

ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

BIBLIOGRAPHIC ANALYSIS OF BIOGAS PRODUCTION

Loiva Zukovski¹, Eléia Righi², Bruna Bento Drawanz³

¹ Pós-graduanda do curso de Especialização em Inovação e Tecnologia para Alimentos e Bebidas da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Caxias do Sul, RS. E-mail: loivazuk@gmail.com;

² Doutora, professora Adjunta da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Endereço: Avenida Júlio de Castilhos, 3947 - Bairro Cinquentenário - Caxias do Sul - RS – Cep 95010-005. E-mail: eleia-righi@uergs.edu.br;

³ Doutora, professora Adjunta da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Endereço: Avenida Júlio de Castilhos, 3947 - Bairro Cinquentenário - Caxias do Sul - RS – Cep 95010-005. E-mail: bruna-drawanz@uergs.edu.br;

RESUMO

A energia sustentável ainda possui um grande potencial inexplorado no Brasil, havendo espaço para um maior desenvolvimento neste setor. Além de produzir energia limpa, natural, não fóssil, a produção do biogás contribui para o saneamento rural, diminuindo a contaminação do meio ambiente, além da produção de biofertilizantes. Desta forma, o objetivo geral desse trabalho foi organizar uma análise bibliográfica sobre biogás, sendo o mesmo uma alternativa para diminuir impactos socioambientais. O método bibliográfico de organização e busca foi o utilizado para o estudo proposto, trazendo o apanhado de publicação sobre o tema “*biogás*” da série histórica da plataforma Capes-Cafe de 2013 a janeiro de 2023. Na presente pesquisa, foram utilizados os 50 artigos sobre o tema “*biogás*” de maior impacto da base de dados para uma mensuração e qualificação deste assunto. Pode-se verificar que no ano de 2015 houve o maior número de publicações sobre esse assunto e que 54,0 % dos artigos foram publicados entre 2015 e 2018. Nas 50 publicações, foram identificados 207 autores que se dedicaram a trabalhar com o assunto. A maioria dos artigos foram publicados na língua inglesa. Os principais periódicos que publicaram os artigos foram a *Bioresource Technology*, *Renewable & Sustainable Energy Rreviews*, *Energy (Oxford)*, *Energy Policy*, *Biotechnology Advances*, *Applied Energy*, *Renewable Energy*, *Chemical Engineering Journal*, *Biomass & Bioenergy*, *Energy Conversion and Management*. O direcionamento das pesquisas dos artigos apresenta estratégias para otimizar a qualidade e as quantidades de biogás, a separação desses gases por membranas, os sistemas de armazenamento e uso de tecnologias para aumentar a eficiência de produção de biogás. As principais matérias-primas estudadas foram resíduos de: lodo de esgoto, microalgas, plantas de pântano, biocarvão, excrementos de animais, milho, grama e chorume de aterro sanitário e de geração doméstica. Verificou-se, também, que os autores estão preocupados em avaliar os usos do biogás como combustível de frotas agrícolas, para eletricidade, calor e transporte. Os demais trabalhos possuem diferentes abordagens, como avaliação do custo de diferentes tipos de biodigestores, uso de hidrogênio renovável, eficiência de processos de digestão anaeróbia, entre outros. Com a evolução das pesquisas, é necessário que se alinhe um sistema que leve em consideração as questões sociais, ambientais e o desenvolvimento econômico.

Palavras-chave: Biogás. Resíduo orgânico. Indústria verde. Bibliografia. Qualitativo.

ABSTRACT

Sustainable energy still has great untapped potential in Brazil, and there is room for further development in this sector. In addition to producing clean, natural, non-fossil energy, the production of biogas contributes to rural sanitation, reducing environmental contamination, in addition to the production of biofertilizers. In this way, the general objective of this work was to organize a bibliographical analysis on biogas, the same being an alternative to reduce socio-environmental impacts. The bibliographical method of organization and search was used for the proposed study, bringing the collection of publication on the theme "biogas" of the historical series of the platform Capes-Cafe from 2013 to January 2023. In the present research, it was used the 50 articles on the subject "biogas" of greater impact of the database for a measurement and qualification of this subject. It can be verified that in the year 2015 there was the largest number of publications on this subject and that 54.0 % of the articles were published between 2015 and 2018. In the 50 publications, 207 authors were identified who were dedicated to work with the subject. Most of the articles were published in the English language. The main journals that published the articles were Bioresource Technology, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Energy (Oxford), Energy Policy, Biotechnology Advances, Applied Energy, Renewable Energy, Chemical Engineering Journal, Biomass & Bioenergy, Energy Conversion and Management. The research direction of the articles presents strategies to optimise the quality and quantities of biogas, the separation of these gases by membranes, storage systems and the use of technologies to increase the efficiency of biogas production. The main feedstocks studied were wastes from: sewage sludge, microalgae, marsh plants, biochar, animal excrement, corn, grass and slurry from landfill and domestic generation. It was also found that the authors are concerned with evaluating the uses of biogas as fuel for agricultural fleets, for electricity, heat and transport. The other works have different approaches, such as evaluating the cost of different types of biodigesters, use of renewable hydrogen, efficiency of anaerobic digestion processes, among others. With the evolution of research, it is necessary to align a system that takes into account social and environmental issues and economic development.

