

Sobre a eficiência da biodigestão anaeróbia do lodo em estações de tratamento de esgoto (ETE): Uma revisão

Maria Suenia Nunes de Moraes^{*}

Kátia Cristina Barbosa da Silva^{*}

Leonardo Santos Andrade^{*}

Resumo: A crescente demanda por soluções sustentáveis, impulsionada pelas mudanças climáticas e pelo aumento da geração de resíduos orgânicos, reforça a importância de alternativas eficientes para o tratamento de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). A biodigestão anaeróbia se apresenta como um processo promissor, capaz de reduzir a carga poluidora e, simultaneamente, gerar biogás como fonte de energia renovável. Esse processo ocorre por meio da ação de microrganismos que decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, passando por etapas bioquímicas que resultam principalmente na produção de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de pesquisa bibliográfica, a aplicação de técnicas de análise química ambiental para determinar a eficiência da biodigestão anaeróbia do lodo em ETE, considerando diferentes reatores, como o reator de tanque com agitação contínua (CSTR, sigla inglesa), o reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB, sigla inglesa) e o biodigestor lagoa coberta (BLC). Especificamente, busca-se analisar na literatura os métodos de monitoramento empregados, bem como identificar as principais técnicas utilizadas e comparar sua aplicação em distintos modelos de biodigestores. Para isso, serão consideradas técnicas de análise química ambiental amplamente utilizadas no monitoramento do processo, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos voláteis, pH, alcalinidade, ácidos graxos voláteis (AGV) e Cromatografia Gasosa (CG) para caracterização do biogás. A pesquisa evidenciará a utilização dessas metodologias permitindo avaliar a estabilidade operacional e da qualidade do biogás produzido, contribuindo para o manejo adequado dos resíduos, a valorização energética e a promoção da sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Biodigestores, ETE, biogás, meio ambiente.

^{*} Instituto de Química – UFCA: sueniamorais.mn@gmail.com

^{*} Instituto de Química – UFCA: katiabiotec2018@gmail.com

^{*} Instituto de Química – UFCA: ls_andrade@ufca.edu.br

INTRODUÇÃO

Com o cenário atual da mudança climática e os desafios globais relacionados à sustentabilidade, o aumento por novas fontes e tecnologias de energias renováveis vem se tornando cada vez mais urgente. O desenvolvimento econômico vem proporcionando um aumento exorbitante em resíduos orgânicos e efluentes, oriundos tanto do setor doméstico como agroindustrial, gerando um dos principais desafios ambientais atuais por conta do seu despejo. Diante disso, há a necessidade de um gerenciamento adequado e destinação desses resíduos, por meio de tratamentos de efluentes conformes.

O processo de biodigestão anaeróbica apresenta-se como uma opção sustentável e promissora no tratamento dos resíduos sólidos, desempenhando um papel na conversão de resíduos orgânicos em biogás, de modo a reduzir resíduos sem destinação adequada e promover uma alternativa sustentável por meio da biomassa, reduzindo os estragos ao meio ambiente, além de promover o uso de energia renovável contribuindo para a sustentabilidade, este processo se caracteriza por meio de um grupo de microrganismos que degradam a bioquímica da matéria orgânica de forma natural na ausência de oxigênio (LORENZINI, 2024).

O processo pode ser aplicado em diferentes configurações de biodigestores, como o CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), o qual é caracterizado por apresentar um processo contínuo e homogêneo, o UASB (*Up flow Anaerobic Sludge Blanket*) o qual caracteriza-se por um processo de fluxo ascendente e formação de um manto de lodo e o BLC (biodigestor de lagoa coberta) que é uma versão de batelada com retenção de biomassa (COUTO, 2021).

