

Influência de aditivos na geração de biogás proveniente da degradação de resíduos sólidos urbanos: revisão sistemática

Ana Leticia Ramos Bezerra^{1,*}, Cláudio Luis de Araújo Neto², Veruschka Escarião Dessoles Monteiro¹ e Márcio Camargo de Melo¹

¹Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Av. Aprígio Veloso, 882. Campina Grande-PB, Brasil (CEP 58429-900). E-mail: ana.ramos@estudante.ufcg.edu.br.

²Universidade Federal do Maranhão. Campus Balsas. Av. Rodovia MA-140, km 04. Estrada do Gerais de Balsas. Balsas-MA, Brasil (CEP 65800-000).

Resumo. A geração de biogás em aterros sanitários é afetada por diversas variáveis responsáveis por comprometer o desenvolvimento de microrganismos promotores da decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos. Para garantir a eficiência desse processo é preciso ter atenção aos parâmetros que necessitam estar em equilíbrio. Nessa perspectiva, a utilização de aditivos surge como uma alternativa a ser empregada com a finalidade de acelerar a decomposição da matéria orgânica, otimizando assim o processo de geração do biogás. Esse trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura acerca dos aditivos que podem potencializar a produção do biogás gerado pela decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. O levantamento bibliográfico foi realizado utilizando busca por palavras-chave em bases de dados científicos. Por meio de critérios estabelecidos para inclusão ou exclusão dos trabalhos encontrados, os trabalhos afins a pergunta de pesquisa foram selecionados e analisados criticamente. Foram identificadas as informações mais relevantes e sintetizados os principais resultados obtidos. Constatou-se que não é possível realizar uma comparação do desempenho dos aditivos de forma direta, tendo em vista que os fatores intervenientes dos diferentes sistemas de digestão anaeróbica não são os mesmos. Esse trabalho mostrou que uma revisão sistemática é capaz de contribuir na atualização do conhecimento científico do assunto objeto de estudo, podendo ser utilizada para direcionar a realização de novas pesquisas e experimentos.

Palavras-chave: Digestão anaeróbica; Reator de biogás; Bioenergia.

Recebido
27/02/2023

Aceito
28/04/2023

Publicado
30/04/2023

 Acesso aberto



 **ORCID**
ID 0000-0003-1064-2720
Ana Leticia Ramos
Bezerra
ID 0000-0001-7281-0705
Cláudio Luis de Araújo
Neto

Abstract. *Influence of additives on the generation of biogas from the degradation of urban solid waste: Systematic review.*

The generation of biogas in landfills is affected by several variables responsible for compromising the development of microorganisms that promote the anaerobic decomposition of municipal solid waste. To ensure the efficiency of this process it is necessary to pay attention to the parameters that need to be in balance. In this perspective, the use of additives emerges as an alternative to be employed to accelerate the decomposition of organic matter, thus optimizing the process of biogas generation. This work aimed to perform a systematic review of the literature on the additives that can increase the production of biogas generated by the decomposition of municipal solid waste in landfills. The literature survey was carried out using keyword searches in scientific databases. By means of criteria established for inclusion or exclusion of the papers found, the papers related to the research question were selected and critically analyzed. The most relevant information was identified and the main results obtained were synthesized. It was found that it is not possible to directly compare the performance of additives, since the intervening factors of different anaerobic digestion systems are not the same. This work showed that a systematic review is able to contribute to the updating of scientific knowledge on the subject of study, and can be used to guide the conduct of further research and experiments.

Keywords: Anaerobic digestion; Biogas reactor; Bioenergy.

0000-0002-7714-5692

Veruschka Escarião
Dessoles Monteiro

0000-0001-6215-8100

Márcio Camargo de
Melo

Introdução

A maior parte do biogás gerado em aterros sanitários é proveniente da decomposição da matéria orgânica, esse processo ocorre pela ação de microrganismos em condição de biodegradação anaeróbica (Andrade, 2022). Entretanto, a geração do biogás pode também estar associada ao processo de evaporação de compostos orgânicos voláteis e reações químicas entre as partes que compõem os resíduos (Speight, 2018).

