



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 1, pp. 180–194
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p180-194>

Produção de biogás a partir dos resíduos da produção de biodiesel no Brasil – uma revisão

Biogas production from biodiesel production residues in Brazil – a review

Glaucio Gualtieri Honório^{1,*}

¹ Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, campus Maracanã, RJ, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: glaucio.honorio@eng.uerj.br

Received: 2 May 2024 | Accepted: 28 May 2024 | Published online: 5 June 2024

Resumo: Problemas ligados à queima de combustíveis fósseis aliados a crescente demanda mundial tem contribuído para que a sociedade se lance na busca por fontes alternativas e sustentáveis de energia, principalmente a proveniente da biomassa, onde se destaca o biodiesel. Durante o seu processo de produção, o glicerol é o principal subproduto formado, podendo ser absorvido por diversas indústrias. Porém o crescimento na produção tem levado a uma saturação do mercado com o glicerol, e encontrar formas de aproveitamento deste resíduo torna-se fundamental. O presente estudo busca esclarecer a utilização da glicerina residual como substrato para a codigestão anaeróbia na produção de biogás, outra fonte de energia renovável, que vem sendo amplamente estudada na busca de um futuro mais sustentável, reduzindo o consumo de gás natural. Conforme apresentado, a utilização do glicerol associado a diversos resíduos melhora a produção do biogás, sobretudo do metano, constituindo em uma forma promissora para destinação desses resíduos.

Palavras-chave: Biogás, Biodiesel, Glicerol, Codigestão anaeróbia

Abstract: Problems linked to the burning of fossil fuels combined with growing global demand have contributed to society's search for alternative and sustainable sources of energy, mainly from biomass, where biodiesel stands out. During its production process, glycerol is the main by-product formed and can be absorbed by various industries. However, the growth in production has led to a saturation of the market with glycerol, and finding ways to use this residue becomes essential. The present study seeks to clarify the use of residual glycerin as a substrate for anaerobic co-digestion in the production of biogas, another source of renewable energy, which has been widely studied in the search for a more sustainable future, reducing the consumption of natural gas. As presented, the use of glycerol associated with various waste improves the production of biogas, especially methane, constituting a promising way to dispose of this waste.

Keywords: Biogas, Biodiesel, Glycerol, Anaerobic codigestion.

1 Introdução

A demanda mundial de energia vem crescendo a cada ano, tornando-se um dos maiores desafios da sociedade atual. Além da elevação dos preços do barril de petróleo, a queima de combustíveis fósseis e seus problemas ambientais imprimem à humanidade a necessidade da busca por fontes renováveis e sustentáveis de energia (Lôbo e Ferreira, 2009). Segundo o relatório do Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC) a Terra vem aproximadamente 0,2 °C a cada década, sendo impossível alcançar a antiga meta de frear o aumento em 1,5 °C (em relação aos níveis pré-industriais) até 2100, tendo registrado aquecimento de 1,1 °C até o ano de 2023, sendo entre 0,68 °C e 1,01 °C nos oceanos e entre 1,34 °C e 1,83 °C nos continentes. O ano de 2023 quebrou recordes de temperatura média do planeta por duas vezes. Isso se torna especialmente grave quando algumas consequências das mudanças climáticas se tornam irreversíveis a curto prazo, como o aumento do nível dos mares e eventos climáticos extremos (como fortes tempestades) e aumento das ondas de calor. O progresso da desertificação é outro

sério problema, afetando alguns pontos do Brasil, como o Nordeste (onde já se forma um deserto do tamanho da Inglaterra) e o noroeste do Estado do Rio de Janeiro (IPCC, 2023). Dentre os principais responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa (GEE), podem ser citados fatores tais como a agropecuária e o uso inadequado da terra, o desmatamento e a produção de energia a partir de combustíveis fósseis. A contribuição de cada setor pode ser entendida pelo gráfico da Figura 1:

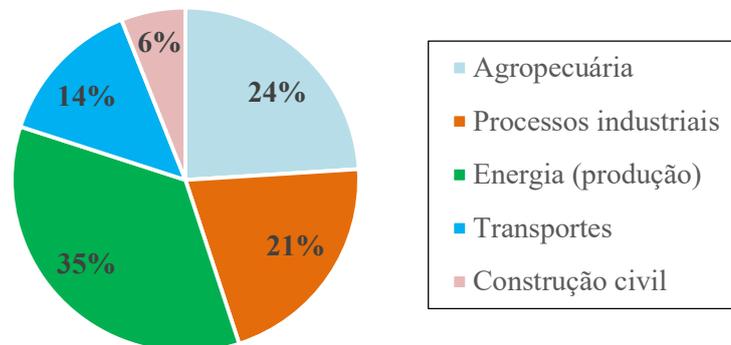


Figura 1. Principais setores econômicos responsáveis por emissões globais de GEE. Dados obtidos a partir do relatório do IPCC 2023.

De acordo com o gráfico, a produção de energia contribui com aproximadamente 35 % das emissões de GEE, porém, levando em consideração o gasto de energia nos outros setores, a contribuição do setor energético é muito maior. Segundo o IPCC, o setor energético é o principal responsável pela emissão de GEE, principalmente o uso de fontes derivadas de combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural, sendo responsáveis por até 80 % das emissões de gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (Almeida, 2023). Com isso, é crescente a busca por fontes de energia de menor impacto ambiental em todo mundo, tais como solar, eólica, hidrelétrica, maremotriz, biomassa, etc. Em seu último relatório, o IPCC aponta que existem desenvolvimentos bastante promissores em tecnologias de baixo carbono, impulsionando cada vez mais estudos no intuito de diminuir a queima dos combustíveis fósseis. Apesar dos esforços, eles ainda não são suficientes para manter o aquecimento global em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, e com isso as mudanças podem se tornar irreversíveis em alguns ecossistemas ao redor do mundo (IPCC, 2023).

Um combustível com menor potencial poluidor comparado à queima de combustíveis fósseis é o biodiesel. Sua vantagem em relação ao diesel de petróleo é a menor emissão de poluentes atmosféricos. De acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) o biodiesel é um “combustível composto por alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzidos a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal, e que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico” (ANP- resolução n° 14/2012). O processo de transesterificação consiste na reação de ácidos graxos de cadeia longa, os triglicerídeos, com um álcool (sendo mais comumente utilizado o metanol), catalisado por um ácido ou uma base. A reação fornece uma mistura de ésteres metílicos de cadeia curta (que formam o biodiesel) e o glicerol (ou glicerina) como subproduto, de acordo com a reação da Figura 2 (Honorio et al., 2019):

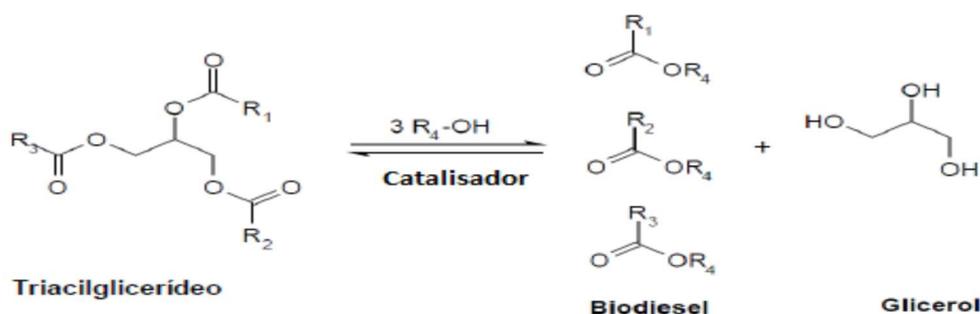


Figura 2. Reação de transesterificação de um triglicerídeo. Fonte: Blatt (2014).

Durante o processo, 1 mol de glicerol é gerado para cada 3 mols de ésteres metílicos formados, o que corresponde a aproximadamente 10 % do produto em massa, sendo este o principal subproduto do processo. O glicerol é um álcool de fórmula molecular C₃H₈O₃, de nome oficial 1,2,3 – propanotriol. Sua

massa molecular é 92,09 g/mol, sendo solúvel em solventes polares como a água e o etanol (Honorio et al., 2019).

