

**DIGESTÃO ANAERÓBICA
EM DOIS ESTÁGIOS DE
RESÍDUOS DE CAFÉ COM
ADIÇÃO DE RESÍDUOS
LÍQUIDOS PARA
PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO E METANO:
ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E
INOVAÇÃO**

**TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION OF COFFEE WASTE WITH THE
ADDITION OF LIQUID WASTE FOR HYDROGEN AND METHANE
PRODUCTION: BIBLIOMETRIC ANALYSIS AND INNOVATION**

Engenharias • 10/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/780971028](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/780971028)

Thiago Medeiros Dos Reis¹

Thiago Padovani Xavier²

Kaio Reis Costa³

Laura Marina Pinotti⁴

RESUMO

O aproveitamento de resíduos orgânicos para geração de energia renovável tem despertado interesse crescente no meio científico, principalmente devido à necessidade de soluções sustentáveis para o setor agroindustrial. Nesse cenário, resíduos do processamento do café, glicerol residual e soro de queijo apresentam potencial para aplicação em processos biológicos voltados à produção energética. A utilização desses materiais em sistemas anaeróbicos de duas etapas pode favorecer a conversão da matéria orgânica em combustíveis gasosos, além de reduzir impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses subprodutos. Diante disso, este estudo realizou um levantamento da produção científica e tecnológica relacionada ao uso combinado desses resíduos em processos anaeróbicos. As buscas foram conduzidas em bases de artigos e bancos de patentes nacionais e internacionais, utilizando palavras-chave associadas à produção de biogás, hidrogênio e digestão anaeróbica. A análise evidenciou aumento gradual do interesse acadêmico pela temática nos últimos anos, embora ainda sejam limitados os estudos envolvendo a integração simultânea de resíduos de café, glicerol residual e soro de queijo em sistemas de dois estágios. Da mesma forma, foram identificados poucos registros tecnológicos direcionados a essa aplicação específica, indicando espaço para desenvolvimento de pesquisas inéditas e futuras inovações. Assim, observa-se que a valorização energética desses resíduos pode contribuir para o avanço de tecnologias sustentáveis, promovendo geração de energia limpa, reaproveitamento de subprodutos agroindustriais e fortalecimento de práticas alinhadas à economia circular.

Palavras-chave: digestão anaeróbica em dois estágios; borra de café; soro de queijo; glicerol; biogás; hidrogênio.

ABSTRACT

The use of organic waste for renewable energy generation has attracted increasing interest in the scientific community, mainly due to the need for sustainable solutions for the agro-industrial sector. In this context, coffee processing residues, crude glycerol, and whey present significant potential for application in biological processes aimed at energy production. The use of these materials in two-stage anaerobic systems may enhance the conversion of organic matter into gaseous fuels while also reducing environmental impacts associated with the improper disposal of such by-products. Therefore, this study carried out a survey of the scientific and technological production related to the combined use of these residues in anaerobic processes. Searches were conducted in scientific databases and national and international patent platforms using keywords associated with biogas production, hydrogen, and anaerobic digestion. The analysis revealed a gradual increase in academic interest in the topic in recent years, although studies involving the simultaneous integration of coffee residues, crude glycerol, and whey in two-stage systems are still limited. Likewise, few technological records were identified for this specific application, indicating opportunities for the development of original research and future innovations. Thus, the energy recovery of these residues may contribute to the advancement of sustainable technologies by promoting clean energy generation, reuse of agro-industrial by-products, and strengthening practices aligned with the principles of the circular economy.

Keywords: two-phase anaerobic digestion; coffee residues; glycerol; Cheese whey, biogas; hydrogen.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o avanço das atividades agroindustriais têm elevado significativamente a demanda por alimentos, combustíveis e energia, resultando em maior geração de resíduos orgânicos em diferentes cadeias produtivas. Esse cenário intensifica os desafios relacionados ao gerenciamento e tratamento desses resíduos, ao mesmo tempo em que impulsiona a busca por fontes renováveis de energia e tecnologias sustentáveis. Nesse contexto, a biomassa residual oriunda de processos agroindustriais destaca-se como alternativa promissora para produção de bioenergia, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o fortalecimento da economia circular (Indriyani et al., 2025; Cremonez et al., 2021).

Entre os resíduos agroindustriais de maior relevância, destacam-se aqueles provenientes da cadeia produtiva do café, especialmente a casca e a borra. O café permanece entre as bebidas mais consumidas no mundo, com produção global superior a 7 milhões de sacas no período de 2020/2021 (Halstead, 2023). Para a safra 2024/2025, estima-se produção de aproximadamente 99,9 milhões de sacas de café Arábica (*Coffea arabica*), sendo o Brasil responsável por cerca de 58,81 milhões de sacas, consolidando-se como maior produtor mundial (EMBRAPA, 2024). Como consequência, grandes volumes de resíduos são gerados ao longo da cadeia cafeeira, reforçando a necessidade de alternativas sustentáveis para seu aproveitamento energético e redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

A digestão anaeróbica tem sido amplamente empregada como rota biotecnológica para conversão de resíduos orgânicos em biogás e outros produtos de interesse energético. Dentre as diferentes configurações do processo, a digestão anaeróbica em dois estágios

destaca-se pela separação das fases acidogênica e metanogênica, permitindo maior estabilidade operacional, melhor controle microbiológico e aumento da eficiência energética do sistema (Simeonov et al., 2021; Holl et al., 2022). Além da produção de metano, essa tecnologia possibilita a geração de hidrogênio, considerado combustível estratégico para a transição energética devido à elevada densidade energética e à ausência de emissões de carbono durante sua combustão (Sudalaimuthu; Sathyamurthy, 2024).

Pesquisas recentes demonstram que a co-digestão de resíduos de café com glicerol residual pode elevar significativamente a produção de biogás, principalmente em razão da elevada carga orgânica presente no glicerol (Albarracin et al., 2024). Entretanto, o uso desse substrato em concentrações elevadas pode provocar instabilidade no sistema anaeróbico, favorecendo acidificação e redução da atividade metanogênica (Silva et al., 2018; Ferreira et al., 2018). Nesse contexto, a utilização conjunta de lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETE) e soro de queijo apresenta potencial para promover maior equilíbrio nutricional e estabilidade microbiológica do processo, uma vez que o soro de queijo possui elevada concentração de lactose, proteínas e nutrientes que favorecem o metabolismo microbiano.

Além dos benefícios relacionados ao aproveitamento de resíduos, a produção simultânea de hidrogênio e metano em sistemas anaeróbicos de dois estágios amplia o potencial tecnológico e econômico da digestão anaeróbica. Estudos indicam que a integração desses biocombustíveis pode contribuir para aplicações energéticas mais eficientes e para o desenvolvimento de alternativas

sustentáveis voltadas ao setor de transportes e à indústria energética (Meena et al., 2020).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre a digestão anaeróbica em dois estágios aplicada à borra de café em co-digestão com glicerol residual, lodo de ETE e soro de queijo, visando mapear o estado da arte em bases científicas e tecnológicas. Busca-se, ainda, identificar tendências de pesquisa, lacunas científicas e oportunidades de inovação relacionadas à produção sustentável de bioenergia a partir do aproveitamento integrado de resíduos agroindustriais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O crescente interesse pela digestão anaeróbica (DA) de resíduos agrícolas está diretamente associado à necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e de minimizar os impactos ambientais de descartes orgânicos. No caso específico dos resíduos do café, diversos estudos destacam seu elevado potencial energético e a possibilidade de aplicação em tecnologias sustentáveis de conversão de biomassa.