O aproveitamento do biogás produzido pela decomposição dos resíduos sólidos urbanos é possível por meio da geração de energia elétrica em turbinas a gás ou motores de combustão interna. O gás produzido também pode ser usado de maneira direta como gás combustível (Moura, 2014). Um fato importante é que nos aterros sanitários brasileiros, aproveitar o biogás energeticamente consiste em uma alternativa que pode ser implementada em um período de curto a médio prazo (Tolmasquim, 2003). Assim, o biogás que, comumente, se refere ao gás de unidades de digestão anaeróbica, consiste em uma forma promissora capaz de suprir as necessidades globais relativas à energia, além de proporcionar diversos benefícios na esfera ambiental (Mao et al., 2015).

A digestão anaeróbica consiste em um processo de bastante complexidade que necessita da cooperação entre diferentes microrganismos anaeróbios e facultativos para prosseguimento das principais etapas que constituem o processo (Khanal, 2008). A geração de biogás em aterros sanitários é afetada por diversas variáveis responsáveis por comprometer o desenvolvimento de microrganismos promotores da decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos. Sendo essas variáveis associadas, principalmente, aos seguintes fatores: composição dos resíduos, umidade, temperatura das células de

aterros e ao potencial hidrogeniônico (Moreira, 2018). Fatores esses propulsores do desenvolvimento da digestão anaeróbica de substratos orgânicos (Melo, 2022).

Assim, para garantir a eficiência do processo é preciso ter atenção aos parâmetros que necessitam estar em equilíbrio ao decorrer deste, como a relação C/N, o pH, alcalinidade, sólidos voláteis, teor de umidade, temperatura, agente inibidores e o inóculo (Melo, 2022). Inóculos podem ser utilizados na digestão anaeróbica para obter melhorias no balanço de nutrientes, na diluição de substâncias tóxicas, sinergia dos microrganismos, elevação da quantidade de material biodegradável e como resultado final, potencialização da produção do biogás, além de maior estabilização dos resíduos (Agdag e Sponza, 2007).

Nessa perspectiva, a utilização de aditivos surge como uma alternativa a ser empregada com a finalidade de acelerar a decomposição da matéria orgânica, otimizando assim o processo de geração do biogás. De modo que aproveitar a biomassa dos resíduos sólidos urbanos utilizando-a como fonte energética, consiste em um procedimento capaz de proporcionar melhorias que impactam positivamente nas condições operacionais dos aterros de resíduos. Além disso, esse aproveitamento gera receita já que se obtém créditos de carbono e venda de eletricidade. Por outro lado, colabora com a diminuição dos gases que são lançados na atmosfera (Nascimento et al., 2017).

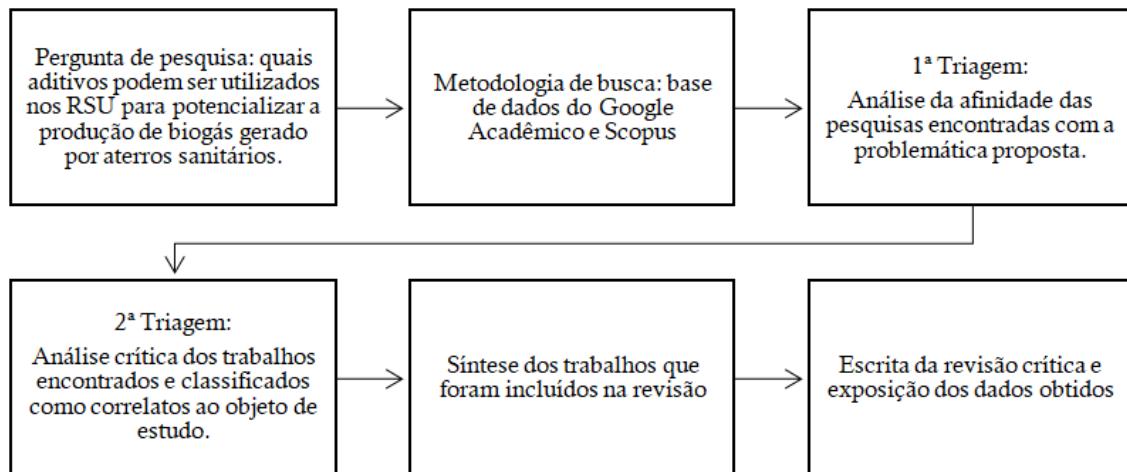
Desse modo, dada a importância relacionada ao aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários, o objetivo desse trabalho consiste em realizar um levantamento, por meio de uma revisão sistemática da literatura, acerca dos aditivos que podem potencializar a produção do biogás gerado pela decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. Desse modo, pretende-se por meio desse estudo identificar aditivos que sejam capazes de influenciar positivamente o processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos, a fim de melhorar a quantidade e qualidade do biogás gerado, de modo que seja possível aproveitar essa fonte energética de maneira mais eficiente e rentável.