Keywords: Biogas. Organic waste. Green industry. Bibliography. Qualitative.

1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis está se tornando um grande problema, pois há emissões de gases que causam impactos ambientais, além da variabilidade de preços e diminuição da oferta. Assim, uma alternativa a esses é o uso de biogás como fonte de energia, o qual é produzido a partir de resíduos orgânicos, através de uma digestão anaeróbia (SOUSA; RIZZATO, 2022).

A sustentabilidade tem sido um assunto muito discutido nas últimas décadas. Da mesma forma, a questão dos alimentos tem passado por mudanças devido ao fenômeno da globalização. Ocorrem alterações nos aspectos econômicos, sociais e ambientais, sinalizando uma associação

entre o desenvolvimento dos sistemas alimentares e as dimensões da sustentabilidade (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

O biogás representa uma importante fonte alternativa de geração de energia, pois diminui a quantidade de resíduos, de efluentes e gases de efeito estufa deixam de ser lançados na atmosfera (RABELO, 2019). As fontes renováveis de energia mais utilizadas no Brasil em 2020, segundo Sousa e Rizzato (2022), foram a lixo, o biodiesel e a energia eólica, totalizando mais de 80 %, enquanto outras biomassas (casca de arroz, capim-elefante e óleos vegetais), energia solar, biogás e gás industrial de carvão vegetal perfazem o restante total.

Na União Europeia, o uso do biogás se encontra em nível avançado, o que diminuiu o número de aterros e, em substituição, foram construídas usinas de recuperação energética *waste to energy* (RABELO, 2019).

Apesar do crescimento recente, a modalidade energia sustentável ainda possui um grande potencial inexplorado no Brasil, havendo espaço para ter um maior desenvolvimento na próxima década. Além disso, o Brasil é um grande produtor de soja, milho, biocombustíveis e proteína animal e tende a aumentar sua produção, ocasionando um aumento de resíduos orgânicos, como de dejetos animais e rejeitos de processos produtivos. No entanto, deve-se ter conhecimento sobre projetos e escolha correta de equipamentos para uso eficiente do biogás para fins energéticos.

A composição do biogás não é fácil de ser definida porque depende do material orgânico utilizado e do tipo de tratamento anaeróbio a que é submetido. No entanto, em Cetesb (2020), é definida uma composição gasosa composta majoritariamente por alguns gases em relação ao volume de gás produzido: metano (50 a 70 %), dióxido de carbono (25 a 50 %) e traços de outros gases (hidrogênio, gás sulfídrico, oxigênio, amoníaco e nitrogênio). Em seu artigo, Plugge (2017) descreve que o biogás pode ser constituído de metano (50 a 75 %), dióxido de carbono (25 a 50 %), pequenas quantidades de outros gases e vapor de água. A autora salienta, também, que o biogás pode ser produzido a partir de matéria orgânica complexa quando decomposta por microrganismos no processo de digestão anaeróbia.

Para Marin *et al.* (2018), o consumo de energia causa, de forma inevitável, impacto sobre o meio ambiente. Diante deste fato, torna-se necessário melhorar a eficiência de transformação e distribuição, assim como descentralizar a produção de energia para se obter maior sustentabilidade dos sistemas de produção. Por outro lado, todo processo de produção gera resíduos e todo resíduo armazena uma quantidade de energia. Assim, os sistemas de produção podem transformar resíduos em energia, reduzindo seu custo de produção e, concomitantemente, diminuindo o seu impacto ambiental.

A geração deste gás, além de diminuir o impacto ambiental, tem potencial para gerar empregos, renda e tributos. Para que haja sustentabilidade neste processo, as questões relacionadas a recursos, capacidade e conhecimento, salientando-se os recursos humanos e materiais, capacidade financeira e intelectual e conhecimentos para gerir e administrar, devem ser sempre levadas em conta. Desta forma, é de extrema relevância criar linhas de crédito específicas para o biogás, com investimento em novas tecnologias, buscando incentivos fiscais para fortalecer o setor (STRASSBURG *et al.*, 2018).

Além de gerar energia com menor custo, a produção do biogás contribui para o saneamento rural, diminuindo a contaminação do meio ambiente e a propagação de doenças infecciosas pela disposição inadequada de dejetos. Outro benefício da produção de biogás é a produção de biofertilizantes para a produção de grãos e pastagens, o que torna a produção do biogás mais competitiva.

Há uma grande variedade de técnicas bem definidas no processo de biogás a partir de águas residuais, lamas e resíduos sólidos com a utilização de diferentes tipos de reatores (totalmente misturado, fluxo plugue, leito de lodo anaeróbio de fluxo ascendente e outros), sendo que as condições do processo, como tempo de retenção, taxa de carregamento, temperatura etc., podem aumentar a estabilidade do processo. Os sistemas de digestor úmido, usando digestor de tanque agitado vertical com diferentes tipos de agitadores, são os mais utilizados (PLUGGE, 2017).