Constituindo-se em um líquido incolor bastante viscoso e com elevada carga orgânica, o glicerol é praticamente insolúvel no biodiesel, sendo separado deste durante o processo de produção através de uma extração líquido-líquido (Honorio et al., 2019). A glicerina gerada como subproduto neste processo pode ser absorvida pela indústria, principalmente de medicamentos, cosméticos e itens de higiene pessoal. Porém a crescente demanda da produção deste biocombustível no país tem levado a saturação do mercado com o glicerol gerado, e formas viáveis tanto ambiental quanto economicamente são importantes para a destinação deste subproduto (Nartker et al., 2014).

Nos últimos anos é crescente o interesse da utilização do glicerol como fonte orgânica em processo de codigestão para geração de hidrogênio e metano através de processo biológico, o biogás (Kitamura et al., 2022). O biogás é um recurso energético alternativo ambientalmente vantajoso, pois gera energia através da decomposição anaeróbia de rejeitos e lixo orgânico, que gerariam gases, como o metano, prejudiciais ao meio ambiente (Duarte et al., 2008). Segundo dados da Empresa de Energia Elétrica (EPE) 1,4 % da energia gerada no país em 2021 são representados pelo biogás, que teve uma expansão de 9,5 % ao ano desde 2019. Somente no ano de 2022 a produção aumentou 21,3 %. Hoje o Brasil conta com 442 plantas de geração de energia a partir do biogás (UDOP, 2023).

O biogás pode ser produzido a partir do processo de biodigestão anaeróbia, que consiste na degradação de resíduos orgânicos em substâncias como o metano, onde microorganismos atuam degradando a matéria orgânica na ausência de oxigênio (Manfron, 1991). O processo de digestão anaeróbia possui dois estágios: o primeiro envolvendo bactérias fermentativas não metanogênicas na formação de ácidos orgânicos e um segundo estágio onde bactérias metanogênicas catabolizam os produtos do estágio anterior levando a formação de metano (Bryant, 1979). Durante o primeiro estágio há ainda a formação de hidrogênio a partir de álcoois que são oxidados a ácidos (Manfron, 1991). O processo de biodigestão pode ser realizado com uma mistura de substratos que possuem características complementares, recebendo o nome de codigestão anaeróbia. Entre as principais vantagens dos processos de codigestão, pode-se citar a elevada remoção da matéria orgânica, além de um alto rendimento na produção de metano (Lins et al., 2021). Como a glicerina possui uma grande quantidade de matéria orgânica disponível para os microorganismos, o seu aproveitamento tem sido objeto de estudo como cossustrato para outros resíduos na produção do biogás. Estudos apontam que diferentes bactérias são capazes de metabolizar o glicerol, incluindo os gêneros *Klebsiella*, *Clostridium* e *Enterobacter* (Almeida et al., 2023).

Em vista disso, o intuito deste trabalho foi descrever e analisar, a partir de uma revisão da literatura entre os anos de 2018 e 2024, a utilização da glicerina residual dos processos de produção do biodiesel como cossustrato na codigestão anaeróbia para a produção do biogás.

2 Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão sistemática da literatura, baseado em uma pesquisa onde foram extraídos dados nacionais com foco na produção do biogás a partir da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos com glicerol residual da produção de biodiesel. Para execução deste trabalho foram utilizados os seguintes banco de dados: Google Acadêmico (GA), Scielo, Scopus e Web of Science (WOS), visando apenas trabalhos produzidos no Brasil (nos idiomas português e inglês) no período compreendido entre 2018 e 2024.

Foram utilizados os seguintes descritores para a pesquisa: “biodiesel”, “biogás”, “produção de biodiesel”, “produção de biogás”, “glicerol”, “Brasil”, “codigestão anaeróbia” e seus correspondentes em inglês (“biodiesel”, “biogas”, “biodiesel production”, “biogas production”, “glycerol”, “Brazil”, “anaerobic codigestion”). Para otimizar a busca pelos bancos de dados foi utilizada também a técnica de truncagem, que corresponde na combinação dos descritores através da palavra AND (ex. “produção de biodiesel” AND “produção de biogás” AND “glicerol”), com o intuito de se obter um maior número de resultados, além de resultados mais precisos.

Do total de estudos encontrados, a seleção aconteceu segundo alguns critérios de elegibilidade, que incluíram trabalhos produzidos no Brasil, sendo aceito somente os idiomas português e inglês, artigos indexados e originais publicados em revistas científicas (processo por revisão por pares cegos), no período entre 2018 e 2024. A decisão de incluir ou não o trabalho ocorreu de acordo com o seguinte procedimento:

1. Conferiu-se se o resumo possui informações importantes referentes ao uso de glicerol residual da produção do biodiesel na produção de biogás.
2. Quando o resumo não forneceu informações suficientes, foram analisadas as conclusões.
3. Não sendo suficiente, foi lido o trabalho completo.
4. Por fim, os trabalhos selecionados foram estudados integralmente para a confecção deste estudo.

3 Resultados e discussões

3.1 Trabalhos selecionados

A consulta bibliográfica nas bases estudadas retornou um total de 182 artigos com os descritores pesquisados. Após os critérios de seleção, excluindo-se as duplicidades e os artigos desenvolvidos fora do Brasil, somaram-se 47 resultados. A maior parte dos resultados selecionados foi obtida através da plataforma Web of Science (20 artigos científicos). Quanto ao ano, em 2022 e 2023 foram produzidos o maior número de publicações (10 trabalhos em cada ano). Cabe ressaltar que, além dos 47 artigos científicos selecionados, foram encontrados na literatura 16 trabalhos acadêmicos (entre dissertações de mestrado e teses de doutorado), porém não foram selecionados por não atender o critério de passar por revisão por pares cegos. Nos gráficos da figura 3 são apresentados os resultados de acordo com a base de dados e o ano de publicação. A Figura 4 nos fornece informações mais detalhadas sobre o ano de publicação em cada base de dados. Na Tabela 1 encontram-se os 5 artigos que mais foram citados em outros trabalhos dentre os selecionados.

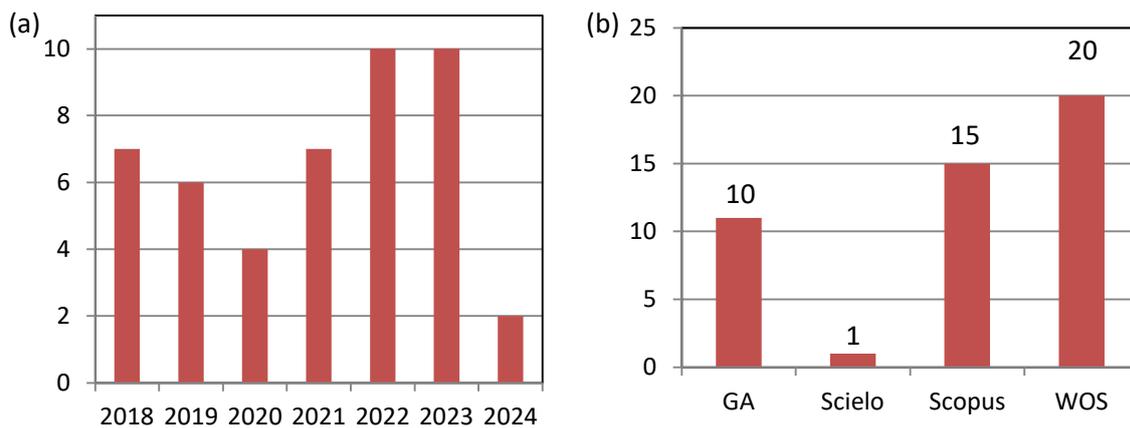


Figura 3. Gráficos com os trabalhos publicados: a) por ano, no período compreendido entre 2018 e 2024; b) por base de dados, no mesmo período.