Metodologia

Este artigo fornece uma revisão sistemática acerca dos aditivos que podem ser utilizados para potencializar a produção do biogás gerado pela decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. O levantamento bibliográfico foi realizado por meio de pesquisas em artigos científicos nacionais e internacionais, dissertações e teses usando a busca de palavras-chave nas bases de dados do Google Acadêmico e Scopus. Os principais termos usados utilizados para consulta na base de dados foram "Biogás", "Resíduos sólidos urbanos", "Aterros sanitários", "Digestão anaeróbica", "Aditivos", "Aceleradores", "Biogas", "Municipal Solid Wastes", "Landfills", "Anaerobic digestion", "Aditives", "Accelerants". Os artigos selecionados passaram por um filtro temporal, sendo escolhidos aqueles que foram publicados entre 2012 e 2022.

Efetuadas as buscas, os artigos, as dissertações e as teses referentes à problemática da pesquisa foram selecionados após a leitura dos títulos e resumos. Os trabalhos classificados como afins à temática em questão foram examinados para extrair informações relevantes e assim realizar a revisão da literatura. As etapas da pesquisa estão descritas na Figura 1.

Figura 1. Procedimentos abordados para a construção da revisão sistemática.



Na Tabela 1 são mostrados os critérios estabelecidos para inclusão ou exclusão dos trabalhos encontrados e averiguados conforme a revisão proposta. Esses critérios definiram os trabalhos incluídos nessa pesquisa, por meio de cumprimento dos critérios determinados.

Tabela 1. Critérios de exclusão e inclusão dos trabalhos analisados.

Critérios de inclusão dos trabalhos analisados	Aplicar algum tipo de aditivo no resíduo sólido urbano Avaliar a influência do emprego de aditivos no resíduo sólido urbano Verificar o rendimento ou a qualidade do biogás produzido Ter sido desenvolvido em aterros, lisímetros ou em biorreatores
Critérios de exclusão dos trabalhos analisados	Não usar resíduo sólido urbano Ter sido desenvolvido antes de 2012

Resultados

Seleção das pesquisas encontradas

Realizadas as buscas nas bases de dados, na 1ª triagem referente à análise da afinidade dos trabalhos encontrados com relação à pergunta de pesquisa, 60 trabalhos foram analisados e essa etapa foi finalizada. Após a 1ª triagem, procedeu-se a 2ª triagem, em que os trabalhos correlatos foram analisados criticamente. Como resultado das buscas e leitura, na etapa de sintetização dos trabalhos a serem incluídos na revisão, totalizou-se a seleção de 17 trabalhos, das quais 12 foram obtidos na base de dados do Google acadêmico e cinco na base de dados da *Scopus*. Foram identificadas as informações mais relevantes e sintetizados os principais resultados obtidos. Na Tabela 2 são apresentados os tipos de trabalhos incluídos na revisão.

Tabela 2. Tipos de trabalhos incluídos na revisão.

Tipo de pesquisa	Número
Dissertação	4
Tese	1
Artigo de revistas/periódicos	12

Panorama das pesquisas analisadas

Os aditivos agem de diferentes formas quando incrementados aos resíduos sólidos urbanos. Dependendo de como estes interagem com o substrato, a produção de biogás pode ser aumentada ou prejudicada. Sendo a eficiência do aditivo influenciada por diversos fatores, a exemplo da quantidade e concentração.

Nesse contexto, diversos aditivos vêm sendo empregados para otimizar os sistemas de digestão anaeróbica (Romero-Güiza et al., 2016). Na Tabela 3 são apresentados os principais resultados obtidos sobre os aditivos que vêm sendo estudados para esse fim.

Tabela 3. Síntese dos trabalhos selecionados e aditivos utilizados.