Segundo Luz et al. (2017), a borra de café apresenta elevados teores de matéria orgânica (>90%) e lipídios (>25%), o que a torna uma fonte altamente promissora para produção de metano em reatores anaeróbios. Já Marcedo e Rambo (2016) demonstram que a casca de café possui poder calorífico de aproximadamente 17.500 kJ/kg, sendo considerada uma biomassa lignocelulósica de valor energético expressivo.

Entretanto, diversos autores apontam que a estrutura lignocelulósica desses resíduos dificulta sua biodegradabilidade

(Frigon et al., 2012; Cremonez et al., 2013; Rubin, 2008). Isso ocorre devido à complexa rede formada por celulose, hemicelulose e lignina, que atua como barreira à ação dos microrganismos metanogênicos (Kumar e Sharma, 2017; Wang et al., 2019). A lignina, em particular, confere rigidez à parede celular vegetal, sendo pouco degradável por processos biológicos convencionais (Moura et al., 2010).

Para superar essas limitações, diversos estudos propõem o uso de pré-tratamentos químicos, físicos ou biológicos. O tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH), por exemplo, tem sido amplamente estudado devido à sua capacidade de romper ligações lignina-hemicelulose e aumentar a exposição da celulose à ação microbiana (Zhou et al., 2012; Xie et al., 2011).

Phitsuwan, Sakka e Ratanakhanokchai (2016) destacam que, além de eficiente, esse tipo de pré-tratamento pode ser realizado em condições operacionais mais brandas, com menor uso de energia e reagentes.

He et al. (2008), em estudo com palha de arroz, observaram que a aplicação de NaOH a 6% aumentou a produção de metano entre 27% e 64%, resultado atribuído à melhora da solubilidade da matéria orgânica. Müller (2019), por sua vez, aplicou tratamento alcalino combinado em cama de bovinocultura, obtendo produção de 771 mLCH₄/kgSV com dose de 3% de NaOH. Já Liew et al. (2011) estudaram resíduos de jardinagem e observaram rendimento máximo de 82 LCH₄/kgVS sob pré-tratamento alcalino.

Estudos focados especificamente na casca de café reforçam essa tendência. Baêta et al. (2017), utilizando vapor a 120°C por 60

minutos, obtiveram 144,96 NmLCH₄/gCOD. Passos et al. (2018), em estudo com casca de café combinada com microalgas, demonstraram que o pré-tratamento elevou a produção de metano para 196,1 NmLCH₄/gSSV. Santos et al. (2018), utilizando ozônio, conseguiram 29 NmL de metano por grama de casca, além de bioetanol.

A codigestão com resíduos alimentares surge como uma solução eficiente para melhorar a estabilidade dos reatores e o desempenho do processo (Dornelas, 2021; Chala et al., 2018; Kampioti e Dimitrios, 2022). A combinação de substratos permite ajustar a relação C:N, o pH e a umidade, fatores essenciais para a sobrevivência dos microrganismos. Além disso, reduz a toxicidade potencial causada por compostos como taninos, cafeína e fenóis presentes na borra (Fernandes et al., 2017; Campos-Vega, 2015).

A borra de café, embora rica em lipídios, apresenta compostos que podem inibir a atividade microbiológica (Qiao et al., 2015; Dai et al., 2019). Estudos apontam que a codigestão com resíduos alimentares balanceados aumenta a produção de metano e diminui os efeitos tóxicos. Ballesteros, Teixeira e Mussatto (2014) observaram relações C:N entre 17:1 e 57:1 em borras industriais, enquanto Luz et al. (2018) apontam a necessidade de manter o pH entre 6,5 e 7,5 para melhor desempenho.

Em experimentos controlados, observou-se que a mistura com 50% de borra de café tratada resultou em produção de 400 NmL/gTVS de metano. Para a casca tratada, o valor foi de 344 NmL/gTVS. Já 100% de resíduo alimentar gerou 600 NmL/gTVS. Por outro lado, o uso isolado de borra ou casca não tratadas produziu apenas 88 e

186 NmL/gTVS, respectivamente, devido à baixa biodegradabilidade e à ausência de correção da acidez e nutrientes (Reis et al., 2026).

Diversos autores têm investigado ainda aplicações alternativas para os resíduos do café, além da digestão anaeróbica. Gouvea et al. (2009) produziram etanol a partir da casca. Oliveira et al. (2008) utilizaram a casca como bioadsorvente para remoção de metais pesados. Lima et al. (2013) destacaram a produção de celulases com fungos do gênero *Trichoderma*. Tehrani et al. (2015) e Phimsen et al. (2016) trabalharam com a borra para obtenção de carvão ativado e biodiesel, respectivamente.

A análise conjunta desses estudos reforça a relevância de técnicas como a caracterização físico-química, os testes de potencial bioquímico de metano (BMP) e o uso de ferramentas complementares como espectroscopia FTIR, difração de raios-X e microscopia eletrônica (Montgomery e Bochmann, 2014; Gueri et al., 2018; Jiang et al., 2017).

Assim, conclui-se que a digestão anaeróbica dos resíduos do café, quando precedida por tratamentos adequados e associada à codigestão com resíduos alimentares, constitui uma rota viável para geração de energia renovável. A literatura aponta avanços significativos nessa área, mas também destaca a importância de abordagens integradas, que considerem as propriedades físico-químicas dos substratos e os requisitos técnicos do processo de biodigestão.

2.1. Biodigestão Anaeróbia e a Geração de Biogás e Hidrogênio

A crescente preocupação com o aproveitamento sustentável de resíduos orgânicos tem impulsionado o desenvolvimento de

tecnologias ambientalmente adequadas, entre as quais se destaca a biodigestão anaeróbia. Trata-se de um processo biológico no qual microrganismos heterotróficos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo como principais subprodutos o biogás, uma mistura composta essencialmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de um efluente líquido com baixa carga orgânica e um lodo estabilizado que pode ser utilizado como biofertilizante (Demirer ;Chen, 2005).

A biodigestão ocorre em quatro etapas sucessivas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Cremones *et al.*, 2019). Na hidrólise, macromoléculas como proteínas, lipídios e carboidratos são decompostas em compostos menores, como aminoácidos e açúcares. Na acidogênese, bactérias fermentativas convertem esses compostos em ácidos graxos voláteis, álcoois e outros metabólitos. A acetogênese transforma esses produtos em precursores como acetato, hidrogênio molecular (H_2) e CO_2 . Finalmente, na metanogênese, microrganismos especializados consomem esses substratos e produzem metano (Cremones *et al.*, 2019).

A versatilidade do processo permite sua manipulação para direcionar a produção de biogás ou de hidrogênio. Quando se deseja priorizar a geração de hidrogênio, é necessário inibir a fase metanogênica, uma vez que o H_2 é um dos principais substratos utilizados para a produção de metano. Parâmetros como pH e temperatura são determinantes nesse controle. O pH ideal para a metanogênese varia entre 6,8 e 7,5, embora o processo possa ocorrer, com menor eficiência, entre 6,0 e 8,0 (Foresti, 1998). Em condições mais ácidas, a atividade metanogênica é inibida, favorecendo a fermentação com liberação de hidrogênio (Moura, 2012).

A temperatura também exerce influência significativa. As faixas de atuação microbiana são classificadas como psicofílica (inferior a 20 °C), mesofílica (entre 20 °C e 40 °C) e termofílica (superior a 45 °C) (Salomon;Lora, 2009). a faixa mesofílica é geralmente preferida para a produção de biogás devido à estabilidade e à eficiência do processo, enquanto a termofílica, mais exigente em controle operacional, favorece a produção de hidrogênio ao inibir microrganismos metanogênicos (Bond ;Templeton, 2011).

A composição do biogás varia conforme o substrato utilizado, podendo incluir resíduos agrícolas, esterco, lixo orgânico e esgoto (Cavalheiro ; Maciel, 2022; CIBIOGÁS, 2022). O metano contido no biogás possui elevado poder energético e pode ser utilizado na geração de eletricidade, calor ou transformado em hidrogênio por meio de processos de reforma (Schultz ;Soares, 2014; Schwengber, 2015; Milanez; Maia; Guimarães, 2021).