Para verificar se o método está funcionando de forma adequada, são utilizadas metodologias de análise química ambiental, amplamente padronizadas e diretamente aplicáveis ao monitoramento de reatores. Essas técnicas fornecem dados sobre como a matéria orgânica está se decompondo, se o método é estável e qual a qualidade do biogás, como: a Demanda Química de Oxigênio (DQO), que mede a quantidade total de matéria orgânica; os Sólidos Voláteis Totais (SVT), que avaliam a parte do lodo que pode ser decomposta; o pH e a alcalinidade, que mostram se o processo está quimicamente estável; os Ácidos Graxos Voláteis (AGV), que indicam o equilíbrio entre a produção de ácidos e a de metano; e a

cromatografia gasosa do biogás, que identifica o CH_4 , o CO_2 e o H_2S (SCHMEIER, 2017).

A gestão adequada do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) configura-se como um desafio ambiental relevante, devido ao seu elevado teor de matéria orgânica e potencial poluidor. A biodigestão anaeróbia oferece uma solução sustentável, permitindo reduzir a carga poluente, estabilizar o lodo e gerar biogás como fonte de energia renovável.

O objetivo desse trabalho é avaliar, por meio de pesquisa bibliográfica, a aplicação de técnicas de análise química ambiental na determinação da eficiência da biodigestão anaeróbia do lodo de ETE em diferentes tipos de biodigestores, como CSTR, UASB e BLC. A partir dessas análises químicas, pretende-se contribuir para o aprimoramento do monitoramento e avaliação dos sistemas, com benefícios para a valorização energética do biogás, manejo adequado de resíduos e redução de impactos ambientais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos

A digestão anaeróbia é um processo natural de degradação da matéria orgânica, que utiliza microrganismos para transformar em energia, na ausência de oxigênio, convertendo a gases compostos principalmente em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), esse processo tem ganhado destaque na gestão ambiental por possui diversas aplicações no tratamento de resíduos orgânicos e efluentes, além de contribuir na redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado de lodos e resíduos orgânicos, ademais a (SILVA, 2009).

O processo de digestão anaeróbica é dividido em quatro etapas, segundo Silva (2009): hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo cada uma dessas etapas conduzida por grupos específicos de microrganismos, formando uma cadeia conjunta que transforma compostos complexos em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).

Principais tipos de biodigestores

Diferentes configurações de biodigestores anaeróbios têm sido utilizadas, a depender da natureza do resíduo e da aplicação desejada. Nesse estudo, os três principais tipos abordados são: CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) caracterizado pela homogeneização, devido à presença de um sistema de agitação; UASB (*Up flow Anaerobic Sludge Blanket*) caracterizado pelo fluxo ascendente do afluente por uma manta de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico; e BLC (Biodigestor de lagoa coberta) caracterizado pela baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. Segundo Amaral, Steinmetz e Kunz (2019), os biodigestores podem ser classificados conforme regime de alimentação, forma de alimentação, concentração de sólidos e sistema de agitação, entre outros aspectos operacionais.

O biodigestor CSTR funciona em regime contínuo, recebendo substrato continuamente e removendo o efluente ao mesmo tempo, mantendo volume praticamente constante no interior do reator. Esse sistema se distingue pela presença de mecanismos de agitação mecânica ou hidráulica, responsáveis por promover a mistura completa do conteúdo do biodigestor, assegurando que o substrato e a biomassa microbiana fiquem homogêneos (KARIYAMA *et al.*, 2018). Segundo Kunz *et al.* (2019), essa condição favorece a uniformidade da temperatura, da concentração de sólidos e da distribuição dos microrganismos, contribuindo para o adequado desenvolvimento das etapas da digestão anaeróbia e para a estabilidade do processo.

Essa característica favorece a estabilidade do processo, permitindo maior controle dos principais parâmetros operacionais do processo, como tempo de retenção hidráulica, temperatura e carga orgânica aplicada, sendo amplamente empregados no tratamento de resíduos líquidos e semissólidos, incluindo lodos de estações de tratamento de esgoto (BENITES-CAÑOTE, 2018; KARIYAMA *et al.*, 2018).

