estimativa de custos para a fase piloto (10 unidades) é um dos pilares da Engenharia de Produção, exigindo uma análise de Custo de Implantação (CAPEX). O valor total de R\$4.700.000,00, detalhado na tabela 2, é uma estimativa de ordem de grandeza. Para este estudo, propõe-se um detalhamento metodológico inspirado em análises de viabilidade econômica, como a de Silva *et al.* (2024), que, embora focada no agronegócio, utiliza os mesmos princípios de análise de custo-benefício (CAPEX/OPEX) aqui propostos.

O custo de R\$3.000.000,00 para “Desenvolvimento” (construção das 10 unidades) resulta em R\$300.000,00 por unidade piloto. Este valor é compatível com sistemas comunitários de médio porte (ex: atendendo entre 50-100 residências), e sua estrutura analítica de custos (EAC) se baseia na tabela 2.

Tabela 2 - Estrutura Analítica de Custos (EAC) das Unidades Piloto de Biodigestores.

Componente da EAC	Percentual (%)	Descrição dos Custos Associados
Equipamentos	45%	Inclui os reatores (ex: PEAD ou fibra de vidro), gasômetros, sistemas de purificação de biogás (filtro de H ₂ S) e bombas, caso necessárias.
Obras Civis	30%	Escavação, fundações, caixas de passagem e instalação de tubulações de coleta.
Engenharia e Licenciamento	15%	Projetos, licenças ambientais e taxas.
Contingência e Capital de Giro	10%	Reserva para custos não previstos no projeto e capital inicial para o início da operação.
Total	100%	Custo Total Estimado por Unidade (R\$ 300.000,00)

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A fase de “Planejamento” (R\$500.000,00) foca no mapeamento detalhado e seleção de áreas, e as fases de “Teste” e “Liberação” (totalizando R\$ 1.200.000,00) cobrem os custos de comissionamento, aquisição de sensores e o intensivo programa de capacitação comunitária, baseado na tabela 3.

Tabela 3 - Cronograma e Distribuição dos Custos por Fase do Projeto Piloto.

Fase	Duração	Custo Estimado
Planejamento	1 mês	R\$ 500.000,00
Desenvolvimento	5 meses	R\$ 3.000.000,00
Teste e Avaliação	1 mês	R\$ 500.000,00
Liberação	2 meses	R\$ 700.000,00
Total Geral	9 meses	R\$ 4.700.000,00

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Planejamento do Projeto

Projeto Conceitual e Preliminar

Nesta etapa, define-se o design específico dos biodigestores a serem implantados, considerando as características locais (vazão de esgoto, espaço disponível, tipo de solo). Realiza-se o dimensionamento adequado e a seleção de materiais (por exemplo, concreto estrutural, polietileno de alta densidade - PEAD, tubulações de PVC), seguida por análises de viabilidade técnica e econômica.

Materiais e Componentes

Detalhamento dos materiais necessários para a estrutura dos biodigestores, sistemas de alimentação e descarga, tubulações, válvulas, além de equipamentos de apoio como bombas (se necessárias), gasômetros para armazenamento de biogás, medidores de vazão e pressão, e os EPIs para as equipes de construção e operação.

Construção

Fase de execução da infraestrutura civil (escavações, fundações, montagem ou construção dos tanques), instalação das tubulações e equipamentos auxiliares. Prevê-se a construção inicial de 10 unidades piloto para validação do modelo em campo. Testes hidráulicos e de estanqueidade são realizados antes do início da operação.

Teste e Avaliação

Monitoramento Técnico

Após o início da operação (startup), realiza-se o acompanhamento contínuo do desempenho dos biodigestores. Monitoram-se parâmetros físico-químicos e biológicos do afluente e efluente (DQO, DBO, sólidos, pH, nutrientes) para avaliar a eficiência de remoção de poluentes, além da produção e composição do biogás gerado.

Avaliação Comunitária

Aplicação de instrumentos (questionários, entrevistas, grupos focais) para coletar a percepção da comunidade beneficiada sobre o funcionamento do sistema, os benefícios percebidos (redução de odor, melhoria da paisagem etc.) e eventuais dificuldades.