O hidrogênio é considerado um vetor energético estratégico, capaz de armazenar e transferir energia entre os setores de transporte, indústria e geração elétrica (Brasil, 2022; Hwang, 2013). Sua produção a partir de fontes renováveis, como o biogás, é essencial para garantir benefícios ambientais e alinhar-se aos objetivos do desenvolvimento sustentável (Cudjoe *et al.*, 2022; Nadaleti *et al.*, 2021; Obaideen *et al.*, 2022).

A fermentação acidogênica é o primeiro passo crítico na rota de produção biológica de H₂, sendo influenciada por fatores como o tipo de substrato, temperatura, pH, taxa de diluição e perfil microbiológico. Em sistemas operando a 37°C, pH 5,5 e com glicerol como co-substrato, rendimentos de 2,1 a 2,6 mol H₂/mol hexose equivalente já foram reportados (Ramirez-Morales *et al.*, 2019).

A pureza do gás gerado costuma variar de 40% a 60%, com presença de CO₂ e traços de CH₄ (Rajesh Banu *et al.*, 2021). Para aplicações energéticas ou industriais, é necessário purificar esse hidrogênio. Dentre as principais tecnologias destacam-se: PSA (Pressure Swing Adsorption), que remove seletivamente CO₂ e alcança purezas superiores a 95%; membranas de Pd/Ag, indicadas para baixos fluxos; e absorção por solventes, adequada para operações de média escala (Kang *et al.*, 2024; Król *et al.*, 2024; Muin *et al.*, 2021).

A tecnologia PSA é amplamente empregada na separação e purificação de gases, destacando-se como uma estratégia eficaz para o enriquecimento do hidrogênio produzido em processos fermentativos, como a digestão anaeróbia bifásica. Seu funcionamento baseia-se na adsorção seletiva de componentes indesejáveis, como CO₂, vapor d'água, metano e compostos orgânicos voláteis, em materiais porosos sob alta pressão (Kang *et al.*, 2024; Abd *et al.*, 2023).

Durante o processo, o hidrogênio, por apresentar baixa afinidade com os adsorventes, atravessa o leito com menor retenção, sendo coletado com elevada pureza. A operação é realizada em ciclos alternados de pressurização e despressurização, permitindo a regeneração do adsorvente e continuidade do sistema sem necessidade de reagentes químicos (Kang *et al.*, 2024). Com isso, o PSA é capaz de alcançar purezas superiores a 95% para o hidrogênio, tornando-se uma das principais tecnologias disponíveis para sua valorização energética (Król *et al.*, 2024; Muin *et al.*, 2021).

Além da elevada eficiência, a tecnologia apresenta vantagens como baixo consumo energético em comparação a métodos criogênicos, simplicidade operacional e adaptabilidade a diferentes composições

de gases residuais, sendo especialmente indicada para sistemas descentralizados e integrados à valorização de resíduos orgânicos (Król *et al.*, 2024; Muin *et al.*, 2021). Tais tecnologias complementares não apenas agregam valor ao produto gasoso, como também podem ser integradas a sistemas de economia circular, fornecendo hidrogênio para uso em células a combustível, reformadores ou indústrias químicas locais (Rajesh Banu *et al.*, 2021; Król *et al.*, 2024). Considerando a diversidade tecnológica da biodigestão anaeróbica, a purificação do hidrogênio é etapa fundamental para garantir a qualidade do biocombustível gerado, especialmente em sistemas bifásicos que visam a produção simultânea de H₂ e CH₄ (Rajesh Banu *et al.*, 2021; Król *et al.*, 2024).

Quadro 1. Comparativo entre a Produção de Biogás e a Produção de Hidrogênio via Biodigestão Anaeróbia

Critério	Produção de Biogás	Produção de Hidrogênio
Objetivo principal	Maximizar a geração de metano (CH ₄)	Maximizar a liberação de hidrogênio molecular (H ₂)
Etapas envolvidas	Hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese completas	Hidrólise, acidogênese e acetogênese com inibição da metanogênese
Parâmetro de pH ideal	Entre 6,8 e 7,5	Levemente ácido (inferior a 6,5) para inibir metanogênese
Faixa de temperatura preferencial	Mesofílica (20–40 °C)	Termofílica (> 45 °C), favorecendo a produção de H ₂
Tipo de microrganismo dominante	Metanogênicos	Bactérias fermentativas acidogênicas

Substratos comuns	Resíduos orgânicos, esterco, lixo orgânico	Resíduos ricos em carboidratos e proteínas
Produtos gerados	Metano (CH ₄), CO ₂ , biofertilizante	Hidrogênio (H ₂), ácidos graxos voláteis, CO ₂
Aplicações	Geração de eletricidade, calor, biocombustível	Armazenamento de energia, uso industrial, transporte
Controle operacional	Mais estável e consolidado	Mais sensível a variações de pH e temperatura
Contribuição ambiental	Redução de GEE com uso de CH ₄ como energia	Maior valor ambiental pela produção de combustível limpo e não emissor

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No Brasil, o potencial de geração de biogás é particularmente elevado nos setores sucroenergético e agroindustrial (Mendes et al., 2023; Fava et al., 2023). Além de contribuir para a gestão de resíduos e a redução das emissões de gases de efeito estufa, a valorização energética por meio do biogás e do hidrogênio pode impulsionar significativamente a transição para uma economia de baixo carbono (Dayrell et al., 2024; Nadaleti et al., 2021; IEA, 2024).

Estudos destacam que o setor sucroenergético, especialmente a produção de cana-de-açúcar, apresenta grande potencial para a produção de biogás e biometano, promovendo benefícios ambientais, econômicos e energéticos, além de apoiar políticas públicas voltadas à sustentabilidade e à descarbonização da matriz energética nacional (Mendes et al., 2023; Fava et al., 2023; Dayrell et al., 2024).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada com base em uma análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura, conforme apresentado no fluxograma da Figura 1. As buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus e Web of Science, reconhecidas internacionalmente pela abrangência e relevância científica nas áreas de energia, biotecnologia e resíduos agroindustriais.

Inicialmente, na Etapa 1, foi conduzida uma busca exploratória utilizando os descritores em inglês: “anaerobic digestion”, “biogas”, “coffee grounds” e “whey”, associados por operadores booleanos AND, com o objetivo de identificar estudos relacionados à produção de biogás por digestão anaeróbia a partir de resíduos agroindustriais, especialmente borra de café e soro de queijo. A escolha dessas palavras-chave foi fundamentada na relevância desses substratos para processos de valorização energética e aproveitamento de resíduos orgânicos em sistemas anaeróbios.