No entanto, manter a mistura constante exige mais energia, elevando os custos de funcionamento em relação a outros modelos anaeróbicos. Mesmo com essa desvantagem, o CSTR apresenta elevada estabilidade operacional, sendo indicado

para situações que precisam de mais previsibilidade e controle das condições ambientais internas do biodigestor (KUNZ *et al.*, 2019).

No reator UASB, o efluente flui no sentido de baixo para cima, passando por uma massa espessa de lodo anaeróbio muito concentrada e biologicamente ativa. Dentro desse sistema, os microrganismos interagem diretamente com a matéria orgânica do efluente, promovendo sua degradação e conversão em biogás (CUCO, 2019; ESPÍRITO SANTO, 2017). A formação e manutenção da manta de lodo são aspectos fundamentais para o desempenho do reator, pois viabilizam altas taxas de remoção da matéria orgânica, mesmo com um tempo de retenção hidráulica relativamente curto, fazendo do UASB uma tecnologia amplamente usada no tratamento de efluentes residenciais e industriais (PUTRI & NUR, 2023).

O fluxo ascendente do afluente promove o contato entre o substrato e os microrganismos, enquanto o separador trifásico permite a retenção do lodo e a coleta do biogás produzido. Esses sistemas apresentam vantagens operacionais significativas, como menor consumo energético, uma vez que não necessitam de agitação mecânica, além de reduzida produção de lodo excedente quando comparados a sistemas completamente misturados (ESPÍRITO SANTO, 2017).

Os reatores UASB apresentam atrativos operacionais significativos, como menor consumo energético, uma vez que não necessitam de sistemas de agitação mecânica, e reduzida produção de lodo excedente quando comparados a sistemas completamente misturados (PUTRI & NUR, 2023). A presença do separador trifásico possibilita a eficiente separação entre o biogás, o lodo e o efluente tratado, favorecendo a retenção da biomassa no interior do reator e a coleta do biogás gerado. No entanto, o desempenho do UASB está diretamente relacionado às condições operacionais, como temperatura e características do afluente, sendo mais eficiente em regiões de clima tropical, onde as condições ambientais favorecem a atividade microbiológica anaeróbia (PUTRI & NUR, 2023; CUCO, 2019).

O BLC é caracterizado pela presença de uma cobertura impermeável que possibilita a captura e o aproveitamento do biogás gerado durante o processo de digestão anaeróbia. Esse sistema opera, geralmente, em regime contínuo, com longos tempos de retenção hidráulica, o que favorece a degradação da matéria orgânica e a estabilização do lodo (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2016). Destaca-se por ser fácil de construir, baixo custo de implantação e facilidade

operacional, além de ser bastante usado para tratar efluentes com muita matéria orgânica, especialmente em locais que dispõem de ampla área física. A retenção prolongada do substrato contribui para o aumento da eficiência do processo anaeróbio, enquanto a cobertura impermeável atua na mitigação de emissões atmosféricas, no controle de odores e na viabilização do aproveitamento energético do metano produzido (METCALF & EDDY, 2016).

Ainda que não apresente um gerenciamento tão preciso quanto alternativas mais modernas e compactas, a exemplo dos reatores CSTR e UASB, o BLC se mostra eficaz na remoção de matéria orgânica e na geração de biogás, especialmente em áreas de clima tropical (CHERNICHARO, 2007). Contudo, fatores como a influência de variações climáticas, a eficiência volumétrica reduzida e o maior tempo de resposta a mudanças no processo podem restringir seu uso em certas situações. Por isso, é crucial analisar com cuidado as propriedades do resíduo e as condições do local para decidir se essa tecnologia é a mais adequada (METCALF & EDDY, 2016).