Referência	Escala	Identificação do aditivo	Resultados relevantes
Fernandes (2013)	Bancada	Fração orgânica dos RSU	Aumento na geração de biogás
Yang et al. (2013)	Laboratorial	Nanopartículas de prata metálica	Redução na geração de metano
Liu et al. (2014)	Laboratorial	Escória	Aceleração da degradação e da estabilização do resíduo Aumento no teor de metano gerado
Liu et al. (2014)	Laboratorial	Cinza volante	Aceleração da degradação e da estabilização do resíduo Aumento no teor de metano gerado
Moura (2014)	Piloto	lodo de esgoto	Redução da geração de biogás
Rempel (2014)	Piloto	Glicerina	Aumento na produção de biogás
Frank et al. (2016)	Piloto	Celulase e lixiviado	Aumento na geração de biogás
Sillas-Moreno et al. (2018)	Laboratorial	Lodo de esgoto	Aumento na produção de metano
Bonatto (2019)	Piloto	Nanopartículas de prata	Baixa produção de metano
Carvalho (2019)	Laboratorial	Biocarvão (Biochar)	Aumento na geração de metano
Jayanth et al. (2020)	Piloto	Lixiviado de aterro sanitário	Diminuição do rendimento do biogás
Rasapoor et al. (2020a)	Laboratorial	Fenanzina sintética	Aumento na geração de biogás
Rasapoor et al. (2020b)	Laboratorial	Biocarvão(Biochar)	Aumento na produção de metano
Rasapoor et al. (2020b)	Laboratorial	Fenanzina sintética	Aumento na produção de metano
Rasapoor et al. (2021)	Campo	Lixiviado e Biocarvão (Biochar)	Aumento na produção de metano
Rasapoor et al. (2021)	Campo	Lixiviado e Fenanzina sintética	Aumento na produção de metano
Aromolaran et al. (2022)	Laboratorial	Espuma de esgoto	Aumento na produção de biogás
Kumar et al. (2022)	Laboratorial	Esterco de vaca e lodo de estação de tratamento anaeróbico de águas residuais	Aumento na produção de biogás

Tabela 3. Continuação.

Referência	Escala	Identificação do aditivo	Resultados relevantes
Muratçobanoğlu et al. (2022)	Laboratorial	Óxido de grafeno reduzido	Aumento na produção de biometano
Salehiyoun et al. (2022)	Laboratorial	Biocarvão(Biochar)	Aumento na geração de biometano

Fernandes (2013) estudou a biodegradação de lodo de estação de tratamento de águas residuais e lodo de estação de tratamento e valorização orgânica, com a adição da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, para avaliar o potencial de geração de biogás. Por meio da realização de ensaios de biodegradabilidade, pode-se observar uma taxa de produção de metano alta, sendo esta entre 75% e 72%. Porém, os inóculos utilizados apresentaram alto teor de sulfitos e amônia, que torna necessária a realização de um pós-tratamento do gás para o uso destes em motores de geração de energia.

Yang et al. (2013) estudaram a influência da adição de íons de prata e de nanopartículas de prata metálica ao lixiviado recirculado. No entanto, a geração de metano não obteve melhora com a adição desses materiais. As nanopartículas de prata causaram inibição da fase de metanogênese, isso pode ser atribuído à acumulação de ácidos.

Liu et al. (2014) utilizaram cinzas volantes e escória. Nessa pesquisa, os autores verificaram uma aceleração da degradação e estabilização dos resíduos sólidos urbanos, além disso, os resultados mostraram que houve aumento na produção e no conteúdo de metano.

Moura (2014) observou que a utilização de lodo de esgoto como inóculo prejudicou a produção e a geração de resíduos sólidos urbanos, sendo a quantidade de biogás gerada menor do que nos estudos em que não foi utilizado inóculo, atribuindo esse resultado à provável criação de um ambiente pouco favorável ao desenvolvimento dos processos microbiológicos geradores do biogás, podendo também estar associado às características do lodo de esgoto usado ou a quantidade desse material que foi submetida à inoculação.

Além disso, problemas de vazamento na aparelhagem do experimento causaram prejuízos à aferição do volume de biogás. Fato que, associado à ação prejudicial do lodo de esgoto, é determinante na compreensão do baixo volume de biogás gerado, quando comparado a trabalhos desenvolvidos anteriormente.