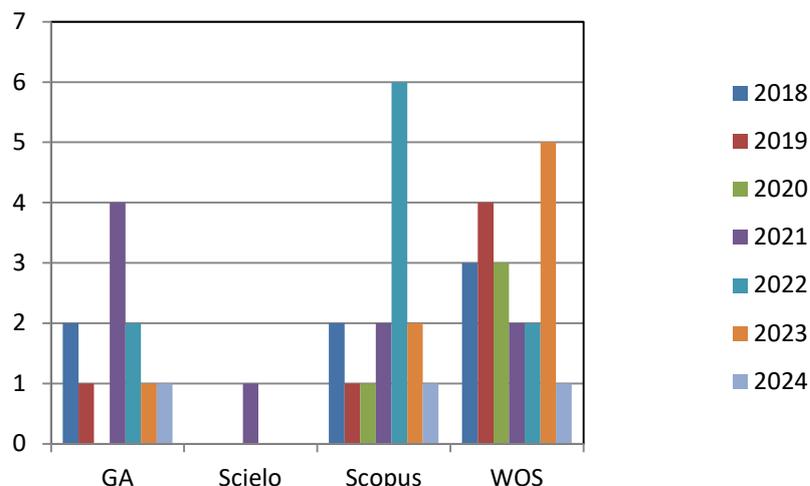


Figura 4. Gráfico com os trabalhos publicados no período 2018/2024 por base de dados.

Tabela 1. Artigos selecionados no estudo que mais foram citados em outros trabalhos.

Autores	Título	Ano	Citações
Silva et al.	Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol	2018	120
Meier et al.	Production of biohydrogen by an anaerobic digestion process using the residual glycerol from biodiesel production as additive to cassava wastewater	2020	36
Veroneze et al.	Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses	2019	35
Rodrigues et al.	Energy valorization of crude glycerol and sanitary sewage in hydrogen generation by biological processes	2020	29
Ferreira et al.	Co-digestion of sewage sludge with crude or pretreated glycerol to increase biogas production	2018	22

3.2 Desenvolvimento

Entre os estudos selecionados, Almeida et al. (2023) apresentaram uma revisão da literatura a respeito da utilização do glicerol bruto na produção de biocombustíveis, sobretudo etanol, hidrogênio e o biogás, a partir de processos de fermentação. Em outro trabalho de revisão de literatura, Santos e Mazzoneto (2022) analisaram a destinação da glicerina residual na produção de biodiesel mediante o crescimento na produção deste biocombustível no país. Dentre as principais utilizações, o estudo concluiu que o potencial energético da glicerina para produção de biogás é bastante positivo, porém ainda pouco explorado frente a usos como na indústria farmacêutica, alimentação de animais e obtenção de novos produtos químicos. Segundo os autores, a produção energética é pouco explorada, pois apresenta menor rentabilidade econômica que as outras utilizações.

Quanto ao processo de codigestão, a maior parte dos artigos selecionados propôs o lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) como inóculo para a codigestão com glicerol para produção de biogás. Estudos mostram que a codigestão anaeróbia aumenta a produtividade de biogás a partir do lodo de ETE, pois o cossustrato fornece nutrientes muitas vezes ausentes ou deficientes no lodo (Jensen et al., 2014). Além do lodo, outros resíduos foram propostos nos trabalhos, com destaque para a vinhaça da cana-de-açúcar, subproduto da obtenção do etanol. Dejetos aviários, suínos e bovinos, águas residuárias do processamento do arroz e da mandioca, soro de queijo, melaço de cana e de soja, resíduos alimentares e biomassa microalgal estão entre os demais inóculos estudados, com alguns trabalhos avaliando misturas ternárias. O pH do meio e a concentração de glicerol adicionada ao inóculo se mostraram parâmetros importantes na produção tanto de hidrogênio quanto de metano. As condições de temperatura, mesofílicas (temperaturas até aproximadamente 40 °C) e termofílicas (temperaturas acima de 50 °C) também foram estudadas em alguns trabalhos.

Santos Filho et al. (2018) propuseram um estudo onde avaliaram a codigestão do lodo de ETE com glicerina residual da produção do biodiesel. Após 80 dias de incubação sob condições mesofílicas o estudo concluiu que o volume de biogás acumulado na ausência de glicerina foi maior do que quando a glicerina foi adicionada. Segundo os autores, a glicerina pode ter inibido o processo de biodigestão devido à sobrecarga orgânica. Paulista et al. (2019) também observaram que a elevada carga orgânica de glicerol bruto provoca uma inibição dos microorganismos metanogênicos. Para contornar o problema, os autores pré trataram o glicerol com o uso de energia ultrassônica. O grupo avaliou a influência de pré-tratamentos do glicerol bruto com algumas bactérias, como das espécies *Aspergillus niger* e *Escherichia Coli*, que produzem lipases capazes de degradar ácidos graxos de cadeia longa, inibidores no processo de digestão anaeróbia. Os resultados mostraram uma melhora no rendimento principalmente do metano, de 11 % para um incremento de 0,2 % de glicerol até 99 % para um incremento de 1,7 %, quando a espécie *A. niger* foi utilizada. Já a biodegradação por *E. Coli* não forneceu bons resultados. Foi verificado pelo grupo que a

utilização do ultrassom aumentou consideravelmente a produção do biogás, obtendo um rendimento de até 73 % de metano. Vasconcelos et al. (2019) estudaram a influência da glicerina na estrutura de bactérias em reatores anaeróbios, observando que maiores incrementos de glicerol levaram a um aumento da população de bactérias, o que nem sempre foi traduzido em uma maior produção de metano e, principalmente, hidrogênio.

Outros estudos evidenciaram que a concentração de glicerina adicionada ao inóculo é um parâmetro importante no processo de codigestão, pois enquanto concentrações menores aumentam a produtividade de biogás, altos teores de glicerina podem inibir a produção do mesmo. Ferreira et al. (2018) avaliaram a codigestão do lodo de ETE com glicerol residual em três níveis de adição de glicerol bruto ao lodo em condições mesofílicas e sem agitação: adição de maiores proporções (5 a 20 % v/v), com proporção de 1 % v/v e com incrementos menores (0,3 a 0,7 % v/v). Na primeira etapa, a adição de grandes proporções levou a uma inibição na produção de metano quando comparado ao lodo sem adição de glicerol. Com pequenas adições observou-se uma maior produção do biogás. A adição de 0,5 % v/v de glicerol ao lodo de esgoto apresentou os melhores resultados, com a produção de metano 1,7 vezes maior que a produção do lodo sem adição do glicerol. O mesmo grupo avaliou posteriormente a produção de biogás a partir de uma mistura ternária contendo resíduos alimentares, lodo de ETE e glicerol bruto, em digestores anaeróbios operando durante 60 dias em condições mesofílicas. Para controle, um dos digestores recebeu apenas lodo, enquanto o outro recebeu a mistura ternária nas proporções (em volume) 89,6 % de lodo, 10% de resíduos alimentares e 0,4 % de glicerol bruto (condições otimizadas em estudos preliminares). Enquanto o biodigestor contendo apenas o lodo apresentou maior instabilidade produzindo 3 L/dia de biogás (23 % de metano), no biodigestor contendo a mistura ternária a produção foi de 21L/dia (43 % de metano) (Ferreira et al., 2018).