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho configura-se como pesquisa bibliográfica, de caráter exploratório e analítico, com enfoque na avaliação da eficiência da biodigestão anaeróbia do lodo ETE, a partir de métodos de análise química ambiental. Para isso, foram levantados dados de estudos publicados em periódicos científicos, livros especializados e documentos técnicos relacionados à digestão anaeróbia, ao monitoramento de biodigestores e às técnicas de análise química ambiental aplicadas a esse processo.

As informações coletadas foram organizadas em tabelas e quadros comparativos, permitindo analisar o desempenho dos diferentes reatores e a relevância de cada parâmetro químico para o monitoramento da biodigestão. A síntese final consistiu em uma discussão crítica sobre a aplicabilidade das análises químicas, o desempenho dos reatores e as estratégias de gestão sustentável de lodo e valorização do biogás.

RESULTADOS

Por meio da pesquisa bibliográfica ficou evidenciado que a eficiência da biodigestão anaeróbia do lodo em ETE está diretamente relacionada ao monitoramento sistemático de parâmetros químicos ambientais. Esses elementos ajudam a entender se o processo está estável, como os biodigestores estão funcionando e a qualidade do biogás produzido. Em geral, a literatura aponta que a DQO, os SVT, o pH, a alcalinidade, os VFA e a cromatografia gasosa como os principais pontos utilizados na avaliação da digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2016; SCHMEIER, 2017).

Os diferentes tipos de biodigestores (CSTR, UASB e BLC) mostram-se eficazes em estabilizar o lodo e remoção da matéria orgânica, embora possuam características operacionais distintas. Reatores CSTR destacam-se pelo elevado controle operacional, possibilitando mais firmeza ao processo, especialmente em relação à temperatura, ao pH e à quantidade de matéria orgânica aplicada. Essa configuração favorece a uniformidade do meio reacional e o adequado desenvolvimento das etapas da digestão anaeróbia, refletindo em eficiência na produção de biogás (KARIYAMA et al., 2018; KUNZ et al., 2019). Contudo, a agitação constante implica maior gasto de energia e os custos de operação (BENITES-CAÑOTE, 2018).

Os reatores UASB, por sua vez, apresentam elevada eficiência na remoção da matéria orgânica, geralmente expressa pela redução da DQO, além de apresentarem menor produção de lodo excedente quando comparados a sistemas completamente misturados. A literatura aponta que o desempenho desses reatores é favorecido em regiões de clima tropical, nas quais as condições ambientais propiciam maior atividade microbiológica anaeróbia e contribuem para a estabilidade e manutenção da manta de lodo (CHERNICHARO, 2007; ESPÍRITO SANTO, 2017; PUTRI & NUR, 2023). Ademais, a inexistência de sistemas de agitação mecânica resulta em menor consumo energético, o que torna o reator UASB uma alternativa atrativa sob os pontos de vista econômico e operacional.

O BLC tem se mostrado uma tecnologia eficiente para o tratamento de resíduos com elevada carga orgânica, especialmente em locais que dispõem de ampla área física. Os estudos analisados indicam que, embora esse sistema

apresente menor controle operacional e maior tempo de resposta às variações do processo, ele é eficaz na estabilização do lodo e na produção de biogás, destacando-se pelo baixo custo de implantação e pela simplicidade construtiva (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2016). A cobertura impermeável desempenha papel fundamental na captura do biogás gerado, na redução da emissão de odores e na mitigação de gases de efeito estufa, além de possibilitar o aproveitamento energético do metano produzido.

A Tabela 1 mostra uma comparação entre os principais tipos de biodigestores anaeróbios utilizados em ETE, considerando os parâmetros químicos de monitoramento, bem como as vantagens e limitações operacionais associadas a cada tecnologia.

Tabela 1. Comparação dos principais biodigestores anaeróbios utilizados em ETE.

Tipo de biodigestor	Principais parâmetros químicos monitorados	Principais vantagens	Principais limitações
CSTR	DQO, SVT, pH, alcalinidade, AGV, cromatografia gasosa	Elevado controle operacional; alta estabilidade do processo; eficiência consistente na produção de biogás	Maior consumo energético; maior custo operacional
UASB	DQO, SVT, pH, alcalinidade, AGV	Alta eficiência na remoção de DQO; menor produção de lodo excedente; baixo consumo energético	Sensível a variações de carga orgânica e temperatura
BLC	DQO, SVT, pH, cromatografia gasosa	Baixo custo de implantação; simplicidade construtiva; aproveitamento do biogás	Menor controle operacional; maior tempo de resposta a mudanças

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em Chernicharo (2007), Metcalf & Eddy (2016), Kariyama et al. (2018), Kunz et al. (2019), Espírito Santo (2017), Putri & Nur (2023) e Schmeier (2017).

De um modo geral, com base nas informações contidas na Tabela 1 é possível evidenciar que, ao selecionar o biodigestor anaeróbio mais apropriado, é imprescindível considerar as propriedades do lodo, as condições climáticas da região, os custos de instalação e funcionamento, bem como as metas do tratamento. A utilização conjunta dos métodos de análise química ambiental mostra-se essencial para medir a eficácia da biodigestão anaeróbia, auxiliando na identificação de instabilidades do processo e no aprimoramento da gestão sustentável do lodo produzido em ETE.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o processo de biodigestão anaeróbica apresenta-se como uma opção sustentável e promissora no tratamento dos resíduos sólidos, desempenhando um papel na conversão de resíduos orgânicos em biogás, de modo a reduzir resíduos sem destinação adequada e promover uma alternativa sustentável. Os biodigestores CSTR, UASB e BLC apresentaram atrativos e limitações operacionais distintas, indicando que a escolha da tecnologia mais adequada deve considerar alguns fatores, de modo a garantir a eficiência do tratamento, o aproveitamento energético do biogás e a gestão ambientalmente sustentável do lodo gerado.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, André Cestonaro do; STEINMETZ, Ricardo Luís Radis; KUNZ, Airon. Os biodigestores. *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. Concórdia: Sbera – Embrapa Suínos e Aves, 2019. p.41–68.
- BENITES-CAÑOTE, Susan Johana. *Caracterização da biodigestão de lodos UASB e de lodos ativados e análise do ciclo de vida do aproveitamento energético do biogás resultante*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.
- COUTO, Pâmela Talita do. Estudo da utilização do ADM1 como plataforma de modelagem para reatores em batelada empregados no processamento anaeróbio da vinhaça de cana-de-açúcar. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-27012023-095247/>. Acesso em: 13 jul. 2025.
- CUCO, Luís Fernando Oliveira. *Análise crítica de projetos de reatores UASB e concepção de sistema pré-fabricado de distribuição de esgoto para reatores de escala plena*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.

- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5).
- ESPÍRITO SANTO, Belinazir Costa do. *Avaliação de câmara de dessorção de metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- KARIYAMA, I. D.; ZHAI, X.; WU, B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: a review. *Water Research*, v. 143, p. 503–517, 2018. DOI:10.1016/j.watres.2018.06.065.
- KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do; ARRIECHE, Claudia Antunes. *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.
- LORENZINI, A. E. *Avaliação Comparativa de Performance de Biodigestores CSTR, UASB e BLC: Um Estudo de Caso no Rio Grande Do Sul*. 2024. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.
- METCALF & EDDY. *Tratamento de águas residuárias e reuso*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016.
- PUTRI, Widia; NUR, Ansiha. *Review pengolahan air limbah menggunakan Up flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) di negara berkembang*. CIVED – Journal of Civil Engineering and Vocational Education, v. 10, n. 2, p. 753–762, jun. 2023. E-ISSN: 2622-6774. DOI: 10.24036/cived.v10i2.430.
- SILVA, Wellington Regis. *Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais*. 2009. 201 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7187>. Acesso em: 13 jul. 2025.
- SCHMEIER, Nara Paula. *Avaliação da operação de biodigestor no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos*. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2017.