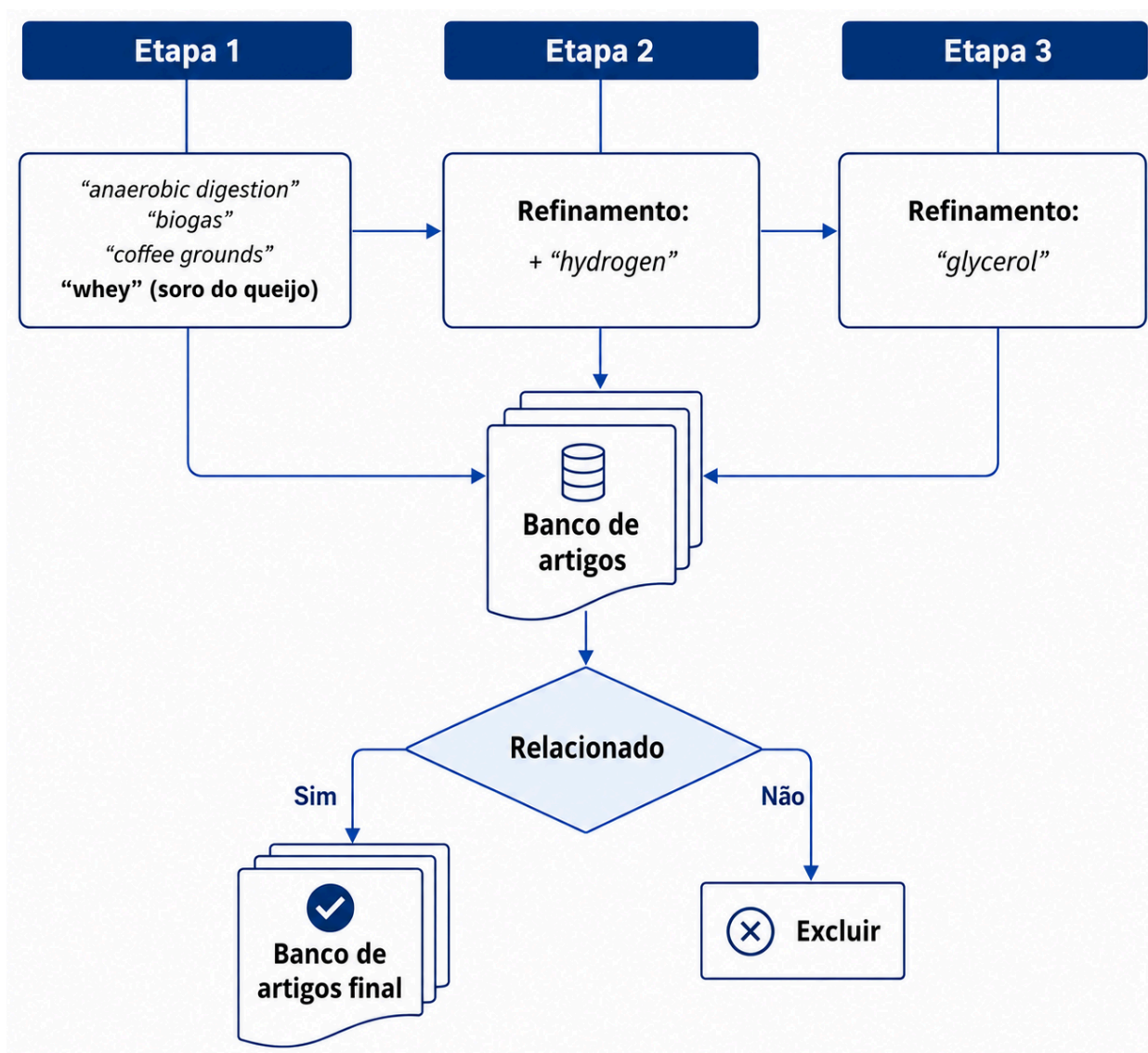
Como critérios de delimitação, foram considerados apenas artigos científicos publicados entre os anos de 2020 e 2025, escritos em inglês e classificados como “article” nas bases consultadas. Após a obtenção dos resultados iniciais, realizou-se uma triagem preliminar por meio da leitura dos títulos, palavras-chave e resumos, permitindo a formação de um banco inicial de artigos relacionados ao tema da pesquisa.

Na Etapa 2, a estratégia de busca foi refinada com a inclusão do termo “hydrogen”, direcionando a pesquisa para estudos voltados à produção integrada de biogás e hidrogênio em processos anaeróbios. Esse refinamento permitiu identificar trabalhos relacionados à bioenergia avançada, coprodução energética e rotas biotecnológicas aplicadas ao aproveitamento de resíduos orgânicos.

Posteriormente, na Etapa 3, foi incorporado o descritor “glycerol”, visando selecionar estudos que investigassem o uso do glicerol como co-substrato em processos de digestão anaeróbia e produção de biohidrogênio. A inclusão desse termo teve como finalidade ampliar a análise para pesquisas envolvendo sinergias metabólicas, aumento da eficiência energética e aproveitamento de subprodutos industriais em sistemas anaeróbios.

Após todas as etapas de refinamento, os artigos recuperados foram submetidos a uma análise criteriosa de relevância, considerando aderência ao tema, objetivos do estudo, metodologia empregada e contribuição científica para a área de bioenergia. Os trabalhos que não apresentaram relação direta com o escopo da pesquisa foram excluídos. Ao final do processo, constituiu-se o banco final de artigos utilizado como base teórica e científica deste estudo.

Figura 1. Fluxograma do processo da estratégia de seleção de artigos



A análise bibliométrica desses artigos foi realizada por meio de metodologia específica, utilizando ferramentas como o software Studio R e a biblioteca biblioshiny, um aplicativo Shiny para análise bibliométrica. A seleção dos artigos para análise considerou o fator de impacto dos periódicos em que foram publicados, obtido por meio do Journal Citation Reports (JCR). Somente os artigos publicados em periódicos com fator de impacto foram incluídos na análise, garantindo a inclusão de estudos mais relevantes e influentes na área de interesse.

Além disso, foi aplicado um critério adicional de seleção utilizando o método "ordinatio maior". Esse método priorizou os artigos com maior número de citações, com o objetivo de incluir os estudos mais

citados e impactantes na análise. Dessa forma, buscou-se capturar as pesquisas mais relevantes e com maior impacto na comunidade científica.

3.1. Pesquisa Sistemática em Bases de Dados de Patentes

A prospecção tecnológica foi conduzida por meio de uma análise sistemática de documentos de patente em bases nacionais e internacionais, com o objetivo de identificar tecnologias relacionadas à digestão anaeróbica aplicada ao aproveitamento energético de resíduos do café, associadas à produção de hidrogênio (H₂) e metano (CH₄). As buscas foram realizadas nas plataformas Espacenet, Google Patents, USPTO, INPI e PATENTSCOPE/WIPO, reconhecidas pela abrangência e relevância no monitoramento de inovação tecnológica em escala global.

A estratégia metodológica foi estruturada em quatro rodadas sucessivas de busca, adotando refinamentos progressivos dos descritores empregados. O objetivo dessa abordagem foi ampliar a sensibilidade da prospecção tecnológica e, simultaneamente, aumentar a especificidade dos resultados obtidos, permitindo identificar documentos com diferentes níveis de proximidade conceitual em relação à proposta desta pesquisa.

Na primeira rodada, utilizou-se a combinação de termos mais específica e tecnicamente alinhada ao escopo do estudo: “anaerobic digestion” AND “glycerol” AND “hydrogen” AND “methane” AND “coffee grounds” AND “whey”. Essa etapa teve como finalidade localizar registros de patente que integrassem simultaneamente os principais elementos da proposta investigada, incluindo o processo de digestão anaeróbica, o uso de resíduos do café, a aplicação do

glicerol como co-substrato, a presença do soro de queijo e a produção de hidrogênio e metano como vetores energéticos.

Na segunda rodada, a estratégia de busca foi parcialmente flexibilizada por meio da substituição dos termos específicos relacionados aos resíduos do café pelo descritor genérico “coffee”. A combinação utilizada foi: “anaerobic digestion” AND “glycerol” AND “hydrogen” AND “methane” AND “coffee”. O objetivo dessa modificação foi ampliar o alcance da busca e identificar documentos que abordassem o café de maneira geral, independentemente da especificação do tipo de resíduo empregado no processo anaeróbico.