Desta forma, o objetivo geral desse trabalho foi organizar uma análise bibliográfica sobre a produção de biogás, por ser produzido a partir de resíduos urbanos ou industriais e agroindustriais e por decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Sendo assim, a energia do biogás é apresentada como uma alternativa para diminuir impactos socioambientais.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esse trabalho é um recorte qualitativo e bibliográfico sobre o termo “biogás”. Para Prodanov e Freitas (2013), nas pesquisas qualitativas, as variáveis, que são os elementos observáveis, são descritas ou explicadas. Pereira *et al.* (2018) descrevem que, nos métodos qualitativos, o importante é a interpretação por parte do pesquisador através de suas opiniões sobre o fenômeno em estudo.

Com base nos dados qualitativos, pode-se obter resultados em análises qualitativas da produção acadêmica, a qual exprime a construção de conceitos e o fortalecimento de uma área do conhecimento, consolidando um campo reconhecido do saber. Desta forma, mapear a

produção científica desse espaço é relevante para se entender o conjunto discursivo e de pesquisa de uma área de conhecimento ou de uma instituição (MACULAN *et al.*, 2014).

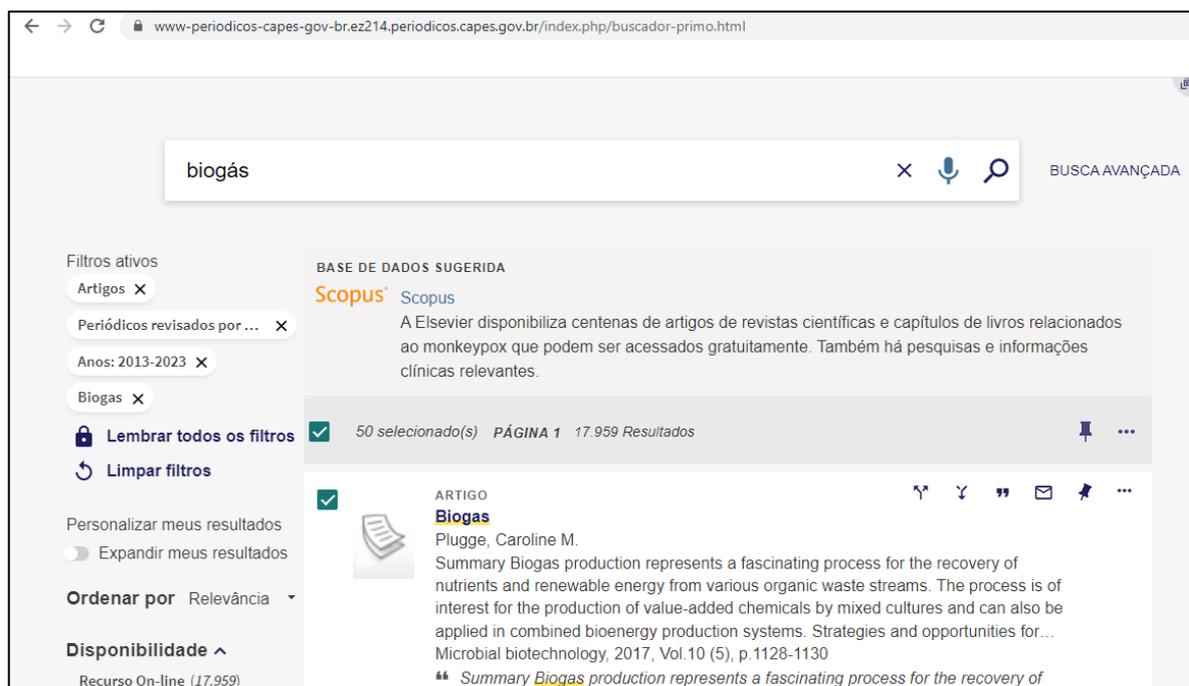
O método bibliográfico de organização e busca é o utilizado para o estudo proposto, trazendo o apanhado de publicações sobre o tema “*biogás*” da série histórica da rede CAFe do portal Periódicos CAPES (Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) de 2013 a 2023 (até janeiro de 2023).

A contribuição do estudo, também, busca se apoiar na geração de *clusters* de palavras-chave, com a utilização do *software Word Cloud*, onde se torna possível visualizar e traçar análises de toda a lista de trabalhos resultantes da busca desenvolvida para este documento.

Para trazer a discussão do tema, foram utilizados os seguintes parâmetros: Palavra-chave: “*biogás*”; Filtro 01: Periódicos revisados por pares; Anos: 2013 até 2023; Filtro 02: assunto: *Biogás*; Dia da pesquisa: 30/01/2023. O segundo filtro foi importante ser usado, pois assim ficou limitado a 17.959 documentos encontrados. Dentre esses, foram selecionados os 50 artigos com maior impacto da base de dados (Figura 01).

A partir destes processos, esse estudo teve o desafio de identificar os diferentes aspectos e dimensões do tema “*biogás*”, que vem tendo vasto interesse e destaque ao longo dos anos.

Figura 01: *Print* da tela com parâmetros utilizados.



Fonte: Portal Periódicos CAPES.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente pesquisa, foram utilizados os 50 artigos sobre o tema “biogás” de maior impacto da base de dados (de 2013 até 2023), para uma mensuração e qualificação deste assunto. Na Tabela 01, foi listada a quantidade de artigos em cada ano. Pode-se verificar que no ano de 2015 houve o maior número de publicações sobre esse assunto e que 54,0 % dos artigos foram publicados entre 2015 e 2018.

Tabela 01: Artigos publicados da série analisada.

Ano	Nº de Artigos Publicados	Percentual (%)
2013	4	8,0
2014	2	4,0
2015	11	22,0
2016	6	12,0
2017	6	12,0
2018	9	18,0
2019	1	2,0
2020	4	8,0
2021	5	10,0
2022	2	4,0
TOTAL	50	100,0

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Nas 50 publicações de maior relevância sobre o tema, foram identificados 207 autores que se dedicaram a trabalhar com o assunto. Somente 5 artigos foram publicados na língua portuguesa (10 %). O restante, 45 artigos, foram publicados na língua inglesa (90 %).

Os principais periódicos que publicaram os artigos foram a *Bioresource Technology*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *Energy (Oxford)*, *Energy Policy*, *Biotechnology Advances*, *Applied Energy*, *Renewable Energy*, *Chemical Engineering Journal*, *Biomass & Bioenergy*, *Energy Conversion and Management*. No Brasil, podem ser citados os periódicos: Informe GEPEC, Revista de Gestão Social e Ambiental, Revista Brasileira de Estudos de População, Engenharia Agrícola e Perspectivas em Ciência da Informação.

Praticamente todos os periódicos analisados foram publicados na Inglaterra, pela Elsevier. Alguns foram publicados no Brasil. Ainda, podem ser mencionadas publicações na Holanda, China, México e Suíça.

O direcionamento das pesquisas sobre o assunto busca, principalmente, estratégias para otimizar a qualidade e as quantidades de biogás, a separação desses gases por membranas, os sistemas de armazenamento e uso de tecnologias para aumentar a eficiência de produção de biogás.

Além disso, foram analisados os usos de vários resíduos, lodo de esgoto, microalgas, plantas de pântano, biocarvão, excrementos de animais, milho, grama e chorume de aterro sanitário para a produção do biogás, bem como alguns estudos dos resíduos de geração doméstica.

Verificou-se, também, que os autores estão preocupados em avaliar os usos do biogás como combustível de frotas agrícolas, para eletricidade, calor e transporte, principalmente na União Europeia. Os demais trabalhos possuem diferentes abordagens, como avaliação do custo de diferentes tipos de biodigestores, parâmetros operacionais que influenciam o processo de biogás, uso de hidrogênio renovável, eficiência de processos AD (digestão anaeróbia), enriquecimento de CH₄ mediado por hidrogênio e remoção bioeletroquímica de CO₂ para melhoria de biogás.

De forma ampla, foram apresentados *insights* metodológicos e recomendações sobre a avaliação do desempenho ambiental e econômico desses sistemas a partir de uma perspectiva de ciclo de vida, tratamento de micropoluentes, toxicidade e estabilidade do sistema, digerido como biofertilizante, sistemas bioeletroquímicos, biorreatores inovadores, sequestro de carbono, melhoramentos de biogás, microbiomas, remediação de resíduos (água), pré-tratamento de resíduos, adição de promotor e modelagem, controle de processo e automação, entre outras.

Na Figura 02, está apresentado o Mapa de Palavras que foi gerado com base nos artigos analisados na pesquisa, sendo evidenciadas as palavras que apareceram com maior frequência, tendo as mesmas maior destaque. Observa-se que a palavra-chave “biogas” é a maior, sendo a que está mais presente nos artigos analisados.

A eficiência de degradação de 21 usinas agrícolas de biogás CSTR em grande escala foi investigada por Ruile *et al.* (2015). Os autores determinaram o potencial de metano residual das etapas de digestão em testes por batelada. Os resultados deste estudo mostraram que o rendimento residual de metano está significativamente correlacionado com o tempo de retenção hidráulico (TRH). Uma degradação quase completa dos substratos de entrada foi alcançada devido a um TRH de mais de 100 dias. Observaram que as características da matéria-prima têm o maior impacto no tempo de degradação. Verificaram, também, que os valores padrão do rendimento de metano são uma ferramenta útil para avaliar a eficiência da degradação. Concluíram que adaptar o TRH aos materiais de entrada é o fator chave para uma degradação eficiente em usinas de biogás.

Na União Europeia (UE), a produção de biogás aumentou devido ao incentivo das políticas de energia renovável, além dos benefícios econômicos, ambientais e climáticos, atingindo 18 bilhões de m³ de metano (CH₄) em 2015, representando metade da produção global de biogás (SCARLAT *et al.*, 2018). No artigo, os autores apresentam uma visão geral do desenvolvimento e perspectivas do biogás e seu uso para eletricidade, calor e transporte na UE.