Rempel (2014) constatou que o incremento de glicerina à fração orgânica de resíduos sólidos urbanos proporcionou um aumento de até 30% no volume de biogás produzido. Verificou-se ainda que a produção máxima de biogás foi acelerada, quando comparada ao processo em que foi utilizado apenas a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Por meio da utilização de glicerina como aditivo foi possível aumentar de forma significativa o volume de biogás, porém o percentual usado na pesquisa, diante das condições impostas faz com que seja necessário um controle eficiente do pH e da alcalinidade para que não ocorra a acidificação ou alcalinização excessiva do meio.

Frank et al. (2016) observaram aumento significativo na geração de biogás em biorreatores operados com adição de celulase no lixiviado recirculado, ao passo que no biorreatore em que o lixiviado foi recirculado sem adição da celulase não foi verificado melhora na produção de biogás, ressaltando que a realização de pesquisas que foquem na otimização da concentração necessária de enzimas para promoção da degradação dos resíduos pode viabilizar o processo de adição.

Sillas-Moreno et al. (2018) observaram que, ao utilizar lodo de esgoto como inóculo na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos provenientes de um aterro sanitário, foi obtido aumento na produção de metano, porém foi verificado uma fase de latência de quatro dias. Essa combinação provocou um efeito sinérgico no rendimento de metano e na qualidade do biogás, fazendo com que fosse proposto que novos estudos sejam realizados para analisar a dinâmica da população microbiana ao decorrer do processo de digestão, ajudando a elucidar o efeito sinérgico entre os inóculos e viabilizar a aplicação em larga escala.

Bonatto (2019) constatou que a utilização de nanopartículas de prata não foi capaz de potencializar a geração de biogás, já que nos lisímetros do estudo, não foi verificada a entrada na fase de degradação dos resíduos responsável pela metanogênese. Sendo atribuído esse resultado à possibilidade de falhas do projeto e monitoramento dos reatores pilotos, a exemplo da entrada de oxigênio, fezendo com que o gás metano fosse emitido em pequena quantidade, apresentando um pequeno aumento apenas nos últimos meses de monitoramento. Além do mais, a análise da interferência no que se refere às diferentes concentrações de nanoprata na biodegradação dos resíduos no interior dos reatores piloto foi dificultada, pois as três concentrações estudadas não apresentaram proporcionalidade.

Em Carvalho (2019), nos três ensaios realizados utilizando biorreatores, a adição de biocarvão (carvão vegetal ou biochar) diretamente no processo de digestão anaeróbica proporcionou redução da lagphase que consiste no tempo necessário para que as bactérias comecem a adaptar-se e reproduzirem-se no meio onde são inseridas, além de benefícios na taxa de produção diária de biogás, já que houve um aumento desta. Também foi possível verificar uma maior biodegradabilidade do substrato, tendo como consequência um maior volume acumulado de biogás gerado.

Em Jayanth et al. (2020), a produção de biogás foi analisada por meio de uma planta de biometanação semicomercial baseada em reatores anaeróbicos para mono e codigestão da FORSU e de lixiviado de aterro sanitário. Dentre os três reatores estudados, o reator que apresentou maior desempenho no rendimento de biogás foi o reator 1 (monodigestão da FORSU), seguido do reator 3 (codigestão de FORSU e lixiviado) e o reator 2 (monodigestão de lixiviado). Esse trabalho abordou também uma análise técnico e econômica que considera que esses tipos de usinas de biometanização apresentam rentabilidade.

Já Rasapoor et al. (2020a) verificaram que o ajuste do teor de umidade para 45% para a maioria das amostras coletadas nas várias etapas do aterro foi responsável por um aumento significativo na geração de biogás. Além de que, o uso do fenanzina sintética como aditivo mostrou-se bastante eficaz na geração de biogás, sendo esse processo associado a promoção da transferência de elétrons. Foi constatado ainda que o acúmulo de amônia-nitrogênio pode causar perdas significativas. Entretanto, o uso do fenanzina sintética é capaz de promover melhorias na atividade microbiana inclusive em altas concentrações de amônia-nitrogênio.