O estudo de Ferreira et al. (2018) atribuiu os resultados obtidos principalmente a alterações no pH do meio, pois em altas concentrações de glicerol houve uma diminuição acentuada do pH, o que pode ter inibido a produção do metano, enquanto em concentrações menores houve um tamponamento do meio. A conclusão pode ser corroborada por outro trabalho. O estudo de Silva et al. (2018) avaliou a produção de hidrogênio e metano a partir da codigestão de resíduos alimentares, lodo de ETE e glicerol bruto em condições mesofílicas, onde as concentrações de glicerol variaram entre 1 % e 3 % v/v; em um sistema anaeróbio de acidogênese/metanogênese de dois estágios. O estudo concluiu que a adição de glicerol bruto contribuiu para o aumento da produção tanto de hidrogênio quanto de metano. Enquanto a proporção 3 % de glicerol forneceu os melhores resultados para a obtenção do hidrogênio, o metano teve maior rendimento com a mistura contendo 1 % v/v de glicerol bruto. Foi observada uma redução abrupta na produção do biometano na proporção 3 %v/v, notando-se alta instabilidade nos valores de pH do meio. Levando em consideração a produção tanto de H₂ quanto de CH₄ os melhores rendimentos foram obtidos com a mistura contendo 1 % v/v de glicerol bruto. O estudo também concluiu que a produção foi maior quando os resíduos alimentares foram aumentados em relação ao lodo de esgoto, na proporção 2:1, o que pode ser justificado pelo aumento da matéria orgânica disponível. Aguilar-Aguilar et al. (2019) também chamaram atenção em um estudo para a influência do pH do meio na produção de biogás. Os autores avaliaram a produção de hidrogênio a partir da codigestão de dejetos suínos e glicerol bruto pelo processo de fermentação, otimizando o processo a partir de um planejamento fatorial do tipo composto central com 2 fatores (concentração de glicerol bruto de 4 a 10 g/L e de dejetos suínos de 5 a 15 g/L), possuindo 6 pontos axiais e 4 pontos centrais. Segundo estudos anteriores apontados pelo grupo, o pH inicial é outro fator chave para a melhoria da produção de hidrogênio. Neste estudo, o pH inicial nos reatores foi superior a 7 em todos os casos. Especificamente os maiores e menores rendimentos de hidrogênio foram obtidos em pH inicial de 7,38 e 7,50, respectivamente, e o pH final de todos os reatores foi entre 4 e 6. O rendimento máximo de hidrogênio ocorreu com glicerol bruto na concentração de 2,75 g/L e dejetos suínos na concentração 10 g/L, em um tempo de fermentação de 21 dias, condições obtidas com a construção de uma superfície de resposta. O estudo mostrou que uma alta concentração de dejetos suínos levou a um consumo mais rápido de carbono pelos microorganismos, aumentando a concentração de ácidos graxos no ambiente e diminuição da produção de hidrogênio. Já uma baixa concentração, levou a formação de amônia e inibição dos microorganismos fermentadores. Os resultados mostraram que uma alta concentração de resíduos e de glicerol bruto (maior que 21,56 %) implicam em um efeito negativo na produção de hidrogênio.

Schwengel et al. (2019) observaram um aumento significativo na produção do metano a partir de incrementos de glicerol a afluentes de esterco de galinha. O estudo avaliou diferentes teores de glicerol nos resíduos da produção de biodiesel, nas concentrações 40 % (G40), 60 % (G60) e 80 % (G80). O estudo observou que para o resíduo G40 há uma maior redução da matéria orgânica (55,4 %), e quando

adicionado na concentração 2,6 % ao dejetado estudado proporcionou uma elevada produção de metano, com um aumento de 36 % quando comparado ao tratamento sem a glicerina. Holanda et al. (2021) concluíram que o glicerol apresenta uma influência positiva na codigestão com lodo de ETE quando utilizado em concentrações limite, obtendo um melhor resultado com incremento de até 15 % de glicerina no lodo. Em outro estudo, o grupo já havia demonstrado que a adição de glicerol a resíduos sólidos influenciava consideravelmente a geração de biogás (Holanda et al., 2019). Kitamura et al. (2022) obtiveram rendimentos de até 75 % na produção de biometano a partir do melaço de soja e do glicerol, quando este foi utilizado nas proporções de 30 % e 10 %, atingindo até 80 % de remoção da matéria orgânica, com um rendimento de 406 mL de CH₄ para cada grama de DQO.

Meier et al. (2020) avaliaram um sistema da codigestão de água residuária de mandioca com glicerol para a produção de hidrogênio. O grupo estudou os efeitos da temperatura e da concentração de glicerina com um planejamento fatorial do tipo 3², encontrando como valores ótimos a temperatura de 38,5 °C e um incremento de 4 % de glicerol. Nestas condições, foi observado um aumento no crescimento dos microorganismos com grande potencial para a produção de hidrogênio molecular. Como resultado houve um ganho de até 400 % na produção quando comparada à digestão dos resíduos na ausência de glicerina. Lins et al. (2021) avaliaram a codigestão de glicerol com efluente de abatedouro e manipueira. O trabalho concluiu que o glicerol gerou um aumento na produção de metano, porém há limitações no seu uso como substrato, principalmente em relação a concentração e ao pH do meio.

Adames et al. (2021) avaliaram a produção de hidrogênio na codigestão do glicerol bruto com lodo de ETE, com incrementos de 1 % e 1,5 % de glicerol bruto. Os resultados apontaram uma alta produção de hidrogênio, chegando a atingir até 11,34 mol de H₂/m³ de reator por dia, quando o incremento de glicerina foi de 1,5 %. O mesmo grupo obteve um alto rendimento na produção de metano em outro estudo, obtendo 312 L de CH₄/m³ de reator por dia, com redução de até 94 % da matéria orgânica (Adames et al., 2022). O mesmo grupo avaliou a codigestão do glicerol bruto com esgoto doméstico em outro estudo (Adames et al., 2022). O grupo é o que mais apresentou trabalhos sobre o tema.

Alves et al. (2020) avaliaram a adição de glicerol na proporção 1 e 3 % v/v ao lodo de ETE monitorando parâmetros como pH, relação ácidos voláteis/alcalinidade, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), teor de sólidos voláteis e relação carbono/nitrogênio. Comparado ao teste sem adição de glicerol, o aumento na produção de metano foi de 61 % e 167 % para os testes suplementados com 1 % e 3 % de glicerol, respectivamente. Porém os autores observaram que com adição de 3 % v/v de glicerol houve um período de instabilidade inibindo a produção de metano, o que não foi observado com a adição de 1 % v/v de glicerol, o que atribuíram ao tamponamento do meio nessa condição que evitou o acúmulo de ácidos voláteis, responsável pela inibição da metanogênese. O estudo aponta que incrementos maiores de glicerol levam a formação de ácido acético, propiônico e butírico, o que ocasiona uma diminuição do pH do meio, fato que já havia sido apontado na literatura através de outros estudos (Baba et al., 2013; Fountoulakis et al., 2010). Em outro estudo, o grupo avaliou a codigestão do lodo primário, resíduos de alimentos e glicerol bruto nas concentrações 1 % e 3 % v/v. Os ensaios mostraram um aumento na produção de metano com incrementos de glicerol, embora a metanogênese tenha sido inibida com incrementos maiores de glicerina. Porém, com um tempo mais longo de adaptação, a produção de metano foi restaurada, e os resultados maximizados. Os autores obtiveram rendimentos de 45,4 % e 122,7 % para incrementos de 1 % e 3 % de glicerol quando comparados a testes controle (sem adição do glicerol) (Alves et al., 2022).

Outros estudos que otimizaram o teor de glicerina na codigestão de resíduos para a produção de biogás estão resumidos na Tabela 2.

Além do biodiesel, outro biocombustível gera resíduos no seu processo de produção com potencial para obtenção de biogás, o etanol. Tanto o etanol de primeira geração (1G) quanto o etanol de segunda geração (2G, obtido por meio de fermentação de biomassa citrícola) geram grandes quantidades de vinhaça, resíduo com alto teor de matéria orgânica e nutrientes (Torquato et al., 2017). Assim, estudos têm sido realizados na obtenção de hidrogênio e metano a partir desse resíduo, inclusive através da codigestão com glicerol proveniente da indústria do biodiesel. Rodrigues et al. (2021) avaliaram a codigestão do glicerol bruto com a vinhaça citrícola. A codigestão favoreceu a produção de hidrogênio quando comparado a um ensaio controle (apenas a vinhaça citrícola). Os efluentes gerados na produção de hidrogênio foram fermentados na presença de glicerol em processo metanogênico. Ao final, o estudo concluiu que a codigestão da vinhaça com o glicerol levou a um aumento da produção do biogás.

Tabela 2. Trabalhos envolvendo a otimização de teores de glicerol na codigestão de resíduos para obtenção de biogás.