A cogeração de energia a partir do biogás é cada vez mais significativa na Polônia (IGLIŃSKI *et al.*, 2015), sendo que o número de plantas de energia de biogás agrícola aumentou. O uso de biogás na produção de energia, a partir de lixo, esgoto, excrementos de animais, milho e grama, poderia suprir 7,5 % da demanda energética do país.

Na União Europeia, utiliza-se a pasteurização como método padrão para saneamento de plantas de biogás de matadouros e que manuseiam resíduos de alimentos. Também, a sanitização termofílica integrada foi aprovada pelo órgão da Agricultura da região. Grim *et al.* (2015) comparam os dois métodos em relação à demanda de calor e produção de biogás, em uma planta em escala real na Suécia. Os resultados mostraram que não houve efeito significativo no desempenho do processo ou na produção de biogás. No entanto, na sanitização termofílica integrada, a demanda de calor pode ser reduzida em 46 %, a partir de cálculos teóricos.

A geração doméstica de biogás a partir de resíduos animais para cozinhar e iluminar, ao mesmo tempo em que produz fertilizante orgânico de alta qualidade, é uma proposta viável da solução para famílias agrícolas. Buysman e Mol (2013), chegaram a conclusão que um modelo de mercado puro para o desenvolvimento de biogás em países menos desenvolvidos não funcionarão facilmente. Desta forma, a regulamentação e a coordenação governamentais continuarão necessárias, e o financiamento do carbono não substituirá facilmente a assistência oficial de desenvolvimento e o apoio financeiro governamental.

Como o biogás apresenta impurezas, faz-se necessária a purificação para remoção dos contaminantes. Žák *et al.* (2018), apresentam uma inovação na purificação de biogás a biometano usando uma tecnologia de purificação por membrana de etapa única, sem pré-tratamento e com uso de baixa pressão de alimentação. Foram utilizadas membranas de fibra oca assimétrica com uma camada fina, seletiva e não porosa produzida em carbonato de poliéster no lado do orifício. O melhor fator de separação CO_2/CH_4 foi obtido com um arranjo de duplo estágio operado a 17 °C, produzindo um biogás com pureza de 96 % CH_4 (v/v), resultando em reduções significativas nos gastos operacionais.

No trabalho de Qie *et al.* (2015), os autores analisaram tecnologias de limpeza e melhoramento de biogás, incluindo pureza e impurezas do produto, recuperação e perda de metano, eficiência de atualização e custos operacionais e de investimento. Além disso, o potencial de utilização do biogás e os correspondentes requisitos de qualidade do gás são investigados em profundidade. A seleção da tecnologia de atualização é específica do local, sensível ao caso e depende dos requisitos de utilização do biogás e das circunstâncias locais. Portanto, combinar a tecnologia selecionada para uso com requisitos específicos é significativamente importante.

As usinas de biogás são uma opção promissora para suprir a demanda de eletricidade para compensar a divergência entre a demanda e o fornecimento de energia por fontes não controladas, como a eólica e a solar. Mauky *et al.* (2017), estudaram que a alimentação orientada para a demanda com o objetivo de produção de gás flexível pode ser uma alternativa eficaz. A alimentação flexível resultou em uma taxa variável de produção de gás e uma progressão dinâmica de ácidos individuais e o respectivo valor de pH. Em consequência, uma produção de biogás orientada pela demanda pode permitir economias significativas em termos do volume de armazenamento de gás necessário (até 65%) e permitir uma flexibilidade muito maior da planta em comparação com a produção constante de gás.

Deve-se considerar o desempenho biológico e energético dos sistemas de produção de biogás, pois há necessidade de energia na forma de calor e eletricidade. Assim, para que a usina de biogás individual melhore seu desempenho energético, é necessária uma metodologia robusta para analisar e avaliar a demanda de energia em um nível detalhado. Desta forma, o objetivo do trabalho de Lindkvist *et al.* (2017), foi desenvolver procedimentos para análise detalhada da demanda energética em usinas de biogás. Os autores analisaram os subprocessos (por exemplo, pré-tratamento, digestão anaeróbica, limpeza de gás), os processos unitários (por exemplo, aquecimento, mistura, bombeamento, iluminação) e a combinação destes. Os

resultados mostraram que a metodologia pode ser aplicável em usinas de biogás com diferentes configurações de seu sistema de produção.

A remoção bioeletroquímica de CO₂ (dióxido de carbono) para melhoramento do biogás foi proposta e demonstrada por Xu, Wang e Dawn (2014), em experimentos contínuos e em batelada. O sistema de enriquecimento de biogás *in-situ* pareceu ter um desempenho melhor do que o *ex-situ*, sendo que o teor de CO₂ foi mantido abaixo de 10 % em ambos os sistemas. O desempenho do sistema *in-situ* foi melhor em operação contínua. Como resultado, a remoção bioeletroquímica de CO₂ apresentou grande potencial para o aproveitamento do biogás.

Uma instalação para melhoramento da conversão de biogás em biometano usando hidrogênio renovável foi analisada por Curto e Martín (2019). Eles estudaram a otimização multiperíodo para a seleção da tecnologia renovável ou combinação de tecnologias para a produção de hidrogênio, que pode ser produzido via eletrólise usando energia solar ou eólica. Também, estudaram a metanação de CO₂ do biogás para produzir gás natural sintético.

Os trabalhos recentes desenvolvimentos e aplicações do enriquecimento de metano em processos de metanação microbiana foram revisados sistematicamente por Arval *et al.* (2018). As tecnologias microbianas disponíveis baseadas no enriquecimento de CH₄ mediado por hidrogênio, em particular *ex-situ*, *in-situ* e bioeletroquímica, foram comparadas e discutidas. Os autores revisaram, também, plantas piloto e plantas comerciais de enriquecimento de CH₄ a partir de biometanação microbiana.

Em seu artigo, Khanal *et al.* (2021), descrevem avanços recentes na digestão anaeróbia. São abordados temas como borrefinaria anaeróbia, alongamento de cadeia, tratamento de micropoluentes, toxicidade e estabilidade do sistema, biofertilizantes, sistemas bioeletroquímicos, biorreatores inovadores, sequestro de carbono, melhoramento de biogás, microbiomas, remediação de resíduos líquidos, pré-tratamento de resíduos, adição de aceleradores, modelagem, controle de processo e automação, entre outras.

A digestão anaeróbia do bio-óleo derivado da pirólise do digerido sólido foi testada em modo de batelada usando um inóculo não adaptado (HÜBNER; MUMME, 2015). O maior rendimento de metano foi observado para o bio-óleo a 330 °C. A maioria dos compostos orgânicos voláteis (VOCs, na sigla em inglês) contidos no bio-óleo (furfural, fenol, catecol, guaiacol e levoglucosan) foram reduzidos abaixo do limite de detecção. Desta forma, a pirólise integrada à digestão anaeróbia, além da conversão termoquímica do digerido, também apresentam a bioconversão do bio-óleo de pirólise a gás metano.

Estratégias inovadoras para produção de biogás foram elencadas na revisão de Patinvoh *et al.* (2017), pois os substratos utilizados para produção de biogás podem ser

indigeríveis, difíceis de digerir ou tóxicos. Os autores discorreram sobre o pré-tratamento físico comumente conhecido, a descompressão rápida, a auto-hidrólise, os pré-tratamentos ácidos ou alcalinos, o pré-tratamento ou lixiviação com solventes (por exemplo, para lignina ou celulose), os pré-tratamentos supercríticos, oxidativos ou biológicos, bem como a gaseificação e a fermentação combinadas, a produção integrada de biogás e pré-tratamento, o projeto inovador de biodigestor de biogás, a codigestão e o bioacrécimo.

Deena *et al.* (2022) apresentam uma revisão com o uso de biocarvão (*biochar*) como aditivo na produção de biogás. Segundo os autores, as propriedades intrínsecas do biocarvão, como tamanho dos poros, propriedades de superfície específicas e capacidade de troca catiônica, o tornam um aditivo ideal que enriquece as funções microbianas e melhora a digestão anaeróbica.

Insights metodológicos e recomendações sobre a avaliação do desempenho ambiental e econômico a respeito da digestão anaeróbica de resíduos alimentares a partir de uma perspectiva de ciclo de vida foram desenvolvidos por Feiz *et al.* (2020). Os autores forneceram uma taxonomia da cadeia de valor do biogás proveniente do desperdício de alimentos que descreve as principais atividades, fluxos e parâmetros em toda a cadeia de valor. Ao considerar as múltiplas funções da produção de biogás a partir desses resíduos, propuseram alguns indicadores-chave de desempenho para permitir a comparação de diferentes sistemas de produção de biogás sob as perspectivas de impacto climático, uso de energia primária, reciclagem de nutrientes e custo.

Dentre os 50 artigos pesquisados, pode-se citar alguns artigos publicados no Brasil que evidenciam o uso de tecnologias para produção e utilização de biogás, assim como pesquisas na área.

No município de Cascavel – PR, Calza *et al.* (2015), avaliaram os custos envolvidos na construção de modelos de biodigestores (indiano, chinês e canadense). Os autores determinaram os custos de produção de energia a partir do biogás produzido por dejetos de caprinos, bovinos e suínos em sistemas de semiconfinamento. A maior produção de energia foi verificada para bovinos.

O trabalho de Höfig *et al.* (2021), teve como objetivo analisar a viabilidade econômica da utilização do biogás como combustível para abastecer a frota de uma fazenda em Brasilândia, no Mato Grosso do Sul. Em um primeiro momento, foi utilizado biogás de duas granjas da fazenda, o qual foi encaminhado via gasoduto até um microposto. Para o segundo caso, foi utilizado biogás de uma granja, sendo o biogás encaminhado ao mesmo microposto. Em uma

terceira via, foi utilizado um microposto próximo a um biodigestor. Este último apresentou a maior viabilidade econômica, sendo o melhor cenário para investimento.

A produção de biogás utilizando resíduos sólidos gerados em uma indústria de papel instalada no município de Belo Oriente, de Minas Gerais, foi avaliada por Sylvio e Ferreira (2021). Foram feitos dez tratamentos com diferentes concentrações de resíduos: lodo biológico do tratamento de esgoto da indústria, dregs e munha de carvão, provenientes do processo de beneficiamento da celulose. O tratamento que apresentou melhor resultado na produção total de biogás foi a mistura de 80% de lodo biológico, 10 % de dregs e 10 % de munha de carvão. O teor de munha de carvão acima de 20 % na mistura do efluente inibe a atividade microbiológica e a produção de biogás.

Pode-se verificar, nos vários artigos pesquisados, que há uma preocupação com a sustentabilidade nos processos que geram biogás. Além da produção de energia limpa e não fóssil, a produção do biogás contribui para o saneamento rural, diminuindo a contaminação do meio ambiente, sendo uma alternativa para a diminuição dos impactos socioambientais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Novas tecnologias podem ser utilizadas para diminuir o impacto ambiental dos resíduos produzidos pelo homem. A produção de biogás pode ser uma alternativa a um problema que vem crescendo nos últimos anos.

Além de produzir energia limpa, natural, não fóssil, a produção do biogás contribui para o saneamento rural, diminuindo a contaminação do meio ambiente, podendo, ainda, produzir biofertilizantes. No entanto, deve haver maiores pesquisas nessa área. Os biodigestores são uma tecnologia relativamente nova e necessita maiores estudos para que sua aplicação seja mais simples e corriqueira.

O desenvolvimento de tecnologias de pequena escala, mais baratas e eficientes para uso em escala agrícola, mais amplamente aplicável, pode ser um fator para a ampliação da produção do biogás.

Por outro lado, devem ser criadas linhas de crédito para que os produtores possam adquirir essas tecnologias e operá-las de forma satisfatória. Assim, pode-se pretender um sistema que alie as questões sociais, ambientais e o desenvolvimento econômico, objetivando-se a sustentabilidade através da evolução que não esgota os recursos para o futuro.

REFERÊNCIAS

- ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS, P. G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology advances**, v. 36, p.452-466, 2018.
- ARVAL, N.; KVIST, T.; AMMAM, F.; PANT, D.; OTTOSEN, L. D. M. An overview of microbial biogas enrichment. **Bioresource technology**, v. 264, p. 359-369, 2018.
- BUYSMAN, E.; MOL, A. P. J. Market-based biogás sector development in least developed contries – The case of Cambodia. **Energy Policy**, v. 63, p. 44-51, 2013.
- CALZA, L. F.; LIMA, C. B.; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, 2015, v. 35, p. 990-997, 2015.
- CETESB. **Biogás, Definição**. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/biogas/#:~:text=Contudo%2C%20em%20linhas%20gerais%2C%20o,mistura%20gasosa%20composta%20principalmente%20por%3A&text=Metano%20\(CH4\)%3A%2050,do%20volume%20de%20g%C3%A1s%20produzido.&text=Di%3%B3xido%20de%20carbono%20\(g%C3%A1s%20carb%C3%B4nico,do%20volume%20de%20g%C3%A1s%20produzido.](https://cetesb.sp.gov.br/biogas/#:~:text=Contudo%2C%20em%20linhas%20gerais%2C%20o,mistura%20gasosa%20composta%20principalmente%20por%3A&text=Metano%20(CH4)%3A%2050,do%20volume%20de%20g%C3%A1s%20produzido.&text=Di%3%B3xido%20de%20carbono%20(g%C3%A1s%20carb%C3%B4nico,do%20volume%20de%20g%C3%A1s%20produzido.) Acesso em: 25 jan. 2023.
- CURTO, D.; MARTÍN, M. Renewable based biogas upgrading. **Journal of cleaner production**, v. 224, p. 50-59, 2019.
- DEENA, S. R.; VICKRAM, A. S.; MANIKANDAN, S.; SUBBAIYA, R.; KARMEGAM, N.; RAVINDRAN, B.; CHANG, S. W.; AWASTHI, M. K. Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review. **Bioresource technology**, v. 355, p. 127234-127234, 2022.
- FEIZ, R.; JOHANSSON, M.; LINDKVIST, E.; MOESTEDT, J.; PÅLEDAL, S. N.; SVENSSON, N. Key performance indicators for biogas production—methodological insights on the life-cycle analysis of biogas production from source-separated food waste. **Energy (Oxford)**, v. 200, p.117462, 2020.
- GRIM, J.; MALMROS, P.; SCHNÜRER, A.; NORDBERG, Å. Comparison of pasteurization and integrated thermophilic sanitation at a full-scale biogas plant – Heat demand and biogas production. **Energy (Oxford)**, v.79, p. 419-427, 2015.
- HÖFIG, P.; LOFHAGEN, J. C. P.; SILVA, G. M. F. Viabilidade econômica do uso do biogás como combustível veicular em uma grande propriedade rural. **Informe GEPEC**, v. 25, p. 185, 2021.
- HÜBNER, T.; MUMME, J. Integration of pyrolysis and anaerobic digestion – Use of aqueous liquor from digestate pyrolysis for biogas production. **Bioresource technology**, v. 183, p.86-92, 2015.

IGLIŃSKI, B.; BUCZKOWSKI, R.; CICHOSZ, M. Biogas production in Poland—Current state, potential and perspectives. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 50, p. 686-695, 2015.

KHANAL, S. K.; LÜ, F.; WONG, J. W. C.; WU, D.; OECHSNER, H. Anaerobic digestion beyond biogas. **Bioresource technology**, v. 337, p. 125378-125378, 2021.

LINDKVIST, E.; JOHANSSON, M.; ROSENQVIST, J. Methodology for Analysing Energy Demand in Biogas Production Plants—A Comparative Study of Two Biogas Plants. **Energies** (Basel), *Energies* (Basel), v. 10, p. 1822, 2017.

MACULAN, B. C. M. D. S.; LIMA, G. N. B. O.; PONTES, F. V. Análise qualitativa de dados bibliométricos: uma visão da produção acadêmica do PPGCI/UFMG. **Encontro Brasileiro de Bibliometria e Cientometria**, v. 4, p. A64, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.11959/brapci/45465>. Acesso em: 08 fev. 2023.

MARIN, B.; VELOSO, A. V.; MATTIOLI, M. C.; SOARES, J. F. Avaliação sustentável de biogás em unidade de produção de suínos e seu reaproveitamento energético. **Revista Agroambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 4, 2018.

MAUKY, E.; WEINRICH, S.; JACOBI, H.; NÄGELE, H.; LIEBETRAU, J.; NELLES, M. Demand-driven biogas production by flexible feeding in full-scale – Process stability and flexibility potentials. **Anaerobe**, 2017, v. 46, p. 86-95, 2017.

OLIVEIRA, A. L. A.; CRUZ, F. T.; SCHNEIDER, S. Sustentabilidade e escolhas alimentares: por uma biografia ambiental dos alimentos. **Sustentabilidade em Debate**, v. 10, n.1, p. 146-158, 2019.

PATINVOH, R. J.; OSADOLOR, O. A.; CHANDOLIAS, K.; HORVÁTH, I. S.; TAHERZADEH, M. J. Innovative pretreatment strategies for biogas production. **Bioresource technology**, v. 224, p. 13-24, 2017.

PEREIRA, A. S.; SHITSUKA, D. M.; PARREIRA, F. J.; SHITSUKA, R. **Metodologia da pesquisa científica** [recurso eletrônico]. Santa Maria, RS: UFSM, NTE, 1. ed. 2018. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf. Acesso em: 07 fev. 2023.

PLUGGE, C. M. Biogas. **Microbial Biotechnology**, v. 10, p. 1128-1130, 2017.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E.C. **Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2. ed., 2013. Disponível em: <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2023.

QIE, S.; LI, H.; YAN, J.; LIU, L.; YU, Z.; YU, X. Selection of appropriate biogas upgrading technology—a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 51, p. 521-532, 2015.

RABELO, C. A. O fomento do biogás como fonte de energia renovável. **Revista Videre**,

Dourados, MS, v. 11, n. 22, 2019.

RUILE, S.; SCHMITZ, S.; MÖNCH-TEGEDER, M.; OECHSNER, H. Degradation efficiency of agricultural biogas plants – A full-scale study. **Bioresource technology**, v. 178, p. 341-349, 2015.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable energy**, v. 129, p. 457-472, 2018.

SILVEIRA, S. C.; MUNIZ, A.; SOUSA, A. CAMPOS, A. T. Modelos não lineares ajustados à produção acumulada de biogás provenientes de camas sobrepostas de suínos. **Revista Agroambiental**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, 2018.

SOARES, P. B.; CARNEIRO, T. C. J.; CALMON, J. L.; CASTRO, L. O. C. O. Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados *Web of Science*. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 175-185, 2016. Disponível em: http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212016000100175. Acesso em: 08 fev. 2023.

SOUSA, A. L.; RIZZATO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 2, 2022.

STRASSBURG, U.; OLIVEIRA, N. M.; ROCHA JUNIOR, W. F. As percepções dos atores locais sobre o biogás no Oeste do Paraná. **Revista Desenvolvimento em Questão**, Editora Unijuí, n. 45, p. 287-307, 2018.

SYLVIO, A. V.; FERREIRA, R. S. Avaliação da produção de biogás a partir de resíduos de uma indústria de celulose. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 15, p. 1-15, 2021.

THORIN, E.; OLSSON, J.; SCHWEDE, S.; NEHRENHEIM, E. Co-digestion of sewage sludge and microalgae – Biogas production investigations. **Applied energy**, v. 227, p.64-72, 2018.

XU, H.; WANG, K.; HOLMES, D. E. Bioelectrochemical removal of carbon dioxide (CO₂): An innovative method for biogas upgrading. **Bioresource technology**, v. 173, p. 392-398, 2014.

ŽÁK, M.; BENDO VÁ, H.; FRIESS, K.; BARA, J. E.; IZÁK, P. Single-step purification of raw biogas to biomethane quality by hollow fiber membranes without any pretreatment – An innovation in biogas upgrading. **Separation and purification technology**, v. 203, p. 36-40, 2018.