Em Rasapoor et al. (2020b) foi estudado a adição de biocarvão e fenanzina sintética ao lixiviado submetido à recirculação. Para estimativa do potencial de geração de metano, os autores usaram modelos, em conjunto com dados laboratoriais e dados referentes aos relatórios anuais do aterro objeto do estudo. O uso de aditivos proporcionou aumento significativo na capacidade de geração de metano. Afenanzina sintética na concentração de 70 mg/L provocou melhorias no potencial de produção de metano em 34%, já nas concentrações entre 15 e 30 g/L de biocarvão elevaram a produção de metano em 18% e 10%. Sendo ressaltado que é necessário investigar a utilização de aditivos promotores de transferência direta de elétrons em sistemas de digestão anaeróbica em grande escala.

Rasapoor et al. (2021) realizaram um estudo de campo que investigou os efeitos do lixiviado recirculado com adição de biocarvão e fenanzina sintética na produção de biogás. A geração do biogás foi analisada por meio do monitoramento de poços de gás por um período de cinco meses. Os resultados obtidos evidenciaram que os maiores fluxos de gás ocorreram nos poços que fizeram o processo de recirculação de lixiviado, porém o que apresentou maior fluxo de gás foi o que não usou aditivos. De modo que os poços que utilizaram lixiviado e aditivos apresentaram aumento na geração de biogás quando comparado a geração observada no poço de controle, utilizado apenas para monitoramento da pressão do gás.

Aromolaran et al. (2022) investigaram a codigestão de espuma de esgoto e de FORSU, os resultados demonstram que é possível produzir 39% a mais de biogás quando até 40% desse material é adicionado, salientando a importância de realizar uma investigação do pré-tratamento da espuma de esgoto antes do tratamento em reatores anaeróbicos.

Em Kumar et al. (2022) a digestão anaeróbica de restos de alimentos juntamente com esterco de vaca e lodo de digestor anaeróbico foram estudados por meio de quatro reatores de batelada. O reator que apresentou maior produção acumulada de biogás foi o reator em que havia os restos de alimentos, o esterco de vaca e o lodo, esse rendimento máximo pode ser atribuído à presença de população microbiana suficiente e suprimento necessário de nutrientes. A utilização de um substarto único na codigestão (o esterco de vaca e o lodo) com resíduos alimentares apresentou uma digestão anaeróbica com uma produção e rendimento de biogás inferior, quando comparado a codigestão dos três resíduos.

Muratçobanoğlu et al. (2022) analisaram a influência da adição de óxido de grafeno reduzido na digestão anaeróbica semicontínua da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, os resultados mostraram que a taxa e o rendimento na geração de biometano foi aumentada. No entanto, ao aumentar a taxa de carga orgânica, houve diminuição da produção de biometano, em consequência do acúmulo de ácidos graxos voláteis.

Salehiyoun et al. (2022) verificaram que a adição de biocarvão proporcionou melhorias no rendimento de metano. Nesse estudo, a quantidade de carga orgânica aplicada foi elevada quando comparada com outras pesquisas já feitas. Desse modo, os autores salientam que a eficácia desse aditivo depende da dosagem e também da quantidade de inóculo.

De modo geral, todos os estudos que utilizaram algum tipo de biocarvão como aditivo obtiveram bons resultados quanto à otimização da geração de biogás, conforme constatado em Carvalho (2019), Rasapoor et al. (2020b, 2021) e Salehiyoun et al. (2022). Por outro lado, os dois estudos que aplicaram nanopartículas de prata não alcançaram bons resultados, conforme estudo de Yang et al. (2013) e Bonatto (2019). Em Jayanth et al. (2020) a aplicação de lixiviado diminuiu a produção de biogás, todavia, em Frank et al. (2016) e Rasapoor et al. (2021), nos quais o lixiviado foi aplicado misturado com aditivos, observou-se aumento na geração.

Moura (2014), ao aplicar lodo de esgoto, observou uma diminuição da produção do biogás, enquanto Sillas-Moreno et al. (2018) e Kumar et al. (2022), ao empregar o mesmo aditivo observaram melhorias. Aromolaran et al. (2022) também obtiveram bons resultados, no entanto utilizando a espuma de esgoto. Outros aditivos, como a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, escória, cinza volante, glicerina, enzimas celulóticas misturadas com lixiviado, fenanzina sintética, esterco de vaca e óxido de grafeno reduzido mostraram-se promissores quanto à otimização da geração de biogás.

Desse modo, de acordo com Liu et al. (2021), não é possível realizar uma comparação do desempenho dos aditivos de forma direta, tendo em vista que os fatores intervenientes dos diferentes sistemas de digestão anaeróbica não são os mesmos, a exemplo do substrato utilizado, da configuração dos reatores e da composição da comunidade microbiana anaeróbica.

Conclusão

Por meio dessa revisão, foi possível constatar que diversas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de analisar os efeitos do emprego de diferentes aditivos na geração de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos, a fim de promover uma melhor e mais rápida biodegradação dos resíduos, tendo como consequência, melhorias na geração e rendimento do biogás produzido.

Mesmo que alguns trabalhos analisados tenham obtido resultados em que a produtividade do biogás não apresentou melhorias, a maior parte alcançou resultados positivos. Por outro lado, na maioria dos trabalhos, a relação entre os custos dos aditivos e a eficiência energética alcançada não é clara na maioria dos estudos.

Vale salientar ainda que os resultados alcançados apresentam bastante variações, pois os processos que ocorrem na interação entre os microrganismos presentes nos sistemas de digestão anaeróbica estudados, podem causar inibição ou retardamento da fase de metanogênese, responsável pela maior geração de metano, por exemplo.

Outro desafio a ser considerado na realização desses estudos está na determinação das concentrações ideais entre o aditivo e o substrato, para assim alcançar uma máxima produção de biogás. Uma vez que, dependendo da concentração empregada, pode ocorrer acúmulo de compostos tóxicos, o que provoca efeitos negativos na biodegradabilidade dos resíduos e, consequentemente, na geração do biogás.

Ademais, no decorrer dos experimentos, os dados referentes à geração de biogás, além de sofrerem influência dos processos biodegradativos, podem também ser influenciados por fatores relacionados à operação e ao projeto. De modo que a obtenção dos resultados referentes à produção de biogás pode ser prejudicada por problemas e falta de eficiência na captura e medição do gás. Assim, um monitoramento dos fatores operacionais dos reatores anaeróbicos deve ser realizado frequentemente, considerando que para alcançar um bom desempenho do sistema é interessante que as condições de operação se mantenham ideais.

Desse modo, este estudo demonstrou que uma revisão sistemática é capaz de contribuir na atualização do conhecimento científico do assunto objeto de estudo, podendo ser utilizada para direcionar a realização de novas pesquisas e experimentos.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

Agdag, O. N.; Sponza, D. T. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. *Journal of Hazardous Materials*, v. 140, n. 1/2, p. 75-85, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.059>

Andrade, F. N. **A influência da recirculação de lixiviado na produção e qualidade do biogás gerado em aterros sanitários:** revisão sistemática. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2022. (Dissertação de mestrado).

Aromolaran, A.; Sartaj, M.; Alqaralleh, R. M. Z. Biogas production from sewages cum through anaerobic co-digestion: The effect of organic fraction of municipal solid waste and landfill leachate blend addition. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02152-y>

Bonatto, I. C. **Influência de nanopartículas de prata nos mecanismos de degradação de resíduos sólidos urbanos em instalação piloto**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019. (Tese de doutorado).

Carvalho, R. L. F. **Efeito da adição de biochar na produção de biogás e biometano**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2019. (Dissertação de mestrado).

Fernandes, C. H. R. **Biodegradabilidade termofílica dos resíduos sólidos urbanos e potencialidade em biogás**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2013. (Dissertação de mestrado).

Frank, R. R.; Davies, S.; Wagland, S. T.; Villa, R.; Trois, C.; Coulon, F. Evaluating leachate recirculation with cellulase addition to enhance waste biostabilisation and landfill gas production. **Waste Management**, v. 55, p. 61-70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.038>

Jayanth, T. A. S.; Mamindlapelli, N. K.; Begum, S.; Arelli, V.; Juntupally, S.; Ahuja, S.; Dugyala, S. K.; Anupoju, G. R. Anaerobic mono and co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and landfill leachate at industrial scale: Impact of volatile organic loading rate on reaction kinetics, biogas yield and microbial diversity. **Science of the Total Environment**, v. 748, 142462, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142462>

Khanal, S. K. Overview of anaerobic biotechnology. In: Khanal, S. K. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and applications**. Ames: John Wiley & Sons, 2008. p. 1-27. <https://doi.org/10.1002/9780813804545>

Kumar, A.; Bhardwaj, S.; Samadder, S. R. Evaluation of methane generation rate and energy recovery potential of municipal solid waste using anaerobic digestion and landfilling: A case study of Dhanbad, India. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 41, n. 2, p. 407-417, 2022. <https://doi.org/10.1177/0734242x221122494>

Liu, M.; Wei, Y.; Leng, X. Improving biogas production using additives in anaerobic digestion: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, 126666, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126666>

Liu, W.; Liu, Y.; Zhu, B.; Li, X. Enhanced biogas production from a stimulated landfill bioreactor for the co-disposal of municipal solid waste and coal wastes. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 36, n. 11, p. 1186-1194, 2014. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.540628>

Mao, C.; Feng, Y.; Wang, X.; Ren, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>

Melo, D. O. S. **Gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos domiciliares de São Carlos-SP: análise do potencial de aproveitamento energético de biogás oriundo de aterro sanitário e biometanizadores**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2022. (Dissertação de mestrado).

Moreira, F. G. S. **Emissões fugitivas de biogás em célula de aterro sanitário**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2018. (Dissertação de mestrado).

Moura, J. S. **Avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de esgoto em uma simulação experimental de aterro sanitário.** Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2014. (Dissertação de mestrado).

Muratçobanÿglu, H.; Gökçek, Ö. B.; Muratçobanÿglu, F.; Mert, A.; Demirel, S. Biomethane enhancement using reduced graphene oxide in anaerobic digestion of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 354, 127163, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127163>

Nascimento, M. C. B.; Freire, E. P.; Dantas, F. A. S.; Giansante, M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019171125>

Novais, R. M.; Gameiro, T.; Carvalheiras, J.; Seabra, M. P.; Tarelho, L. A. C.; Labrincha, J. A.; Capela, I. High pH buffer capacity biomass flyash-based geopolymers spheres to boost methane yield in anaerobic digestion. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 258-267, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.033>

Rasapoor, M.; Young, B.; Brar, R.; Baroutian, S. Enhancement of landfill gas generation from aged waste by a combination of moisture adjustment and application of biochar and neutral red additives: A field-scale study. **Fuel**, v. 283, 118932, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118932>

Rasapoor, M.; Young, B.; Brar, R.; Baroutian, S. Improving biogas generation from aged landfill waste using moisture adjustment and neutral red additive - Case study: Hampton Downs's Landfill Site. **Energy Conversion and Management**, v. 216, 112947, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112947>

Rasapoor, M.; Young, B.; Brar, R.; Sarmah, A.; Zhuang, W.-Q.; Baroutian, S. Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps to ward improving biogas generation. **Fuel**, v. 261, 116497, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116497>

Rempel, N. **Biodigestão anaeróbica da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina.** São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2014. (Dissertação de mestrado).

Romero-Guiza, M.; Vila, J.; Mata-Alvarez, J.; Chimenos, J.; Astals, S. The role of additives on anaerobic digestion: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1486-1499, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>

Salehiyou, A. R.; Zilouei, H.; Safari, M.; Di Maria, F.; Samadi, S. H.; Norouzi, O. Na investigation for improving dry anaerobic digestion of municipal solid wastes by adding biochar derived from gasification of wood pellets. **Renewable Energy**, v. 186, p. 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.115>

Sillas-Moreno, M. V.; Senés-Guerrero, C.; Pacheco, A.; Montesinos-Castellanos, A. Methane potential and metagenomics of waste water sludge and a methane-producing landfill solid sample as microbial inocula for anaerobic digestion of food waste. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 94, n. 4, p. 1123-1133, 2018. <https://doi.org/10.1002/jctb.5859>

Speight, J. G. **Natural gas:** A basic handbook. 2. ed. Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2018.

Tolmasquim, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

Yang, Y.; Gajaraj, S.; Wall, J. D.; Hu, Z. A comparison of nanosilver and silver ion effects on bioreactor landfill operations and methanogenic population dynamics. **Water Research**, v. 47, n. 10, p. 3422-3430, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.040>



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.