Ajustes

Com base nos resultados do monitoramento técnico e da avaliação comunitária, realizam-se os ajustes necessários no projeto ou na operação dos sistemas para otimizar o desempenho e a aceitação local.

Liberação e Acompanhamento

Entrega e Treinamento Comunitário

Realização de evento de entrega oficial das unidades à comunidade, associado a um programa de treinamento sobre o funcionamento básico do sistema, os cuidados necessários e as responsabilidades dos usuários. Propõe-se a formação de comitês locais de acompanhamento.

Capacitação Local

Formação específica de moradores locais selecionados para atuarem como operadores e mantenedores básicos dos sistemas, com distribuição de manuais de operação simplificados e contatos de suporte técnico.

Monitoramento Contínuo

Estabelecimento de um programa de visitas periódicas da equipe técnica para verificar o funcionamento dos biodigestores, coletar dados de operação e avaliar os impactos de longo prazo na saúde pública e nas condições ambientais da comunidade.

Análise de Viabilidade Operacional e Sustentabilidade (OPEX)

A sustentabilidade do projeto, cerne da Engenharia de Produção, depende da cobertura dos Custos Operacionais (OPEX) e da criação de valor (economia circular). O maior risco de projetos de saneamento descentralizados é o abandono por falha na manutenção.

Modelo de Gestão e OPEX

Propõe-se um modelo de gestão mista, alinhado com as parcerias: 1. Comitê Local: Formado por moradores capacitados, responsáveis pela operação diária (verificação visual, pequenas desobstruções) e gestão do uso dos subprodutos. 2. Equipe Técnica (via Parceria/PPP): Responsável pelo monitoramento técnico,

manutenções preventivas (análises de efluente, remoção de lodo excedente) e corretivas.

O OPEX (custo da equipe técnica, insumos de laboratório, peças de reposição) é o principal gargalo. A viabilidade do projeto depende da sua cobertura.

Geração de Valor (Biogás e Biofertilizante) como Cobertura de OPEX

O modelo de negócio deve ser baseado na valorização dos subprodutos. O desafio é adaptar o modelo de Seropédica à escala comunitária:

Benchmark (Seropédica): Em macro escala, o aterro gera receita vendendo biometano para indústrias (Seropédica Online, 2023) e créditos de carbono, justificando ampliações (O DIA, 2023).

Proposta (Microescala): Na escala comunitária, a “receita” é a economia direta gerada para as famílias. O biogás pode ser purificado e usado em cozinhas comunitárias (substituindo o GLP) e o biofertilizante em hortas locais. Esta economia tangível aumenta a “renda disponível” da comunidade e serve como principal justificativa para a manutenção do sistema, alinhando-se aos estudos de viabilidade econômica que demonstram o retorno sobre o investimento (Silva *et al.*, 2024).

Plano de Operação Padrão (POP)

Para garantir a execução, a fase de “Liberação” deve entregar um Plano de Operação Padrão (POP) visual (baseado nos princípios “Lean”) ao comitê local, contendo:

Checklist Diário: Nível das caixas, presença de odores, funcionamento de bombas (se houver).

Checklist Semanal: Verificação de gasômetro, purga de filtros.

Fluxo de Acionamento (Quem chamar): “Se [problema], então [ação / contato da Equipe Técnica]”.

Ressalta-se que as estimativas de custos (CAPEX e OPEX) apresentadas neste estudo são ordens de grandeza baseadas em referências de mercado e metodologias de viabilidade (Silva *et al.*, 2024), servindo como uma base para o projeto piloto. Valores reais dependerão de cotações específicas no momento da implantação, podendo apresentar variações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de criação e manutenção de biodigestores para tratamento de esgoto, detalhada neste artigo, emerge como uma solução tecnicamente viável e socialmente relevante para enfrentar o desafio persistente do saneamento básico inadequado em áreas carentes, como observado no Rio de Janeiro (Brasil, 2021). A aplicação dos princípios da Engenharia de Produção na estruturação do projeto,

com fases definidas, planejamento de recursos, cronograma e foco na gestão de processos, confere clareza e gerenciabilidade à iniciativa.

Os benefícios esperados vão além da melhoria direta das condições sanitárias e da consequente redução de doenças de veiculação hídrica. A proposta incorpora a valorização de subprodutos, biogás como fonte de energia local e biofertilizante para uso agrícola ou em jardins comunitários, alinhando-se a preceitos de sustentabilidade e economia circular. Adicionalmente, o projeto visa promover o desenvolvimento local por meio da capacitação da comunidade e do potencial geração de emprego e renda, além de fortalecer o tecido social através da criação de parcerias entre diferentes atores (governo, empresas, ONGs, comunidade), um aspecto relevante para a sustentabilidade de intervenções em saneamento (Heller; Castro, 2007).

Conclui-se que a implementação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto via biodigestores, quando bem planejada e gerenciada, representa uma estratégia promissora para avançar na universalização do saneamento de forma sustentável. O modelo aqui proposto, embora demande validação e adaptação em campo, oferece um caminho com potencial de replicabilidade para outras comunidades com características semelhantes no Brasil.

Além disso, para além da viabilidade técnica, o sucesso da implementação depende de um modelo de gestão operacional e financeira robusto, baseado nos princípios da Engenharia de Produção. A análise de CAPEX/OPEX e a criação de um modelo de negócio social baseado na economia circular (inspirado em *benchmarks* como Seropédica) são a chave para a sustentabilidade e replicabilidade do projeto.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a realização de análises econômicas aprofundadas, incluindo custos de operação e manutenção a longo prazo, estudos comparativos entre diferentes modelos de biodigestores em condições reais de uso, e o desenvolvimento de arranjos institucionais e modelos de negócio que garantam a sustentabilidade financeira e operacional das instalações. A implementação deste modelo contribui diretamente para o avanço das Metas de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especificamente o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10520: Informação e documentação – Citações em documentos.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12236: Projetos de sistemas de esgotamento sanitário – Procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AHDB. The 5 principles of lean management. [S. I.]: AHDB, [s.d.]. Disponível em: <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/the-5-principles-of-lean-management>. Acesso em: 14 abr. 2025.

BGS EQUIPAMENTOS. **Perguntas frequentes sobre biodigestor e biogás.** [S. I.]: BGS Equipamentos, [s.d.]. Disponível em: <https://www.bgsequipamentos.com.br/perguntas-frequentes/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Secretaria Nacional de Saneamento.** Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico Temático – Serviços de Água e Esgotos – 2020. Brasília, DF: SNS/MDR, 2021. Disponível em: <https://www.snis.gov.br>. Acesso em: 25 out. 2025.

BRK AMBIENTAL. **5 tecnologias que estão revolucionando o saneamento no Brasil.** Blog BRK Ambiental, [s.l.], [s.d.]-a. Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/saneamento-no-brasil/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

BRK AMBIENTAL. **Saneamento: como as engenharias podem ajudar esse setor.** Blog BRK Ambiental, [s.l.], [s.d.]-b. Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/engenharias-e-saneamento/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CARDOSO, J. R. **A falta de infraestrutura dentro do estado do Rio de Janeiro com escassez de saneamento adequado e sua relação com o meio ambiente: uma revisão narrativa da literatura.** Revista FT, v. 28, n. 138, p. 1–20, set. 2024.

CECIERJ. Fundação Centro de Ciências e Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro. **Cartilha sobre saneamento básico na Baixada Fluminense.** Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2024. Disponível em: <https://www.cecierj.edu.br/wp-content/uploads/2024/12/Cartilha-O-Basico-compressed.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025. Reatores anaeróbios

CHERNICHARO, C. A. L.. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1997. 245 p.

DROME. **Telemetria no saneamento: otimização e eficiência na gestão de água e esgoto.** Drome, São Paulo, 27 ago. 2024. Disponível em: <https://drome.com.br/telemetria-no-saneamento-otimizacao-e-eficiencia-na-gestao-de-agua-e-esgoto/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

HABITAT PARA A HUMANIDADE BRASIL. **Doenças causadas pela falta de acesso ao saneamento básico.** São Paulo: Habitat Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://habitatbrasil.org.br/doencas-falta-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

HELLER, L.; CASTRO, J. E. **Parcerias público-privadas em saneamento básico: apontamentos e questões para o debate.** Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 41, n. 2, p. 285–306, mar./abr. 2007.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Avanços do novo marco legal do saneamento básico 2024 (SNIS 2022): Os desafios para a Baixada Fluminense.** São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br>. Acesso em: 25 out. 2025.

MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NASR, J. A. **Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries.** Journal of Environmental Management, v. 90, n. 1, p. 652-659, 2009.

MESQUITA, T. C. R. **Tratamento descentralizado de esgotos sanitários em sistemas constituídos por tanques sépticos e filtros anaeróbios.** 2019. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

MIXTURA. Digestores anaeróbios: eficiência e sustentabilidade no tratamento. Mixtura, Curitiba, 6 set. 2023. Disponível em: <https://mixtura.ind.br/digestores-anaerobios/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MUZIOREVA, H.; GUMBO, T. **Decentralized sanitation alternatives in cities of the global south: A case of constructed wetlands in Bulawayo, Zimbabwe.** Journal of Infrastructure and Planning Development, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2024.

LEROY MERLIN. **Biodigestor: o que é, quanto custa, qual o melhor?** Blog Leroy Merlin, São Paulo, 18 jun. 2021. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/dicas/o-que-e-biodigestor>. Acesso em: 14 abr. 2025.

O DIA. **Aterro sanitário de Seropédica passa por obras de ampliação.** O Dia, Rio de Janeiro, 15 ago. 2023. Disponível em: <https://odia.ig.com.br/seropedica/2023/08/6692997-aterro-sanitario-de-seropedica-passa-por-obras-de-ampliacao.html>. Acesso em: 25 out. 2025.

PIRES, R. B. **Eficiência de biodigestor no tratamento de resíduos alimentares.** 2019. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/43400/1/PIRES%20Rachel%20Barros.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PROJESAN. **3 challenges to improve the Brazilian basic sanitation sector.** Projesan, [S. l.], [s.d.]; postado em 13 nov. 2024]. Disponível em: <https://www.projesan.com/en/blog/3-challenges-to-improve-the-brazilian-basic-sanitation-sector>. Acesso em: 14 abr. 2025.

RENATO, N. S.; DE OLIVEIRA, A. C. L.; ERVILHA, A. M. T.; ANTONIAZZI, S. F.; MOLTÓ, J.; CONESA, J. O.; BORGES, A. C. **Replacing natural gas with biomethane from sewage treatment: optimizing the potential in São Paulo State, Brazil.** Energies, v. 17, n. 7, p. 1657, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1657>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SEROPÉDICA ONLINE. **Seropédica: Gás Verde vai fornecer biometano para empresa de setor metalúrgico.** Seropédica Online, Seropédica, 10 out. 2023. Disponível em: <https://seropedicaonline.com/noticias/seropedica-gas-verde-vai-fornecer-biometano-para-empresa-de-setor-metalurgico/>. Acesso em: 25 out. 2025.

SHA, C.; SHEN, S.; ZHANG, J.; ZHOU, C.; LU, X.; ZHANG, H. **A review of strategies and technologies for sustainable decentralized wastewater**

treatment. Water, v. 16, n. 20, p. 3003, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/20/3003>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA, C. E. et al. **Viabilidade econômica da implantação de biodigestores anaeróbios em uma propriedade rural de gado de corte em ciclo completo no município de Itapetininga/SP.** Revista Pesquisa e Panorama Científico, [S. I.], v. 12, n. 1, 2024.

SUSANA. Sustainable Sanitation Alliance. Project database. [S. I.]: SuSanA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.susana.org/knowledge-hub/projects>. Acesso em: 14 abr. 2025.

VIEIRA, P. S.; VILLANOVA, L. B.; GOMES, C.; MENDES, R. M.; FILHO, M. V. **Nature-based solutions and the challenge of basic sanitation in favelas and urban communities: an analysis of the Jardim Nova Esperança favela in São José dos Campos-SP.** ARAC – Direitos Humanos em Revista, v. 14, n. 1, p. 1–20, 2024.

WHO. World Health Organization; UNICEF. **Progress on sanitation and drinking-water: 2010 update.** Geneva: WHO, 2010. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241563956>. Acesso em: 8 nov. 2025.