Na terceira rodada, optou-se por remover o termo “glycerol” da combinação anterior, utilizando os descritores: “anaerobic digestion” AND “hydrogen” AND “methane” AND “coffee”. Essa adequação metodológica foi motivada pela baixa recorrência de registros envolvendo simultaneamente o uso de glicerol e resíduos de café nas etapas anteriores. Assim, a retirada desse termo permitiu ampliar a sensibilidade da prospecção tecnológica, favorecendo a identificação de patentes relacionadas ao aproveitamento anaeróbico do café para produção de biogás e biohidrogênio, independentemente da utilização de co-substratos adicionais.

Essa etapa possibilitou identificar tecnologias com similaridades conceituais e operacionais relevantes à proposta investigada, especialmente em relação ao aproveitamento energético da biomassa residual do café em sistemas anaeróbicos bifásicos voltados à geração de H_2 e CH_4 . Além disso, os resultados obtidos contribuíram para uma avaliação mais consistente acerca do grau

de originalidade e do potencial inovador da proposta desenvolvida neste estudo.

Na quarta rodada, a estratégia de busca foi novamente refinada com a reintrodução de descritores específicos relacionados aos resíduos do café, utilizando a combinação: “anaerobic digestion” AND “hydrogen” AND “methane” AND “coffee grounds” AND “whey”. Essa configuração teve como objetivo aumentar a precisão da prospecção tecnológica, restringindo os resultados a documentos mais diretamente relacionados ao uso de resíduos específicos em processos de digestão anaeróbica com produção simultânea de hidrogênio e metano.

Após a obtenção dos resultados em todas as etapas, os documentos recuperados foram submetidos a uma análise preliminar baseada na leitura dos títulos, resumos, classificações internacionais de patentes e descrições técnicas. Foram excluídos os registros sem aderência ao escopo da pesquisa, duplicados ou que não apresentavam relação direta com processos anaeróbicos aplicados ao aproveitamento energético de resíduos orgânicos. Os documentos considerados relevantes compuseram o banco final de patentes analisadas, servindo como base para a avaliação da originalidade tecnológica e do potencial de inovação associado à proposta desta pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

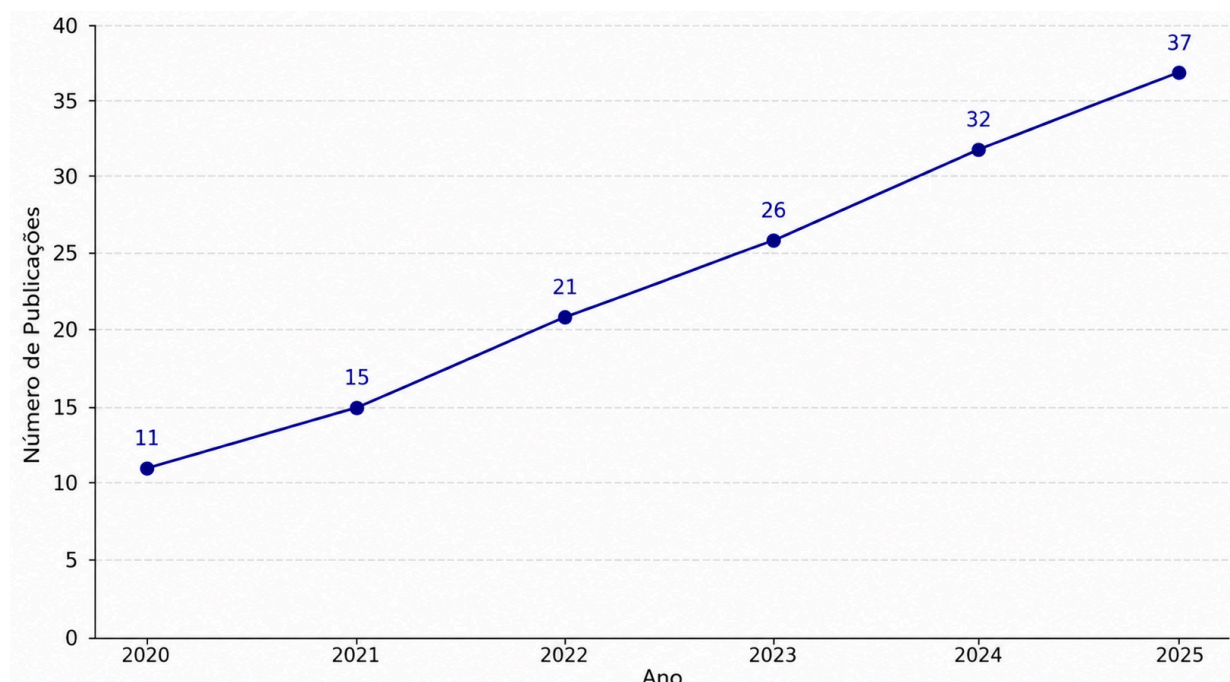
De antemão, é importante salientar que, a partir da busca inicial realizada com as palavras-chave definidas na Etapa 1, identificaram-se 187 artigos. Após o processo de refinamento na Etapa 2, o número de publicações foi reduzido para 90. Na Etapa 3, com a inclusão da palavra-chave "glycerol", não foi encontrado nenhum artigo. Os

gráficos e tabelas apresentados a seguir foram elaborados com base nas palavras-chave empregadas nas etapas 1 e 2 do procedimento metodológico.

4.1. Publicações Anuais

Os dados apresentados na Figura 2 revelam uma expansão progressiva das pesquisas desenvolvidas entre 2020 e 2025 sobre digestão anaeróbica em dois estágios aplicada à utilização de borra de café e soro de queijo. O aumento no número de estudos ao longo dos anos reflete o fortalecimento do interesse científico por processos biotecnológicos capazes de transformar resíduos agroindustriais em fontes renováveis de energia, com destaque para a obtenção de hidrogênio e metano. Esse cenário demonstra a busca crescente por alternativas sustentáveis que aliem valorização de resíduos, inovação tecnológica e contribuição para a transição energética.

Figura 2. Artigos, sobre o tema, produzidos anualmente entre os anos de 2020 e abril de 2025.



A Figura 2 demonstra crescimento expressivo das publicações científicas relacionadas à digestão anaeróbica em dois estágios no período de 2020 a 2025. Em 2020 foram registrados 11 estudos, enquanto em 2025 o número atingiu 37 publicações, representando aumento aproximado de 236% ao longo do período analisado.