Autores	Título	Resumo
Simm et al. (2018)	Contribute of Crude Glycerin to Increase the Efficiency of Anaerobic Digestion Process of Dairy Cattle Manure	O estudo avaliou a codigestão anaeróbia de esterco bovino e glicerol bruto processada com 10, 17 e 24 dias, com os digestores alimentados diariamente com cargas de 0,5 % de glicerina e 10% de esterco bovino. Os maiores rendimentos de biogás ocorreram com a adição de 2,7 % e 3,6% de glicerina (17 e 24 dias).
Veroneze et al. (2019)	Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses	Estudo avaliou a biodigestão de dejetos suínos com doses de glicerina para a produção tanto de biogás quanto de biofertilizante. Os biodigestores foram alimentados com dejetos suínos e doses de glicerina de 5 %, 10 %, 15 % e 20 % v/v. A adição de glicerina não levou a melhores resultados, tendo efeito inibitório em altas concentrações.
Lourenço et al. (2021)	Methane production test of the anaerobic sludge from rice parboiling industries with the addition of biodiesel glycerol from rice bran oil in Brazil	Estudo avaliou a influência de incrementos de glicerol bruto a farelo de arroz em digestão anaeróbia com lodo. Os incrementos foram de 0, 1, 2 e 3 % v/v, observando que com o incremento de 1 % v/v houve uma maior produção de metano.
Adames et al. (2023)	Continuous Long-Term Anaerobic Co-digestion of Crude Glycerol and Domestic Sewage: Plug-Flow In-Series Reactor Performance and Microbiota Acclimatization	Avaliaram a codigestão de esgoto doméstico com glicerol bruto nas proporções 1,5, 2 e 3 % v/v em 4 reatores sequenciais com leito fixo, onde a fermentação era favorecida nos reatores R1 e R2 e a metanogênese favorecida nos reatores R3 e R4. Observou-se que a mais alta produção de metano ocorreu com incrementos de 1,5 % de glicerol.

Borges et al. (2022) avaliaram a produção do biogás a partir de resíduos da indústria do biodiesel e etanol, a partir da codigestão da vinhaça de cana com glicerol destilado, em condições mesofílicas. O estudo observou que a biodegradabilidade do glicerol reforça a importância de se aumentar gradativamente a carga orgânica (vinhaça) com a finalidade de evitar o acúmulo de ácidos voláteis, inibindo assim a metanogênese. Em outro estudo, o grupo havia estudado a produção de metano a partir da codigestão da vinhaça da cana de açúcar e do glicerol em condições mesofílicas (30 °C), avaliando diferentes proporções de ambos os substratos, bem como a produção do biogás a partir da monodigestão de ambos os substratos. O maior rendimento na produção de metano foi obtido com a mistura vinhaça/glicerol na proporção 50:50, um aumento de 20 % em relação a monodigestão da vinhaça. Em uma perspectiva global, segundo os autores a produção de bioenergia a partir do biogás pode aumentar até 1500 % com a implantação bem-sucedida da codigestão anaeróbia da vinhaça/glicerol, podendo fornecer até 11,7 TWh de energia (Borges et al., 2021). O estudo de Menezes et al. (2023) avaliou a codigestão da vinhaça da cana de açúcar e glicerol, garantindo produção consistente de metano. O estudo avaliou a influência de sulfato (presente na vinhaça) na metanogênese, visto que o mesmo inibe a atividade de algumas comunidades microbianas em condições termofílicas. Segundo o estudo, o sulfato quebra moléculas de 1,3 – propanodiol e de propanoato, que são frequentes na fermentação do glicerol. Quanto a temperaturas, o estudo concluiu que a melhor produção de metano ocorreu a temperatura ambiente (condições mesofílicas). O mesmo grupo estudou a codigestão anaeróbia da vinhaça de cana de açúcar e do glicerol em um reator anaeróbio de leito fluidizado em condições termofílicas (55 °C). O estudo apontou uma alta produção de metano, sem a detecção de sulfato no efluente, devido a observação de microorganismos dos gêneros *Desulfovibrio* e *Desulfomicrobium*, responsáveis pela remoção do sulfato. Através de modelos matemáticos, Ferreira et al. (2023) chegaram a condições otimizadas para a

codigestão do melaço de cana com glicerol. Takeda et al. (2022) obtiveram excelentes resultados na remoção de matéria orgânica e na produção de CH₄ através da codigestão da vinhaça de cana com o glicerol.

Outros estudos apresentaram excelentes resultados com a adição de glicerol em concentrações controladas a diferentes inóculos. Kreuzsch et al. (2018) avaliaram a produção de biogás a partir da codigestão de dejetos suínos com glicerol e óleo residual, utilizando 18 reatores com 500 mL de matéria prima a temperaturas de 37 °C (mesofílica) e 55 °C (termofílica) por 32 dias. Os experimentos foram conduzidos em triplicada nas seguintes condições: controle (apenas dejetos suínos), suplementados com 3 % de glicerol e suplementados com 3 % de óleo residual. A adição de glicerol e de óleo residual em condições mesofílicas resultaram em um aumento na produção de biogás quando comparados ao experimento controle, variando de 13,5 mL (controle) para 26,4 mL (glicerol) e 35,2 mL (óleo residual) na produção de biogás, todos os experimentos com teores de metano acima de 65%. Em condições termofílicas os resultados foram inferiores, indicando uma possível inibição dos microorganismos na produção de metano.

Garcia e Cammarota (2018) avaliaram diferentes pré-tratamentos de lodo de ETE com choques térmicos a 90 °C e 95 °C por 60 minutos. Os resultados mostraram uma inibição dos microorganismos metanogênicos e enriquecimento do lodo com microorganismos produtores de H₂. O estudo otimizou alguns parâmetros através de um planejamento fatorial, e concluiu que uma maior concentração de glicerol adicionada ao inóculo (75 % de glicerol) favoreceu a produção de hidrogênio, consequentemente inibindo a produção de metano. Guedes et al. (2023) apresentaram em um congresso um estudo onde propuseram a codigestão de glicerol e lodo de ETE em uma mistura ternária com resíduos de casca de laranja. Os resultados do trabalho mostraram um aumento da produção de biogás, porém a codigestão do lodo com cascas de laranja forneceu um resultado melhor que a mistura ternária.

O estudo de Rodrigues et al. (2020) avaliou a produção de biohidrogênio a partir da codigestão de glicerol bruto com esgoto sanitário em condições mesofílicas (30 °C) e pH 7,0. Foi observado que o aumento de glicerol levou a formação de ácido acético (com conseqüente diminuição do pH) e 1,3-propanodiol. A produção de biohidrogênio foi de 35,82 mmol/L.

Cripa et al. (2020) avaliaram a codigestão de glicerol bruto e de sacarose com resíduos de matadouros de aves como inóculo, por 11 dias em um reator em condições mesofílicas (35 °C), utilizando também sacarose no processo de codigestão. Os resultados mostraram que a produção de biogás a partir da codigestão com glicerol bruto produziu resultados semelhantes ao uso da sacarose, porém com um tempo maior para adaptação do inóculo ao substrato. O artigo chamou atenção para um estudo (Selembro et al., 2009) que sugeriu que o tipo de inóculo pode afetar o tempo de atraso para aclimação. O estudo também mostrou que a adição de quantidades maiores de glicerol inibe a produção de biogás (como já visto anteriormente).

Boscaro et al. (2022) avaliaram a influência de nanopartículas de Fe₃O₄ na codigestão anaeróbia de glicerol bruto e lodo de ETE, em ensaios realizados em condições mesofílicas. Os autores observaram um aumento na produção de metano com a utilização das nanopartículas revestidas de citrato, com aumento de até 49,8 % na concentração 0,2 g/L de glicerol bruto. Também observaram um aumento na produção de bactérias após a suplementação do meio com as nanopartículas de Fe₃O₄, o que teria favorecido a metanogênese.

Rodrigues et al. (2022) avaliaram a utilização de glicerol para a produção de ácido lático e metano. Os resíduos da geração de ácido lático foram utilizados como substrato em reatores metanogênicos, fornecendo resultados promissores. Pereira et al. (2022) monitoraram um reator sequencial anaeróbico operando em batelada com águas residuais da indústria do biodiesel. Faber et al. (2023) obtiveram excelentes resultados a partir da codigestão do glicerol bruto com lodo de ETE. Os autores avaliaram a produção de metano e hidrogênio a partir da digestão de glicerol em concentrações variadas (3 a 7 g/L) utilizando lodo de ETE como inóculo. Para a produção de hidrogênio, o lodo foi tratado em condições termofílicas (65 °C) por 30 minutos, inibindo assim as bactérias metanogênicas. Para a produção de metano, não houve pré-tratamento do lodo. O rendimento energético do reator operando em 2 estágios foi de 118% maior que o reator operando em estágio único.

No estudo de Moraes et al. (2021) foi avaliada a produção de biogás a partir do lodo de esgoto como inóculo codigerido com 6 diferentes substratos para a produção de metano: águas residuais de suinocultura, frigoríficos, laticínios, cervejaria, processamento de frutas e glicerol residual da produção de biodiesel. O substrato com maior potencial na produção de metano foi o glicerol. Silveira et al. (2021) revelaram em um estudo um elevado potencial para a geração de biogás a partir da codigestão de glicerol com dejetos aviários quando comparada a outras matérias primas, como casca de banana, solo de cultivo

de hortaliças e palha de cana na presença da glicerina. O estudo relatou que todas as matérias primas tiveram um aumento na produção de H_2 e CH_4 quando suplementadas com glicerina durante o processo de digestão.

Já Matos et al. (2023) converteram glicerol em carvão ativado utilizando acetato de potássio como ativador, e avaliaram a adsorção de metano no carvão produzido. O estudo de Melo et al. (2023) otimizou a digestão anaeróbia de glicerol bruto residual da produção de biodiesel através de um delineamento composto central em reatores descontínuos. As variáveis estudadas foram relação alimento/microorganismo e tempo de ciclo. A produção mais alta de biogás ocorreu a uma relação 0,23 gDQO/gVS para um tempo de ciclo de 7 dias.

Almeida et al. (2023) avaliaram o processo de codigestão de soro de queijo e glicerol verificando o efeito do aumento da taxa de carga orgânica e temperatura. O estudo concluiu que o reator de metanogênese operando em condições mesofílicas apresentou maior tolerância a altas taxas de carga orgânica.

No ano de 2024, dois estudos chamam a atenção. Albarracin et al. (2024) investigaram a codigestão anaeróbia de resíduos líquidos de processamento de café com glicerina e esterco bovino. Foi observado no estudo que a utilização da glicerina trouxe vantagens a produção de biogás a partir de resíduos do café. Da Silva et al. (2024) avaliaram a codigestão da biomassa microalgal com diferentes matérias-primas (vinhaça de cana de açúcar e glicerol), em sistemas binários e ternários. A combinação 16,7:16,7:66,7 (Algas:vinhaça:glicerol) apresentou o melhor resultado, superando em até 38 % a produção de metano somente com a digestão a partir das microalgas.

4 Conclusões

Conforme evidenciado pela literatura, o biogás apresenta-se como uma alternativa de energia renovável frente à alta demanda mundial e a busca por fontes mais sustentáveis em substituição à queima de combustíveis fósseis, principalmente quanto ao uso do gás natural. Há uma gama de resíduos com potencial para serem aproveitados na produção do biogás, e a codigestão desses resíduos com a glicerina oriunda dos processos de transesterificação para produção de biodiesel apresenta excelentes resultados, sobretudo na produção de metano e biometano. Os principais pontos a serem destacados na presente revisão são:

- a) O teor de glicerol adicionado ao inóculo é um parâmetro importante na produção do biogás, principalmente em relação à produção de metano. Estudos mostraram que uma alta concentração de glicerol bruto durante o processo de codigestão anaeróbia causa uma redução do pH do meio devido a formação de ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico, originados durante a fermentação do glicerol. Apesar de favorecer a produção de hidrogênio, essa diminuição do pH inibe a etapa de metanogênese. Com a adição ao inóculo de concentrações menores de glicerol há um tamponamento do meio, o que evita o acúmulo desses ácidos voláteis, favorecendo a formação de metano.
- b) As temperaturas para obtenção do metano devem ser controladas. Os estudos avaliaram que um maior rendimento na produção de CH_4 ocorreu em condições mesofílicas, enquanto em condições termofílicas houve a inibição da metanogênese, pois altas temperaturas ocasionam a morte dos microorganismos responsáveis pelo processo.
- c) A vinhaça, resíduo da produção de outro biocombustível, o etanol, tem apresentado excelentes resultados quando codigerido com glicerina para produção de biogás. Os estudos mostram um aumento na produção de hidrogênio, porém o sulfato presente na vinhaça pode inibir a atividade de alguns microorganismos responsáveis pela metanogênese. Alguns estudos apontam que alguns microorganismos podem consumir o sulfato do meio, favorecendo a produção de metano.
- d) Os resultados dos estudos avaliados são promissores, e a presente revisão sugere que estudos no pré-tratamento do glicerol bruto (reduzindo assim a produção de ácidos voláteis durante a fermentação, tais como os ácidos acético, propiônico e butírico) sejam realizados, assim como a otimização de outras condições experimentais, que podem levar a uma maior produção de hidrogênio e metano.

Agradecimentos

O autor agradece a UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Referências bibliográficas

- Adames, LV, Jacobus, AP, Sakamoto, IK, Lazaro, CZ, Pires, LO, Maintinguer, SI (2022) ‘Bioenergy Recovery from Anaerobic Co-digestion of Crude and Domestic Sewage in-series Reactor: Microbial Characterization and System Performance’, *Bioenergy Research*, 15, 2145 – 2158. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10417-1>
- Adames, LV, Pires, LO, Adorno, MAT, Maintinguer, SI (2021) ‘Produção de hidrogênio em reator anaeróbio de fluxo contínuo utilizando glicerol bruto oriundo da produção de biodiesel’, *Revista Matéria* 26 (2), 1 – 11. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210002.1268>
- Adames, LV, Pires, LO, Maitinguer, SM (2023) ‘Continuous Long-Term Anaerobic Co-digestion of Crude Glycerol and Domestic Sewage: Plug-Flow In-Series Reactor Performance and Microbiota Acclimatization’, *BioEnergy Research*, 16, 1876–1888. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10515-0>
- Aguilar-Aguilar, FA, Longoria, A, Juantorena, AU, Santos, AS, Pantoja, LA, Sebastian, PJ (2019) ‘Optimization of Hydrogen Yield from the Anaerobic Digestion of Crude Glycerol and Swine Manure’. *Catalysts*, v. 9, n. 4, p. 316. <https://doi.org/10.3390/catal9040316>
- Albarracin, LT, Mas, IR, Fuess, LT, Rodriguez, RP, Volpi, MPC, Moraes, BS (2024) ‘The Bioenergetic Potential from Coffee Processing Residues: Towards an Industrial Symbiosis’, *Resources*, v. 13, n. 21, pp. 1 – 19. <https://doi.org/10.3390/resources13020021>
- Almeida, PS, Menezes, CA, Camargo, FP, Sakamoto, IK, Lovato, G, Rodrigues, JAD, Varesche, MBA, Silva, EL (2023) ‘Biomethane recovery through co-digestion of cheese whey and glycerol in a two-stage anaerobic fluidized bed reactor: Effect of temperature and organic loading rate on methanogenesis’, *J. Environmental Management*, v. 330 (117117), pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117117>
- Alves, IRFS, Mahler, CF, Oliveira, LB, Reis, MM (2020) ‘Assessing the use of crude glycerol from biodiesel production as an alternative to boost methane generation by anaerobic co-digestion of sewage sludge’, *Biomass and Bioenergy*, v. 143, pp. 105831 – 105839. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105831>
- Alves, IRFS, Mahler, CF, Oliveira, LB, Reis, MM, Bassin, JP (2022) ‘Investigating the effect of crude glycerol from biodiesel industry on the anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in ternary mixtures’, *Energy*, v. 241, pp. 122818 – 122828. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122818>
- ANP – Agência Nacional de Petróleo. Resolução nº14 de 11 de maio de 2012, Diário Oficial da União, 18 de maio [online] Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=274067#:~:text=Resolve%3A-Art.,em%20todo%20o%20territ%C3%B3rio%20nacional> (acessado em 26 de setembro de 2023).
- Baba, Y, Tada, C, Watanabe, R, Fukuda, Y, Chida, N, Nakai, Y (2013) ‘Anaerobic digestion of crude glycerol from biodiesel manufacturing using a large-scale pilot plant: methane production and application on of digested sludge as fertilizer’, *Bioresour. Technol*, v. 140, pp. 342–348. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.020>
- Blatt, GG (2014) *Utilização de cromatografia líquida em coluna, em camada delgada e de alta eficiência na separação, isolamento e identificação dos mono-, di- e triacilgliceróis do biodiesel*. Doctoral thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Borges, AV, Fuess, LT, Takeda, PY, Alves, I, Dias, MES, Damianovic, MHRZ (2021) ‘Co-digestion sugarcane vinasse and distilled glycerol to enhance bioenergy generation in biofuel-producing plants’, *Energy Conversion and Management*, v. 250, pp. 114897 – 114908. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114897>
- Borges, AV, Fuess, LT, Takeda, PY, Alves, I, Dias, MES, Damianovic, MHRZ (2022) ‘Co-digestion of biofuel by-products: Enhanced biofilm formation maintains high organic matter removal when methanogenesis fails’, *Journal of Environmental Management*, v. 310, pp. 114768 – 114777. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114768>
- Boscaro, ME, Marin, DFC, Silva, DC, Maintinguer, SI (2022) ‘Effect of Fe₃O₄ nanoparticles on microbial diversity and biogas production in anaerobic digestion of crude glycerol’, *Biomass and Bioenergy*, v. 160, pp. 106439 – 106446. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106439>

- Bryant, MP (1979) ‘Microbial methane production: theoretical aspects’, *Journal of Animal Science*, v. 48, n. 1, pp. 193 – 201.
- Cripa, FB, Arantes, MK, Sequinel, R, Fiorini, A, Rosado, FR, Alves, HJ (2020) ‘Poultry slaughterhouse anaerobic ponds as a source of inoculum for biohydrogen production’, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 129, n. 1, pp. 77 – 85. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.07.006>
- Da Silva, EM, Araujo, SC, Veras, STS, Pinheiro, AAD, Motterani, F, Kato, MT, Florencio, L, Leite, WRM (2024) ‘Anaerobic co-digestion of microalgal biomass, sugarcane vinasse, and residual glycerol from biodiesel using simplex-centroid mixture design: methane potential, synergic effect, and microbial diversity’, *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, pp. 1 – 13. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33193-1>
- Duarte, ICS, Oliveira, LL, Saavedra, NKD, Fantinatti-Garboggini, F, Oliveira, VM, Varesch, MBA (2008) ‘Evaluation of the microbial diversity in a horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactor treating linear alkylbenzene sulfonate’, *Biodegradation*, v. 19, n. 3, pp. 375–385. <https://doi.org/10.1007/s10532-007-9143-5>
- Faber, MO, Meireles, PLS, Leitão, VSF (2023) ‘Process Parameters and Energy Evaluation of Biological Hydrogen and Methane Sequentially Produced Using Residual Glycerin from Biodiesel’, *BioEnergy Research*, v. 16, pp. 1758–1768. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10539-6>
- Ferreira, CM, Akisue, RA, Sousa Jr, R (2023) ‘Mathematical Modeling and Computational Simulation Applied to the Study of Glycerol and/or Molasses Anaerobic Co-Digestion Processes’, *Processes*, v. 11, pp. 2121. <https://doi.org/10.3390/pr11072121>
- Ferreira, JS, Volschan Jr, I, Cammarota, MC (2018) ‘Co-digestion of sewage sludge with crude or pretreated glycerol to increase biogas production’, *Environ Sci Pollut Res*, v. 25, pp. 21811–21821. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2260-3>
- Ferreira, JS, Volschan Jr, I, Cammarota, MC (2018) ‘Enhanced Biogas Production in Pilot Digesters Treating a Mixture of Sewage Sludge, Glycerol, and Food Waste’, *Energy Fuels*, v. 32, pp. 6839–6846. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00742>
- Fountoulakis, MS, Petousi, I, Manios, T (2010) ‘Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production’, *Waste Manag*, v. 30, pp. 1849–1853. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.011>
- García AB, Cammarota MC (2018) ‘Biohydrogen production from pretreated sludge and synthetic and real biodiesel wastewater by dark fermentation’, *Int J Energy Res* 2019, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1002/er.4376>
- Guedes, MTJC, Ribeiro, MHG, Soroka, VD, Almeida, IR, Silva, MCA (2023) ‘Efeito do glicerol como co-substrato na geração de biogás e de biometano a partir da digestão anaeróbia de resíduos de casca de laranja’, *32º congresso da ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Holanda, SHB, Silva Júnior, MJ, Rocha, JO, Silva, RP, Medeiros, RM (2019) ‘Avaliação da influência do glicerol sobre a geração de biogás de resíduos sólidos através do teste bmp’, *2º Congresso Sul Americano de resíduos sólidos e sustentabilidade*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Holanda, SHB, Silva Júnior, MJ, Rocha, JO, Silva, RP, Medeiros, RM (2021) ‘Evaluation of the influence of glycerol on the biogas generation of solid urban waste through the BMP test’, *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, pp. 44257 – 44267. [10.34117/bjdv7n5-039](https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-039)
- Honório, GG, Da Cunha, JN, Dos Santos KLCA, de Aguiar, PF, De Andrade, DF, De Souza, CG, D’ávila, LA, Archanjo, BS, Achete, CA, Pradelle, RNC, Turkovics, F, Neto, RF, D’elia, E (2019) ‘Free glycerol determination in biodiesel samples using palladium nanoparticles modified glassy carbonelectrode associated with solid phase extraction’, *Journal of Solid state Electrochemistry*, v. 23, pp. 3057 – 3066. <https://doi.org/10.1007/s10008-019-04387-2>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) ‘Global Warming of 1,5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of

- climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty’, [online]. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/sr15/> (acessado em 2 de abril de 2024).
- Jensen, PD, Astals, S, Lu, Y, Devadas, M, Batstone, DJ (2014) ‘Anaerobic codigestion of sewage sludge and glycerol, focusing on process kinetics, microbial dynamics and sludge dewaterability’, *Water Res*, v. 67, pp. 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.024>
- Kitamura, SHP, Silva, LM, Batista, FK, Mello, BS, Rodrigues, BCG, Sarti, A (2022) ‘Codigestão anaeróbia de resíduos agroindustriais (melaço de soja e glicerol) em reator anaeróbio horizontal de leito fixo’, *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 1, pp. 6144 – 6163. 10.34117/bjdv8n1-416
- Kreusch, RC, Hasan, C, Mallmann, F, Gomes, GMF, Marder, M, Konrad, O (2018) ‘Produção de biogás obtida por dejetos suínos com suplementação de glicerol e óleo vegetal residual’, *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, n. 3, pp. 251-263. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0020>
- Lins, MA, Berger, JS, Gonçalves, MP, Zenatti, DC, Hermes, E (2021) ‘Efeito da adição de glicerol residual na digestão anaeróbia de efluentes de fecularia e abatedouro’, *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 2, pp. 407 – 415. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e6149>
- Lôbo, IP, Ferreira, SLC (2009) ‘Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos’, *Quim. Nova*, v. 32, n. 6, pp. 1596–1608. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600044>
- Lourenço, VA, Nadaleti, WC, Vieira, BM, Chua, H (2021) ‘Methane production test of the anaerobic sludge from rice parboiling industries with the addition of biodiesel glycerol from rice bran oil in Brazil’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 149, pp. 111331 – 111341. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111331>
- Manfron, MP (1991) ‘Biodigestão Anaeróbica: uma alternativa para usinas de laticínios’, *Ciência Rural*, v. 21, n. 1, pp. 145 – 152.
- Matos, B, Batista, M, Pires, J (2023) ‘Efficient adsorption of carbon dioxide and methane on activated carbon prepared from glycerol with potassium acetate’, *Environmental Chemistry Letters*, v. 21, pp. 1265–1270. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01556-0>
- Meier, TRW, Cremonez, PA, Maniglia, TC, Sampaio, SC, Teleken, JG, da Silva, EA (2020) ‘Production of biohydrogen by an anaerobic digestion process using the residual glycerol from biodiesel production as additive to cassava wastewater’, *Journal of Cleaner Production*, v. 258, pp. 1 – 11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120833>
- Melo, BS, Pozzi, A, Rodrigues, BCG, Costa, MAM, Sarti, A (2023) ‘Anaerobic digestion of crude glycerol from biodiesel production for biogas generation: Process optimization and pilot scale operation’, *Environmental Research*, v. 244, p. 117938. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117938>
- Menezes, CA, Almeida, PS, Camargo, FP, Delforno, TP, Oliveira, VM, Sakamoto, IK, Varesche, MBA, Silva, EL (2023) ‘Two problems in one shot: Vinasse and glycerol co-digestion in a thermophilic high-rate reactor to improve process stability even at high sulfate concentrations’, *Science of the Total Environment*, v. 862, pp. 160823 – 160833. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160823>
- Menezes, CA, Almeida, PS, Camargo, FP, Delforno, TP, Oliveira, VM, Sakamoto, IK, Varesche, MBA, Silva, EL (2023) ‘One versus two-stage codigestion of sugarcane vinasse and glycerol: Assessing combinations at mesophilic and (hyper) thermophilic conditions’, *Science of the Total Environment*, v. 904, pp. 166294 – 116306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166294>
- Morais, NWS, Coelho, MMH, Silva, AS, Silva, FSS, Ferreira, TJT, Pereira, EL, Santos, B (2021) ‘Biochemical potential evaluation and kinetic modeling of methane production from six agro-industrial wastewaters in mixed culture’, *Environmental Pollution*, v. 280, pp. 116876 – 116885. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116876>
- Nartker, S, Aurant, J, Ammermam, M, Stogsdill, M (2014) ‘Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry’, *Waste Management*, v. 34, n. 12, pp. 2567–2571. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.017>
- Paulista, LO, Boaventura, RAR, Vilar, VJP, Pinheiro, ALN, Martins, RJE (2019) ‘Enhancing methane yield from crude glycerol anaerobic digestion by coupling with ultrasound or *A. niger*/*E. coli*

- biodegradation’, *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, pp. 1461 – 1474. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06748-w>
- Pereira, EL, Borges, AC, da Silva, GJ (2022) ‘Effect of the Progressive Increase of Organic Loading Rate in an Anaerobic Sequencing Batch Reactor for Biodiesel Wastewater’, *Treatment Water*, v. 14, n. 223, pp. 1 – 17. <https://doi.org/10.3390/w14020223>
- Rodrigues, CV, Adames, LV, Marques, RFC, Jacobus, AP, Pires, LO, Maintinguer, SI (2021) ‘Biossistemas integrados na codigestão do glicerol bruto em resíduos agroindustriais para a geração de H₂ e CH₄’, *Revista Matéria*, v. 26, n. 2, pp. 1 – 14. 10.1590/S1517-707620210002.1262
- Rodrigues, CV, Pires, LO, Medina, KJD, Maintiguer, MI (2022) ‘Recovery of crude glycerol and citrus vinasse in anaerobic digestion in two stages for lactic acid and biomethane production’, *Industrial Biotechnology*, v. 18, n. 4, pp. 1 – 9. <https://doi.org/10.1089/ind.2021.0028>
- Rodrigues, CV, Santana, KO, Nespeca, MG, Rodrigues, AV, Pires, LO, Maintinguer, SI (2020) ‘Energy valorization of crude glycerol and sanitary sewage in hydrogen generation by biological processes’, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, pp. 11943 – 11953. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.168>
- Santos Filho, DA, Oliveira, LRG, Schirmer, WM, Sobrinho, MAM, Jucá, JFT, Vasconcelos, TL (2018) ‘Avaliação da produção de biogás a partir da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e glicerina residual’, *Biofix Scientific Journal*, v. 3, n. 2, pp. 260 – 266. DOI:dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i2.59938
- Santos, JJ, Mazzoneto, AW (2022) ‘Aplicações da glicerina no mercado e potencial energético’, *Bioenergia em revista: diálogos*, v. 12, n. 2, pp. 42-64.
- Schwingel, AW, Orrico, ACA, Junior, JL, Orrico Junior, MAP, Borquis, RRA, Fava, AF (2019) ‘Laying hen manure in anaerobic Co-Digestion with glycerin containing different glycerol and impurity levels’, *Journal of Cleaner Production*, v. 215, pp. 1437 – 1444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.125>
- Selembó, PA, Perez, JM, Lloyd, WA, Logan, BE (2009) ‘Enhanced hydrogen and 1,3-propanediol production from glycerol by fermentation using mixed cultures’, *Biotechnol Bioeng*, v. 104, pp. 1098 – 1106. <https://doi.org/10.1002/bit.22487>
- Silva, FMS, Mahler, CF, Oiveira, LB, Bassin, JP (2018) ‘Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol’, *Waste management*, v. 76, pp. 339-349. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.039>
- Silveira, BM, Silveira, G, Cestari, A (2021) ‘Síntese de biogás com o uso de glicerina residual da produção de biodiesel’, *RQI*, v. 1, n. 1, pp. 66 – 74.
- Simm, S, Orrico, ACA, Orrico Jr, MAP, Sunada, NS, Schwingel, AW, Lopes, WRT, Whittinghill, KL, Vargas Jr, FM, Costa, MSM. (2018) ‘Contribute of Crude Glycerin to Increase the Efficiency of Anaerobic Digestion Process of Dairy Cattle Manure’, *Environmental Progress e Sustainable Energy*, v. 37, n. 4, pp. 1305-1311. <https://doi.org/10.1002/ep.12808>
- Takeda, PY, Oliveira, CA, Dias, MES, Paula, CT, Borges, AV, Damianovic, MHRZ (2022) ‘Enhancing the energetic potential of sugarcane biorefinery exchanging vinasse and glycerol in sugarcane off-season in na anaerobic reactor’, *Renewable Energy*, v. 195, pp. 1218 – 1229. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.12>
- Torquato, LDM, Pachiega, R, Crespi, MS (2017) ‘Potential of biohydrogen production from effluents of citrus processing industry using anaerobic bacteria from sewage sludge’, *Waste Management*, v. 59, pp. 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.047>
- UDOP – União Nacional de Bioenergia (2023) ‘Produção de biogás aumenta 21,3% no Brasil em 2022’, [online]. Disponível em: [https://www.udop.com.br/noticia/2023/01/12/producao-de-biogas-aumenta-21-3-no-brasil-em-2022.html#:~:text=Atualmente%2C%20o%20Brasil%20conta%20com,Natural%20e%20Biocombust%203%ADveis%20\(ANP\)](https://www.udop.com.br/noticia/2023/01/12/producao-de-biogas-aumenta-21-3-no-brasil-em-2022.html#:~:text=Atualmente%2C%20o%20Brasil%20conta%20com,Natural%20e%20Biocombust%203%ADveis%20(ANP)) (acessado em 4 de outubro de 2023).

Vasconcelos, EAF, Santaella, ST, Viana, MB, dos Santos, AB, Pinheiro, GC, Leitão, RC (2019) ‘Composition and ecology of bacterial and archaeal communities in anaerobic reactor fed with residual glycerol’, *Anaerobe*, v. 59, pp. 145 – 153. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2019.06.014>

Veroneze, ML, Schwantes, D, Gonçalves Jr, AF, Richart, A, Manfrin, J, Schiller, AP, Buba, TB (2019) ‘Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses’, *Journal of Cleaner Production*, v. 213, pp. 176 – 184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.181>