

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO LODO DE ESGOTO POR DIGESTÃO ANAERÓBIA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DE ARACAJU (SE), BRASIL

Hellen Karine Sales dos Santos; Daniel Moureira Fontes Lima; Ludmilson Abritta Mendes; Vania Elisabete Schneider; Juliano Rodrigues Gimenez

Resumo: A crescente geração de lodo em estações de tratamento de esgoto (ETEs) tem intensificado a necessidade de estratégias que integrem sua gestão sustentável à recuperação de recursos. Embora a digestão anaeróbia seja uma tecnologia consolidada para a estabilização do lodo e a produção de biogás, sua implementação depende da integração entre a caracterização do resíduo, o planejamento operacional e o dimensionamento de sistemas compatíveis com as condições locais. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de recuperação energética do lodo gerado nas principais ETEs da Região Metropolitana de Aracaju (SE), por meio da proposição e do dimensionamento preliminar de biodigestores anaeróbios sob a perspectiva da Economia Circular. A metodologia integrou dados operacionais das estações, a caracterização físico-química do lodo, a definição de dois cenários de implantação, o dimensionamento preliminar dos biodigestores e a estimativa da produção potencial de metano, biogás e do potencial energético bruto do biogás, com base em modelos consolidados da literatura. Os resultados evidenciaram que ambos os cenários apresentam condições favoráveis à recuperação energética do lodo, sendo as diferenças observadas diretamente relacionadas às características operacionais das ETEs, à produção de lodo e à disponibilidade de sólidos voláteis. O estudo demonstra que a recuperação energética depende da integração entre a caracterização do lodo, o planejamento dos cenários de implantação e o dimensionamento dos biodigestores, constituindo uma estratégia tecnicamente consistente para a recuperação de recursos e para a incorporação dos princípios da Economia Circular no planejamento de sistemas de saneamento.

Palavras-chave: lodo de esgoto; digestão anaeróbia; recuperação energética; biogás; economia circular.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

ENERGY RECOVERY FROM SEWAGE SLUDGE THROUGH ANAEROBIC DIGESTION WITHIN A CIRCULAR ECONOMY FRAMEWORK: A CASE STUDY IN THE METROPOLITAN REGION OF ARACAJU, BRAZIL

Abstract: The increasing generation of sewage sludge in wastewater treatment plants (WWTPs) has intensified the need for strategies that integrate sustainable sludge management with resource recovery. Although anaerobic digestion is a well-established technology for sludge stabilization and biogas production, its implementation depends on the integration of sludge characterization, operational planning, and engineering design tailored to local conditions. This study aimed to evaluate the energy recovery potential of sewage sludge generated at the main wastewater treatment plants in the Metropolitan Region of Aracaju, northeastern Brazil, by proposing and preliminarily designing anaerobic biodigesters within a Circular Economy framework. The methodology integrated operational data from the treatment plants, physicochemical sludge characterization, the definition of two implementation scenarios, preliminary biodigester design, and the estimation of potential methane production, biogas production, and the gross energy potential of biogas using established models reported in the literature. The results demonstrated that both implementation scenarios present favorable conditions for sewage sludge energy recovery, with the observed differences being directly associated with the operational characteristics of the wastewater treatment plants, sludge production, and volatile solids availability. The study demonstrates that energy recovery depends on integrating sludge characterization, implementation planning, and biodigester design, providing a technically consistent strategy for resource recovery and supporting the incorporation of Circular Economy principles into wastewater management systems.

Keywords: sewage sludge; anaerobic digestion; energy recovery; biogas; Circular Economy.

1. INTRODUÇÃO

A ampliação da cobertura dos serviços de coleta e tratamento de esgoto constitui uma das principais estratégias para a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental. Entretanto, o aumento da capacidade instalada das estações de tratamento de esgoto (ETEs) resulta na geração crescente de lodo de esgoto, subproduto cujo gerenciamento representa um dos maiores desafios operacionais e econômicos desses sistemas. Estima-se que o manejo do lodo represente uma parcela significativa dos custos operacionais das ETEs, o que exige soluções que conciliem segurança sanitária, viabilidade técnica e sustentabilidade ambiental (Andreoli; von Sperling; Fernandes, 2014; Tonetti et al., 2018).

Tradicionalmente, o lodo tem sido destinado à estabilização, à desidratação e à disposição final. Entretanto, sua elevada concentração de matéria orgânica confere elevado potencial para recuperação

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

de recursos, especialmente na forma de energia renovável por meio da digestão anaeróbia. Essa tecnologia encontra-se amplamente consolidada para a estabilização do lodo, a redução da carga orgânica e a produção de biogás, possibilitando simultaneamente a redução do volume de resíduos destinados à disposição final, a geração de energia renovável e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Appels et al., 2008; Chernicharo, 2007; Metcalf & Eddy, 2016).

A recuperação energética do lodo insere-se no paradigma da Economia Circular, que propõe substituir modelos lineares de produção e consumo por sistemas capazes de manter materiais, energia e recursos em circulação por mais tempo possível (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017; Korhonen et al., 2018). No setor de saneamento, essa abordagem impulsiona a transformação das ETEs, de unidades destinadas exclusivamente ao tratamento de efluentes, em infraestruturas voltadas à recuperação de água, nutrientes e energia, fortalecendo a sustentabilidade ambiental, a eficiência operacional e a transição energética. Sob essa perspectiva, o aproveitamento energético do lodo deixa de ser apenas uma alternativa tecnológica e passa a constituir uma estratégia de recuperação de recursos alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aos ODS 6 (Água Potável e Saneamento), 7 (Energia Limpa e Acessível), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança do Clima).

Apesar dos avanços observados internacionalmente, a recuperação energética do lodo ainda é incipiente em grande parte das estações de tratamento de esgoto brasileiras. Na Região Metropolitana de Aracaju (SE), o lodo gerado nas ETEs é submetido à desidratação, estabilização e disposição final, inexistindo sistemas implantados para seu aproveitamento energético. Além disso, são escassos os estudos que integrem a caracterização do lodo, a estimativa de seu potencial energético e o dimensionamento preliminar de sistemas de digestão anaeróbia aplicados às condições operacionais locais, o que limita o planejamento de estratégias voltadas à recuperação de recursos e à implementação de sistemas de recuperação energética.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de recuperação energética do lodo gerado nas principais estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de Aracaju, por meio da caracterização do lodo, da proposição e do dimensionamento preliminar de biodigestores anaeróbios, sob a perspectiva da Economia Circular.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

O delineamento metodológico foi estruturado para integrar a caracterização do lodo, o planejamento dos cenários de implantação e o dimensionamento preliminar de biodigestores, permitindo avaliar o potencial de recuperação energética do lodo gerado nas principais estações de tratamento de esgoto (ETEs) da Região Metropolitana de Aracaju (RMA), sob a perspectiva da Economia Circular.

A área de estudo compreende a Região Metropolitana de Aracaju, localizada no estado de Sergipe, abrangendo os municípios de Aracaju, Nossa Senhora do Socorro, São Cristóvão e Barra dos Coqueiros. Foram selecionadas as principais ETEs operadas pela Companhia de Saneamento de Sergipe

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

(DESO), responsáveis pelo atendimento à maior parcela da população urbana da região e pela geração do maior volume de lodo no sistema metropolitano.

Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados dados operacionais das ETEs ERQ Sul, ERQ Oeste, ETE Barra e ETE Orlando Dantas, incluindo vazão afluente, produção de lodo, características físico-químicas e informações operacionais dos sistemas de tratamento. Esses dados serviram de base para a caracterização do lodo, a definição dos cenários de implantação, o dimensionamento preliminar dos biodigestores e a estimativa do potencial de recuperação energética.

A seleção dessas unidades permitiu avaliar diferentes condições operacionais de geração de lodo e construir cenários representativos para a Região Metropolitana de Aracaju, assegurando que as análises refletissem a realidade do sistema regional de esgotamento sanitário e fornecessem subsídios para futuras estratégias de recuperação de recursos no setor de saneamento.

Figura 1 - Estações da RMA abordadas neste estudo



Fonte: elaboração própria com base em dados fornecidos pela DESO (2025)

2.2 Estrutura metodológica

A pesquisa foi estruturada para integrar informações operacionais das ETEs, critérios consolidados de projeto de biodigestores e estimativas do potencial de recuperação energética do lodo, estabelecendo uma sequência metodológica capaz de relacionar as características do resíduo às decisões de dimensionamento e à avaliação do aproveitamento energético.

O desenvolvimento do estudo compreendeu quatro etapas principais: **(i)** levantamento e organização dos dados operacionais das ETEs; **(ii)** definição dos cenários de implantação dos biodigestores; **(iii)** dimensionamento preliminar das unidades de digestão anaeróbia; e **(iv)** estimativa da produção potencial de metano, biogás e potencial energético bruto do biogás.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



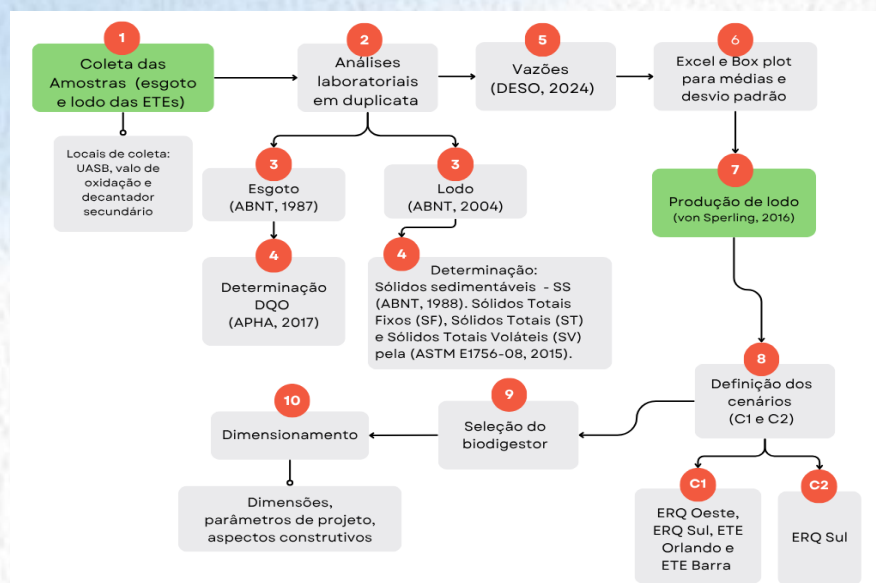
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Essa estrutura metodológica permitiu integrar a caracterização do lodo ao planejamento dos sistemas de digestão anaeróbia, assegurando coerência entre os dados utilizados, os critérios de projeto adotados e a interpretação dos resultados obtidos.

Figura 2. Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados no estudo.



Fonte: Os autores (2026).

Após a organização dos dados operacionais e da caracterização do lodo, foram definidos cenários representativos de implantação dos biodigestores, utilizados como base para o dimensionamento preliminar das unidades e para a estimativa do potencial de recuperação energética.

2.3 Definição dos cenários de implantação

Com base na distribuição espacial das ETes, na produção de lodo e nas características operacionais do sistema de esgotamento sanitário da Região Metropolitana de Aracaju, definiram-se dois cenários de implantação de biodigestores para avaliar diferentes estratégias de recuperação energética.

O **cenário BC1** contempla a implantação de um biodigestor destinado exclusivamente ao tratamento do lodo produzido na **ERQ Sul**, unidade responsável pela maior geração de lodo entre as ETes avaliadas. Essa configuração representa uma estratégia que analisa o desempenho de um sistema implantado junto à principal unidade geradora.

O **cenário BC2** considera a implantação de um sistema para tratamento conjunto do lodo proveniente da ERQ Oeste, da ETE Barra e da ETE Orlando Dantas. Esse cenário possibilita avaliar os efeitos da

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

concentração da produção de lodo no dimensionamento do biodigestor e no potencial de recuperação energética do sistema.

Em ambos os cenários foi adotado um biodigestor anaeróbio de alta taxa, em estágio único, selecionado em função de sua ampla aplicação em ETEs e de sua elevada eficiência na estabilização do lodo e na produção de biogás (Appels et al., 2008; Chernicharo, 2007).

A comparação entre os dois cenários permitiu analisar a influência da escala de operação no dimensionamento das unidades e no potencial de recuperação energética do lodo, fornecendo subsídios para a avaliação de diferentes estratégias de implantação.

2.4 Critérios de dimensionamento do biodigestor

O dimensionamento preliminar do biodigestor foi desenvolvido com base nos procedimentos propostos por Chernicharo (2007), Metcalf & Eddy (2016), Nuvolari (2011) e Qasim (1999), complementados por informações operacionais de biodigestores implantados pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), utilizadas como referência para validação dos parâmetros de projeto.

O biodigestor foi concebido como a solução tecnológica destinada a operacionalizar a recuperação energética do lodo, sendo adotada a configuração cilíndrica com fundo em tronco de cone, amplamente empregada em sistemas de digestão anaeróbia devido à facilidade de remoção do lodo digerido, à eficiência operacional e à estabilidade do processo.

Como condição inicial do projeto, considerou-se que o lodo seria previamente submetido à desidratação em leitos de secagem até atingir aproximadamente 6% de sólidos totais, admitindo-se a perda de 10% dos sólidos voláteis nessa etapa, conforme Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001). A temperatura de operação foi estabelecida com base nas condições climáticas médias observadas na Região Metropolitana de Aracaju, com dados meteorológicos do INMET (2025).

O volume útil do biodigestor, o volume do cone inferior, o volume total da unidade, o tempo de retenção de sólidos e a taxa de aplicação de sólidos voláteis foram determinados pelas Equações (1) a (6), seguindo os critérios clássicos de dimensionamento descritos na literatura.

$$V_{digestor} = Q_{lodo} \cdot TRS \quad (1)$$

Em que, TRS: tempo de retenção de sólidos (dia); $V_{digestor}$: volume do digestor (m^3); e Q_{lodo} : vazão afluente de lodo (m^3 lodo/dia).

$$V_{cone} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2)$$

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot A_{base} \cdot h_{sólidos} \quad (3)$$

$$V_{util\ cone} = V_{cone} - V_s \quad (4)$$

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

$$V_{\text{útil total}} = V_{\text{digestor}} + V_{\text{útil cone}} \quad (5)$$

$$TAsv = \frac{C_{SV} \cdot Q_{\text{lodo}}}{V_{\text{digestor}}} \quad (6)$$

Os parâmetros obtidos serviram de base para a estimativa da produção potencial de metano, biogás e energia elétrica apresentada na seção seguinte.

2.5 Estimativa do potencial de recuperação energética

A avaliação do potencial de recuperação energética foi realizada a partir da produção de lodo e da carga de sólidos voláteis determinada para cada cenário de implantação, permitindo estimar a produção potencial de metano, biogás e energia elétrica.

Inicialmente foi calculada a produção potencial de metano, utilizada como referência para a determinação da produção de biogás e da energia elétrica potencialmente recuperável. As estimativas seguiram os procedimentos descritos por Qasim (1999), Chernicharo (2007) e Metcalf & Eddy (2016), considerando uma concentração média de 60% de metano no biogás e um poder calorífico inferior de 6,0 kWh Nm⁻³.

$$V_{CH_4} = 0,35 \cdot \left[\left(E \cdot \frac{G_{SV} \cdot 0,35}{0,68} \right) - 1,42 \cdot \left(\frac{Y \cdot E \cdot G_{DBO_{ult}}}{1 + k_d \cdot \theta_c} \right) \right] \quad (7)$$

$$V_{\text{biogás}} = \frac{V_{CH_4}}{0,60} \quad (8)$$

$$Et_{\text{biogás}} = V_{\text{biogás}} \cdot PCI_{\text{biogás}} \quad (9)$$

As estimativas obtidas permitiram comparar o desempenho dos cenários propostos e avaliar, de forma preliminar, o potencial de recuperação energética do lodo gerado nas ETEs estudadas, fornecendo subsídios para a discussão da viabilidade técnica dessa estratégia sob a perspectiva da Economia Circular.

2.6 Análise dos resultados

Os resultados foram analisados comparativamente entre os cenários **BC1** e **BC2**, com o objetivo de identificar a alternativa com maior potencial de recuperação energética do lodo e avaliar a influência da escala de operação no dimensionamento dos biodigestores e na produção estimada de metano, biogás e potencial energético bruto.

A interpretação dos resultados foi fundamentada na literatura nacional e internacional sobre digestão anaeróbia, recuperação de recursos e Economia Circular, permitindo discutir as implicações técnicas da

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

recuperação energética para sistemas de saneamento e sua contribuição para a evolução das estações de tratamento de esgoto em direção ao conceito de **Water Resource Recovery Facilities (WRRFs)**.

Essa abordagem possibilitou analisar o biodigestor não apenas como uma unidade destinada à estabilização do lodo, mas também como uma solução tecnológica inserida em uma estratégia mais ampla de recuperação de recursos, eficiência energética e sustentabilidade operacional das ETEs.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do lodo e potencial para recuperação de recursos

A caracterização físico-química do lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto avaliadas evidenciou condições favoráveis à sua utilização em processos de digestão anaeróbia, indicando que o material apresenta potencial para recuperação energética. Os parâmetros determinados, especialmente a concentração de sólidos voláteis, demonstram a presença de matéria orgânica biodegradável em quantidade compatível com a produção de metano e biogás, constituindo a base técnica para o aproveitamento energético do lodo.

Tabela 1 - Parâmetros de produção de biogás, metano e energia.

Parâmetros	BC1	BC2	Unidade
Produção líquida de biogás de massa celular	50,2	41,7	kg/dia
Coefficiente de crescimento celular	0,07	0,07	kg SSV/kg DBO utilizada
Eficiência na utilização do resíduo	0,75	0,75	Adimensional
Carga de DBO última do lodo cru afluente ao digestor	1587,4	1270,7	kg/dia
Coefficiente de morte celular	0,03	0,03	dia^{-1}
Tempo de residência celular	22	20	dia
Fator teórico de conversão de 1kg de DBO ult em metano	0,35	0,35	Adimensional
Fator de conversão de DBO ult em massa celular	1,42	1,42	kg SV/kgDBOult
Poder energético do biogás	6	6	kWh/Nm ³

Fonte: Os autores

As diferenças observadas entre as unidades refletem particularidades operacionais e variações inerentes aos processos de tratamento adotados. Entretanto, em todos os casos, verificou-se a presença de fração

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

orgânica passível de degradação anaeróbia, o que indica que o lodo produzido nas ETEs estudadas representa um recurso potencial para a geração de energia renovável.

Esses resultados corroboram estudos clássicos sobre digestão anaeróbia, que reconhecem a caracterização do lodo como etapa fundamental para o planejamento de sistemas de recuperação energética, uma vez que a composição físico-química influencia diretamente a produção de metano e o desempenho dos biodigestores (Andreoli; von Sperling; Fernandes, 2014; Metcalf & Eddy, 2016).

Mais do que um diagnóstico operacional, a caracterização realizada neste estudo constitui o ponto de partida para o planejamento de estratégias de recuperação de recursos, permitindo subsidiar as etapas seguintes de dimensionamento dos biodigestores e estimativa do potencial energético.

3.2 Dimensionamento preliminar do biodigestor como estratégia para recuperação energética

Com base nas características do lodo e na produção observada em cada ETE, foram dimensionados biodigestores para os dois cenários propostos, permitindo avaliar diferentes estratégias de recuperação energética para a Região Metropolitana de Aracaju.

Tabela 2. Parâmetros de dimensionamento dos biodigestores para os cenários BC1 e BC2.

Parâmetros	Valor	Referência
Temperatura mínima (°C)	24,9	INMET (2025)
Temperatura máxima (°C)	29,4	INMET (2025)
Faixa de temperatura operacional	Mesofílica, com monitoramento	Autores (2026)
pH	7, com monitoramento	Chernicharo (2007)
TRS inicial (dia)	17	Qasim (1999), Metcalf e Eddy (2016)
Inóculo para start-up	Lodo do DAFA da ERQ Sul	Autores (2026)
Substrato	Lodo de cada cenário	Autores (2026)
Frequência de alimentação	Semicontínua: uma vez ao dia, três vezes por semana	Leite (2015)
Descarte do lodo	Automático e monitorado	Sanepar

Fonte: Autores (2026).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Mais do que definir dimensões construtivas, o dimensionamento realizado demonstra que a recuperação energética do lodo pode ser estruturada por meio de critérios técnicos consolidados, transformando um potencial identificado na caracterização do lodo em uma solução operacional passível de implantação.

Nesse contexto, o biodigestor deixa de ser apenas uma unidade destinada à estabilização do lodo e passa a representar a infraestrutura tecnológica responsável por operacionalizar a recuperação energética no sistema de tratamento.

3.3 Potencial de recuperação energética do lodo

As estimativas indicam que ambos os cenários têm potencial de recuperação energética, o que confirma a viabilidade técnica da digestão anaeróbia como estratégia de aproveitamento do lodo de esgoto. As diferenças observadas entre os cenários refletem as condições operacionais consideradas no dimensionamento dos biodigestores, evidenciando que fatores como a produção de lodo, a disponibilidade de sólidos voláteis e a configuração adotada para o tratamento influenciam diretamente a produção potencial de metano, biogás e energia elétrica.

Tabela 3. Potencial estimado de produção de metano, biogás e energia elétrica nos cenários BC1 e BC2.

Características	BC1	BC2	Unidade
Vazão de lodo	156,7	131,1	m³/dia
Carga de sólidos voláteis (Gsv)	4.072,3	3.323,9	kg SV/dia
Taxa de aplicação de sólidos voláteis (Tasv)	1,6	1,6	kg SV/m³/dia
Tempo de retenção de sólidos (TRS)	16	18	dia
Volume total	2.669,0	2.161,9	m³
Volume útil total	2.564,3	2.077,1	m³
Área superficial	314,0	254,3	m²
Diâmetro	20,0	18,0	m
Altura para acúmulo de gases	1,5	1,5	m
Altura de acúmulo de espuma	0,6	0,6	m
Altura de acúmulo de sobrenadantes	0,6	0,6	m
Altura cônica superior	1,5	1,5	m

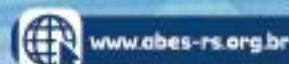
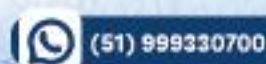
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores

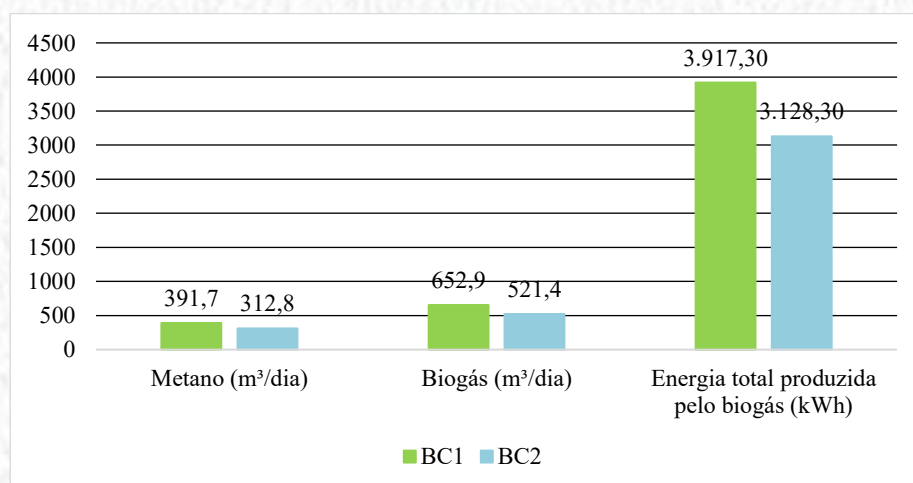


Altura cônica de fundo	1,5	1,5	m
Altura acúmulo de sólidos	1,0	1,0	m
Altura útil	8,0	8,0	m

Fonte: Autores (2026).

Os resultados demonstram que ambos os cenários apresentam potencial de recuperação energética, evidenciando a viabilidade técnica da digestão anaeróbia como estratégia para o aproveitamento do lodo de esgoto. As diferenças observadas entre os cenários refletem os critérios adotados para o dimensionamento dos biodigestores e as condições operacionais consideradas em cada configuração de implantação, o que influencia diretamente a produção estimada de metano, biogás e energia elétrica.

Figura 3. Comparação da produção estimada de metano, biogás e energia elétrica entre os cenários BC1 e BC2.



Fonte: Autores (2026).

A Figura 3 sintetiza graficamente os resultados apresentados na Tabela 3 e evidencia as diferenças entre os cenários avaliados. No cenário BC1, foram estimadas produções de 391,7 m³ d⁻¹ de metano, 652,9 m³ d⁻¹ de biogás e 3.917,3 kWh d⁻¹ de energia elétrica, enquanto no cenário BC2 foram estimadas produções de 312,8 m³ d⁻¹ de metano, 521,4 m³ d⁻¹ de biogás e 3.128,3 kWh d⁻¹ de energia elétrica. Embora apresentem diferenças quantitativas, ambos os cenários demonstram potencial de recuperação energética, indicando que a digestão anaeróbia pode ser aplicada como alternativa para o aproveitamento do lodo nas condições avaliadas.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Observa-se que, embora BC2 receba lodo proveniente da ERQ Oeste, da ETE Barra e da ETE Orlando, a produção global de BC1 é maior (Figura 3). Essa diferença é explicada pelas vazões de esgoto tratadas por cada unidade. O BC1 recebe uma vazão total de 1.098,6 m³/h, ao passo que o BC2 opera com vazão total de 403,5 m³/h, distribuída entre a ETE Barra (181,2 m³/h), ERQ Oeste (168,9 m³/h) e a ETE Orlando (54,5 m³/h). Portanto, apesar de o BC2 concentrar contribuições de três unidades distintas, a maior vazão afluente ao BC1 resulta em uma produção de lodo proporcionalmente mais elevada.

Mais do que comparar os valores estimados, os resultados evidenciam que o potencial de recuperação energética está diretamente relacionado às características operacionais do sistema, especialmente à produção de lodo, à disponibilidade de matéria orgânica biodegradável e aos critérios empregados no dimensionamento dos biodigestores. Dessa forma, a recuperação energética não deve ser interpretada apenas como consequência da adoção de uma tecnologia consolidada, mas como resultado de um processo integrado que articula a caracterização do lodo, o planejamento dos cenários de implantação e o dimensionamento das unidades de digestão anaeróbia.

Essa abordagem amplia o significado dos resultados obtidos ao demonstrar que a caracterização do lodo constitui a base para estimar seu potencial energético, enquanto o dimensionamento preliminar do biodigestor representa a etapa que transforma esse potencial em uma solução tecnicamente estruturada. Sob essa perspectiva, o biodigestor deixa de ser apenas uma unidade destinada à estabilização do lodo e passa a constituir a solução tecnológica que operacionaliza a recuperação energética, permitindo converter um subproduto do tratamento de esgoto em uma fonte potencial de energia renovável.

Assim, os resultados apresentados não apenas confirmam a viabilidade técnica da recuperação energética nos cenários avaliados, mas também demonstram que sua implementação depende da integração entre diagnóstico, planejamento e projeto. Essa interpretação estabelece a base para a discussão das implicações da recuperação energética para o saneamento sustentável, apresentada na seção seguinte.

3.4 Implicações para o saneamento sustentável

Os resultados obtidos demonstram que a recuperação energética do lodo constitui uma estratégia tecnicamente promissora para integrar o tratamento de resíduos, a produção de energia renovável e a recuperação de recursos em estações de tratamento de esgoto. Sob essa perspectiva, o biodigestor deixa de ser apenas uma unidade destinada à estabilização do lodo e passa a desempenhar um papel central como solução tecnológica capaz de operacionalizar a recuperação energética identificada nas etapas de caracterização e dimensionamento.

Essa abordagem acompanha a evolução do setor de saneamento em direção ao conceito de Water Resource Recovery Facilities (WRRFs), no qual as ETEs deixam de atuar exclusivamente como unidades de remoção de poluentes e passam a recuperar água, nutrientes e energia. Nesse contexto, a utilização do biogás para geração de energia elétrica pode contribuir para reduzir a dependência da rede convencional, ampliar a eficiência operacional e fortalecer a resiliência energética dos sistemas de tratamento.

Embora este estudo não tenha contemplado uma avaliação econômico-financeira, os resultados obtidos fornecem uma base técnica consistente para futuras análises de viabilidade, indicando que a integração

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

entre caracterização do lodo, planejamento operacional e dimensionamento de biodigestores representa uma estratégia promissora para apoiar decisões de investimento em recuperação energética.

Sob a perspectiva da Economia Circular, o estudo reforça a necessidade de substituir modelos lineares de gerenciamento do lodo por estratégias voltadas à recuperação de recursos, promovendo a reinserção da matéria orgânica e da energia nos ciclos produtivos. Essa mudança de paradigma amplia o papel das ETEs no contexto da sustentabilidade urbana e aproxima o setor das estratégias internacionais voltadas à implementação de Net Zero Wastewater Treatment Plants, nas quais a recuperação de energia e a redução das emissões de gases de efeito estufa constituem objetivos complementares.

Além dos benefícios operacionais e ambientais, essa abordagem contribui diretamente para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente dos ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança do Clima), ao integrar a recuperação de recursos, a eficiência energética e a sustentabilidade na gestão do lodo de esgoto.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que a recuperação energética do lodo pode ser tecnicamente estruturada por meio da integração entre a caracterização do lodo, o planejamento dos cenários de implantação e o dimensionamento preliminar de biodigestores anaeróbios. A aplicação dessa abordagem às principais estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de Aracaju permitiu estimar o potencial de produção de metano, biogás e energia elétrica, evidenciando que a recuperação energética constitui uma alternativa tecnicamente promissora para o aproveitamento do lodo gerado nessas unidades.

Os resultados reforçam que a digestão anaeróbia representa uma tecnologia consolidada para a recuperação energética do lodo, mas sua efetiva implementação depende da disponibilidade de informações confiáveis sobre a produção e as características do lodo, bem como da adoção de critérios técnicos de planejamento e dimensionamento compatíveis com a realidade operacional dos sistemas de esgotamento sanitário. Nesse contexto, o biodigestor constitui a solução tecnológica que operacionaliza a recuperação energética, transformando o potencial identificado na etapa de caracterização em uma estratégia aplicável à gestão sustentável das estações de tratamento de esgoto.

Sob a perspectiva da Economia Circular, o estudo reforça que o lodo de esgoto deve ser compreendido não apenas como um resíduo a ser estabilizado e adequadamente descartado, mas também como um recurso estratégico capaz de contribuir para a recuperação de energia e para a utilização mais eficiente dos recursos disponíveis. Essa abordagem amplia o papel das estações de tratamento de esgoto, aproximando-as do conceito de infraestruturas voltadas à recuperação de recursos e fortalecendo sua contribuição para a sustentabilidade ambiental e energética do setor de saneamento.

Embora o estudo tenha sido desenvolvido em nível de dimensionamento preliminar, os resultados fornecem uma base técnica consistente para futuras avaliações de viabilidade técnico-econômica, implantação de unidades piloto, otimização operacional dos biodigestores e monitoramento da produção de biogás em condições reais de operação. Esses desdobramentos poderão contribuir para consolidar estratégias de recuperação energética adaptadas às características dos sistemas brasileiros de tratamento de esgoto.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

A principal contribuição deste estudo consiste em demonstrar que a recuperação energética do lodo não depende apenas da disponibilidade de tecnologias consolidadas, como a digestão anaeróbia, mas também da integração entre a caracterização, o planejamento e o dimensionamento de sistemas capazes de transformar o potencial energético em uma solução operacional. Essa perspectiva amplia a compreensão das estações de tratamento de esgoto como infraestruturas destinadas não apenas ao controle da poluição, mas também à recuperação de recursos, contribuindo para a incorporação dos princípios da Economia Circular e para a transição do setor de saneamento em direção a sistemas mais eficientes, resilientes e sustentáveis.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos e apoio à pesquisa e à Universidade Federal de Sergipe (UFS), por meio dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Ao Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul – ISAM/UCS pelo apoio interinstitucional.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DE SERGIPE (DESO). Dados operacionais das estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de Aracaju. Aracaju, 2025.
- GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy: a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Brasília, 2025.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the Circular Economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017.
- KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*, v. 143, p. 37-46, 2018.
- METCALF & EDDY; AECOM. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- NUVOLARI, A. *Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

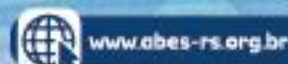
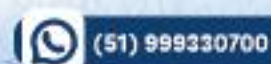
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015.

QASIM, S. R. *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.

TONETTI, A. L. et al. *Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções*. Campinas: UNICAMP, 2018.

VERSTRAETE, W.; VAN DE CAVEYE, P.; DIAMOND, S. Maximum use of resources present in domestic "used water". *Bioresource Technology*, v. 100, n. 23, p. 5537-5545, 2009.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Design of Water Resource Recovery Facilities – Manual of Practice No. 8*. 6th ed. Alexandria, VA: Water Environment Federation, 2017.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Energy Roadmap: Driving Water Resource Recovery*. Alexandria, VA: Water Environment Federation, 2019.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br