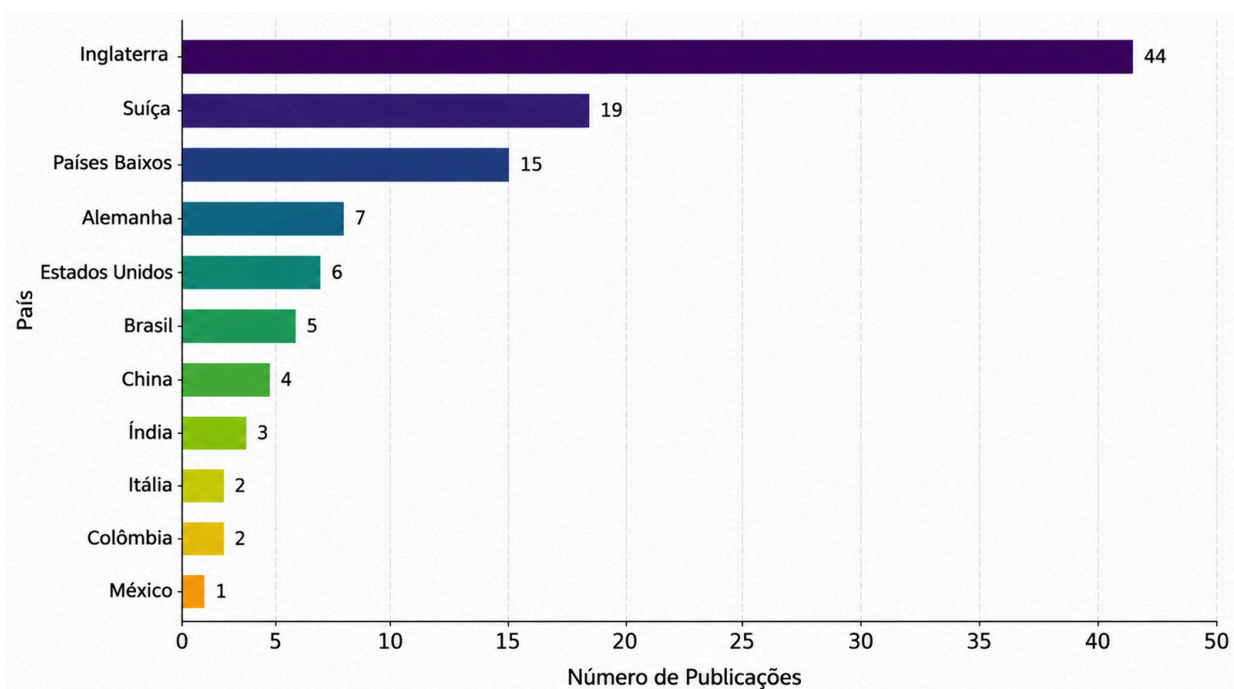
Entre 2020 e 2021 houve crescimento de cerca de 36%, passando de 11 para 15 publicações. Já entre 2021 e 2022 observou-se aumento de aproximadamente 40%, indicando intensificação do interesse científico pela temática. O avanço continuou entre 2022 e 2023, com crescimento de cerca de 24%, seguido de aumento de aproximadamente 23% entre 2023 e 2024. No último intervalo analisado, entre 2024 e 2025, verificou-se crescimento próximo de 16%.

Esses resultados evidenciam expansão contínua das pesquisas envolvendo digestão anaeróbica em dois estágios aplicada ao aproveitamento de resíduos agroindustriais, especialmente em estudos voltados à produção de hidrogênio e metano. O comportamento observado sugere consolidação gradual da temática no meio científico, impulsionada pela demanda por tecnologias sustentáveis e fontes renováveis de energia.

4.2. Produção Científica dos Países

Na Figura 3, apresentam-se os dez países com maior número de publicações sobre o tema.

Figura 3. Países que mais produziram cientificamente sobre o tema, entre 2020 e 2025.



Fonte: Elaborado pelos autores, com dados oriundos do Biblioshiny/Bibliometrix (2025).

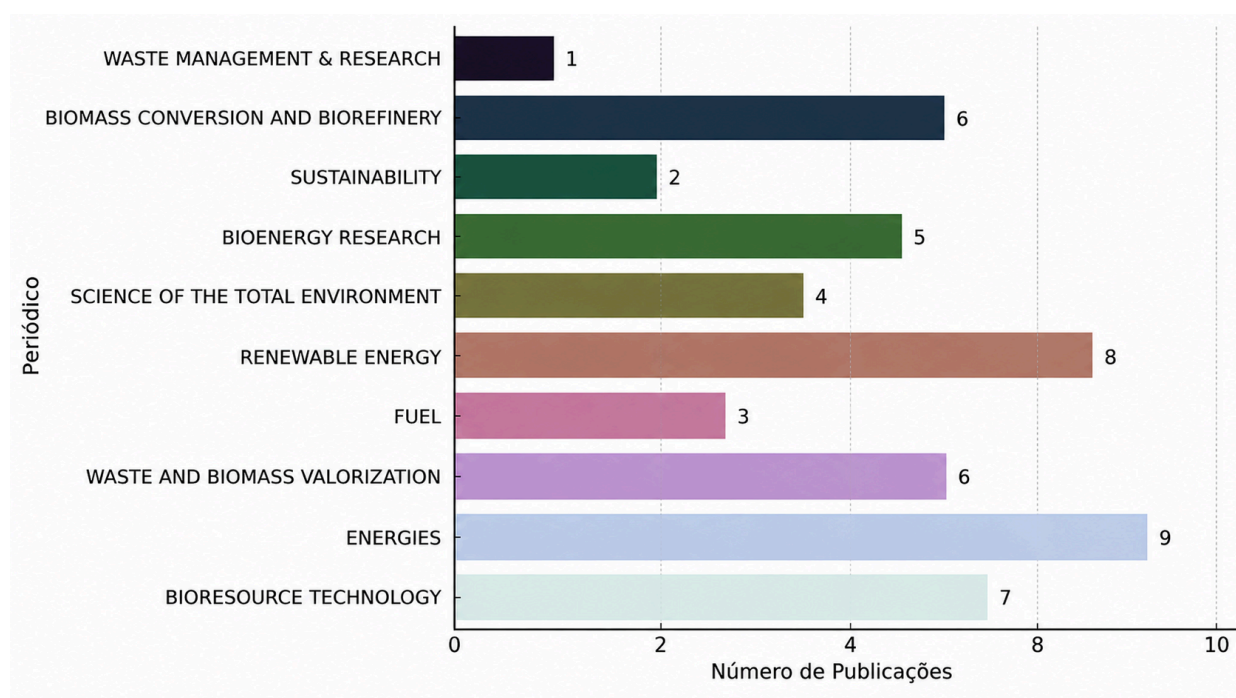
A distribuição geográfica das publicações científicas apresentada na Figura 3 evidencia a predominância de países europeus nas pesquisas relacionadas à digestão anaeróbica em dois estágios utilizando borra de café e soro de queijo. A Inglaterra lidera a produção científica com aproximadamente 41% das publicações identificadas, seguida pela Suíça, com cerca de 18%, e pelos Países Baixos, com aproximadamente 14%. Alemanha e Estados Unidos apresentam participações menores, próximas de 7% e 6%, respectivamente.

O Brasil representa cerca de 5% das publicações analisadas, demonstrando participação ainda limitada quando comparada ao potencial nacional de geração de resíduos agroindustriais. Os demais países somam percentuais inferiores a 5%, indicando menor representatividade científica no tema. De forma geral, os resultados reforçam a necessidade de ampliação das pesquisas e investimentos tecnológicos voltados ao aproveitamento energético de resíduos orgânicos no cenário brasileiro.

4.3. Principais Revistas Científicas

Na Figura 4, observa-se a distribuição das publicações entre os periódicos especializados, o que oferece uma visão estratégica sobre os veículos de maior relevância e visibilidade para a disseminação de estudos relacionados à digestão anaeróbica em dois estágios de resíduos de café com adição de soro de queijo.

Figura 4. Principais revistas científicas com publicação sobre o tema



Fonte: Elaborado pelos autores, com dados oriundos do Biblioshiny/Bibliometrix (2024).

A distribuição das publicações evidencia que o periódico Bioresource Technology ocupa posição de destaque, com 7 publicações, confirmando sua relevância consolidada na área de biotecnologia aplicada à valorização de resíduos e à digestão anaeróbica. Em seguida, o periódico Energies apresenta 9 publicações, demonstrando forte interesse em pesquisas voltadas à geração e ao aproveitamento energético da biomassa. Também se destacam Renewable Energy, com 8 publicações, e os periódicos Biomass Conversion and Biorefinery e Waste and Biomass

Valorization, ambos com 6 publicações, reforçando a importância de temas relacionados à conversão de biomassa, biorrefinarias e economia circular.

Na faixa intermediária, Bioenergy Research apresentou 5 publicações, enquanto Science of the Total Environment registrou 4 e Fuel contabilizou 3. Esses periódicos abrangem aspectos complementares, incluindo impactos ambientais, caracterização de combustíveis e desenvolvimento de tecnologias energéticas. Já Sustainability apresentou 2 publicações, indicando contribuição mais modesta, porém relevante, especialmente no contexto de sustentabilidade e avaliação sistêmica.

Por fim, Waste Management & Research apresentou apenas 1 publicação, representando a menor frequência entre os periódicos analisados. Esse resultado sugere que, embora o gerenciamento de resíduos seja um tema importante, a produção científica selecionada concentrou-se majoritariamente em periódicos especializados em biotecnologia, bioenergia e energias renováveis.

4.4. Palavras-chave Mais Relevantes

Um diagrama esquemático, denominado WordCloud, apresenta o conjunto de palavras-chave mais utilizadas em um determinado tema, evidenciando, por meio do tamanho das palavras, sua importância e grau de utilização. A Figura 5 apresenta a WordCloud de acordo com as palavras-chave encontradas na bibliometria do presente estudo:

Figura 5. WordCloud das principais palavras-chave encontradas sobre o tema, entre os anos de 2020 e 2025.

Na primeira etapa das buscas tecnológicas, considerada a mais específica e diretamente relacionada ao escopo desta pesquisa, não foram identificados registros de patentes nas bases consultadas. Esse resultado indica a ausência de proteção intelectual envolvendo a utilização conjunta de borra de café, glicerol residual e soro de queijo em processos de digestão anaeróbica em dois estágios destinados à produção simultânea de hidrogênio (H_2) e metano (CH_4). Tal cenário demonstra o caráter inovador da proposta e evidencia uma possível lacuna tecnológica no setor de bioenergia.

Na segunda rodada de buscas, optou-se por ampliar os critérios de pesquisa por meio da combinação dos termos “anaerobic digestion”, “glycerol”, “hydrogen”, “methane”, “coffee” e “whey”. Nessa etapa, não foram utilizados termos mais específicos relacionados aos resíduos do café, permitindo uma busca mais abrangente e aumentando a possibilidade de identificação de documentos associados ao aproveitamento energético de biomassa cafeeira e subprodutos agroindustriais.

A pesquisa realizada em plataformas internacionais de patentes resultou na identificação de diferentes registros tecnológicos. Entretanto, após análise individual dos resumos e descrições técnicas, observou-se que grande parte dos documentos apresentava apenas menções superficiais ao café ou ao glicerol, sem abordar diretamente sua aplicação integrada em sistemas anaeróbicos bifásicos. Da mesma forma, poucos documentos mencionavam o uso de soro de queijo como co-substrato, e nenhum deles relacionava simultaneamente borra de café, glicerol residual e soro de queijo voltados à coprodução de H_2 e CH_4 .

No Quadro 2 é apresentada uma comparação entre a proposta desenvolvida neste estudo e os documentos de patente que apresentaram maior proximidade temática. Apesar de algumas similaridades relacionadas ao uso de digestão anaeróbica ou de resíduos orgânicos para geração de biogás, verificou-se ausência de registros envolvendo a combinação específica proposta nesta pesquisa.

Os resultados obtidos reforçam a originalidade científica e tecnológica do trabalho, evidenciando potencial para desenvolvimento de inovação no aproveitamento energético de resíduos agroindustriais. Além disso, a ausência de depósitos patentários diretamente relacionados ao tema demonstra oportunidade estratégica para futuras aplicações tecnológicas e possíveis processos de proteção intelectual na área de bioenergia sustentável.

Quadro 2. Comparativo entre as cinco patentes selecionadas e a proposta desta pesquisa

Critério	Este estudo	JP2003200138A	CN115786406A	CN117908373A	CN101853A
Objetivo	Produção de H ₂ e CH ₄ via biodigestão em duas fases	Tratamento de borra de café para evitar dioxinas e produzir CH ₄	Produção de H ₂ e CH ₄ a partir de resíduos de cozinha com reconstrução da	Otimização da produção de H ₂ e CH ₄ via controle avançado	Produção de biogás (CH ₄) digestão anaeróbia trifásica

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/digestao->

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na terceira etapa da prospecção tecnológica, foi utilizada uma estratégia de busca mais abrangente empregando os termos “anaerobic digestion”, “hydrogen”, “methane”, “coffee” e “whey”, resultando na identificação de 242 registros patentários. Nessa fase, o termo “glycerol” foi retirado propositalmente da combinação de busca com o objetivo de ampliar o número de documentos relacionados ao aproveitamento energético de resíduos do café em processos anaeróbicos voltados à produção de hidrogênio (H₂) e metano (CH₄). A inclusão do termo “whey” permitiu ainda identificar possíveis tecnologias envolvendo soro de queijo como co-substrato em sistemas de digestão anaeróbica.

Apesar do número mais elevado de resultados encontrados, a análise técnica dos documentos revelou baixa aderência ao escopo específico desta pesquisa. Grande parte das patentes identificadas abordava o café apenas de forma genérica, inserido em misturas orgânicas ou resíduos agroindustriais sem detalhamento de sua aplicação em processos de codigestão anaeróbica. Além disso, observou-se que a maioria dos registros estava direcionada predominantemente à produção de metano, sem considerar a coprodução integrada de hidrogênio, característica central da proposta investigada neste estudo.

Outro aspecto observado foi que poucos documentos mencionavam o uso simultâneo de resíduos de café, soro de queijo e outros co-substratos orgânicos em sistemas anaeróbicos bifásicos. Em diversos

casos, verificaram-se limitações técnicas importantes, como ausência de separação das etapas acidogênica e metanogênica, falta de otimização do processo por co-digestão ou inexistência de estratégias voltadas ao aumento da eficiência energética.

Entre os 242 registros analisados, apenas um número reduzido apresentou elementos parcialmente relacionados à proposta desenvolvida nesta pesquisa. Entretanto, nenhum documento identificou a integração específica entre borra de café, glicerol residual e soro de queijo em digestão anaeróbica em dois estágios para produção simultânea de H₂ e CH₄. O Quadro 3 apresenta de forma comparativa os documentos que mais se aproximaram do escopo tecnológico investigado, permitindo evidenciar as diferenças existentes entre as tecnologias encontradas e a abordagem proposta neste trabalho.

Os resultados obtidos reforçam o caráter inovador e a originalidade técnico-científica da pesquisa, evidenciando a existência de lacunas tecnológicas relacionadas ao aproveitamento integrado desses resíduos agroindustriais. Além disso, a ausência de registros patentários específicos demonstra potencial para futuras aplicações tecnológicas e oportunidades de proteção intelectual no setor de bioenergia e economia circular.

Quadro 3. Análise comparativa entre a proposta de pesquisa e cinco registros de patentes correlatos

Critério	Este estudo	KR1013137 66B1	JP2015128 376A	US2024132 919A1	US2013 783A1
Objetivo principal	Produção de hidrogênio	Produção eficiente de metano	Início rápido da fermentação	Produção de metano por	Conver de ene renováv

e metano via biodigestã o anaeróbic a em duas	a partir de esterco e biomassa vegetal	ão metanogê nica com glicerol	consórcio microbian o em reservatóri o analítico	intermi te energia térmica étrica combu
--	---	--	---	--

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/digestao-anaerobica-em-dois-estagios-de-residuos-de-cafe-com-adicao-de-residuos-liquidos-para-producao-de-hidrogenio-e-metano-analise-bibliometrica-e-inovacao?noblockage>

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A quarta e última rodada teve como objetivo aprofundar a investigação em direção a registros tecnicamente mais específicos e alinhados à proposta da pesquisa. Para isso, foram inseridos os termos “coffee husk” e “coffee grounds” na estratégia de busca, compondo a combinação: “anaerobic digestion” AND “hydrogen” AND “methane” AND “coffee husk” AND “coffee grounds”. Essa reformulação visou delimitar o escopo, concentrando-se em patentes que abordassem diretamente os dois principais resíduos sólidos do café utilizados neste estudo: a casca e a borra.

Essa etapa resultou na identificação de 32 registros de patentes, um número mais restrito, mas de maior qualidade técnica em relação às rodadas anteriores. A leitura analítica dos resumos evidenciou que, embora algumas patentes mencionassem o uso de resíduos do café em processos biotecnológicos, poucas exploravam efetivamente seu potencial como substrato primário em digestão anaeróbica com foco na coprodução de hidrogênio (H₂) e metano (CH₄). Para melhor visualização, o Quadro 4 apresenta as seis patentes que mais se

aproximaram da proposta desenvolvida nesta pesquisa, destacando os pontos de convergência e as principais distinções técnicas.

Além disso, mesmo entre os registros que incluíam o uso de “coffee husk” ou “coffee grounds”, observou-se que o enfoque predominante estava na produção de biogás tradicional, com destaque apenas para o metano, sem abordar o aproveitamento bifásico ou a integração com co-substratos como o glicerol. Essa constatação reforça a originalidade da presente proposta, que difere por estruturar um modelo de digestão bifásica, com valorização simultânea de dois vetores energéticos, além de utilizar uma combinação específica de resíduos agroindustriais ainda pouco explorada.

Dessa forma, a quarta rodada permitiu refinar o entendimento sobre o estado da arte, ao revelar que, embora haja um número reduzido de iniciativas envolvendo resíduos do café, ainda não se identificaram registros que apresentem abordagem técnica equivalente à proposta desenvolvida nesta pesquisa. Os resultados reafirmam o caráter inédito da investigação e sua contribuição potencial para o avanço de tecnologias sustentáveis no setor de bioenergia.

Quadro 4. Comparativo entre Patentes e a Proposta de Pesquisa

BASE	PATENTE	TRABALH O DA PATENTE	ESTE TRABALH O	PRODUTO S VISADOS - PATENTE	PRODU S VISADO S NESTE TRABA O
------	---------	----------------------------	----------------------	--------------------------------------	--

Espacenet	CN1018057 53A	Resíduos orgânicos	Borra de café,	de	Metano (CH ₄), com	Hidrogênio (H ₂)
-----------	------------------	-----------------------	-------------------	----	-----------------------------------	---------------------------------

△ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/digestao-anaerobica-em-dois-estagios-de-residuos-de-cafe-com-adicao-de-residuos-liquidos-para-producao-de-hidrogenio-e-metano-analise-bibliometrica-e-inovacao?noblockage>

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram crescimento gradual das pesquisas relacionadas à digestão anaeróbica em dois estágios aplicada ao aproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de hidrogênio e metano. A análise bibliométrica evidenciou maior concentração de estudos em países europeus, enquanto o Brasil ainda apresenta participação limitada, apesar do elevado potencial associado à geração de resíduos da cadeia cafeeira.

A prospecção tecnológica revelou ausência de registros patentários envolvendo especificamente a utilização integrada de borra de café, glicerol residual e soro de queijo em sistemas bifásicos de digestão anaeróbica voltados à coprodução de H₂ e CH₄. Esse cenário reforça o caráter inovador da proposta e evidencia oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias na área de bioenergia.

Dessa forma, conclui-se que a integração desses resíduos apresenta potencial para contribuir com a valorização de subprodutos agroindustriais, geração de energia renovável e fortalecimento de

práticas associadas à economia circular e à sustentabilidade energética.

Agradecimentos

Agradeço à FAPES, à CAPES e à UFES pelo apoio institucional e financeiro, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albarracin, L.T. et al. (2024) 'The bioenergetic potential from coffee processing residues: towards an industrial symbiosis', *Resources*, [e-journal], 13(2), p. 21. <https://doi.org/10.3390/resources13020021>.

Alves, I.R.F.S. et al. (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*, [e-journal], 143, p. 105831. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105831>.

Budiyono, B. et al. (2023) 'Effect of pretreatment and C/N ratio in anaerobic digestion on biogas production from coffee grounds and rice husk mixtures', *International Journal of Renewable Energy Development*, [e-journal], 12(1), pp. 209–215. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.49298>.

Camargo, F.P. et al. (2023) 'Biogas from lignocellulosic feedstock: A review on the main pretreatments, inocula and operational variables involved in anaerobic reactor efficiency', *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal], 48, pp. 20613–20632. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.073>.

Czekala, W. et al. (2023) 'Waste-to-energy: biogas potential of waste from coffee production and consumption', *Energy*, [e-journal], 276, p. 127604. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>.

Cremonez, P.A., Sampaio, S.C., Teleken, J.G., Meier, T.W., Dieter, J. and Teleken, J. (2019) 'Influence of inoculum to substrate ratio on the anaerobic digestion of a cassava starch polymer', *Industrial Crops and Products*, [e-journal], 141, p. 111709. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111709>.

Cremonez, P.A. et al. (2021) 'Two-stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: a review', *Journal of Environmental Management*, [e-journal], 281, p. 111854. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111854>.

Dai, C. et al. (2021) 'Literary runaway: Increasingly more references cited per academic research article from 1980 to 2019', *PLoS ONE*, [e-journal], 16(8), e0255849. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255849>.

Embrapa (2024) 'Produção mundial de café foi estimada em 176,2 milhões de sacas de 60kg para a safra 2024–2025', *Embrapa Agropensa*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agropensa/busca-de-noticias/-/noticia/91004784> (accessed: 09 March 2025).

Ferreira, J., Volschan, I. and Cammarota, M. (2018) 'Co-digestion of sewage sludge with crude or pretreated glycerol to increase biogas production', *Environmental Science and Pollution Research*, [e-journal], 25, pp. 21811–21821. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2260-3>.

Halstead, T. (2023) 'Coffee: world markets and trade', *United States Department of Agriculture*. Disponível em:

<http://www.fas.usda.gov/data/coffee-world-markets-and-trade>

(accessed: 09 March 2025).

Holl, E. et al. (2022) 'Two-stage anaerobic digestion: State of technology and perspective roles in future energy systems', *Bioresource Technology*, [e-journal], 358, p. 127401. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127633>.

Indriyani, E. et al. (2025) 'Analysis of agricultural waste utilization as biogas, renewable energy management, and compost processing on energy efficiency in Bandung', *West Science Social and Humanities Studies*, [e-journal], 3(1), pp. 104–112. <https://doi.org/10.58812/wsshs.v3i01.1603>.

Madondo, N.I. and Chetty, M. (2022) 'Anaerobic co-digestion of sewage sludge and bio-based glycerol: optimisation of process variables using one-factor-at-a-time (OFAT) and Box–Behnken Design (BBD) techniques', *South African Journal of Chemical Engineering*, [e-journal], 40, pp. 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.002>.

REIS, Thiago Medeiros dos; LIRA, Taisa Shimosakai de; CASSINI, Servio Tulio Alves; OLIVEIRA, Jairo Pinto de; PINOTTI, Laura Marina. Unlocking the energy potential of coffee waste: pretreatment effects on anaerobic codigestion efficiency. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 48, n. 1, p. 2669600, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2026.2669600>

Simeonov, I., Kabaivanova, L. and Chorukova, E. (2021) 'Two-stage anaerobic digestion of organic wastes: a review', *Ecological Engineering and Environment Protection*, [e-journal], (3), pp. 38–56. <https://doi.org/10.32006/eeep.2021.3.3856>.

Suhartini, S. et al. (2022) 'Sustainable strategies for anaerobic digestion of oil palm empty fruit bunches in Indonesia: a review', *International Journal of Sustainable Energy*, [e-journal], 41(11), pp. 2044–2096. <https://doi.org/10.1080/14786451.2022.2130923>.

Villa Montoya, A.C. et al. (2020) 'Improving the hydrogen production from coffee waste through hydrothermal pretreatment, co-digestion and microbial consortium bioaugmentation', *Biomass and Bioenergy*, [e-journal], 137, p. 105551. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105551>.

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil

³ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil