



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO MULTIDISCIPLINAR EM SAÚDE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCÊNCIAS

JULIANA GOMES BARRETO SOUZA LEITE

**CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS**

Vitória da Conquista, BA.
2023

JULIANA GOMES BARRETO SOUZA LEITE

**CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biociências,
Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de
Mestre em Biociências.

Orientador: Profa. Dra. Patrícia Lopes Leal
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Coorientador: Profa. Dra. Elizama Aguiar de Oliveira
Universidade Estadual de Santa Cruz- UESC

Vitória da Conquista, BA.
2023

Biblioteca Universitária Campus Anísio Teixeira – SIBI/UFBA

L533

Leite, Juliana Gomes Barreto Souza.

Codigestão anaeróbica de resíduos agroindustriais para geração de Biogás / Juliana Gomes Barreto Souza Leite. -- Vitória da Conquista, BA: UFBA, 2023.

88 f.; il.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Patrícia Lopes Leal.

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a. Elizama Aguiar de Oliveira.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Biociências) - Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, 2023.

1. Digestão anaeróbica. 2. Lignocelulose. 3. Metano. 4. Pré-tratamento
I. Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde. II. Leal, Patrícia Lopes. III. Oliveira, Elizama Aguiar. IV. Título.

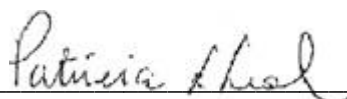
CDU: 662.767.2

JULIANA GOMES BARRETO SOUZA LEITE

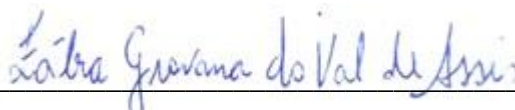
**CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS**

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Biociências e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Biociências, Universidade Federal da Bahia.

Vitória da Conquista – BA, 19/04/2023.



Prof.^a Dr.^a Patrícia Lopes Leal (Orientadora)
(Universidade Federal da Bahia)



Prof.^a Dr.^a Fábiana Giovana do Val de Assis (Examinadora)
(Centro Tecnológico de Desenvolvimento Regional de Viçosa)



Prof. Dr. Bruno Lopes Bastos (Examinador)
(Universidade Federal da Bahia)

“Dedico este trabalho a Deus, por tudo que é e representa na minha vida; e aos meus familiares pela compreensão e amor”.

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus familiares, em especial à minha mãe (Jubmagna), ao meu marido (Thiago) e meus irmãos (Anthony e Gregory) que estiveram comigo durante esta fase, incentivando e me apoiando.

À minha orientadora (Prof^a. Dr^a. Patrícia Lopes Leal) e Coorientadora (Prof^a. Dr^a. Elizama Aguiar de Oliveira), pela disponibilidade, dedicação, paciência, apoio e orientações que me direcionaram e permitiram a realização deste trabalho. Minha eterna gratidão.

Ao Programa de Pós-graduação em Biociências, pelo conhecimento e experiência adquiridos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pelo apoio e financiamento.

Às minhas amigas que me ajudaram nos momentos difíceis e incentivaram a prosseguir, em especial à Cynthia, Dayse e Iasmin.

Aos colegas de laboratório Alexandra, Bruna, Elismar e Mateus.

À todos os colaboradores que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial, Robson e Janeide.

LEITE, Juliana Gomes Barreto Souza. Codigestão anaeróbia de resíduos agroindustriais para geração de biogás. 2023. Dissertação (Mestrado) – Instituto Multidisciplinar de Saúde, Universidade Federal da Bahia, Vitória da Conquista, 2023.

RESUMO

O interesse por fontes energéticas renováveis cresceu acentuadamente nos últimos anos, a fim de mitigar os efeitos nocivos ao meio ambiente causados pelo elevado consumo e dependência dos combustíveis fósseis. Resíduos agroindustriais são biomassas amplamente disponíveis, renováveis e susceptíveis à bioconversão para geração de energia, a exemplo do biogás. A biodigestão anaeróbia é a técnica amplamente empregada no tratamento de resíduos orgânicos para geração de biogás, que pode ser utilizado como fonte de calor, combustível veicular ou transformado em energia elétrica. Contudo, a composição lignocelulósica dos resíduos agroindustriais confere resistência à hidrólise microbiana, fase inicial da biodigestão anaeróbia. Para contornar este problema, técnicas envolvendo codigestão, pré-tratamento da biomassa e determinação de parâmetros operacionais são úteis para viabilizar a degradabilidade dos compostos orgânicos e otimizar a produção de biogás e seu teor de metano. Neste estudo, foi realizada uma revisão sistemática sobre produção de biogás e metano a partir de resíduos lignocelulósicos e esterco bovino. Informações sobre parâmetros que influenciam a produção de biogás, como tipos de matéria prima, tecnologias de pré-tratamento, codigestão e condições operacionais (temperatura e pH) foram destacadas nesta revisão. Uma análise refinada da literatura foi estabelecida adotando critérios de inclusão e exclusão para a formação de um banco de dados robusto de trabalhos publicados em todo mundo no período de 2012 a 2022. Além disso, foi objetivo deste trabalho aplicar ferramentas estatísticas de otimização de processos para investigar a influência de parâmetros operacionais (pH, temperatura e volume de substratos) para produção de biogás e CH₄, a partir da codigestão anaeróbia de esterco bovino, manipueira e casca de café. Ensaios experimentais foram conduzidos aplicando o Delineamento Composto Central (DCC) para avaliar os níveis de pH inicial (8, 9, 10), temperatura (30, 40 e 50°C) e proporção de substrato (casca de café: manipueira: esterco bovino) sobre a produção de biogás e metano, ao longo de 15 dias de retenção hidráulica. A revisão sistemática gerou um banco de dados com o total de 127 publicações de diversos países no período dos anos 2012 a 2022. Os países asiáticos, China e Índia, os países Europeus, especialmente a Alemanha, se destacam como promotores de pesquisas relacionadas a otimização da produção de biogás a partir de resíduos lignocelulósicos e esterco bovino. Os parâmetros operacionais, mais frequentemente, abordados nos estudos selecionados, incluíram a temperatura mesofílica e o ajuste inicial do pH para 7. Dentre os pré-tratamentos estudados, técnicas de preparo físico foram as mais utilizadas e comumente associadas aos tratamentos químicos e biológicos, a fim de aumentar a degradabilidade e reduzir a recalcitrância da celulose e da lignina. Quanto aos resultados dos ensaios experimentais conduzidos no presente trabalho, constatou-se que apresentaram produção de biogás e metano significativas. A ferramenta estatística possibilitou identificar uma relação inversamente proporcional entre o pH e a temperatura nas condições utilizadas. As condições operacionais de pH inicial 10 e 30°C de temperatura apresentaram as melhores condições de fermentação, resultando em 798,72 cm³ de biogás e 638,98 cm³ de CH₄ acumulados ao final de 15 dias de retenção hidráulica.

Palavras- chave: Digestão anaeróbia. Lignocelulose. Metano. Pré-tratamento.

LEITE, Juliana Gomes Barreto Souza. Anaerobic codigestion of agro-industrial residues for biogas generation. 2023. Dissertation (Master degree) - Multidisciplinary Institute in Health, Federal University of Bahia, Vitória da Conquista, 2019.

ABSTRACT

The interest in renewable energy sources has grown sharply in recent years, in order to mitigate the harmful effects on the environment caused by high consumption and dependence on fossil fuels. Agro-industrial residues are widely available, renewable and susceptible to bioconversion for energy generation, such as biogas. Anaerobic digestion is the technique widely used in the treatment of organic waste to generate biogas, which can be used as a source of heat, vehicle fuel or transformed into electricity. However, the lignocellulosic composition of agro-industrial residues makes them resistant to microbial hydrolysis, the initial phase of anaerobic digestion. To overcome this problem, techniques involving co-digestion, pre-treatment of biomass and determination of operational parameters are useful to enable the degradability of organic compounds and optimize the production of biogas and its methane content. In this study, a systematic review was carried out on the production of biogas and methane from lignocellulosic residues and bovine manure. Information on parameters that influence biogas production, such as types of raw material, pre-treatment technologies, co-digestion and operational conditions (temperature and pH), were highlighted in this review. For this, a refined analysis of the literature was established, adopting inclusion and exclusion criteria to form a robust database of works published worldwide, from 2012 to 2022. In addition, the objective of this work was to apply statistical tools for process optimization to investigate the influence of operational parameters (pH, temperature and volume of substrates) for the production of biogas and CH₄, from the anaerobic co-digestion of bovine manure, cassava and coffee husk. Experimental tests were conducted applying the Central Composite Design (CCD) to evaluate the initial pH levels (8, 9, 10), temperature (30, 40 and 50 °C) and substrate proportion (coffee husk : cassava : bovine manure) on the production of biogas and methane, over 15 days of hydraulic retention. The systematic review generated a database with a total of 127 publications from different countries, from 2012 to 2022. Asian countries, such as China and India, and European countries, especially Germany, stand out as promoters of research related to the optimization of biogas production from lignocellulosic residues and bovine manure. The operational parameters most frequently addressed in the selected studies included the mesophilic temperature and the initial pH adjustment to 7. Among the pre-treatments studied, physical preparation techniques were the most used and commonly associated with chemical and biological treatments, in order to increase the degradability and reduce the recalcitrance of cellulose and lignin. As for the results of the experimental tests carried out in the present work, it was verified that they presented significant production of biogas and methane. The statistical tool made it possible to identify an inversely proportional relationship between pH and temperature, under the conditions used. The operating conditions of initial pH 10 and 30°C temperature showed the best fermentation conditions, resulting in 798.72 cm³ of biogas and 638.98 cm³ of CH₄ accumulated at the end of 15 days of hydraulic retention.

Keywords: Anaerobic digestion. Lignocellulose. Methane. Pre-treatment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NO BRASIL.....	9
2.1.1 Resíduos da mandioca	10
2.1.2 Resíduos da bovinocultura	11
2.1.3 Resíduos da cafeicultura	11
2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	13
2.2.1 Etapas do processo de digestão anaeróbia	14
2.2.1.1 <i>Hidrólise</i>	15
2.2.1.2 <i>Acidogênese</i>	16
2.2.1.3 <i>Acetogênese</i>	17
2.2.1.4 <i>Metanogênese</i>	17
2.2.2 Fatores que influenciam na biodigestão anaeróbia	18
2.3 APLICAÇÕES ENERGÉTICAS DO BIOGÁS.....	20
3. OBJETIVOS	20
3.1 OBJETIVO GERAL.....	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4. MATERIAL E MÉTODO	21
4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA.....	21
4.1.2 Critérios de inclusão e exclusão	22
4.1.3 Análise sistemática do banco de dados	22
4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	22
4.2.1 Obtenção dos resíduos agroindustriais	22
4.2.2 Montagem e abastecimento dos biodigestores de bancada	23
4.2.3 Delineamento experimental e análise estatística	24
4.2.4 Quantificação e análise do biogás	24
4.2.5 Análise do efluente	25
5. REFERÊNCIAS	27
6. CAPÍTULO 1- SISTEMAS DE MONODIGESTÃO E CODIGESTÃO ANAERÓBIA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: REVISÃO SISTEMÁTICA	34

7. CAPÍTULO 2- ESTUDO DO PH E DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM ALTO TEOR DE METANO	71
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88

1 INTRODUÇÃO

Recursos naturais não renováveis têm sido historicamente utilizados de forma arbitrária e insustentável, impactando negativamente o meio ambiente. De forma geral, petróleo, carvão, gás natural, eletricidade, energia nuclear e energias renováveis correspondem, em média, 33, 27, 24, 7, 4 e 4 % da proporção total de energia primária em todo o mundo, respectivamente (ABANADES et al., 2021). Ou seja, 85 % do consumo mundial de energia primária vêm sendo suprida por combustíveis fósseis (BENATO E MACOR, 2019). Desse modo, mudanças em políticas públicas de todo mundo buscam ações voltadas à conservação ambiental e desenvolvimento de tecnologias alternativas ao uso dos recursos naturais não renováveis, especialmente, para finalidades energéticas (DJIMTOINGAR et al., 2022).

A tecnologia de digestão anaeróbia é adequada e eficiente para o gerenciamento de materiais orgânicos e também apresenta um papel vital no futuro da produção de energia renovável, colaborando para o desenvolvimento econômico, segurança energética e redução da poluição ambiental (HAGOS et al., 2017; DIMA et al., 2020). O processo biológico ocorre na ausência de oxigênio e resulta na produção de biogás por meio da decomposição de materiais orgânicos (CHRISTY et al., 2014). O biogás pode ser produzido a partir de muitas fontes, como resíduos agrícolas, esgoto, materiais vegetais, resíduos alimentares, resíduos industriais e até mesmo a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (CONVERTI et al., 2009; DEVI et al., 2022). Além de ser um método de conversão da energia, contida na biomassa, o biogás pode ser armazenado e transportado. A técnica de digestão anaeróbia é um método de tratamento e reciclagem de resíduos, que visa a redução de seus efeitos nocivos ao meio ambiente, ao final do processo são gerados aditivos estáveis para o solo (fertilizante líquido) (ALI SHAH et al., 2014).

A produção de biogás via digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas metabólicas interdependentes, denominadas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A estabilidade e a eficiência do processo são afetadas pelo equilíbrio existente entre as bactérias não metanogênicas e as arqueias metanogênicas (MCINERNEY E BRYANT, 1981; DIMA et al., 2020). Os principais constituintes do biogás gerados no processo é o metano (CH_4 , 50 - 75 %) e o dióxido de carbono (CO_2 , 25 - 50 %), mas outros compostos indesejáveis como sulfeto de hidrogênio (H_2S , 0,01 - 0,5 %) e amônia (NH_3 , 0,1 - 0,5 %) também são encontrados (SALOMON E LORA, 2009; WEILAND, 2010; KOUGIAS E ANGELIDAKI, 2018). A

eficiência média da metanogênese atinge, aproximadamente, 0,24 m³ de metano a partir de 1 kg de matéria orgânica seca (ALI SHAH et al., 2014).

A produção mundial de biogás por digestão anaeróbia tem crescido acentuadamente nos últimos anos. Entre 2000 e 2019, a produção passou de 12,4 para 62,3 bilhões de m³ (bm³) compartilhado principalmente entre a Europa (50 %), Ásia (35 %) e América (14 %) (WBA, 2021). Segundo a World Biogas Association (2021) o potencial de crescimento da indústria de biogás é extraordinário, quando comparado ao atual explorado de 1,6 - 2,2 %. O biogás produzido pode ser convertido em calor e energia, ou pode ser purificado para produzir biometano, o qual pode ser usado como combustível para transporte ou atividades domésticas (ESTEVEES et al., 2019). Vários estudos têm sido desenvolvidos com objetivo de melhorar a eficiência da digestão anaeróbia, aumentar a produção de biogás e teor de metano (DJIMTOINGAR et al., 2022). A composição do biogás depende da biodegradabilidade do material orgânico como também da diversidade de microrganismos e fatores operacionais como: temperatura, pH e tempo de retenção hidráulica (TRH) (HAGOS et al., 2017; NESHAT et al., 2017).

O processo de codigestão, mistura de dois ou mais substratos, tem sido amplamente utilizada para aumentar a produção de biogás dos digestores e superar as desvantagens da monodigestão (HAGOS et al., 2017). De forma geral, os principais benefícios do processo de codigestão envolvem: a diluição de substâncias inibidoras, proporcionam o equilíbrio de nutrientes, proporcionam a melhoria da estabilização do processo, garantem o aumento de carga orgânica biodegradável, tendo como consequência o possível aumento da produção de biogás de 25 a 400 % em relação à monodigestão dos mesmos substratos (HAGOS et al., 2017). O esterco bovino, por exemplo, é amplamente utilizado como cosubstrato com outros resíduos agroindustriais, como palha de milho (LIANG et al., 2022), palha de trigo (RANJBAR et al., 2022), resíduos de madeira (WEDWITSCHKA et al., 2022), cana-de-açúcar (KAUR et al., 2020) e outros resíduos agrícolas (trevo, grama, palha, folhas, ervas daninhas) (ALMOMANI, 2020; FENG et al., 2018; ALI E SUN, 2015). Essa tendência se justifica pelo alto teor de carbono da biomassa lignocelulósica atrelado ao alto teor de nitrogênio do esterco bovino, conferindo uma proporção geral de carbono: nitrogênio (20 : 1 e 30 : 1), considerada ideal para produção de biogás (ESTEVEES et al., 2019).

Propostas tecnológicas que promovem máxima eficiência nos processos biológicos de conversão da biomassa, métodos e técnicas de otimização de processos têm merecido atenção. Normalmente, elas envolvem ferramentas estatísticas, a exemplo da Metodologia de Superfície de Resposta, para avaliar os efeitos e estabelecer as condições ideais quanto aos

parâmetros operacionais que impactam a produção e qualidade do biogás (DIMA et al., 2020). Fatores como temperatura, pH, concentração de substratos, adição de inoculantes e micronutrientes são exemplos de variáveis que influenciam o biodigestão anaeróbias, e por isso, amplamente consideradas em estudos de otimização de processos (HAGOS et al., 2017; SAMANI et al., 2017).

Diante do exposto, é inegável que a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de biomassas lignocelulósicas representa uma oportunidade de produção alternativa à energia a partir de fontes renováveis, como os resíduos agroindustriais (CARUSO et al., 2019). Por outro lado, reconhece-se a necessidade de aperfeiçoamento e desenvolvimento tecnológico a fim de tornar tal proposta viável do ponto de vista biotecnológico, ambiental, econômico e social. Ou seja, é fundamental uma abordagem interdisciplinar, com explicações que superem viés tecnológicos e até mesmo de políticas públicas, para que o biogás deixe de ser apenas uma tendência emergente e venha ocupar local de destaque com ampla aplicação, especialmente, para o setor energético.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NO BRASIL

Grandes quantidades de resíduos agroindustriais são geradas usando as práticas atuais de processamento industrial em todo o mundo. Estimam-se que 140 bilhões de toneladas de resíduos provenientes de biomassa agrícola são gerados por ano (VAZ, 2020). A cadeia agroindustrial brasileira gera aproximadamente 291 milhões de toneladas de resíduos por ano, os quais são subprodutos em grandes proporções com pouco ou nenhum valor de mercado (SIQUEIRA et al., 2022). Isso inclui os resíduos de confinamento de animais, resíduos de limpeza de grãos, produtos que apodrecem em armazéns, e que, ao final, se tornam passivos ambientais significativos, descartados de forma inadequada, contaminando o solo e a água, e emitindo gases gerados por sua decomposição (PERES et al., 2019).

O país contabiliza atualmente 811 plantas de biogás, destas 755 estão em operação, com potencial de produção de 2,3 bilhões de m³ de biogás por ano (CIBIOGÁS, 2022). Segundo Borges e colaboradores (2021), a produção pode chegar a 5,3 milhões de m³ / dia de metano em 2030 para 19,7 milhões em 2050. O potencial teórico de produção de biogás no Brasil é de 84,6 bilhões de m³ por ano, o que seria suficiente para suprir 40 % da demanda

interna de energia elétrica e 70 % do consumo de diesel, considerando o cenário atual, o país explora apenas 3 % desse potencial (ABIOGÁS, 2021).

2.1.1 Resíduos da mandioca

A mandioca é uma cultura representativa do setor agrícola brasileiro, o país está entre os maiores produtores mundiais, com produção estimada para o ano de 2022 de 18,23 milhões de toneladas da raiz de mandioca, com aumento de 0,80 % quando comparado ao ano anterior (CONAB, 2023b). No Brasil, os maiores produtores de mandioca são os estados do Pará (4,3 milhões de toneladas), Paraná (3,10 milhões de toneladas) e Bahia (0,93 milhões de toneladas) (IBGE, 2022). Os principais tipos de processamento da raiz de mandioca são para a fabricação de farinha e extração de fécula (CAMPOS et al., 2006).

Durante o processamento da raiz de mandioca, uma grande quantidade de resíduo é gerada. Os resíduos são compostos por folhas, caules, casca, água de lavagem de raízes e manipueira (FORSTER-CARNEIRO et al., 2013; PERES et al., 2019). Dentre os resíduos, a manipueira (resíduo líquido oriundo da prensagem da mandioca) é o mais prejudicial ao meio ambiente, pois contém alta concentração de ácido cianídrico (HCN) equivalente a 3.5 mg / L⁻¹, elevada carga orgânica expressa em Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 4.000 - 70.000 mg / L⁻¹ e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) que pode superar 100.000 mg / L⁻¹ (BARANA E CEREDA, 2000; CAMPOS et al., 2006; SUMAN et al., 2011; HASAN et al., 2015).

Para cada tonelada processada de raízes de mandioca são obtidos aproximadamente 300L de manipueira, este efluente quando descartado, sem o devido tratamento, tem poder poluidor 25 vezes mais que o esgoto doméstico, poluição equivalente a uma população de 230 para 300 habitantes (SUMAN et al., 2011; DANINO, 2020). O descarte inadequado da manipueira causa a eutrofização dos corpos hídricos, contaminação dos solos e por conter HCN também é considerado tóxico e mortal para diversos organismos (CORREIA et al., 2018; MACHADO et al., 2019; ASSIS et al., 2019).

A matéria orgânica da manipueira apresenta um alto teor de açúcares solúveis de fácil fermentação que viabiliza o tratamento biológico em detrimento ao físico-químico. Dentre os tipos de tratamento de efluentes existentes, o tratamento biológico possui grande aplicabilidade no tratamento de águas residuais, sejam concentradas ou diluídas, pois transforma o passivo ambiental em um produto com valor econômico agregado, uma vez que

pode ser empregada na produção de biogás (NEVES E SOUZA, 2019; MACHADO et al., 2019).

2.1.2 Resíduos da bovinocultura

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2022, o Brasil atingiu o efetivo de 222,4 milhões de cabeças de bovinos (CONAB, 2023a). O país é o maior exportador de carne bovina do mundo, tem se destacado internacionalmente neste contexto e prevê aumento de 4 % da produção em 2022 (USDA, 2022). A criação de animais sofreu adaptações, passando de um sistema considerado extensivo para um modelo intensivo de confinamento, objetivando a diminuição dos custos de produção e o aumento da eficiência do processo (DOTTO E WOLFF, 2012; TIETZ et al., 2015). Um dos maiores problemas, no modelo intensivo de confinamento de bovinos, é a quantidade de dejetos produzidos diariamente numa área reduzida (SENÉS-GUERRERO et al., 2019).

A disposição dos resíduos das instalações animais tem se constituído num desafio para criadores e especialistas, pois envolve aspectos técnicos, sanitários e econômicos (DOTTO E WOLFF, 2012). O esterco bovino advindo do modelo intensivo de confinamento está associado a diversos problemas ambientais quando não tratado e descartado inadequadamente, tais como: problemas de odor, evaporação de amônia, altas concentrações de bactérias e patógenos, roedores, insetos, moscas e outras pragas, contaminação de águas superficiais e subterrâneas e deterioração da estrutura biológica do solo (TUFANER E AVŞAR, 2016; SENÉS-GUERRERO et al., 2019; ALMOMANI E BHOSALE, 2020).

Além disso, estima-se que a pecuária seja responsável por 18 % das emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEEs), sendo a bovinocultura responsável pela emissão de 61 % de dióxido de carbono, 81 % de metano e 60 % de óxido nitroso (PHILIPPE E NICKS, 2015). Se manuseado adequadamente, o esterco pode ser um recurso valioso para a produção de energia renovável, uma pequena porcentagem desses resíduos é atualmente processada para gerar biogás (HOLM-NIELSEN et al., 2009). À medida que, os países se comprometem internacionalmente a reduzir GEE e incorporar fontes renováveis de energia, a geração de biogás e sua otimização ganham importância (SENÉS-GUERRERO et al., 2019).

2.1.3 Resíduos da cafeicultura

O café é uma das commodities agrícolas mais importantes do mundo. Em 2020/21 a produção mundial de café foi estimada em 169,64 milhões de sacas de 60 kg (OIC, 2021). O Brasil é líder na exportação e produção de café, com aproximadamente um terço da produção mundial, com estimativa de 53,4 milhões de sacas para o ano de 2022 (CONAB, 2022). As cerejas de café coletadas de cafeeiros precisam passar por vários processos, por via úmida (polpa) ou seca (casca), antes de serem comercializadas.

Nos moinhos úmidos, as cerejas de café passam por uma série de despolpa, lavagem, secagem e polimento. O processamento úmido gera efluentes e resíduos sólidos com alto teor de umidade, como celulose, mucilagem e pergaminho. Em contraste com o processamento úmido, o processamento a seco inclui principalmente o descasque e a secagem. O subproduto do processamento a seco é principalmente casca de café, cerca de 50 % da cereja seca de café, ou seja, para cada tonelada de grãos de café produzidos, uma tonelada de cascas é gerada (DU et al., 2021). No Brasil, as cerejas de café são geralmente processadas pelo método seco, resultando na casca do café, formada por casca externa seca, polpa e pergaminho; é rica em matéria orgânica, nutrientes, cafeína, taninos e compostos fenólicos (OLIVEIRA E FRANCA, 2015; PANDEY et al., 2000).

Alguns estudos para o uso da casca do café têm sido feitos, como o uso direto como combustível em fazendas, ração animal, fermentação e produção de biodiesel. No entanto, algumas formas de aproveitamento possuem limitações considerando a grande quantidade de resíduos gerados, ainda há a necessidade de buscar melhores alternativas e usos mais rentáveis (SANTOS et al., 2018). Embora, a combustão da casca de café seja uma prática comum nas fazendas, já foi demonstrado que grandes problemas estão propensos a ocorrer como: aglomeração, incrustações, emissões de GEE e partículas finas na atmosfera que contribuem para a poluição do ar e o problema do aquecimento global (OLIVEIRA et al., 2008; ALMOMANI E BHOSALE, 2020). Outra limitação é quanto à utilização como ração animal, a cafeína presente na casca de café é um composto ativo e estimulante, seu uso como ração animal deve ser restringido por apresentar natureza tóxica (VEGROII E CARVALHOIII, 1994). Os taninos também são considerados um fator antinutricional e impede que a casca de café seja utilizada na alimentação animal em porcentagens maiores que 10 %, pois são pouco degradáveis como as frações de lignina também presentes no resíduo (PANDEY et al., 2000; OLIVEIRA E FRANCA, 2015; ECHEVERRIA E NUTI, 2017).

Apesar das características supracitadas, a casca de café apresenta vantagens quanto à utilização em processos fermentativos, como a digestão anaeróbia, pois é rica em matéria orgânica, contém alto teor de sólidos voláteis e açúcares, o que a torna um substrato ideal para

processos microbianos para a produção de produtos de valor agregado (PANDEY et al., 2000; ECHEVERRIA E NUTI, 2017). Segundo Oliveira e colaboradores (2008), não há usos rentáveis para casca de café e sua destinação constitui um grande problema ambiental no Brasil, como o desenvolvimento sustentável deve ser priorizado, deve-se buscar o desenvolvimento de técnicas para agregar valor e reaproveita-los.

2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (DA) é um tratamento biológico catalisado por um consórcio de microrganismos na ausência de oxigênio, que converte matéria orgânica complexa em biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2014), uma mistura formada principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) (Tabela 1). O potencial energético do biogás está relacionado com a quantidade de CH₄ que determina seu poder calorífico (SALOMON E LORA, 2009). Enquanto, os processos aeróbios resultam na produção de biomassa microbiana e bioprodutos oxidados (geralmente com baixo teor energético), os processos anaeróbios combinam a redução parcial da carga poluidora do efluente com a produção de moléculas mais reduzidas com potencial energético e fertilizante (MARTINEZ-BURGOS et al., 2021).

Tabela 1 - Composição média do biogás proveniente da digestão anaeróbia (DA).

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH₄)	50-75
Dióxido de carbono (CO₂)	25-50
Sulfeto de hidrogênio (H₂S)	0,01- 0,5
Amônia (NH₃)	0,1–0,5
Nitrogênio (N)	0,5–2,5
Oxigênio (O₂)	0,1–1
Hidrogênio (H₂)	1–3

Fonte: Salomon e Lora (2009); Weiland (2010); Kougiás e Angelidaki (2018).

O tratamento anaeróbico tem sido amplamente utilizado na digestão de diferentes resíduos orgânicos. Morais e colaboradores (2021) avaliaram o potencial de produção de CH₄ de seis efluentes agroindustriais: águas residuais de suínos, de matadouros, de laticínios, efluente de cervejaria, efluente de processamento de frutas e glicerol residual da produção de biodiesel. No Brasil, os substratos utilizados para produção de biogás são divididos em 3

categorias quanto a sua fonte: agropecuária, indústria (agroindústrias) e saneamento (CIBIOGÁS, 2022). A composição do biogás produzido depende do substrato utilizado e das condições de digestão (NESHAT et al., 2017).

A DA de um único substrato ou monodigestão, apresenta algumas limitações para produção de biogás, relacionadas às características do substrato. Por exemplo, substratos como lodo de esgoto é caracterizado por baixas cargas orgânicas; o esterco animal tem baixa carga orgânica e altas concentrações de nitrogênio (N); os resíduos sólidos urbanos tem altas concentrações de metais pesados; resíduos agroindustriais geralmente são ricos em lignocelulose; os resíduos de matadouro contêm altas concentrações de N e de ácidos graxos (MATA-ALVAREZ et al., 2014; SHRESTHA et al., 2017). A maioria dessas limitações que inibem a DA podem ser resolvidas com a adição de outro substrato ou cosubstrato.

A tecnologia de codigestão anaeróbia tem se destacado, pois permite a digestão simultânea de dois ou mais substratos, sólidos e líquidos tratados em conjunto. É utilizada para melhorar os rendimentos da digestão, torna o processo mais estável por apresentar benefícios como: diluição de compostos tóxicos, aumento da carga de matéria orgânica biodegradável, melhor equilíbrio de nutrientes, efeito sinérgico de microrganismos e maior rendimento de biogás (HOLM-NIELSEN et al., 2009; KHALID et al., 2011; ANDRADE et al., 2016). Passos e colaboradores (2018) avaliaram a codigestão anaeróbia da casca de café com biomassa de microalgas, ambos os substratos foram pré-tratados, com hidrólise térmica, separadamente e em mistura para atingir 15 % de sólidos totais (ST), os resultados apresentaram efeito sinérgico, levando a um rendimento de metano de 17 % maior em relação ao valor teórico de ambos os substratos biodegradados separadamente.

2.2.1 Etapas do processo de digestão anaeróbia

A bioconversão de materiais orgânicos em CH_4 é realizada por microrganismos quimioheterotróficos, não metanogênicos e metanogênicos, que se interagem e realizam a DA em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1) (MARTINEZ-BURGOS et al., 2021). O número e os tipos de microrganismos presentes em reatores anaeróbicos provavelmente dependem do tipo de reator, suas condições de operação e a composição do resíduo (BORJA, 2011); esses fatores e o tempo de retenção hidráulica (TRH) vão definir a composição e quantidade de biogás produzido (MA et al., 2013; MEEGODA et al., 2018).

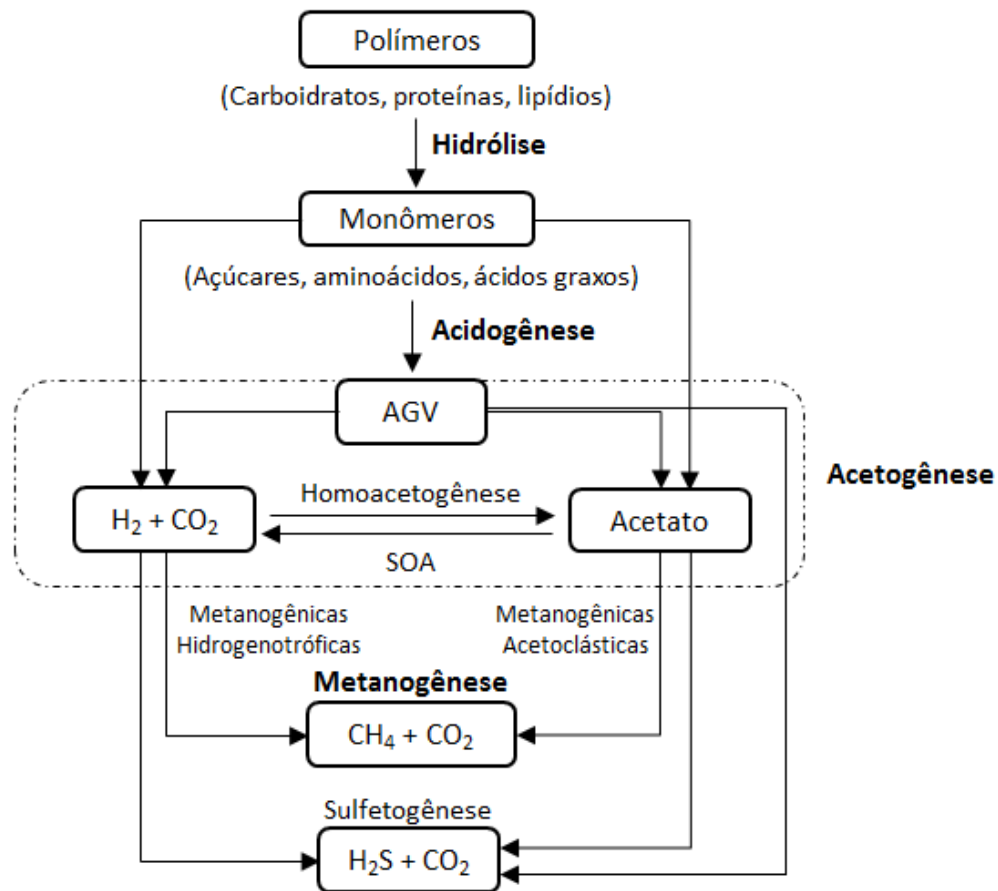


Figura 1 - Bioconversão de polímeros orgânicos em metano (CH_4) durante o processo de digestão anaeróbia. Ácidos graxos voláteis (AGV), bactérias sintróficas oxidantes do acetato (SOA). Adaptação: Gavala et al. (2003); Pan et al. (2021).

2.2.1.1 Hidrólise

As bactérias hidrolíticas podem ser anaeróbias facultativas ou obrigatórias. São responsáveis por secretar enzimas extracelulares que promovem a clivagem de cadeias poliméricas de compostos orgânicos (insolúveis e compostos de maior massa molecular) em materiais orgânicos solúveis, convertendo carboidratos, lipídios e proteínas em açúcares, ácidos graxos de cadeia longa (AGCLs) e aminoácidos, respectivamente (ADEKUNLE et al., 2015). Após a clivagem enzimática, os produtos da hidrólise são capazes de se difundir através das membranas celulares de microrganismos acidogênicos (MEEGODA et al., 2018).

A taxa de decomposição durante o estágio de hidrólise depende muito da natureza do substrato. A hidrólise de substratos como lignina, celulose e hemicelulose ocorre mais lentamente e pode ser considerada uma etapa limitante do processo, por ser de difícil degradação (MA et al., 2013; MEEGODA et al., 2018; MORAIS et al., 2021). Atualmente,

uma variedade de estratégias, como pré-tratamento físico e termoquímico de substratos complexos, codigestão e uso de inóculo rico em microrganismos celulolíticos / hemicelulolíticos são utilizadas para otimizar a etapa de hidrólise (SHRESTHA et al., 2017; LI et al., 2019).

2.2.1.2 Acidogênese

Os monômeros solúveis produzidos na fase hidrolítica são absorvidos por diferentes bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias e são posteriormente degradados em produtos terminais, como ácidos graxos voláteis (AGV) (principalmente ácidos butíricos, ácidos propanoicos e ácidos acéticos), álcoois (metanol, etanol), amônia, hidrogênio e dióxido de carbono (ADEKUNLE E OKOLIE, 2015; WANG et al., 2021). As concentrações de AGV podem ser consideradas como bons indicadores do desempenho do reator anaeróbio. Entre todos os AGV, o ácido acético e o ácido butírico são os mais favoráveis à formação de metano, já o ácido propiônico apesar de desempenhar papel importante na inicialização do processo anaeróbico e estabilização do processo é considerado o AGV mais tóxico. Os metanogênicos são inibidos em concentrações de ácido propiônico acima de 1 - 2 g/L, enquanto podem tolerar concentrações de ácido acético e butírico de até 10 g/L (WIJEKOON et al., 2011).

O conteúdo e a composição dos produtos de fermentação na acidogênese são diversos e afetados por diferentes parâmetros ambientais. Wang e colaboradores (2021) estudaram os efeitos do pH, do potencial de oxirredução e razão carbono-nitrogênio (C/N) na produção de AGV utilizando como substrato efluente de amido enriquecido com nutrientes em reator de tanque agitado contínuo (CSTR). Nesse estudo, o valor do pH foi o fator mais importante que interferiu na composição do AGV e na atividade microbiana, com rendimento máximo de AGVs em pH 6,0; porém em pH 4,0 apenas uma pequena quantidade de ácido acético e butírico foi produzida indicando inibição do crescimento microbiano; outros estudos também relataram inibição da produção de AGV, etanol e H₂ em pH baixo (< 4,0) (FENG et al., 2018). Chen e colaboradores (2015) identificaram a ocorrência de fermentação do tipo ácido butírico em pH > 5, com maior rendimento de biometano de 535 ml CH₄/g - VS e biodegradabilidade de 95%. Sabe-se que a faixa de pH ideal de bactérias acidogênicas é entre 4,0 - 7,0.

Entre os produtos da acidogênese, destacam-se também a amônia e o sulfeto de hidrogênio, que conferem um odor desagradável intenso a esta fase do processo. As bactérias de fase ácida pertencentes aos anaeróbios facultativos utilizam o oxigênio introduzido

acidentalmente no processo, criando condições favoráveis para o desenvolvimento de anaeróbios obrigatórios (ALI SHAH et al., 2014). Bactérias acidogênicas comumente encontradas em digestores anaeróbicos incluem espécies de *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Acetivibrio*, *Bifidobacterium*, *Eubacterium*, *Peptostreptococcus*, *Peptococcus*, *Selenomonas*, *Lactobacillus*, *Streptococcus* e membros das *Enterobacteriaceae* (BORJA, 2011).

2.2.1.3 Acetogênese

O acetato é um intermediário fundamental na decomposição anaeróbia de matéria orgânica e contribui para produção de 60 - 70 % de metano. A maioria dos substratos são convertidos diretamente em acetato e hidrogênio (H_2) em vez de produtos reduzidos, como propionato, butirato e etanol. Contudo, uma grande quantidade de produtos reduzidos são produzidos na acidogênese, sob pH extremamente baixo quando o reator anaeróbio está sobrecarregado, durante a acetogênese esses produtos são oxidados a acetato e H_2/CO_2 , por bactérias que incluem os gêneros *Syntrophomonas* e *Syntrophobacter* (SASAKI et al., 2011; ALI SHAH et al., 2014; PAN et al., 2020). Portanto, os AGV produzidos na etapa anterior (acidogênese) são posteriormente degradados nesta etapa por microrganismos acetogênicos produtores obrigatórios de hidrogênio. Isso ocorre porque alguma quantidade de H_2O dos estágios anteriores ainda está disponível e atua como uma fonte de elétrons para facilitar a conversão dos AGV (ANUKAM et al., 2019).

2.2.1.4 Metanogênese

A metanogênese constitui a última etapa do processo de digestão anaeróbia. Nesta etapa, as metanogênicas hidrogenotróficas e acetoclásticas, convertem respectivamente hidrogênio e acetato, em CO_2 e CH_4 (GAVALA et al., 2003; PAN et al., 2021). Seis tipos de vias regulam a reação de metanogênese, com substratos diferentes, a saber, ácido fórmico, ácido acético, metanol, dióxido de carbono, sulfeto de dimetila e metilamina (DEVI et al., 2022). O sulfeto de dimetila (SDM), por exemplo, é formado a partir da degradação de aminoácidos que contém enxofre (presente em resíduos como esterco) e da metilação anaeróbia do sulfeto. Quando o SDM é reduzido, após a conversão metanogênica, metano e metanotiol são formados. O metanotiol posteriormente forma metano, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (ALI SHAH et al., 2014).

As bactérias metanogênicas são estritamente anaeróbias, altamente vulneráveis a pequenas quantidades de oxigênio e variações do pH, geralmente se desenvolvem em condições inertes, com pH ambiental de 6,5 a 7,5 (ANUKAM et al., 2019; LI et al., 2019). Isso, entretanto, não significa que a metanogênese não ocorra em ambientes de reação ácida ou alcalina. Metanogênios que decompõem acetatos (*Methanosarcina barkeri* e *Methanosarcina* sp.) foram isolados de ambientes de pH aproximadamente 5, enquanto metanogênios metilotróficos e oxidantes de hidrogênio foram encontrados em ecossistemas fortemente alcalinos (ALI SHAH et al., 2014). Caso a quantidade de metanogênios não for suficiente para consumir os AGV produzidos durante a acetogênese, o acúmulo de AGV e a queda do pH inibirão a etapa de hidrólise e, posteriormente, limitarão a biodegradação anaeróbia geral (MA et al., 2013). Durante a metanogênese, a carga de poluição orgânica em termos de demanda química de oxigênio (DQO) ou demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é consideravelmente reduzida pelo processo anaeróbico (ANUKAM et al., 2019).

2.2.2 Fatores que influenciam na biodigestão anaeróbia

Para garantir o metabolismo das espécies bacterianas em condições satisfatórias para produção de biogás é necessário levar em consideração a diversidade de populações microbianas presente em um digestor. O controle do processo de fermentação requer a escolha de uma série de parâmetros físico-químicos, que incluem temperatura, pH inicial, potencial redox, razão inóculo/substrato (I/S), razão carbono/nitrogênio (C/N) e oligoelementos, dos quais Fe, Ni e Co têm influência no anabolismo da célula do microrganismo e ativação de sistemas enzimáticos na produção de metano (FEIZ E AMMENBERG, 2017; DU et al., 2021; GUENDOUZ et al., 2021).

A temperatura é um dos principais fatores para sobrevivência dos microrganismos, pode afetar o crescimento e reduzir significativamente a produção de biogás, é classificada como psicrófila (< 20 °C), mesófila (30 - 45 °C) e termófila (50 - 60 °C) (RISBERG et al., 2013; AHMED et al., 2018; GHATAK E GHATAK, 2018; CHALA et al., 2019). A temperatura mesofílica é considerada mais estável quando comparada a termofílica, devido a uma maior variedade de microorganismos (hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos) que são favorecidos pela faixa de temperatura (FRANQUETO et al., 2019). Contudo, o aumento da temperatura tem um efeito positivo na taxa metabólica dos microrganismos e acelera o processo de digestão (HAGOS et al., 2017). Apesar de apresentar vantagens, o gasto energético do processo termofílico é maior, pois é necessário manter a

temperatura constante no biorreator, além de ser relatado instabilidade e inibição de amônia em temperaturas acima de 60 °C (HAGOS et al., 2017; NSAIR et al., 2020; DEVI et al., 2022). Resíduos de café (polpa, casca e mucilagem) foram avaliados quanto a produção de metano em digestão anaeróbia, em ensaios em batelada realizados a 21, 30 e 37 °C. O rendimento de metano foi praticamente igual em 30 e 37 °C, no entanto foi obtido menor rendimento e produção mais lenta com a digestão anaeróbia dos resíduos à 21°C (CHALA et al., 2019). Palha de trigo pré-tratada e esterco bovino foram codigeridos em reatores CSTR com TRH de 25 dias e temperatura operacional de 37, 44 ou 52 °C. Porém, a temperatura operacional não causou, como esperado, nenhuma diferença significativa no grau de degradação, biogás ou rendimento de metano (RISBERG et al., 2013).

A razão C/N é um fator importante para o desempenho do processo e o rendimento de metano. Se a relação C/N for maior que a faixa apropriada (20 - 30 : 1) da DA, pode ocorrer acúmulo de AGVs, o que leva à queda do pH e inibição da metanogênese (YAO et al., 2017). O pH do líquido do digestor e sua estabilidade também constituem um parâmetro extremamente importante, uma vez que os metanogênicos são altamente sensíveis à mudança de pH e geralmente otimizam em pH neutro (SARKER et al., 2019). A faixa de pH ideal para hidrólise, acetogênese e metanogênese é aproximadamente 6,0, 6,0 - 7,0 e 6,5 - 7,5, respectivamente (PRAMANIK et al., 2019). A codigestão pode permitir um valor de pH estável, evitando a condição extrema de acidificação. A alteração do valor de pH das matérias-primas misturadas na codigestão é mais estável e mais fácil de manter na faixa de pH ideal durante o processo de digestão em comparação com a monodigestão (HAGOS et al., 2017).

A natureza e composição do substrato, que se baseia na digestibilidade anaeróbia, também devem ser consideradas, a matéria-prima deve conter os componentes necessários para uma digestão eficiente (ANDRADE et al., 2016). Os resíduos lignocelulósicos, por exemplo, são compostos por três tipos principais de polímeros: celulose, hemicelulose e lignina. A lignina, componente mais complexo e recalcitrante, muitas vezes restringe a biodegradabilidade e, conseqüentemente, resulta em baixa eficiência de biodigestão e produção de metano (BURAGOHAIN et al., 2021). Três principais parâmetros físico-químico e estruturais que influenciam a taxa de hidrólise enzimática (aumentam a digestibilidade) são: alteração de cristalinidade, área de superfície interna acessível e grau de polimerização (ALI SHAH et al., 2014). Diante disso, uma variedade de estratégias, como pré-tratamento físico e termoquímico de substratos complexos, codigestão e uso de inóculo rico em microrganismos

celulolíticos/hemicelulolíticos são utilizadas para otimizar a etapa de hidrólise da biomassa lignocelulósica (SHRESTHA et al., 2017; LI et al., 2019).

2.3 APLICAÇÕES ENERGÉTICAS DO BIOGÁS

O biogás pode ser utilizado de várias maneiras, bruto ou purificado. Apresenta vantagens definitivas em relação a outras alternativas de energia renovável, como: pode ser produzido quando necessário, ser facilmente armazenado, ser distribuído através da infraestrutura de gás natural existente e usado nas mesmas aplicações que o gás natural. Além da utilização para eletricidade renovável e produção de calor, o biogás pode substituir os combustíveis fósseis no setor de transporte (HOLM-NIELSEN et al., 2009). Para a produção de calor e eletricidade, existe uma ampla gama de tecnologias disponíveis para a utilização do biogás, como a tradicional caldeira a gás, motor de combustão interna, turbina a gás e célula de combustível (RASI et al., 2011).

O biogás bruto contém compostos de enxofre e H_2S que são oxidados a ácido sulfúrico e reage com componentes alcalinos das estruturas do motor, corroendo tubulações, compressores, motores e instrumentos. Em altas concentrações, a NH_3 é corrosiva na presença de água, pode gerar aerossóis e aumentar ligeiramente as emissões de óxidos de nitrogênio após a combustão do biogás (KHAN et al., 2017). Por isso, torna-se importante a purificação do biogás, que inclui remoção de água, CO_2 e compostos tóxicos e nocivos como H_2S , O_2 e NH_3 , para atender aos requisitos dos equipamentos de processamento, melhorar o seu valor calórico e garantir a padronização do gás (BRAGANÇA et al., 2020). Após a purificação, o produto final é referido como 'biometano', normalmente contendo 95 - 97 % de CH_4 e 1 - 3 % de CO_2 . O uso final do biogás determina suas exigências de qualidade, ao final o biometano pode até ser usado como alternativa ao gás natural (RYCKEBOSCH et al., 2011). O metano é um gás incolor e altamente combustível. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, presente no gás de cozinha (EPE, 2007; TABATABAEI et al., 2020).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Construir um bancos de dados, a partir de uma revisão de literatura, com trabalhos científicos sobre utilização de resíduos agroindustriais empregados como biomassa em biodigestão anaeróbia para produção de biogás. A partir dessa revisão sistemática, optou-se por três resíduos da agroindústria (casca de café, manipueira e esterco bovino) para a condução de ensaios experimentais envolvendo ferramenta estatística de otimização de processos como o objetivo de maximizar a produção e qualidade de biogás.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (I) Selecionar artigos dos bancos de dados *ScienceDirect* e *Springer*, publicados entre 2012 a 2022, sobre monodigestão e codigestão de resíduos agroindustriais para produção de biogás e metano.
- (II) Obter um banco de dados a partir do levantamento bibliográfico considerando critérios de inclusão ou exclusão.
- (III) Realizar análise bibliométrica e gráfica dos resultados obtidos, quanto aos principais países envolvidos em pesquisas, resíduos lignocelulósicos utilizados, pré-tratamento e condições operacionais estabelecidas nos bioprocessos.
- (IV) Estabelecer ensaios experimentais envolvendo digestores anaeróbios de bancada abastecidos com manipueira enriquecida com casca de café e esterco bovino para determinação dos parâmetros de operação em batelada;
- (V) Aplicar delineamento composto central (DCC) para avaliar os efeitos das variáveis carga orgânica volumétrica dos substratos, temperatura e pH; sobre a produção e qualidade de biogás e tempo de retenção hidráulica.

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

O levantamento bibliográfico foi conduzido no período de agosto a setembro de 2022, através das bases de dados *Science Direct* e *Springer*, utilizando as palavras chave “codigestion of lignocellulosic residues and manure”, “anaerobic digestion of lignocellulosic residues and manure” e “biogas production with lignocellulosic residues and manure”. Os

trabalhos selecionados compreenderam publicações entre os anos de 2012 a 2022, os quais foram analisados de acordo com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos nesta revisão sistemática.

4.1.2 Critério de inclusão e exclusão

Como critérios de inclusão, optou-se: I - Os trabalhos deveriam reportar o uso de algum resíduo lignocelulósico da agroindústria como biomassa para produção de biogás; II - Incluir investigação metodológica sobre os efeitos de parâmetros físico-químicos gerais na condução da biodigestão anaeróbia; III - Apresentar dados sobre a produtividade de biogás e/ou metano mediante aos tratamentos experimentais avaliados. IV - Compreender o período dos anos 2012 a 2022, como data de publicação. O critério de exclusão aplicou-se apenas aos trabalhos que não abordassem as exigências dos critérios de inclusão ou que utilizassem, codigeridos ou não, outros tipos de resíduos, como alimentares, lodo de esgoto e esterco de outros animais. Os trabalhos científicos condizentes com os critérios estabelecidos foram incluídos à base deste estudo e posteriormente submetidos à codificação e filtragem dos dados.

4.1.3 Análise sistemática do banco de dados

Após a definição do portfólio bibliométrico, foi realizada uma análise dos artigos, com o objetivo de quantificar as informações existentes e fornecer as características destas publicações, condizentes aos critérios de inclusão estabelecidos. As análises estatísticas e geração dos gráficos foram realizados em linguagem R, versão 4.2.2 por meio do software RStudio, versão 353 (ALLAIRE, 2012). Para a geração dos gráficos foram utilizados os pacotes ggplot2 e extrafont.

4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.2.1 Obtenção dos resíduos agroindustriais

Amostras de maniveira foram coletadas em casas de produção de farinha de mandioca, localizadas na microrregião do município de Vitória da Conquista/BA, e transportadas ao laboratório, em recipientes plásticos descontaminados e devidamente

vedados. As amostras de manipueira foram expostas às condições de ambiente (não controladas) com incidência solar e circulação de ar, durante o período de 15 dias, em recipiente aberto. Esse processo foi adotado para garantir a evaporação do ácido cianídrico HCN (ponto de ebulição 25,6 °C) presente nas amostras de manipueira até sua utilização.

As amostras de casca de café foram obtidas de produtores rurais do município de Barra do Choça/BA. A secagem do material foi procedida em estufa de ventilação, a 50 °C, até apresentar estabilidade de peso e posteriormente foram trituradas, peneiradas e armazenadas à temperatura ambiente.

Amostras de esterco bovino foram provenientes de animais experimentais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), confinados e alimentados apenas com forrageiras. A utilização das amostras nos processos de codigestão anaeróbia ocorreu em sua forma fresca, assim que coletadas.

4.2.2 Montagem e abastecimento dos biodigestores de bancada

Biodigestores de bancada foram confeccionados utilizando frascos kitassatos de 250 ml, ligados por meio de mangueiras de silicone aos seus respectivos gasômetros, tipo cúpula flutuante, que consistiram de tubos de PVC (100 e 75 mm) de 20 cm, comportando volume máximo de 880 cm³ de biogás (Figura 2). Os biodigestores foram operados em batelada, o volume da carga orgânica foi definido como 43,3 ml de cada resíduo (casca de café, manipueira e esterco bovino) para 40 ml de água destilada. Medidor de pH de Bancada Microprocessado MPA - 210 foi utilizado para o ajuste do pH com solução hidróxido de sódio (NaOH) 10 M. Os biodigestores foram mantidos em BOD para o controle da temperatura, pelo tempo de retenção hidráulica (TRH) de 15 dias.



Figura 2 - Biodigestores de bancada confeccionados utilizando frascos kitassatos de 250 ml, ligados por meio de mangueiras de silicone aos seus respectivos gasômetros.

4.2.3 Delineamento experimental e análise estatística

O Delineamento Composto Central (DCC) 2^2 foi realizado para avaliar a influência do pH e da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na produção de biogás (cm^3) e gás metano (cm^3), com objetivo de otimizar o processo. As variáveis pH e temperatura foram estudadas em dois níveis diferentes (-1 e +1) com três repetições do ponto central (0) resultando em 7 ensaios experimentais (Tabela 2).

Tabela 2. Fatores experimentais estabelecidos para as variáveis independentes, pH e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), em termos reais e codificados do DCC 2^2 .

Variáveis	Níveis		
	Baixo (-1)	Central (0)	Alto (+1)
pH	8	9	10
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	30	40	50

Com a finalidade de abranger maior número de coeficientes significativos foi considerado o p-valor $< 0,15$ para os termos da equação, posteriormente foi aplicada a análise da variância (ANOVA, $p < 0,05$) utilizando o software *Statistica 10.0*[®].

4.2.4 Quantificação e análise do biogás

O biogás foi quantificado no tempo zero (primeiro dia de incubação) e posteriormente, em intervalos de 48h, ao longo de 15 dias foi medido por meio de um sistema de deslocamento de água. Os valores obtidos foram transformados para cm^3 de acordo com as condições normais de temperatura e pressão (CNTP) (Equação 1), utilizando a pressão local do município de Vitória da Conquista- BA (763,56 mmHg), segundo a metodologia de Barana (2000).

$$\frac{P_0 \times V_0}{T_0} = \frac{P_1 \times V_1 \times F}{T_1}$$

Equação (1)

Onde: P_0 - pressão na CNTP, V_0 - volume na CNTP, T_0 - temperatura na CNTP, P_1 - pressão local de Vitória da Conquista- BA, V_1 - volume medido, T_1 - temperatura medida, F- fator de correção de umidade.

Para avaliar a qualidade do biogás produzido, as concentrações de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e amônia (NH_3) foram quantificadas, utilizando o kit de análise de biogás da Alfakit[®], de acordo com as recomendações do fabricante.

4.2.5 Análise do efluente

Foi realizada análise da demanda química de oxigênio (DQO) do afluente, ao final de 15 dias de retenção hidráulica (RTH) foi realizada outra análise para quantificação da eficiência de remoção (Equação 2) e o pH foi medido.

$$\text{Remoção (\%)} = \frac{DQO_j - DQO_f}{DQO_f} \times 100$$

Equação (2)

Para análise da DQO foi utilizado o kit da Alfakit, segundo as instruções do fabricante. A amostra foi filtrada e posteriormente colocada em tubos de ensaio junto com o dicromato de potássio e o ácido sulfúrico, com auxílio do bloco digestor a temperatura foi elevada a $150\text{ }^\circ\text{C}$ por duas horas (Figura 3). A quantidade de matéria orgânica susceptível a ser oxidada foi quantificada com auxílio do biofoto microprocessado a 600 nm.



Figura 3 - Análise de demanda química de oxigênio (DQO) utilizado o kit da Alfakit[®], segundo instruções do fabricante com bloco digestor.

5 REFERÊNCIAS

- ABANADES, S. et al. A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-24, 2021.
- ABILOGÁS, Associação Brasileira de Biogás e Biometano. A Biogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro. São Paulo: A Biogás, 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>>. Acesso em 20/02/22.
- ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, n. 03, p. 205, 2015.
- AHMED, A. M. S.; BUEZO, K. A.; SAADY, N. M. C. Adapting anaerobic consortium to pure and complex lignocellulose substrates at low temperature: kinetics evaluation. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, p. 99-110, 2019.
- ALI SHAH, F. et al. Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.
- ALI, S. S.; SUN, J. Physico-chemical pretreatment and fungal biotreatment for park wastes and cattle dung for biogas production. **SpringerPlus**, v. 4, p. 1-14, 2015.
- ALMOMANI, F. Prediction of biogas production from chemically treated co-digested agricultural waste using artificial neural network. **Fuel**, v. 280, p. 118573, 2020.
- ALMOMANI, F.; BHOSALE, R. R. Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. **Chemosphere**, v. 255, p. 126805, 2020.
- ANDRADE, W. R. et al. Biogas production from ruminant and monogastric animal manure co-digested with manipueira. **Archivos de zootecnia**, v. 65, n. 251, p. 375-380, 2016.
- ANUKAM, A. et al. A review of the chemistry of anaerobic digestion: Methods of accelerating and optimizing process efficiency. **Processes**, v. 7, n. 8, p. 504, 2019.
- ASSIS L., A. L. F. de; SEIXAS, B. da C.; MAIA, M. J. de O.. Determinação quantitativa do ácido cianídrico em mandioca. **e-Scientia**, v. 11, n. 2, p. 1-7, 2019.
- BARANA, A. C.; CEREDA, M. P. Cassava wastewater (manipueira) treatment using a two-phase anaerobic biodigestor. **Food Science and Technology**, v. 20, p. 183-186, 2000.
- BENATO, A.; MACOR, A. Italian biogas plants: Trend, subsidies, cost, biogas composition and engine emissions. **Energies**, v. 12, n. 6, p. 979, 2019.
- BORGES, C. P. et al. A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110518, 2021.
- BORJA, R. 2.55—Biogas Production. **Comprehensive Biotechnology (Second Edition)**, p. 785-798, 2011.
- BRAGANÇA, I. et al. Impurities in biogas: Analytical strategies, occurrence, effects and removal technologies. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105878, 2020..
- BURAGOHAİN, S.; MAHANTA, P.; MOHANTY, K. Biogas production from anaerobic mono-and co-digestion of lignocellulosic feedstock: Process optimization and its

- implementation at community level. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 101981, 2021.
- CAMPOS, A. T. et al. Tratamento de águas residuárias de fecalaria por meio de lagoas de estabilização. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 235-242, 2006.
- CARUSO, M. C. et al. Recent updates on the use of agro-food waste for biogas production. **Applied Sciences**, 9(6), 1217, 2019.
- CHALA, B.; OECHSNER, H.; MÜLLER, J. Introducing temperature as variable parameter into kinetic models for anaerobic fermentation of coffee husk, pulp and mucilage. **Applied Sciences**, v. 9, n. 3, p. 412, 2019.
- CHEN, X. et al. Improving biomethane yield by controlling fermentation type of acidogenic phase in two-phase anaerobic co-digestion of food waste and rice straw. **Chemical Engineering Journal**, v. 273, p. 254-260, 2015.
- CHRISTY, P. M.; GOPINATH, L. R.; DIVYA, D. A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 167-173, 2014.
- CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis. Biogás Panorama do Biogás no Brasil 2021. **CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022** – Foz do Iguaçu, CIBiogás. 20p. il. Color, 2022.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Safra brasileira de café. Tabela de dados-estimativas da produção e colheita, maio de 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em 20/05/2022.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Carnes - Apresentação: Perspectivas para a agropecuária 2022/23. 2023a. Disponível em :<<https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/perspectivas-para-a-agropecuaria/item/18847-perspectivas-para-a-agropecuaria-volume-10-safra-2022-2023>>. Acesso em 26/03/23.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Mandioca-Analise Mensal- Janeiro 2023. 2023b. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuaria-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-mandioca/item/20062-mandioca-analise-mensal-janeiro-2023>>. Acesso em 26/03/2023.
- CONVERTI, A. et al. Biogas production and valorization by means of a two-step biological process. **Bioresource technology**, v. 100, n. 23, p. 5771-5776, 2009.
- CORREIA, IADS et al. Caracterização da manipueira e possibilidades de tratamento. In: **Colloquium Exactarum**. p. 180-185, 2018.
- DANINO, G. S. **Produção de capim-elefante submetido à doses crescentes de manipueira**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.
- DEVI, M. K. et al. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis. **Bioresource Technology**, p. 127871, 2022.
- DIMA, A. D. et al. Optimization of substrate composition in anaerobic co-digestion of agricultural waste using central composite design. **Biomass and Bioenergy**, v. 138, p. 105602, 2020.

- DJIMTOINGAR, S. S. et al. A review of response surface methodology for biogas process optimization. **Cogent Engineering**, v. 9, n. 1, p. 2115283, 2022.
- DOTTO, R. B.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2012.
- DU, N. et al. Study on the biogas potential of anaerobic digestion of coffee husks wastes in Ethiopia. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 2, p. 291-301, 2021.
- ECHEVERRIA, M. C.; NUTI, M. Valorisation of the residues of coffee agro-industry: perspectives and limitations. **The Open Waste Management Journal**, v. 10, n. 1, 2017.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. "Plano Nacional de Energia 2030-Geração Termelétrica-Biomassa." 2007.
- ESTEVES, E. M. M. et al. Life cycle assessment of manure biogas production: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 411-423, 2019.
- FEIZ, R.; AMMENBERG, J. Assessment of feedstocks for biogas production, part I—A multi-criteria approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 373-387, 2017.
- FENG, K.; LI, H.; ZHENG, C. Shifting product spectrum by pH adjustment during long-term continuous anaerobic fermentation of food waste. **Bioresource technology**, v. 270, p. 180-188, 2018.
- FORSTER-CARNEIRO, T. et al. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, p. 78-88, 2013.
- FRANQUETO, R. et al. Anaerobic codigestion of bovine manure and banana tree leaf: the effect of temperature variability on biogas yield in different proportions of waste. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1444-1458, 2020.
- GAVALA, H. N.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. Kinetics and modeling of anaerobic digestion process. **Biomethanation I**, p. 57-93, 2003.
- GHATAK, M. Das; GHATAK, A. Artificial neural network model to predict behavior of biogas production curve from mixed lignocellulosic co-substrates. **Fuel**, v. 232, p. 178-189, 2018.
- GUENDOUZ, N. et al. Evaluation of the biogas potential of a lignocellulosic residue. **Water Science and Technology**, v. 84, n. 8, p. 1827-1838, 2021.
- HAGOS, K. et al. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 76, p. 1485-1496, 2017.
- HASAN, S. D. M. et al. Volatile fatty acids production from anaerobic treatment of cassava waste water: effect of temperature and alkalinity. **Environmental technology**, v. 36, n. 20, p. 2637-2646, 2015.
- HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource technology**, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Tabela 1618: Área plantada, área colhida e produção, por ano da safra e produto das lavouras. 2022.
- KAUR, M. et al. Effect of chemical pretreatment of sugarcane bagasse on biogas production. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 1937-1942, 2020.

- KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste management**, v. 31, n. 8, p. 1737-1744, 2011.
- KHAN, I. U. et al. Biogas as a renewable energy fuel—A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy conversion and management**, v. 150, p. 277-294, 2017.
- KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I.. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 12, p. 1-12, 2018.
- LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied energy**, v. 240, p. 120-137, 2019.
- LIANG, Y. et al. Novel insights from lignocellulosic waste to biogas through regulated dry-wet combined anaerobic digestion: Focusing on mining key microbes. **Bioresource Technology**, v. 348, p. 126778, 2022.
- MA, J. et al. A simple methodology for rate-limiting step determination for anaerobic digestion of complex substrates and effect of microbial community ratio. **Bioresource technology**, v. 134, p. 391-395, 2013.
- MACHADO, E. P. et al. Avaliação do desempenho de um reator anaeróbio de fluxo vertical com separação de fases no tratamento de manipueira. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 5, p. 2104-2123, 2019.
- MARTINEZ-BURGOS, W. J. et al. Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals. **Bioresource Technology**, v. 341, p. 125795, 2021.
- MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 36, p. 412-427, 2014.
- MCINERNEY, M. J.; BRYANT, M. P. Basic principles of bioconversions in anaerobic digestion and methanogenesis. **Biomass conversion processes for energy and fuels**, p. 277-296, 1981.
- MEEGODA, J. N. et al. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 10, p. 2224, 2018.
- MORAIS, N. W. S. et al. Biochemical potential evaluation and kinetic modeling of methane production from six agro-industrial wastewaters in mixed culture. **Environmental Pollution**, v. 280, p. 116876, 2021.
- NESHAT, S. A. et al. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308-322, 2017.
- NEVES, C. D. S., SOUZA, F. P. D. Caracterização da Água Residual do Processamento da Mandioca (*Manihot Esculenta*) Visando a Produção de Biogás. 2019.
- NSAIR, A. et al. Operational parameters of biogas plants: A review and evaluation study. **Energies**, v. 13, n. 15, p. 3761, 2020.
- OIC, Organização Internacional do Café. Relatório sobre o mercado de café, out. 2021. Disponível em: <http://www.consorcioquesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/dezembro/relatorio_oic_outubro_2021.pdf>. Acesso em 25/05/2022.

- OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. An overview of the potential uses for coffee husks. **Coffee in health and disease prevention**, p. 283-291, 2015.
- OLIVEIRA, L. S. et al. Evaluation of untreated coffee husks as potential biosorbents for treatment of dye contaminated waters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 155, n. 3, p. 507-512, 2008.
- PAN, X. et al. Deep insights into the network of acetate metabolism in anaerobic digestion: focusing on syntrophic acetate oxidation and homoacetogenesis. **Water research**, v. 190, p. 116774, 2021.
- PANDEY, A. et al. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**, v. 6, n. 2, p. 153-162, 2000.
- PASSOS, F. et al. Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. **Bioresource technology**, v. 253, p. 49-54, 2018.
- PERES, S. et al. Anaerobic digestion process for the production of biogas from cassava and sewage treatment plant sludge in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 150-157, 2019.
- PHILIPPE, F.-X.; NICKS, B. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 199, p. 10-25, 2015.
- PRAMANIK, S. K. et al. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. **Bioresource Technology Reports**, v. 8, p. 100310, 2019.
- RANJBAR, F. M.; KARRABI, M.; SHAHNAVAZ, B. Bioconversion of wheat straw to energy via anaerobic co-digestion with cattle manure in batch-mode bioreactors (Experimental investigation and kinetic modeling). **Fuel**, v. 320, p. 123946, 2022.
- RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation—A review. **Energy conversion and Management**, v. 52, n. 12, p. 3369-3375, 2011.
- RISBERG, K. et al. Biogas production from wheat straw and manure—impact of pretreatment and process operating parameters. **Bioresource Technology**, v. 149, p. 232-237, 2013.
- RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101-1107, 2009.
- SAMANI, M. S. et al. Effect of physical and chemical operating parameters on anaerobic digestion of manure and biogas production: A review. **Journal of Environmental Health and Sustainable Development**, 2(1), 235-247, 2017.
- SANTOS, L. C. dos et al. Production of biogas (methane and hydrogen) from anaerobic digestion of hemicellulosic hydrolysate generated in the oxidative pretreatment of coffee husks. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 601-612, 2018.
- SARKER, S. et al. A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants. **Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1915, 2019.
- SASAKI, K. et al. Syntrophic degradation of proteinaceous materials by the thermophilic strains *Coprothermobacter proteolyticus* and *Methanothermobacter thermautotrophicus*. **Journal of bioscience and bioengineering**, v. 112, n. 5, p. 469-472, 2011.

- SENÉS-GUERRERO, C. et al. Biogas-producing microbial composition of an anaerobic digester and associated bovine residues. **MicrobiologyOpen**, v. 8, n. 9, p. e00854, 2019.
- SHRESTHA, S. et al. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: Current status and future perspectives. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 1245-1257, 2017.
- SIQUEIRA, M. U. et al. Brazilian agro-industrial wastes as potential textile and other raw materials: a sustainable approach. **Materials Circular Economy**, 4(1), 9, 2022.
- SUMAN, P. A.; URBANO, L. H.; MISCHAN, M. L. M. M. Effect of fermentation parameters on ethanol production from cassava liquid residue (manipueira). **Acta Scientiarum: Technology**, v. 33, n. 4, 2011.
- TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part 2: mainstream and downstream strategies. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1392-1407, 2020.
- TIETZ, C. M.; FEIDEN, A.; SOARES, P. R. H. BIOGÁS DE BOVINOS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 1, 2015.
- TUFANER, F.; AVŞAR, Y.. Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review. **International journal of environmental science and technology**, v. 13, p. 2303-2312, 2016.
- USDA, United States Department of Agriculture. Livestock and Poultry: World Markets and Trade. **Foreign Agricultural Service**. April 8, 2022. Available in: <<https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade>> Accessed 12/02/23.
- VAZ JUNIOR, S. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. 2020.
- VEGROII, C. L. R.; CARVALHOIII, F. C. de. Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café, 1994.
- WANG, R. et al. Novel strategy for enhancing acetic and formic acids generation in acidogenesis of anaerobic digestion via targeted adjusting environmental niches. **Water research**, v. 193, p. 116896, 2021.
- WBA, World Biogas Association. Biogas: Pathways to 2030 - Report March de 2021. Available in: <<https://www.worldbiogasassociation.org/biogas-pathways-to-2030-report/>>. Accessed 03/03/2023.
- WBA, World Biogas Association. Global Potential of Biogas. 2019. Available in: <<https://www.worldbiogasassociation.org/global-potential-of-biogas/>>. Accessed 03/03/2023.
- WEDWITSCHKA, H. et al. Material characterization and conditioning of cattle feedlot manure as feedstock for dry batch anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 138, p. 210-218, 2022.
- WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 85, p. 849-860, 2010.
- WIJEKOON, K. C.; VISVANATHAN, C.; ABEYNAYAKA, A. Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 9, p. 5353-5360, 2011.

YAO, Y.; CHEN, S.; KAFLE, G. K. Importance of “weak-base” poplar wastes to process performance and methane yield in solid-state anaerobic digestion. **Journal of environmental management**, v. 193, p. 423-429, 2017.

CAPÍTULO 1

Sistemas de monodigestão e codigestão anaeróbia para produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais: revisão sistemática

J. G. B. S. Leite¹, K. P. da Silva¹, E. Aguiar-Oliveira², P. L. Leal^{1,*}

¹ Instituto Multidisciplinar em Saúde, Universidade Federal da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil

² Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, Brasil

* Endereço para correspondência: (email: lealpat@yahoo.com.br)

Resumo

A produção de biogás por digestão anaeróbia tem despertado o interesse de diversos países em todo o mundo. Além de ser um meio para o gerenciamento e aproveitamento de resíduos orgânicos, é uma importante fonte de energia renovável e ainda apresenta um potencial de crescimento extraordinário devido à grande disponibilidade de matéria-prima. Esta revisão sistemática apresenta uma abordagem sobre sistemas de digestão anaeróbia para produção de biogás e metano a partir de resíduos agroindustriais. Para isso, foi realizada uma análise refinada na literatura, selecionando publicações de diversas partes do mundo. O efeito de diferentes parâmetros sobre produção de biogás, como tipos de matéria prima, tecnologias de pré-tratamento, codigestão e condições operacionais (temperatura e pH), foram destacados. Um total de 127 artigos foram criteriosamente selecionados da base de dados *Science Direct* e *Springer*. A maioria das pesquisas foram desenvolvidas no continente asiático, seguido do europeu e americano, os principais países envolvidos foram China, Índia, Alemanha, Estados Unidos e Canadá. A técnica de codigestão (CoD) de resíduos ricos em lignocelulose associados às estratégias de pré-tratamento (físico, químico, biológico ou combinados) reduzem a natureza recalcitrante, aumenta a degradabilidade e rendimento de biogás e metano. As condições operacionais frequentemente utilizadas nas pesquisas envolvem a utilização de temperatura mesofílica entre 35 e 37 °C e o pH inicial neutro.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, lignocelulose, metano, parâmetros operacionais.

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo energético e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) causadas, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis são os principais desafios para o desenvolvimento econômico sustentável e as mudanças climáticas globais (FOSTER et al. 2017). De forma geral, petróleo, carvão, gás natural, eletricidade, energia nuclear e outras energias renováveis correspondem, em média, 33, 27, 24, 7, 4 e 4 % da proporção total de energia primária em todo o mundo, respectivamente (ABANADES et al. 2022). Ou seja, 85 % do consumo mundial de energia primária vem sendo suprida por combustíveis fósseis (BENATO e MACOR 2019).

O biogás é reconhecido, atualmente, como uma das principais bioenergias, é uma fonte de energia alternativa promissora para enfrentar uma parte dos desafios ambientais e energéticos globais (TABATABAEI et al. 2020a). Pode ser utilizado para diversas finalidades, como na geração de energia elétrica, por meio da queima em motogeradores, a fabricação de biometano, após a retirada do CO₂ e contaminantes, para a substituição do gás natural, especialmente o veicular, e, por fim, a utilização dos resíduos como fertilizantes (BNDES 2018; KAPOOR et al. 2020; KABEYI e OLANREWaju 2022). Diferentemente dos combustíveis fósseis, o biogás é inerentemente renovável, uma vez que é gerado a partir de processos de conversão de material biogênico. O principal componente do biogás é o metano, que se por um lado é considerado prejudicial para o aquecimento global, por outro pode ter papel importante de aplicação energética (BOCHMANN e MONTGOMERY 2013).

A produção de biometano a partir de abordagens de recuperação e reaproveitamento de resíduos, provenientes de diversas atividades antrópicas, aumentou significativamente nos últimos anos (ABANADES et al. 2022). A exemplo disso, destacam-se os resíduos lignocelulósicos, como os de origem agrícola, florestal e industrial (como palha de milho, palha de trigo, resíduos de cana - de - açúcar, de madeira, folhas e esterco animal), reconhecidos como biomassa altamente disponível, de baixo custo e com enorme potencial para produção de biogás (YAO et al. 2017).

A bioconversão da biomassa em biogás é realizada por um consórcio de microrganismos, na ausência de oxigênio, que se interagem e realizam a digestão anaeróbia (DA), em quatro etapas metabólicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1) (MCINERNEY e BRYANT 1981). Os principais constituintes gerados no processo é o metano (CH_4 , 50-75 %) e o dióxido de carbono (CO_2 , 25-50 %), mas outros compostos indesejáveis como sulfeto de hidrogênio (H_2S , 0,01- 0,5 %) e amônia (NH_3 , 0,1–0,5 %) também são encontrados (SALOMON e LORA 2009; WEILAND 2010; KOUGIAS e ANGELIDAKI 2018).

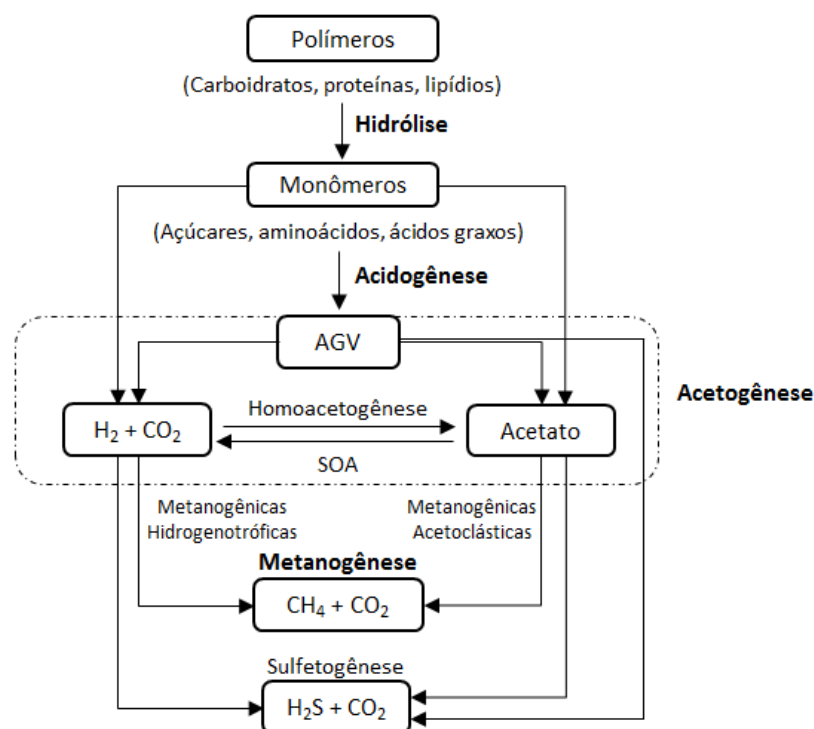


Figura 1- Bioconversão de polímeros orgânicos em metano (CH_4) durante o processo de digestão anaeróbia. Bactérias sintróficas oxidantes do acetato (SOA), ácidos graxos voláteis (AGV). Adaptação Gavala et al. (2003); Pan et al. (2021).

Para fins de aplicação energética, o biogás pode ser utilizado na forma bruta ou purificada, apresentando poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de CH_4 existente na mistura gasosa. Esses valores podem variar de 5.000 a 7.000 kcal/ m^3 , ou seja, 1 m^3 de biogás pode equivaler a 0,5 - 0,6 litros de óleo diesel ou cerca de 6 kWh de eletricidade (KABEYI e OLANREWAJU, 2022). Quando submetido a processos de purificação, o biogás pode alcançar a composição desejável de 95 - 97 % de CH_4 , sendo possível atingir um índice de até 12.000 kcal/ m^3 , comparável com o gás natural (8.000 kcal/ m^3) (HOLM-NIELSEN et al. 2009; TABATABAEI et al. 2020b). Portanto, o processo de purificação do biogás tem como finalidade remover componentes nocivos à rede de distribuição de gás, aparelhos e usuários

finais, como também aumentar o poder calorífico e a densidade relativa (RYCKEBOSCH et al. 2011).

Muitos são os fatores que podem influenciar na eficiência da biodigestão e pureza do biogás quanto ao teor CH_4 . A composição química da biomassa, especialmente, no que se refere aos teores de carbono e nitrogênio, é um dos fatores que pode influenciar a pureza do biogás (DEVI et al. 2022). Resíduos agroindustriais, por exemplo, são constituídos, de forma geral, por celulose (40 - 60 %), hemicelulose (10 - 40 %) e lignina (10 - 30 %), (YADAV et al. 2019). Alguns estudos apontam que a composição lignocelulósica da biomassa pode comprometer o rendimento de CH_4 no bioprocessamento em até 60 % comparado ao valor teórico (MA et al. 2013; SHRESTHA et al. 2017).

A lignina, componente mais complexo e recalcitrante dos resíduos agroindustriais, é a principal responsável por dificultar a fase de hidrólise no processo de digestão anaeróbia (BURAGOHAIN et al. 2021). A fim de reverter essa limitação, estratégias de pré-tratamento da biomassa se tornaram alvo de muitos estudos, as quais envolvem (isoladamente ou em conjunto) técnicas físicas, químicas e biológicas (SHRESTHA et al. 2017). Nesse contexto, o pré-tratamento mecânico (KANG et al. 2019), térmico (RASI et al. 2019), com ácido e álcali (KRISHANIA et al. 2013), o emprego de enzimas (SCHIMPF e SCHULZ 2019) e microrganismos (ÖNER et al. 2018) são recorrentemente abordados na literatura.

Além disso, é possível relacionar estudos com propostas de otimizar e ou desenvolver rotas tecnológicas que promovam maior produção e melhor qualidade do biogás, a partir da codigestão (adição de mais de um substrato). Bumharter et al. (2023), a partir de uma robusta revisão sobre oportunidade da indústria de biogás na Europa, reportaram que a codigestão de esterco bovino com resíduos lignocelulósicos aumentou, em média, 30% o teor de CH_4 , quando comparado a monodigestão de resíduos lignocelulósicos. Buragohain et al. (2021) relataram aumentos de 34,67, 31,16 e 21,11 % na produção de biogás de palha de arroz, capim e lentilha d'água, respectivamente, sob codigestão com esterco bovino.

Além da composição química e biodegradabilidade do substrato, outros fatores, relacionados aos parâmetros de condições do processo, também são determinantes para aumentar a eficiência da produção de biogás e metano (HAGOS et al. 2017). Temperatura, pH, concentração de substratos, adição de inoculantes e micronutrientes, são exemplos de variáveis que influenciam a conversão da biomassa em biogás, e por isso, amplamente consideradas em estudos de otimização de processos (HAGOS et al. 2017; SAMANI et al. 2017).

Diante do exposto, é inegável que a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de biomassas lignocelulósicas representa uma oportunidade de produção alternativa de energia a partir de fontes renováveis, como os resíduos agroindustriais (CARUSO et al. 2019). Por outro lado, reconhece-se a necessidade de aperfeiçoamento e desenvolvimento tecnológico a fim de tornar tal proposta viável do ponto de vista biotecnológico, ambiental, econômico e social. Ou seja, é fundamental uma abordagem interdisciplinar, com explicações que superem vies tecnológicos e até mesmo de políticas públicas, para que o biogás deixe de ser apenas uma tendência emergente e venha ocupar local de destaque com ampla aplicação, especialmente, para o setor energético.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo apresentar uma abordagem sobre sistemas de digestão anaeróbia para produção de biogás e metano a partir de resíduos agroindustriais. Para isso, foi realizada uma análise refinada na literatura, selecionando publicações de diversas partes do mundo. O efeito de diferentes parâmetros sobre produção de biogás, como tipos de matéria prima, tecnologias de pré-tratamento, codigestão e condições operacionais (temperatura e pH), foram destacados. Como também, as atuais aplicações energéticas e os principais países envolvidos com o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia de digestão anaeróbia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados foi compilado a partir de pesquisas conduzidas nas plataformas “*Web Science Direct*” e “*Springer*”, no período de agosto a setembro de 2022, utilizando os termos chave “codigestion of lignocellulosic residues and manure”, “anaerobic digestion of lignocellulosic residues and manure” e “biogas production with lignocellulosic residues and manure”. Para seleção das publicações que compuseram o banco de dados foram utilizados os critérios de inclusão: I - Os trabalhos deveriam reportar o uso de algum resíduo lignocelulósico da agroindústria como biomassa para produção de biogás; II - Incluir investigação metodológica sobre os efeitos de parâmetros físico-químicos gerais na condução da biodigestão anaeróbia; III - Apresentar dados sobre a produtividade de biogás e/ou metano mediante aos tratamentos experimentais avaliados. IV - Compreender o período dos anos 2012 a 2022, como data de publicação.

O total de 127 publicações, oriundas de diferentes países, foram selecionadas de acordo com os critérios de inclusão estabelecidos nesta revisão sistemática (Tabela 1).

Tabela 1- Banco de dados formado por artigos científicos selecionados, de acordo com os critérios de exclusão e inclusão estabelecidos, disponíveis nas plataformas de pesquisa “Science Direct” e “Springer”

Código	Referências	País
1	Coats <i>et al.</i> (2012)	Estados Unidos
2	Yan <i>et al.</i> (2012)	China
3	Krishania <i>et al.</i> (2013)	Índia
4	Pohl <i>et al.</i> (2013)	Alemanha
5	Qiao <i>et al.</i> (2013)	China
6	Saady e Massé (2013)	Canadá
7	Chen <i>et al.</i> (2014a)	China
8	Chen <i>et al.</i> (2014b)	China
9	Estevez <i>et al.</i> (2014)	Noruega
10	Kalamaras e Kotsopoulos (2014)	Grécia
11	Schroyen <i>et al.</i> (2014)	Bélgica
12	Ali e Sun (2015)	Egito
13	Avicenna <i>et al.</i> (2015)	Malásia
14	Gu <i>et al.</i> (2015)	China
15	Massé e Saady (2015)	Canadá
16	Mathew <i>et al.</i> (2015)	Índia
17	Menardo <i>et al.</i> (2015)	Itália
18	Pokój <i>et al.</i> (2015)	Polônia
19	Rico <i>et al.</i> (2015)	Espanha
20	Saady e Massé (2015)	Canadá
21	Schroyen <i>et al.</i> (2015)	Bélgica
22	Song e Zhang (2015)	China
23	Surendra e Khanal (2015)	Estados Unidos
24	Zhang <i>et al.</i> (2015)	China
25	Ismail e Talib (2016)	Iraque
26	Janke <i>et al.</i> (2016)	Alemanha
27	Panepinto e Genon (2016)	Itália
28	Saady e Massé (2016)	Canadá
29	Sasaki <i>et al.</i> (2016)	Japão
30	Walter <i>et al.</i> (2016)	Áustria
31	Zhang <i>et al.</i> (2016)	China
32	Gallegos <i>et al.</i> (2017)	Alemanha
33	Janke <i>et al.</i> (2017)	Alemanha
34	Mustafa <i>et al.</i> (2017)	China
35	Tian <i>et al.</i> (2017)	China
36	Tsapekos <i>et al.</i> (2017)	Dinamarca
37	Veluchamy e Kalamdhad (2017)	Índia
38	Yao <i>et al.</i> (2017)	Estados Unidos
39	Zealand <i>et al.</i> (2017)	Reino Unido
40	Zhao <i>et al.</i> (2017)	China
41	Ghatak e Ghatak (2018)	Índia
42	Kovačić <i>et al.</i> (2018)	Croácia
43	Lianhua <i>et al.</i> (2018)	China
44	Lu <i>et al.</i> (2018)	China
45	Öner <i>et al.</i> (2018)	Turquia
46	Surendra <i>et al.</i> (2018)	Estados Unidos
47	Veluchamy e Kalamdhad (2018)	Índia
48	Zealand <i>et al.</i> (2018)	Reino Unido
49	Zhang <i>et al.</i> (2018)	China
50	Ahmed <i>et al.</i> (2019)	Canadá
51	Ali e Sun (2019)	China

52	Dong <i>et al.</i> (2019)	China
53	Kainthola <i>et al.</i> (2019a)	Índia
54	Kainthola <i>et al.</i> (2019b)	Índia
55	Kang <i>et al.</i> (2019)	China
56	Khalid <i>et al.</i> (2019)	Paquistão
57	Kullavanijaya e Chavalparit (2019)	Tailândia
58	Kumar <i>et al.</i> (2019)	Índia
59	Ma <i>et al.</i> (2019)	China
60	Nguyen <i>et al.</i> (2019)	Estados Unidos
61	Pore <i>et al.</i> (2019)	Índia
62	Rasi <i>et al.</i> (2019)	Finlândia
63	Rojas-Sossa <i>et al.</i> (2019)	Estados Unidos
64	Rouches <i>et al.</i> (2019)	França
65	Sarto <i>et al.</i> (2019)	Indonésia
66	Schimp e Schulz (2019)	Alemanha
67	Suaisom <i>et al.</i> (2019)	Tailândia
68	Tapadia-Maheshwari <i>et al.</i> (2019)	Índia
69	Wang <i>et al.</i> (2019)	China
70	Yadav <i>et al.</i> (2019)	Índia
71	Almomani (2020)	Catar
72	Almomani e Bhosale (2020)	Catar
73	Faisal <i>et al.</i> (2020)	China
74	Feng <i>et al.</i> (2020)	Dinamarca
75	Ferrero <i>et al.</i> (2020)	Itália
76	Franqueto <i>et al.</i> (2020)	Brasil
77	Kaur <i>et al.</i> (2020)	Índia
78	Korai e Li (2020)	China
79	Kumar <i>et al.</i> (2020)	Índia
80	Lee <i>et al.</i> (2020)	Singapura
81	Mendieta <i>et al.</i> (2020a)	Colômbia
82	Mendieta <i>et al.</i> (2020b)	Colômbia
83	Muhammad <i>et al.</i> (2020)	Índia
84	Paritosh <i>et al.</i> (2020)	Índia
85	Şenol e Zenk (2020)	Turquia
86	Şenol <i>et al.</i> (2020)	Turquia
87	Thaemngoan <i>et al.</i> (2020)	Tailândia
88	Wang, H <i>et al.</i> (2020)	Japão
89	Wang, Y <i>et al.</i> (2020)	China
90	Zhong <i>et al.</i> (2020)	Estados Unidos
91	Abdelwahab <i>et al.</i> (2021)	Índia
92	Abid <i>et al.</i> (2021)	China
93	Agarwal <i>et al.</i> (2021)	Índia
94	Ajayi-Banji e Rahman (2021)	Estados Unidos
95	Allah <i>et al.</i> (2021)	Egito
96	Baghbanzadeh <i>et al.</i> (2021)	Canadá
97	Buragohain <i>et al.</i> (2021)	Índia
98	Du <i>et al.</i> (2021)	China
99	Iweka <i>et al.</i> (2021)	Ningéria
100	Khan e Ahring (2021)	Estados Unidos
101	Kim e Karthikeyan (2021)	Estados Unidos
102	Lee <i>et al.</i> (2021)	Singapura
103	Paritosh <i>et al.</i> (2021)	Índia
104	Prabhu <i>et al.</i> (2021)	Índia
105	Rajput <i>et al.</i> (2021)	Paquistão
106	Rani <i>et al.</i> (2021)	Índia
107	Riau <i>et al.</i> (2021)	Espanha
108	Saha <i>et al.</i> (2021a)	Índia
109	Saha <i>et al.</i> (2021b)	Índia
110	Saif <i>et al.</i> (2021)	China
111	Sonwai <i>et al.</i> (2021)	Tailândia

112	Volpi <i>et al.</i> (2021)	Brasil
113	Zhang <i>et al.</i> (2021)	China
114	Ali <i>et al.</i> (2022)	China
115	AR (2022)	Índia
116	Ariç <i>et al.</i> (2022)	Turquia
117	Ewunie <i>et al.</i> (2022)	Noruega
118	Liang <i>et al.</i> (2022)	China
119	Nagarajan e Ranade (2022)	Reino Unido
120	Rani <i>et al.</i> (2022)	Índia
121	Ranjbar <i>et al.</i> (2022)	Irã
122	Tran <i>et al.</i> (2022)	Tailândia
123	Ünyay <i>et al.</i> (2022)	Turquia
124	Wedwitschka <i>et al.</i> (2022)	Alemanha
125	Wu <i>et al.</i> (2022)	China
126	Yan <i>et al.</i> (2022)	China
127	Zhang <i>et al.</i> (2022)	China

2.2 ANÁLISE SISTEMÁTICA DO BANCO DE DADOS

Após a definição do portfólio bibliométrico, foi realizada uma análise dos artigos, com o objetivo de quantificar as informações existentes e fornecer as características destas publicações, condizentes aos critérios de inclusão estabelecidos. As análises estatísticas e geração dos gráficos foram realizados em linguagem R, versão 4.2.2 por meio do software RStudio, versão 353 (ALLAIRE, 2012). Para a geração dos gráficos foram utilizados os pacotes ggplot2 e extrafont.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ATUALIZAÇÕES RECENTES SOBRE ENERGIA E BIOGÁS

A produção de biogás a partir da biomassa, representa uma oportunidade promissora, por ser uma fonte de energia renovável, amplamente disponível e barata. Quando comparada a outros recursos de energia não convencionais (solar, eólica, hidro-onas e geotérmica), contribui para o gerenciamento de resíduos orgânicos e diminuição significativa da emissão de gases de efeito estufa (GEE) (CARUSO *et al.* 2019). A principal aplicação do biogás é a geração de energia elétrica, em 2022 foi gerado no mundo 21.376 MW (IRENA 2023), e tal atribuição condiciona, de certa forma, o ranqueamento dos principais países em destaque neste cenário (Tabela 2).

Tabela 2- Classificação dos principais países produtores de energia elétrica a partir do biogás

País	Capacidade (MW)
Alemanha	6.961
EUA	2.029

China	1.928
Reino Unido	1.923
Itália	1.382
Turquia	1.103
Tailândia	635
França	571
Brasil	486
República Checa	370

Fonte: IRENA (2023)

Dentre os 10 países que ocupam o ranking mundial de geração de energia elétrica por biogás, cinco deles estão localizados na Europa, com destaque para Alemanha (Tabela 2). A Europa se destaca como maior produtor mundial de biogás, contando com pelo menos 20 mil usinas de biogás (IEA, 2020). Em 2020, a União Europeia (UE) produziu cerca de 171 TWh de biogás, do qual 72 % (123 TWh) foram utilizados na geração de eletricidade e calor como combustível, e cerca de 5 % (9 TWh) foram injetados nas redes de gás para mistura de gás natural (ENERGY, 2021). Cabe ainda mencionar que, aproximadamente, 64% da capacidade total instalada de usinas de biogás operam com matéria prima agrícola (BENATO e MACOR, 2019). A comissão Europeia propôs, no plano de ação REPowerEU, atingir a meta de 35 bm^3 por ano até 2030 e criar pré-condições do contínuo aumento do potencial até 2050, em 95-167 bm^3 , atingindo 23 - 41 % do consumo de gás natural da UE em 2021 (412 bm^3). O plano de ação REPowerEU, visa contribuir para a segurança energética e a mitigação das mudanças climáticas (ALBERICI et al 2022; EBA 2022).

A implementação de incentivos às energias renováveis, nos últimos anos, estimulou muitos países ao desenvolvimento tecnológico e aperfeiçoamento da produção de biogás. Além dos países europeus, é importante destacar a presença de países como os EUA, China, Tailândia e Brasil entre os maiores produtores de energia elétrica advinda do biogás (Tabela 2). A China estabeleceu, recentemente, uma meta ambiciosa de alcançar 33% da geração de eletricidade proveniente de fontes renováveis até 2025, presente no 14º Plano Quinquenal publicado em junho de 2022 (IEA 2022). No mesmo ano, o governo federal dos Estados Unidos introduziu a Lei de Redução da Inflação, uma lei que expande significativamente o apoio à energia renovável nos próximos 10 anos por meio de créditos fiscais e outras medidas (IEA 2022).

3.2 BANCO DE DADOS

A partir do levantamento bibliográfico, foram selecionadas 127 publicações, de diversos países, reportando a utilização de resíduos agroindustriais como biomassa para produção de biogás e/ou metano (Tabela 1). Do total de publicações selecionadas, a maioria se refere a estudos desenvolvidos na Ásia (56,7 %) e Europa (20,5 %), seguidos do continente americano (15,75 %), conforme apresentado na Fig. 2. É importante destacar, que enquanto a Europa, sobretudo a Alemanha, é referência mundial na produção de biogás (Tabela 2), países da Ásia avançam, no que se refere à divulgação científica, atraindo a atenção e interesse de profissionais da área, ao redor de todo o mundo.

Sob esta análise de tema científico, China e Índia foram os países asiáticos que detiveram o maior número de registros na literatura, desde 2012 (Tabela 1). Tal fato pode ser atribuído aos programas de apoio implementados pelos governos locais, desde 1970, buscando o incentivo ao desenvolvimento de biogás, e o aproveitamento de resíduos agrícolas (CHEN et al., 2012; MITTAL et al., 2018; KAPOOR et al., 2020). Contudo, a produção atual de biogás na Índia (2,07 bm^3) ainda é considerada incipiente diante do seu potencial (29 a 48 bm^3), devido a várias barreiras técnicas e não tecnológicas (MITTAL et al., 2018).

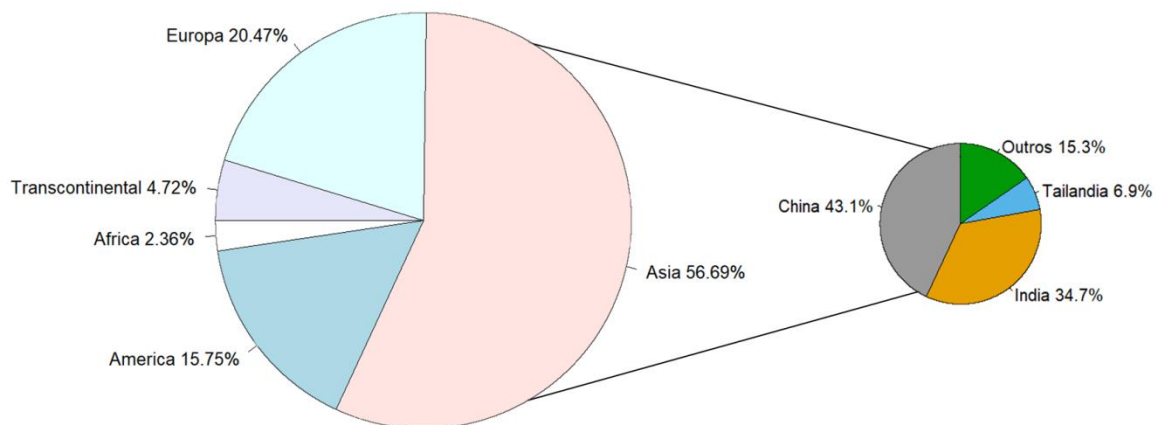


Figura 2- Principais continentes e países asiáticos envolvidos no desenvolvimento de pesquisas relacionadas a produção de biogás e CH_4 a partir de resíduos lignocelulósicos, segundo os critérios de inclusão e exclusão desta revisão sistemática da base de dados *Science Direct* e *Springer* entre 2012 e 2022

A China, considerada terceira maior produtora mundial de biogás para geração de energia elétrica (Tabela 2), já contava em 2018, com mais de 108 mil usinas e produção de 11,21 bm^3 de biogás (IEA 2020). Apesar desses números, a China ainda apresenta pouca capacidade de instalação de usinas (0,6 GW), quando comparada a Alemanha (6,2 GW), por exemplo (IEA, 2020). Segundo Xue et al. (2020), as políticas e regulamentações referentes ao biogás na China foram estabelecidas com base em leis e demandas agrícolas, direcionando fundos para o desenvolvimento de digestores domésticos para a produção de biogás. Porém,

de acordo ainda com esses autores, existe uma carência de políticas que garantam a entrada de produtos de biogás no mercado e que estimulem a operação de usinas de biogás de distribuição, na China.

Conforme o banco de dados deste estudo, mais de 20% das publicações sobre resíduos agroindustriais aplicados à geração de biogás foram originárias do continente europeu (Figura 2). Destaque especial deve ser dado à Alemanha que como principal produtor mundial de biogás, reúne cerca de dois terços do total das usinas de biogás situadas na Europa (IEA, 2020). Desde que a Lei das Fontes de Energia Renovável, entrou em vigor nesse país, no ano 2000, emendas políticas governamentais posteriores buscaram incentivar o desenvolvimento de biotecnologias voltadas à produção de biogás (THEUERL et al., 2019). Consequentemente, o crescimento da indústria de biogás é notório na Alemanha, e inegavelmente sustentado por políticas governamentais recentes que propõem, por exemplo, o uso de resíduos de culturas, culturas sequenciais, esterco bovino e captura de CH₄ de aterros sanitários (THEUERL et al., 2019; IEA, 2020). Em 2020, a Alemanha produziu cerca de 90 TWh de biogás, 53 % da produção energética total da UE, seguida pela Itália (14 %, cerca de 23 TWh), França (8 %, 13 TWh) e República Checa (4 %, 7 TWh) (ENERGY, 2021).

Na América do Norte, os Estados Unidos (EUA), se destaca como segundo maior produtor de biogás utilizado para geração de energia elétrica (Tabela 2), é responsável por uma quantidade considerável de trabalhos desenvolvidos (50 %), conforme a Tabela 1. Em 2017, a Agencia de Proteção Ambiental dos EUA aprovaram a DA como um dos padrões de combustível renovável, atraindo atenção crescente pelos resíduos agroindustriais (ROJAS-SOSSA et al., 2019). Segundo o American Biogas Council, atualmente, mais de 2.300 usinas de biogás são operadas nos EUA, sendo 332 de digestores anaeróbicos em fazendas, 1.269 usinas de recuperação de águas residuais, 66 sistemas autônomos que digerem resíduos de alimentos e 645 projetos de gás de aterro (COUNCIL, 2021). Apesar do crescente interesse na produção de biogás a partir de resíduos agrícolas, cerca de 90 % da produção de biogás é advinda de sistemas de recuperação de gás de aterro com decomposição de resíduos sólidos municipais (RSU) (IEA, 2020).

No Canadá, o total de usinas instaladas para produção de biogás é estimado em cerca de 150 (ABANADES et al. 2022), destes 45 digestores anaeróbicos são agrícolas, a maioria está operando com cerca de 100 % da sua capacidade, estão gerando eletricidades ou tem sistemas combinados de calor e energia. A província de Ontário abriga a maioria (73 %) das usinas de biogás agrícola (CBA, 2022). Políticas governamentais estão dando suporte para o investimento industrial a longo prazo, como o Programa de Tecnologia Limpa Agrícola

(ACTP) de 2021 que concede o financiamento de US\$ 165,7 milhões para ajudar os agricultores, US\$ 10 milhões para a adoção de projetos de energia limpa nos próximos dois anos e US\$ 50 milhões adicionais para apoiar a pesquisa e inovação de tecnologias de energia limpa até 2028 (CBA, 2022).

Na América do Sul, o Brasil se destaca por ser um país essencialmente agrícola, apresenta elevado potencial para o aproveitamento energético de resíduos agroindustriais. O país contabiliza atualmente 811 plantas de biogás, destas 755 estão em operação, com potencial de produção de 2,3 bm^3 por ano (CIBIOGÁS, 2021). De acordo com CIBiogás (2021), cerca de 80 % das plantas de biogás em operação são do setor agropecuário, enquanto que o setor industrial e de saneamento correspondem a 11 e 9 % respectivamente. Porém, a maior participação na produção de biogás é do setor de saneamento com 74 % do volume total de biogás produzido no país. O potencial teórico de produção de biogás no Brasil é de 84,6 bm^3 por ano, o que seria suficiente para suprir 40 % da demanda interna de energia elétrica e 70 % do consumo de diesel, considerando o cenário atual, o país explora apenas 3 % desse potencial (ABIOGÁS, 2021).

De acordo com o banco de dados, notou-se que dentre os países transcontinentais, a Turquia concentrou o maior número de pesquisas científicas publicadas, desde 2018 (Tabela 1). O país ocupa a sexta posição entre os maiores produtores mundiais de energia elétrica a partir do biogás (Tabela 2). O potencial da Turquia para geração de energia a partir de resíduos agroindustriais, foi estimado em 9,5 GW, com destaque para os os resíduos da cultura de avelã, da qual a Turquia é responsável por mais de 63 % da produção mundial (ŞENOL, 2019). Contudo, assim como reportado para outros países, a Turquia é depende de combustíveis fósseis, principalmente de gás natural (37,2 %) e carvão (32 %) (ŞENOL e ZENK, 2020). Por isso, o país vem apresentando ações de política energética que visam aumentar, em curto prazo de tempo, o uso de bioenergia e biocombustíveis (ŞENOL e ZENK, 2020).

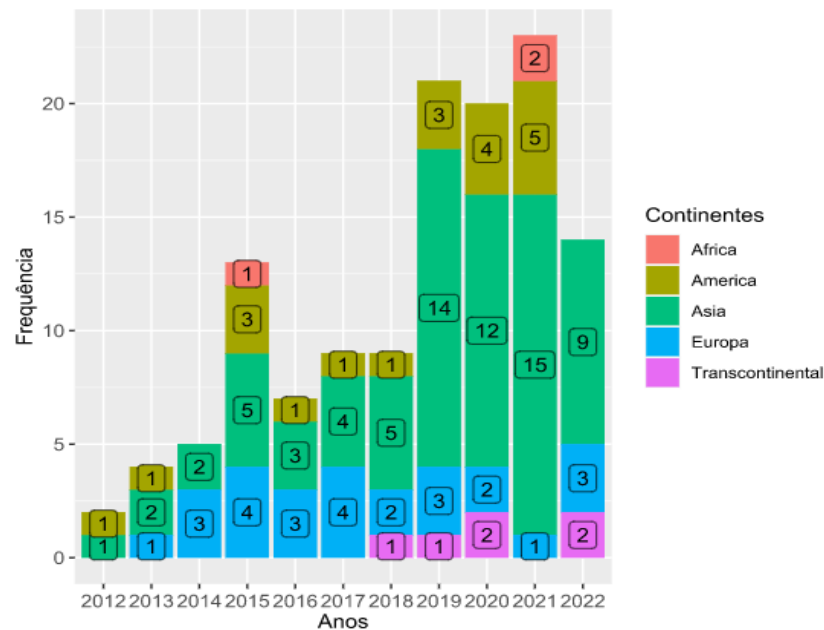


Figura 3- Frequência temporal dos artigos incluídos na revisão sistemática das bases de dados Science Direct e Springer entre 2012 e 2022, sobre produção de biogás e/ou metano a partir de resíduos lignocelulósicos e esterco bovino. As cores representam a distribuição entre os continentes. *Transcontinentais: Turquia e Indonésia

Com base no banco de dados, foi calculada a frequência de publicações sobre o tema deste estudo em relação aos anos de publicação deles, compreendidos entre 2012 e 2022 (Figura 3). Interessante notar o salto do número de publicações que ocorreu entre os anos de 2019 e 2021, concomitante ao crescente interesse sobre desenvolvimento e otimização da produção de biogás advinda dos resíduos ricos em lignocelulose (Figura 3).

Trabalhos foram desenvolvidos no continente asiático nos 10 anos analisados, principalmente em 2019, que praticamente triplicou, quando comparado ao ano anterior. Isso se deve, aos programas de desenvolvimento agrícola sustentável que têm sido desenvolvidos em países asiáticos, envolvendo desenvolvimento de usinas de biogás e apoio científico para eficiente degradação de resíduos, como também incentivos para promoção de adubos orgânicos, como subproduto, obtidos a partir da DA (SUN et al. 2023; MNRE 2019). Tal como, o Plano de Ação Nacional para Substituição do Adubo Químico por Adubo Orgânico (OSCF), iniciado em 2017 na China, o Novo Programa Nacional de Biogás e Adubo Orgânico (NNBOMP), iniciado em 2018 na Índia e o Plano de Desenvolvimento de Energia Alternativa (AEDP) iniciado em 2021 na Tailândia. O AEDP visa atingir 30 % do consumo de energia renovável até 2037 e alcançar a emissão zero até 2065, o biogás é um dos meios para atingir a

meta, pois a Tailândia tem alto potencial de biomassa agrícola, cerca de 1500 usinas de biogás em escala industrial, 83 % delas em fazendas de gado (AEDP, 2021; REINAUER e HANSEN, 2021).

3.2.1 Características dos resíduos lignocelulósicos, pré-tratamentos utilizados e parâmetros operacionais para produção de biogás

Diferentes resíduos lignocelulósicos utilizados no processo de digestão anaeróbia, para produção de biogás e / ou CH₄, foram identificados nesta revisão sistemática. Contudo, os resíduos agroindustriais mais frequentemente utilizados foram: esterco bovino, resíduos de milho e palha de trigo, com 120, 25 e 24 artigos, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3- Resíduos lignocelulósicos utilizados com maior frequência em processos de digestão anaeróbia para produção de biogás e metano, selecionados no período entre 2012 e 2022, com o respectivo número de frequência e porcentagem de lignocelulose

Resíduos	Nº de artigos	Lignocelulose*	
		(%)	Código de referência
Esterco bovino	120	39,13- 67,36	[1, 4, 10, 12, 21, 27, 28, 33, 42, 47, 63, 67, 68, 85, 106, 108]
Resíduos de milho	25	71,50- 85,30	[1, 12, 21, 36, 41, 42, 47, 49, 72, 87, 91]
Palha de trigo	24	71,05- 85,70	[4, 19, 27, 28, 39, 41, 59, 91]
Espécies de Capim	19	71,24- 79,61	[2, 12, 70, 106]
Palha de arroz	17	66,30- 83,54	[2, 31, 56, 78, 96, 99, 100]
Resíduos de cana-de-açúcar	10	—	—
Resíduos agrícolas**	8	—	—
Aguapé	5	67,21-67,31	[88, 97]
Resíduos de madeira	5	57,20	[123]
Lodo de papel de celulose	3	44,85- 50,83	[48, 123]
Outros***	13	—	—

*Soma de celulose, hemicelulose e lignina

**Resíduos agrícolas= palha, colmo, serrapilheira, folhas secas e cascas

***Outros= lentilha, resíduos do dendê, *Lolium multiflorum*, *Brassica napus*, *Avena strigosa*, *Prosopis juliflora*, cardo, sorgo, salgueiro, resíduos de girassol, xilano, celulose, caule do aspargo, pó de bambu, *Hydrilla verticillata*, resíduo de álamo, *H. glomeratus*, cânhamo, linho, resíduos de algodão, *Peashrub korshinsk*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, casca de avelã, *Azolla pinnata*, *Sida hermaphrodita*, *Medicago sativa*, *Phleum pratense*, palha de cevada, *P. Hysterophorous*, *Ageratum conyzoides*, silagem de *Triticale*, palha de soja, resíduos de girassol, folhas de couve-flor, folha de bananeira, casca de frutos de pinhão-manso, calêndula, rosa vermelha, rosa da china, narciso, *Chrysanthemum sp.*, salvinia

Resíduos agrícolas como colmo e palha de milho, trigo e arroz têm atraído interesse específico para aplicações energéticas devido à sua enorme disponibilidade no mundo, baixo custo e por serem matérias-primas sustentáveis (QIAO et al., 2013; YADAV et al., 2019; RANI et al., 2021). Segundo a World Biogas Association (2021), 2,5 bilhões de toneladas de resíduos de colheitas agrícolas são gerados por ano, no mundo, mas pouco desse total apresenta uma aplicação de uso definido. Exemplo disso, é a China que produz, aproximadamente, um bilhão de toneladas de palha de colheitas agrícolas a cada ano, mas apenas 30 % é utilizada, sendo o restante descartado ou queimado (YAN et al., 2022).

Estima-se que, se 80 % do volume acumulado de resíduos agroindustriais, gerados no mundo, fossem empregados como biomassa em processos de biodigestão, algo em torno de 4.700 TWh de biogás poderia ser gerado (WBA, 2021). Esse valor corresponde a 11 vezes mais que a produção mundial para o ano de 2018 (407 TWh).

3.2.2 Pré-tratamentos utilizados em resíduos lignocelulósicos

Dos 127 artigos selecionados para o banco de dados, cerca de 94,5 % utilizaram alguma estratégia técnica de pré-tratamento, seja físico, químico, biológico ou a combinação deles (Figura 4). Somente sete artigos não utilizaram pré-tratamento do resíduo lignocelulósico. A adoção de pré-tratamento da biomassa, unicamente física, foi reportada em, aproximadamente, 50 % dos artigos que compuseram a base de dados deste trabalho. Apesar de ser o método mais utilizado e aumentar a biodegradabilidade da lignocelulose, também é considerado dispendioso pelo gasto energético (KALAMARAS e KOTSOPOULOS, 2014; WANG Y. et al., 2020; LIANG et al., 2022).

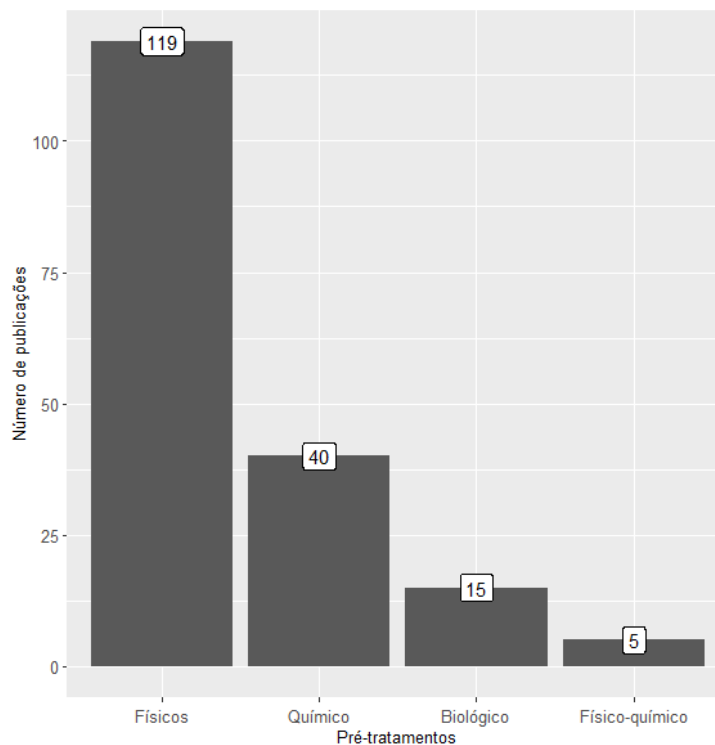


Figura 4- Técnicas de pré-tratamento utilizadas nos artigos selecionados do banco de dados Science Direct e Springer entre 2012 e 2022, sobre produção de biogás e metano a partir de resíduos lignocelulósicos.

Nesta revisão sistemática, foi possível identificar os principais tipos de pré-tratamento físico aplicados: mecânico, térmico, explosão a vapor, campo elétrico pulsado e extrusão. O pré-tratamento mecânico foi o principal método aplicado, consistindo da fragmentação da

biomassa por meio de trituração, pulverização e moagem. O efeito do tempo de moagem na distribuição de tamanho do capim híbrido *Pennisetum* foi investigado, as amostras foram moídas, peneiradas e separadas em diferentes tamanhos (0,150 e 1 mm), o maior rendimento de CH₄ (291,9 ± 4,7 ml / g - SV) foi obtido entre 0,250 - 0,380 mm (Kang et al. 2019). Os mesmos autores reportaram também a redução no tempo de retenção hidráulica (TRH) em até 35,7 %. Sasaki et al. (2016) estudaram o efeito do pré-tratamento mecânico da palha de arroz, a que passou por moagem produziu 260 ml / g - SV de CH₄, aumentou o rendimento em 46,06 %, quando comparada a palha de arroz triturada.

O pré-tratamento mecânico e térmico com água quente 75 °C por 1 hora, foram aplicados em casca de *Picea abies* e *Pinus sylvestris*, a combinação dos pré-tratamentos aumentou a produção de CH₄ dos resíduos em 86,8 % (99 ml / g - SV) e em 19,6 % (55 ml / g - SV) respectivamente (RASI et al., 2019). Quatro diferentes técnicas de pré-tratamento térmico (forno de ar quente, micro-ondas, autoclave e água quente) foram utilizadas em *Ageratum conyzoides*, o pré-tratamento em autoclave (90 °C por 90 min.) aumentou a solubilidade e o rendimento de CH₄ em 34,6 % (4.053 ml / g - SV) com diminuição do TRH de 50 para 35 dias (SAHA et al., 2021a).

Os efeitos da eletrohidrólise (campo elétrico pulsado) foram avaliados em lodo de papel e celulose, o tratamento realizado a 15 V por 45 min alcançou 301 ml / g - SV de CH₄ com relação resíduo/inóculo (F / I) igual a 2,5 (VELUCHAMY e KALAMDHAD, 2017 e 2018). A técnica também foi utilizada em *Parthenium hysterophorous* triturado, o melhor tratamento (20 V por 40 min.) aumentou o rendimento de CH₄ em 27,79 % (4242 ± 17 ml / g - SV) (SAHA et al., 2021b). O pré-tratamento mecânico e por extrusão foram avaliados em palha de arroz. Os autores concluíram que a palha de arroz extrusada apresentou significativa redução granulométrica, melhora nas propriedades físicas e expansão de volume; alcançando maior produção específica de CH₄ (227,3 L / kg - SV) que foi 32,5 % e 72,2 % maior que a palha moída e sem tratamento, respectivamente (CHEN et al., 2014a).

O pré-tratamento químico dos resíduos lignocelulósicos foi utilizado em 48 artigos (37,8 %) desta revisão sistemática, diferentes técnicas foram utilizadas, sendo: álcali, ácido e agentes oxidantes. Todos os artigos utilizaram o pré-tratamento físico associado ao químico, com exceção de Wang Y. et al. (2020) que estudaram concentrações de esterco bovino tratado com permanganato de potássio (KMnO₄) em diferentes intervalos de tempo (0, 2, 4, 8, 16, 24, 32 e 48 h). A condição ótima de pré-tratamento foi encontrada na dosagem de KMnO₄ de 100 mg / g - ST de esterco bovino por 8 h, a produção volumétrica de CH₄ aumentou 23 %.

Na maioria dos artigos a técnica de pré-tratamento mecânico foi utilizada antes do pré-tratamento químico. O pré-tratamento químico (H_2SO_4 , NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e Na_2CO_3) da palha de trigo moída (2 - 3 mm) foi avaliado na codigestão com esterco bovino (proporção de 40 : 60) para produção de biogás e CH_4 . O pré-tratamento da palha de trigo com 3 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 3 % Na_2CO_3 por 48 h resultou na maior produção de biogás (0,924 m^3 / kg - SV) e CH_4 (0,380 m^3 / kg - SV) seguido do pré-tratamento com NaOH a 2 % que produziu 0,899 e 0,370 m^3 / kg - SV de biogás e CH_4 . Os dois pré-tratamentos químicos aumentaram a produção de CH_4 em 57,7 e 53,5 % quando comparados a palha de trigo triturada (0,241 m^3 / kg - SV) (KRISHANIA et al., 2013). O pré-tratamento, com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH e KOH (1, 2, 3 e 4 %), foi utilizado em resíduos de milho. Neste estudo, o KOH a 2 % mostrou o impacto mais positivo no rendimento cumulativo de CH_4 (140 L / kg - SV) sendo 65,2 % maior que o resíduo não tratado, 14,1 % maior que 1 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 50,5 % maior que 1 % de NaOH (PARITOSH et al., 2020). Capim (palha de *P. australis*) moído pré-tratado com álcali (NaOH 2 %) aumentou o rendimento de CH_4 em 70 % (343,08 ml / g - SV) quando comparado ao capim não tratado (TRAN et al., 2022).

O pré-tratamento alcalino é amplamente utilizado em resíduos lignocelulósicos, foi avaliado em 34 artigos desta revisão. No pré-tratamento as ligações éster da fração de lignina, celulose e hemicelulose são abertas, se dissolvem e a cristalinidade da celulose diminui, melhora a porosidade e aumenta a área de superfície da biomassa (KHAN et al., 2022). Além de ser avaliada a concentração do álcali e o tempo de residência, o pré-tratamento térmico é associado. O pré-tratamento térmico (180 °C, 30 min) em reator Parr com adição de 3 % de NaOH , melhorou a degradação das fibras de esterco bovino e aumentou o rendimento de CH_4 em 127 % (KHAN e AHRING, 2021).

A utilização de ácido como técnica de pré-tratamento também foi relatada. Kim e Karthikeyan (2021) pré-trataram esterco bovino com 4 % HCl e 15 % NaOH por 24 h, o pré-tratamento com álcali aumentou em 206 % (356 ml / g - SV) a produção de CH_4 em comparação ao não tratado (116 ml / g - SV), porém o pré-tratamento ácido inibiu a produção de biogás, devido aos efeitos inibitórios do furfural e do 5-hidroximetil furfural. Entretanto, Sarto et al. (2019) aumentaram a produção de biogás em 131,45 % (424,30 ml) quando pré-trataram aguapé em autoclave (121 °C e 2 atm) com H_2SO_4 a 5 % por 60 min, quando comparado ao controle não tratado. Resíduos de milho (caule) foram pré-tratados com águas residuais de furfural, a maior produção de CH_4 (166,34 ml / g - VS) foi alcançada á 35 °C por 6 dias que foi 70,36 % maior que o controle não tratado (97,64 ml / g - SV) (WANG et al., 2019).

As técnicas de oxidação úmida, expansão da fibra de amônia (AFEX), cavitação hidrodinâmica e cavitação ultrassônica com álcali são classificadas como pré-tratamento físico-químico e são utilizadas com objetivo de diminuir a natureza recalcitrante de resíduos lignocelulósicos. Lee et al. (2020) e (2021) estudaram o pré-tratamento de oxidação úmida com adição de peróxido de hidrogênio (0, 3, 6 e 9 %; H₂O₂) a 180 °C por 45 min, foi utilizado resíduo de dendê (cachos vazios) moído e inóculo na proporção 2:1. A oxidação úmida com 6% de H₂O₂ e posterior codigestão em condições mesofílicas (37 °C) a 120 rpm resultou em maior produção de CH₄ (362 ml / g - SV) quando comparado ao resíduo com apenas tratamento térmico (276 ml / g - SV) e não tratado (253,4 ml / g - SV), aumentou o rendimento em 31 e 43 %, respectivamente (ISMAIL e TALIB et al., 2016).

Resíduo de milho (palha) foram tratados com AFEX na proporção 2:1 (amônia para matéria seca) por 30 min a 102 °C a 325 psi, a codigestão do resíduo de milho tratado produziu 213 L / kg - SV de biogás, 22 % maior que o resíduo não tratado (175 L / kg - SV), e aumentou a abundância da comunidade archaea em 11,8 % (ROJAS-SOSSA et al., 2019). Nagarajan e Ranade (2022) trataram o bagaço da cana-de-açúcar moída com a técnica de cavitação hidrodinâmica baseada em vórtice, e obtiveram aumento de 113 % da produção de CH₄ (229 ml / g - SV) com 9 passes, quando comparado ao resíduo não tratado (107 ml / g - SV). A técnica de cavitação ultrassônica foi utilizada com KOH em três concentrações (2, 4 e 6 % p / p) a 22 °C e e intensidade constante de 20 kHz, a palha de trigo tratada com 4 % de KOH produziu 282 ml / g - SV de CH₄, 47 % maior que a palha não tratada (192 ml / g - SV) (KORAI e LI, 2020).

O pré-tratamento biológico foi relatado em 15 artigos, associado ao pré-tratamento físico e químico, com técnicas envolvendo a utilização de fungos, bactérias, enzimas e ensilagem. Tratam-se de tecnologias consideradas de baixo custo, com menos formação de inibidores quando comparado ao pré-tratamento químico, porém é necessário longo período de tempo de pré-tratamento (KHAN et al., 2022). O pré-tratamento mecânico da palha de arroz associado à inoculação com *Pleurotus ostreatus*, resultou, após 30 dias, na produção máxima de CH₄ (258 L / kg - VS), proporcionando rendimento 165 % maior comparado à palha de arroz não tratada (MUSTAFA et al., 2017) . Resíduos agrícolas (folhas) moídos receberam pré-tratamento fúngico (*Aspergillus terreus* e *Trichoderma viride*, 25 °C por 7 dias) e químico (2,5 % de NaOH e 2,5 % de NH₄OH por 15 dias), o rendimento de CH₄ foi 30 % maior (79,8 L / kg - VS) que os resíduos não tratados (61,4 L / kg - VS) (ALI e SUN, 2015).

A utilização do pré-tratamento fúngico é direcionada à degradação da lignina e da hemicelulose, porque a celulose é mais recalcitrante ao ataque de fungos, já o consórcio microbiano tem alta capacidade de degradação de celulose e hemicelulose (ZHENG et al., 2014). O pré-tratamento fúngico e bacteriano da palha de trigo e de milho, aumentaram o rendimento de CH₄ em 46 e 51 % respectivamente, quando comparado ao controle não tratado (252 e 176 ml / g - SV) (YADAV et al., 2019). Resíduos de madeira extrusadas (120 °C e 50 bar), foram pré-tratadas com duas cepas bacterianas comerciais, o resíduo foi incubado por 43 h á 37 e 55 °C, o maior rendimento de CH₄ foi obtido com o pré-tratamento na concentração de 5,0 g / L a 37 °C. O resíduo pré-tratado aumentou o rendimento de CH₄ em 88,6 e 70,2 % (54,5 e 49,1 ml / g - SV) para Petronet Alfa e Petronet Omega, quando comparado ao controle não tratado (28,9 ml / g - SV) (BAGHBANZADEH et al., 2021).

Apenas 4 artigos utilizaram pré-tratamento enzimático do resíduo lignocelulósico, as enzimas estudadas foram: celulase, lacase, peroxidase, hemicelulase e ligninase. Palha de milho foi pré-tratada com diferentes enzimas (lacase, manganês peroxidase e peroxidase versátil) e diferentes tempos de incubação (0,6 e 24 h), a enzima lacase (2 U / g; pH 6 e 25 °C) apresentou produção de 344 L / kg - SV de CH₄ (25 %) após 24 h e as enzimas peroxidases (5 U / g; pH 4,5 e 25 °C) de 309 L / kg - SV (17 %) após 6 h, o aumento de ambos os grupos enzimáticos foi de 16 % e 14 % após, respectivamente, 6 e 24 horas de tratamento quando comparados ao controle (SCHROYEN et al., 2014). O rendimento de CH₄ aumentou significativamente (91 %), quando resíduos de papel e celulose foram pré-tratados com ultrasson (37 kHz e 600 W por 30 min) e uma mistura de enzimas celulases, hemicelulases e ligninases (4,8 µl), em comparação com o resíduo não pré-tratado após 23 dias de DA (WALTER et al., 2016).

A ensilagem é um método bioquímico anaeróbico de pré-tratamento, onde as bactérias do ácido láctico (LAB) convertem carboidratos solúveis em ácidos orgânicos para preservar energia e nutrientes (YAN et al., 2022). O pH ácido (4) hidrolisa a hemicelulose e aumenta a hidrólise da celulose (Shrestha et al. 2017). Riau et al. (2021) realizaram a ensilagem de *Lolium multiflorum* (Azevém), *Brassica napus* (colza forrageira) e *Avena strigosa* (aveia preta) sem adição de aditivos. A ensilagem aumentou o rendimento de CH₄ na codigestão com esterco bovino em 18,8, 25,1 e 27,2 % respectivamente, em termos de L / kg - SV. O estudo também concluiu que tempos de ensilagem superiores a 3 meses não modificaram a composição química nem as propriedades energéticas das culturas utilizadas. Palha de trigo foi pré-tratada com diferentes aditivos (enzimático, químico e biológicos Schaumalac) para ensilagem durante 180 dias. O potencial máximo de metano de 275 ml / g - SV, 36 % maior,

foi obtido a partir da silagem com 30 % de sólidos totais e moagem em extrusora, a aplicação de aditivos (LAB e enzimas) de silagem levou a um aumento adicional de 1,5 % (279,6 ml / g - SV) (GALLEGOS et al., 2017).

3.2.3 Monodigestão e codigestão de resíduos lignocelulósicos aplicados na produção de biogás e metano

A codigestão (CoD) de diferentes combinações de resíduos municipais, industriais e agrícolas, também tem sido amplamente difundida, principalmente, os de origem lignocelulósica que geralmente possui quantidade inadequada de nutrientes, alta carga orgânica, deficiência de microrganismos e baixo teor de nitrogênio, a adição de co-substrato na maioria das vezes supera as desvantagens da monodigestão (MonoD) (KAINTHOLA et al., 2019c; HAGOS et al., 2017). Dos resíduos analisados, o esterco bovino está presente em 95 % dos artigos, é comumente utilizado em codigestão com resíduos agrícolas, como inóculo por possuir grande diversidade microbiana, bactérias hidrolíticas e metanogênicas capazes de degradar a lignocelulose, e produzir biogás com alto teor de CH₄ (HAGOS et al., 2017). A MonoD anaeróbia é estudada em apenas 13 artigos, dos quais 8 são com esterco bovino.

Do total de trabalhos avaliados que compuseram o banco de dados, 16 artigos compararam MonoD e CoD, sendo a última responsável por maior rendimento de biogás e CH₄. Janke et al. (2017) foram o único estudo que relatou vantagem da MonoD, a torta de filtro da cana-de-açúcar apresentou produção específica de 480 ml / g - SV de biogás, 50 % maior em comparação com a opção de CoD com bagaço durante a fase de condição estacionária do experimento semicontínuo. O estudo concluiu que a relação C:N da torta de filtro (24:1) estava dentro da faixa ótima para DA (20 - 40 : 1). A codigestão de palha de trigo, esterco bovino e bactérias hidrolíticas (bioaugmentação) em batelada, aumentou o rendimento de CH₄ em 342 ml / g - SV, 55 % maior que a MonoD da palha de trigo (221 ml / g - SV), a inoculação de *C. thermocellum* aumentou o rendimento da codigestão em 7,6 % com produção de 368 ml / g - SV de CH₄, um aumento semelhante foi registrado em reator de tanque com agitação contínua (CSTRs) (TSAPEKOS et al., 2017).

3.2.4 Análise de parâmetros operacionais (temperatura e pH) utilizados para biodigestão de resíduos lignocelulósicos

Para que ocorra uma eficiente produção de biogás e CH_4 é necessário que os parâmetros operacionais da DA estejam adequados para o crescimento dos microrganismos. A temperatura é um dos parâmetros importantes, influencia na sobrevivência e no crescimento dos microrganismos e interfere diretamente no tempo de TRH. Segundo Kainthola et al. (2019c) as condições ideais para a DA seriam a hidrólise na faixa termofílica (50 - 70 °C) e a metanogênese na faixa mesofílica (30 - 45 °C), enquanto que na primeira o tempo de TRH é menor com degradação mais precoce, a segunda apresenta mais estabilidade e riqueza de bactérias anaeróbias. De acordo com a Figura 5, a temperatura mesofílica é a mais utilizada para produção de biogás e CH_4 , presente em 71,6 % (91) dos artigos, a temperatura mais frequente foi 35 e 37 °C. Já a temperatura termofílica foi estudada em 16 artigos, sendo 55 °C a mais frequente, em 11 artigos foi estudada com a mesofílica. Poucos estudos, relataram a DA sob condições psicrófilas (< 20 °C).

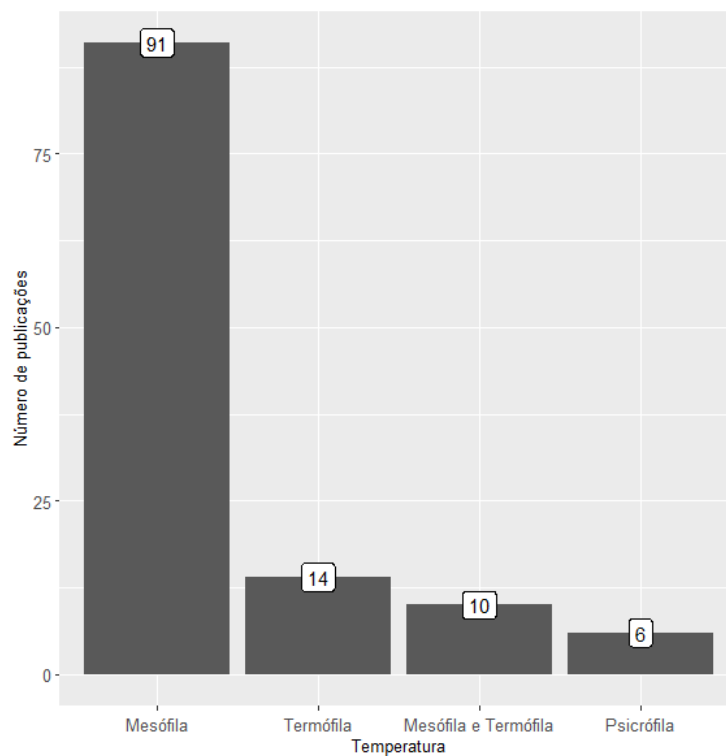


Figura 5- Condições operacionais relacionadas a temperatura encontrada nos artigos selecionados das bases de dados Science Direct e Springer entre 2012 e 2022, segundo os critérios de inclusão desta revisão sistemática

Os efeitos das taxas de carga orgânica (OLRs), temperaturas e taxas de recirculação de efluentes, foram investigadas na produção de biogás, do capim híbrido (*Pennisetum purpureum* e *Pennisetum typhoideum*) usando CSTRs alimentados semi-continuamente em escala piloto. Na DA termofílica (55 °C) os microrganismos se adaptaram mais rapidamente ao resíduo e o rendimento específico de CH_4 foi consideravelmente maior (53,8 e 32,3 %) que a DA em condições mesofílicas (35 °C), ambos com mesma taxa de carga orgânica (OLR; 2,0

kg SV m⁻³ d⁻¹). O mesmo estudo ainda relatou que os digestores termofílicos operaram de forma mais estável sob OLR de até 5,0 kg SV m⁻³ d⁻¹ quando comparado ao mesofílico (SONWAI et al., 2021). Os efeitos da adição de inóculo, do pré-tratamento e da temperatura foram avaliados quanto a produção de biogás a partir de resíduos da indústria de algodão, os estudos concluíram que as condições termofílicas melhoraram o rendimento de biogás (51.622 ml / g - SV) em aproximadamente 92 %, quando comparada as condições mesofílicas (26.916 ml / g - SV) (ISMAIL e TALIB, 2016).

A codigestão de resíduos agrícolas e esterco bovino em temperatura termofílica (55 °C) aumentou em 15 % a produção cumulativa de CH₄ em comparação com os resultados obtidos a 35 °C (ALMOMANI, 2020). O esterco bovino (EB) codigerido com bagaço de cana-de-açúcar (BC) e com pó de bambu, apresentou maior taxa de produção de biogás a 55 °C, seguida por 50, 35, 45 e 40 °C. A 55 °C, o potencial de produção de biogás de EB + BC (40,744 ml / g - SV) foi máximo (GHATAK e GHATAK, 2018). Outro estudo, relatou que a codigestão do EB + BC pré-tratado com álcali, apresentou degradação precoce da matéria orgânica a 55 °C, como também maior taxa de produção de biogás, aumento de aproximadamente 9% quando comparado as condições mesofílicas (35 °C) (KAUR et al., 2020).

Apesar dos artigos utilizados nesta revisão relatarem vantagens associadas a DA termofílica, como degradação precoce da matéria orgânica, para a maior produção de biogás e OLR é necessário mais estudos, que estabeleçam as melhores temperaturas em função do resíduo utilizado. Segundo Karrabi et al. (2023) a DA termofílica, pode gerar acidificação, aumento de toxicidade, alto custo de investimento e interrupção da produção de biogás. Como também, temperaturas reduzidas de DA, estão associadas a redução do metabolismo dos microrganismos, baixa taxa de hidrólise e maiores TRH (KAINTHOLA et al., 2019c). Saady e Massé (2013) realizaram MonoD de esterco bovino e palha de trigo em condições psicrófilas (20 °C), alcançou produção máxima de CH₄ depois de 94 dias de RTH, de 237,6 e 235,3 L / kg - SV respectivamente. A codigestão dos resíduos (27 % ST) também foi avaliada pelos autores (SAADY e MASSÉ, 2015), ao longo de 315 dias, a estabilidade do reator de batelada sequencial (SBR) foi avaliada em 14 ciclos sucessivos com OLR crescente (4, 5 e 6 g TDQO kg⁻¹ d⁻¹), o estudo resultou em um rendimento específico médio de CH₄ de 187,3, 163,6 e 150,8 L / kg - SV, respectivamente. Outro estudo foi avaliado com 27 % ST e maior OLR de 7,0 e 8,0 g TCO_D kg⁻¹d⁻¹ por 84 dias com 4 ciclos sucessivos, o SBR demonstrou um rendimento específico de CH₄ de 147,1 e 143,2 L / kg - SV respectivamente, a hidrólise foi a etapa limitante (MASSÉ e SAADY, 2015).

O pH operacional afeta diretamente o desenvolvimento da DA, pois influencia na taxa de crescimento dos microrganismos, é um dos fatores que possibilita avaliar a estabilidade do processo, junto com a capacidade tampão e com a remoção de matéria orgânica (MENDIETA et al., 2020a). A faixa de pH considerada ideal para a DA é de 6,8 a 7,4 (MAO et al., 2015). Dos artigos selecionados, 34 (26,8 %) fizeram o ajuste inicial do pH, os demais artigos conferiram e/ou monitoraram ao longo da DA. O pH ajustado variou entre 5-8, o que apresentou maior frequência foi o pH 7. O pH neutro é mais favorável para a produção de biogás, uma vez que a maioria dos metanogênicos cresce na faixa de pH de 6,7 a 7,5 (Kalamaras e Kotsopoulos 2014), valores extremos de pH são tóxicos e causam danos à membrana celular dos metanogênicos e inibição da produção de CH₄ (KAINTHOLA et al., 2019a; RAJPUT et al., 2021).

A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para otimizar parâmetros operacionais de temperatura (26 - 40 °C) e pH (5 - 8,5) da codigestão de *Prosopis juliflorasementes*, aguapé, folhas secas e esterco bovino. Com os parâmetros otimizados (pH 7 e 35,5 °C) o estudo alcançou rendimento cumulativo de biogás de 74,13 L / kg com 76,2 % de CH₄ e relatou que a DA foi mais dependente da mudança de pH do que da mudança de temperatura, quando o pH foi reduzido para 6,68 ou aumentado para 7,68 houve redução do rendimento de biogás e do teor de CH₄ (PRABHU et al., 2021).

4 CONCLUSÃO

A produção de biogás e metano, apresenta elevado potencial de crescimento, sendo considerada uma alternativa para sanar os impactos ambientais causados pela utilização desenfreada dos combustíveis fósseis. Os resíduos agroindustriais representam uma fonte de matéria-prima barata, amplamente disponível e adequada para utilização em sistemas de codigestão anaeróbia. Diante disso, países em todo o mundo tem incentivado o desenvolvimento de pesquisas envolvendo a utilização de resíduos agroindustriais como fonte energia renovável nos últimos anos. Métodos de pré-tratamento físico, químico e biológico, são utilizados para diminuir a natureza recalcitrante dos resíduos lignocelulósicos, aumentando a eficiência da digestão anaeróbia. Como também, ferramentas de otimização de processos, com a finalidade de obter os melhores parâmetros operacionais que forneçam maior produção de biogás e teor de metano, com elevado potencial energético.

5 AGRADECIMENTOS

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa. À Coodenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (Fapesb) pelo fomento da pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

- ABANADES, S. et al. A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. **Int J Environ Sci Technol (Tehran)** 19:3377-3400, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03301-6>.
- ABDELWAHAB, T.A.M. et al. Metal nanoparticle mixtures to improve the biogas yield of cattle manure. **Biomass Conv Bioref** 13:2243-2254, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01286-3>.
- ABID, M. et al. Novel insights of impacts of solid content on high solid anaerobic digestion of cow manure: Kinetics and microbial community dynamics. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125205>.
- ABIÓGÁS, Associação Brasileira de Biogás e Biometano. A Biogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro. São Paulo: A Biogás, 2021. Disponível em: <https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>. Acesso 08 Fevereiro 2022.
- AGARWAL, A. et al. Hydrothermal, acidic, and alkaline pretreatment of waste flower-mix for enhanced biogas production: a comparative assessment. **Biomass Conv Bioref**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01607-6>.
- AHMED, A.M.S.; BUEZO, K.A.; SAADY, N.M.C. Adapting anaerobic consortium to pure and complex lignocellulose substrates at low temperature: kinetics evaluation. **Int J Recycl Org Waste Agricult**, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0238-2>.
- AJAYI-BANJI, A.A.; RAHMAN, S. Efficacy of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles for enhancing solid-state anaerobic co-digestion: focus on reactor performance and retention time. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124670>.
- ALBERICI, S.; GRIMME, W.; TOOP, G. Biomethane production potentials in the EU. **A gas for climate report**, 2022. https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/10/Guidehouse_GfC_report_design_final_v3.pdf. Accessed 24 January 2023.
- ALI, S.S. et al. Exploring the potential of anaerobic co-digestion of water hyacinth and cattle dung for enhanced biomethanation and techno-economic feasibility. **Fuel**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125397>.
- ALI, S.S.; SUN, J. Physico-chemical pretreatment and fungal biotreatment for park wastes and cattle dung for biogas production. **SpringerPlus**, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1466-9>.

ALI, S.S.; SUN, J. Effective thermal pretreatment of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for the enhancement of biomethanation: VIT® gene probe technology for microbial community analysis with special reference to methanogenic *Archaea*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102853>.

ALLAH, W.E.A. et al. Methane production enhancement of a family-scale biogas digester using cattle manure and corn stover under cold climates. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101163>.

ALLAIRE, J. RStudio: integrated development environment for R. Boston, MA, v. 770, n. 394, p. 165-171, 2012.

ALMOMANI, F. Prediction of biogas production from chemically treated co-digested agricultural waste using artificial neural network. **Fuel**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118573>.

ALMOMANI, F.; BHOSALE, R.R. Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. **Chemosphere**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805>.

ARIÇ, A. et al. The effect of various thermochemical pretreatment methods on the biomethanisation of hemp (*Cannabis sativa*) hurd and kinetic analysis. **Biomass Conv Bioref**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02667-y>.

AEDP, Alternative Energy Development Plan (2021) Mid-century, long-term low greenhouse gas emission development strategy, submitted under the Paris agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Thailand_LTS1.pdf. Accessed 04 March 2023.

AVICENNA et al. Process improvement of biogas production from anaerobic co-digestion of cow dung and corn husk. **Procedia Chemistry**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.014>.

BAGHBANZADEH, M. et al. Enhancing hydrolysis and bio-methane generation of extruded lignocellulosic wood waste using microbial pre-treatment. **Renewable Energy**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.131>.

BENATO, A.; MACOR, A. Italian biogas plants: trend, subsidies, cost, biogas composition and engine emissions. **Energies**, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12060979>.

BNDES, Banco Nacional do Desenvolvimento (2018). Biogás: a próxima fronteira da energia renovável, 26 de julho de 2018. <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogas>>. Acesso em: 29/03/2023.

BOCHMANN, G.; MONTGOMERY, L.F. Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. In *The biogas handbook* (pp. 85-103). **Woodhead Publishing**, 2013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978085709498850004X>

BUMHARTER, C. et al. New opportunities for the European Biogas industry: A review on current installation development, production potentials and yield improvements for manure

and agricultural waste mixtures. **Journal of Cleaner Production**, 135867, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623000252>.

BURAGOHAIN, S.; MAHANTA, P.; MOHANTY, K. Biogas production from anaerobic mono- and co-digestion of lignocellulosic feedstock: process optimization and its implementation at community level. **Environmental Technology & Innovation**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101981>.

CBA, Canadian Biogas Association. Analysis of regulatory barriers impacting agricultural biogas development in Canada, march 2022. [https://biogasassociation.ca/images/uploads/documents/2022/resources/Agricultural Biogas Regulatory Analysis April 2022.pdf](https://biogasassociation.ca/images/uploads/documents/2022/resources/Agricultural_Biogas_Regulatory_Analysis_April_2022.pdf). Accessed 06 June 2023.

CARUSO, M.C. et al. Recent updates on the use of agro-food waste for biogas production. **Applied Sciences**, 9(6), 1217, 2019. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/6/1217>.

COUNCIL, American Biogas (2021) Biogas Market Snapshot. <https://americanbiogascouncil.org/biogas-market-snapshot/>. Accessed 04 March 2023.

CHEN, L. et al. The progress and prospects of rural biogas production in China. **Energy Policy**, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.052>.

CHEN, X. et al. Enhancing methane production from rice straw by extrusion pretreatment. **Applied Energy**, 2014a. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.076>.

CHEN, X. et al. Asparagus stem as a new lignocellulosic biomass feedstock for anaerobic digestion: Increasing hydrolysis rate, methane production and biodegradability by alkaline pretreatment. **Bioresource Technology**, 2014b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.070>.

CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. Panorama do Biogás no Brasil. Relatório Técnico nº 001/2022 (2021). <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>. Accessed 06 March 2023.

COATS, E.R. et al. Methane production on thickened, pre-fermented manure. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.077>.

DEVI, M.K. et al. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis. **Bioresource Technology**, 127871, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422012019>.

DONG, L. et al. Reflux of acidizing fluid for enhancing biomethane production from cattle manure in plug flow reactor. **Bioresource Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.092>.

DU, F. et al. Maximizing the value of Korshinsk peashrub branches by the integration of *Pleurotus tuoliensis* cultivation and anaerobic digestion of spent mushroom substrate. **Renewable Energy**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.053>.

ENERGY, D.G. Quarterly report on European gas markets. With focus on 2021, an extraordinary year on the European and global gas markets. **Market Observatory for Energy**, vol 14, 2021. <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022->

[04/Quarterly%20report%20on%20European%20gas%20markets_Q4%202021.pdf](#). Accessed 05 January 2023.

ESTEVEZ, M.M. et al. Semi-continuous anaerobic co-digestion of cow manure and steam-exploded *Salix* with recirculation of liquid digestate. **J Environ Manage**, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.028>.

EBA, European Biogas Association. Tracking biogas and biomethane deployment across Europe. E-statistical Report (2022). <https://www.europeanbiogas.eu/SR-2022/EBA/>. Accessed 24 January 2023.

EWUNIE, G.A.; YIGEZU, Z.D.; MORKEN, J. Biochemical methane potential of *Jatropha curcas* fruit shell: comparative effect of mechanical, steam explosion and alkaline pretreatments. **Biomass Conv Bioref**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01159-1>.

FAISAL, S. et al. Biomethane enhancement via plastic carriers in anaerobic co-digestion of agricultural wastes. **Biomass Conv Bioref**, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00779-x>.

FENG, L.U. et al. Anaerobic digestion of co-ensiled cover crop and barley straw: effect of co-ensiling ratios, manure addition and impact on microbial community structure. **Industrial Crops and Products**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112025>.

FERRERO, F. et al. Suitability of cardoon (*Cynara cardunculus* L.) harvested at two stages of maturity to ensiling and methane production. **Biomass and Bioenergy**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105776>.

FOSTER, E. et al. The unstudied barriers to widespread renewable energy deployment: Fossil fuel price responses. **Energy Policy**, 103, 258-264, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516307157>.

FRANQUETO, R. et al. Anaerobic codigestion of bovine manure and banana tree leaf: the effect of temperature variability on biogas yield in different proportions of waste. **J Mater Cycles Waste Management**, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01033-2>.

GALLEGOS, D. et al. Effect of particle size reduction and ensiling fermentation on biogas formation and silage quality of wheat straw. **Bioresource Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.137>.

GHATAK, M.D.; GHATAK, A. Artificial neural network model to predict behavior of biogas production curve from mixed lignocellulosic co-substrates. **Fuel**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.051>.

GU, Y.; ZHANG, Y.; ZHOU, X. Effect of Ca(OH)₂ pretreatment on extruded rice straw anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.004>.

HAGOS, K. et al. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and sustainable energy reviews**, 76, 1485-1496, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116309388>.

HOLM-NIELSEN, J.B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource technology**, 100(22), 5478-5484, 2009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408011012>.

IEA, International Energy Agency (2020) Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Accessed 05 January 2023.

IEA, International Energy Agency (2022), Renewables, IEA, Paris, License: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/renewables>. Accessed 06 April 2023.

IRENA, International Renewable Energy Agency (2023) Renewable capacity statistics 2023. ISBN: 978-92-9260-525-4. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf?rev=b357baf054584e589c8ab635140d0596. Accessed 05 April 2023.

ISMAIL, Z.Z.; TALIB, A.R. Recycled medical cotton industry waste as a source of biogas recovery. **Journal of Cleaner Production**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.069>.

IWEKA, S.C. et al. Optimization of biogas yield from anaerobic co-digestion of corn-chaff and cow dung digestate: RSM and python approach. **Heliyon**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08255>.

JANKE, L. et al. Comparison of start-up strategies and process performance during semi-continuous anaerobic digestion of sugarcane filter cake co-digested with bagasse. **Waste Management**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.007>.

JANKE, L. et al. Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. **Energy Conversion and Management**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.083>.

KABEYI MJB, OLANREWaju OA (2022) Biogas production and applications in the sustainable energy transition. **Journal of Energy**. <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>.

KAINTHOLA, J.; KALAMDHAD, A.S.; GOUD, V.V. Enhanced methane production from anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla verticillata and its kinetic analysis. **Biomass and Bioenergy**, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.011>.

KAINTHOLA, J. et al. Enhanced methane potential of rice straw with microwave assisted pretreatment and its kinetic analysis. **Journal of Environmental Management**, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.052>.

KAINTHOLA, J.; KALAMDHAD, A.S.; GOUD, V.V. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. **Process Biochemistry**, 2019c. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.05.023>.

KALAMARAS, S.D.; KOTSOPOULOS, T.A. Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe. **Bioresource Technology**, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.005>.

- KANG, X. et al. The effect of mechanical pretreatment on the anaerobic digestion of *Hybrid Pennisetum*. **Fuel**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.134>.
- KAPOOR, R. et al. Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: a research outlook. **Bioresource Technology**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123036>.
- KARRABI, M. et al. A comprehensive review on biogas production from lignocellulosic wastes through anaerobic digestion: An insight into performance improvement strategies. **Fuel**, 340, 127239, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122040637>.
- KAUR, M. et al. Effect of Chemical Pretreatment of Sugarcane Bagasse on Biogas Production. **Materials Today: Proceedings**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.278>.
- KHALID, M.J. et al. Synergistic effect of alkaline pretreatment and magnetite nanoparticle application on biogas production from rice straw. **Bioresource Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.051>.
- KHAN, M.U. et al. A review of recent advancements in pretreatment techniques of lignocellulosic materials for biogas production: opportunities and limitations. **Chemical Engineering Journal Advances**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100263>.
- KHAN, M.U.; AHRING, B.K. Improving the biogas yield of manure: effect of pretreatment on anaerobic digestion of the recalcitrant fraction of manure. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124427>.
- KIM, J.R.; KARTHIKEYAN, K.G. Effects of severe pretreatment conditions and lignocellulose-derived furan byproducts on anaerobic digestion of dairy manure. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125632>.
- KORAI, R.M.; LI, X. Effect of ultrasonic assisted KOH pretreatment on physiochemical characteristic and anaerobic digestion performance of wheat straw. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.06.022>.
- KOUGIAS, P.G.; ANGELIDAKI, I. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, 12, 1-12, 2018. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11783-018-1037-8>.
- KOVAČIĆ, Đ. et al. Thermal pretreatment of harvest residues and their use in anaerobic co-digestion with dairy cow manure. **Appl Biochem Biotechnol**, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2559-4>.
- KRISHANIA, M.; VIJAY, V.K.; CHANDRA, R. Methane fermentation and kinetics of wheat straw pretreated substrates co-digested with cattle manure in batch assay. **Energy**, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.028>.
- KULLAVANIJAYA, P.; CHAVALPARIT, O. The production of volatile fatty acids from Napier grass via an anaerobic leach bed process: the influence of leachate dilution, inoculum, recirculation, and buffering agent addition. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103458>.

- KUMAR, V. et al. Anaerobic digestion of *Azolla pinnata* biomass grown in integrated industrial effluent for enhanced biogas production and COD reduction: optimization and kinetics studies. **Environmental Technology & Innovation**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100627>.
- KUMAR, S. et al. Weak alkaline treatment of wheat and pearl millet straw for enhanced biogas production and its economic analysis. **Renewable Energy**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.133>.
- LEE, J.T.E. et al. Improving methane yield of oil palm empty fruit bunches by wet oxidation pretreatment: mesophilic and thermophilic anaerobic digestion conditions and the associated global warming potential effects. **Energy Conversion and Management**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113438>.
- LEE, J.T.E. et al. Influence of wet oxidation pretreatment with hydrogen peroxide and addition of clarified manure on anaerobic digestion of oil palm empty fruit bunches. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125033>.
- LIANG, Y. et al. Novel insights from lignocellulosic waste to biogas through regulated dry-wet combined anaerobic digestion: focusing on mining key microbes. **Bioresource Technology**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126778>.
- LIANHUA, L. et al. Effect of bioaugmentation on the microbial community and mono-digestion performance of *Pennisetum hybrid*. **Waste Management**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.031>.
- LU, X. et al. Improved process performance of the acidification phase in a two-stage anaerobic digestion of complex organic waste: effects of an iron oxide-zeolite additive. **Bioresource Technology**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.052>.
- MA, X. et al. Effect of substrate to inoculum ratio on biogas production and microbial community during hemi-solid-state batch anaerobic co-digestion of rape straw and dairy manure. **Appl Biochem Biotechnol**, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03035-9>.
- MAO, C. et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>.
- MASSÉ, D.I.; SAADY, N.M. Dry anaerobic digestion of high solids content dairy manure at high organic loading rates in psychrophilic sequence batch reactor. **Appl Microbiol Biotechnol**, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6516-2>.
- MATHEW, A.K. et al. Biogas production from locally available aquatic weeds of Santiniketan through anaerobic digestion. **Clean Techn Environ Policy**, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0877-6>.
- MCINERNEY, M.J.; BRYANT, M.P. Basic Principles of Bioconversions in Anaerobic Digestion and Methanogenesis. In: Sofer, S.S., Zaborsky, O.R. (eds) **Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels**. Springer, Boston, MA, p 277-296, 1981. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0301-6_15.

MENARDO, S.; CACCIATORE, V.; BALSARI, P. Batch and continuous biogas production arising from feed varying in rice straw volumes following pre-treatment with extrusion. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.104>.

MENDIETA, O. et al. Synergistic effect of sugarcane scum as an accelerant co-substrate on anaerobic co-digestion with agricultural crop residues from non-centrifugal cane sugar agribusiness sector. **Bioresource technology**, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122957>.

MENDIETA, O. et al. Management and valorization of waste from a non-centrifugal cane sugar mill via anaerobic co-digestion: technical and economic potential. **Bioresource Technology**, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123962>.

MNRE, Ministry of New and Renewable Energy government of India (2019) Biogas Technology Development Division, Request for expression of interest for thyrd party evaluation study of NNBOMP, implemented during the 3 year period from 2017-18 to 2019-20. https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2019/11/NNBOMP_compressed-1-6.pdf. Accessed 04 February 2023.

MITTAL, S.; AHLGREN, E.O.; SHUKLA, P.R. Barriers to biogas dissemination in India: a review. **Energy Policy**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.027>.

MUHAMMAD, M.B.; CHANDRA, R.; PAYAL, H. A method for shifting of cattle dung based biogas digester for enhanced anaerobic co-digestion of cattle dung with leaf litter of neem. **Biomass Conv Bioref**, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01166-2>.

MUSTAFA, A.M. et al. Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid-state anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.028>.

NAGARAJAN, S.; RANADE, V.V. Pretreatment of milled and unchopped sugarcane bagasse with vortex based hydrodynamic cavitation for enhanced biogas production. **Bioresource Technology**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127663>.

NGUYEN, D. et al. Intermittent micro-aeration: New strategy to control volatile fatty acid accumulation in high organic loading anaerobic digestion. **Water Research**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115080>.

ÖNER, B.E. et al. Bioaugmentation with *Clostridium thermocellum* to enhance the anaerobic biodegradation of lignocellulosic agricultural residues. **Bioresource Technology**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.040>.

PANEPINTO, D.; GENON, G. Analysis of the extrusion as a pretreatment for the anaerobic digestion process. **Industrial Crops and Products**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.044>.

PARITOSH, V. et al. Simultaneous alkaline treatment of pearl millet straw for enhanced solid state anaerobic digestion: Experimental investigation and energy analysis. **Journal of Cleaner Production**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119798>.

- PARITOSH, K. et al. Enhancing hydrolysis and syntropy simultaneously in solid state anaerobic digestion: Digester performance and techno-economic evaluation. **Bioresource Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125538>.
- POHL, M.; HEEG, K.; MUMME, J. Anaerobic digestion of wheat straw--performance of continuous solid-state digestion. **Bioresource Technology**, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.101>.
- POKÓJ, T. et al. Semi-continuous anaerobic digestion of different silage crops: VFAs formation, methane yield from fiber and non-fiber components and digestate composition. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.060>.
- PRABHU, A.V. et al. Parametric optimization of biogas potential in anaerobic co-digestion of biomass wastes. **Fuel**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119574>.
- PORE, S.D. et al. Meta-omics based analyses of microbiome involved in biomethanation of rice straw in a thermophilic anaerobic bioreactor under optimized conditions. **Bioresource Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.099>.
- QIAO, J.T. et al. Molecular characterization of bacterial and archaeal communities in a full-scale anaerobic reactor treating corn straw. **Bioresource Technology**, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.014>.
- RAJPUT, A.A.; ZESHAN; HASSAN, M. Enhancing biogas production through co-digestion and thermal pretreatment of wheat straw and sunflower meal. **Renewable Energy**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.149>.
- RANI, P.; BANSAL, M.; PATHAK, V.V. Experimental and kinetic studies for improvement of biogas production from KOH pretreated wheat straw. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100283>.
- RANI, P.; PATHAK, V.V.; BANSAL, M. Co-digestion of wheat straw and animal manure pretreated with calcium hydroxide for biomethane production: kinetic study. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100145>.
- RANJBAR, F.M.; KARRABI, M.; SHAHNAVAZ, B. Bioconversion of wheat straw to energy via anaerobic co-digestion with cattle manure in batch-mode bioreactors (experimental investigation and kinetic modeling). **Fuel**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123946>.
- RASI, S. et al. Cascade processing of softwood bark with hot water extraction, pyrolysis and anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121893>.
- REINAUER, T.; HANSEN, U.E. Concurrent changes in latecomer capability-building and learning: firm-level evidence from the Thai biogas industry. **Journal of Cleaner Production**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125783>.
- RIAU, V. et al. Closing nutrient loops in a maize rotation. Catch crops to reduce nutrient leaching and increase biogas production by anaerobic co-digestion with dairy manure. **Waste Management**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.006>.

- RICO, C. et al. Thermophilic anaerobic digestion of the screened solid fraction of dairy manure in a solid-phase percolating reactor system. **Journal of Cleaner Production**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.101>.
- ROJAS-SOSSA, J.P. et al. Effects of ammonia fiber expansion (AFEX) treated corn stover on anaerobic microbes and corresponding digestion performance. **Biomass and Bioenergy**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105263>.
- ROUCHES, E. et al. Solid-state anaerobic digestion of wheat straw: Impact of S/I ratio and pilot-scale fungal pretreatment. **Waste Management**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.006>.
- RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>.
- SAADY, N.M.; MASSÉ, D.I. Psychrophilic anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: a characterization study. **Bioresource Technology**, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.089>.
- SAADY, N.M.C.; MASSÉ, D.I. Impact of organic loading rate on the performance of psychrophilic dry anaerobic digestion of dairy manure and wheat straw: long-term operation. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.065>.
- SAADY, N.M.C.; MASSÉ, D.I. Starting-up low temperature dry anaerobic digestion of cow feces and wheat straw. **Renewable Energy**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.066>.
- SAHA, B.; KALAMDHAD, A.S.; KHWAIRAKPAM, M. Efficiency of electrohydrolysis pretreatment on terrestrial weed (*Parthenium hysterophorus*) to cut down the hydrolysis stage during the anaerobic digestion process and continuous reactor study. **Energy Reports**, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.023>.
- SAHA, B.; KHWAIRAKPAM, M.; KALAMDHAD, A.S. Thermal pre-treatment - a prerequisite for the reduction of hydrolysis stage during anaerobic digestion of *Ageratum conyzoides*. **Materials Science for Energy Technologies**, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.12.002>.
- SAIF, I. et al. Improved digestibility and biogas production from lignocellulosic biomass: biochar addition and microbial response. **Industrial Crops and Products**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113851>.
- SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and bioenergy**, 33(9), 1101-1107, 2009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195340900052X>.
- SAMANI, M.S. et al. Effect of physical and chemical operating parameters on anaerobic digestion of manure and biogas production: A review. **Journal of Environmental Health and Sustainable Development**, 2(1), 235-247, 2017. <https://jehsd.ssu.ac.ir/article-1-77-en.html>.

- SARTO, S.; HILDAYATI, R.; SYAICHURROZI, I. Effect of chemical pretreatment using sulfuric acid on biogas production from water hyacinth and kinetics. **Renewable Energy**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.121>.
- SASAKI, K. et al. Toward the complete utilization of rice straw: Methane fermentation and lignin recovery by a combinational process involving mechanical milling, supporting material and nanofiltration. **Bioresource Technology**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.029>.
- SCHIMPF, U.; SCHULZ, R. Industrial by-products from white-rot fungi production. Part II: application in anaerobic digestion for enzymatic treatment of hay and straw. **Process Biochemistry**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.10.006>.
- SCHROYEN, M. et al. Impact of enzymatic pretreatment on corn stover degradation and biogas production. **Bioresource Technology**, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.030>.
- SCHROYEN, M. et al. Effect of enzymatic pretreatment of various lignocellulosic substrates on production of phenolic compounds and biomethane potential. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.051>.
- ŞENOL, H.; ZENK, H. Determination of the biogas potential in cities with hazelnut production and examination of potential energy savings in Turkey. **Fuel**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117577>.
- ŞENOL, H.; ERŞAN, M.; GÖRGÜN, E. Optimization of temperature and pretreatments for methane yield of hazelnut shells using the response surface methodology. **Fuel**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117585>.
- SHRESTHA, S. et al. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: current status and future perspectives. **Bioresource Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.089>.
- SONG, Z.; ZHANG, C. Anaerobic codigestion of pretreated wheat straw with cattle manure and analysis of the microbial community. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.028>.
- SONWAI, A. et al. Biogas production from high solids digestion of *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoideum*: suitable conditions and microbial communities. **Journal Environ Manage**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113570>.
- SUAISOM, P.; PHOLCHAN, P.; AGGARANGSI, P. Holistic determination of suitable conditions for biogas production from *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum americanum* liquor in anaerobic baffled reactor. **Journal Environ Manage**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.103>.
- SUN, B. et al. Coordinative management of soil resources and agricultural farmland environment for food security and sustainable development in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043233>.

SURENDRA, K.C.; KHANAL, S.K. Effects of crop maturity and size reduction on digestibility and methane yield of dedicated energy crop. **Bioresource Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.055>.

SURENDRA, K.C. et al. Anaerobic digestion of high-yielding tropical energy crops for biomethane production: Effects of crop types, locations and plant parts. **Bioresource Technology**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.062>.

TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part 1: upstream strategies. **Renewable Energy**, 146, 1204-1220, 2020a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119310572#bib3>.

TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part 2: mainstream and downstream strategies. **Renewable Energy**, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.047>.

TAPADIA-MAHESHWARI, S. et al. Illustration of the microbial community selected by optimized process and nutritional parameters resulting in enhanced biomethanation of rice straw without thermo-chemical pretreatment. **Bioresource Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121639>.

THAEMNGOEN, A. et al. Anaerobic digestion of napier grass (*Pennisetum purpureum*) in two-phase dry digestion system versus wet digestion system. **Bioenergy Research**, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10110-1>.

THEUERL, S. et al. The future agricultural biogas plant in Germany: a vision. **Energies**, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12030396>.

TIAN, Y. et al. Biogas properties and enzymatic analysis during anaerobic fermentation of *Phragmites australis* straw and cow dung: influence of nickel chloride supplement. **Biodegradation**, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10532-016-9774-5>.

TRAN, G.V. et al. Simultaneous carbon dioxide reduction and methane generation in biogas for rural household use via anaerobic digestion of wetland grass with cow dung. **Fuel**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123487>.

TSAPEKOS, P. et al. Bioaugmentation with hydrolytic microbes to improve the anaerobic biodegradability of lignocellulosic agricultural residues. **Bioresource Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.043>.

ÜNYAY, H. et al. Effects of organic loading rate on methane production from switchgrass in batch and semi-continuous stirred tank reactor system. **Biomass and Bioenergy**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106306>.

VELUCHAMY, C.; RAJU, V.W.; KALAMDHAD, A.S. Prerequisite - an electrohydrolysis pretreatment for anaerobic digestion of lignocellulose waste material. **Bioresource Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.137>.

VELUCHAMY, C.; RAJU, V.W.; KALAMDHAD, A.S. Electrohydrolysis pretreatment for enhanced methane production from lignocellulose waste pulp and paper mill sludge and its kinetics. **Bioresource Technology**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.093>.

- VOLPI, M.P.C. et al. Operational and biochemical aspects of co-digestion (co-AD) from sugarcane vinasse, filter cake, and deacetylation liquor. **Appl Microbiol Biotechnol**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11635-x>.
- XUE, S. et al. A systematic comparison of biogas development and related policies between China and Europe and corresponding insights. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 117, 109474, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119306823>.
- WALTER, A. et al. Biomethane potential of industrial paper wastes and investigation of the methanogenic communities involved. **Biotechnol Biofuels**, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0435-z>.
- WANG, Z. et al. Evaluation of methane production and energy conversion from corn stalk using furfural wastewater pretreatment for whole slurry anaerobic co-digestion. **Bioresource Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121962>.
- WANG, Y. et al. Improved lignocellulose degradation prior to semi-dry anaerobic digestion of dairy manure via potassium permanganate treatment. **Bioresource Technology Reports**, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100462>
- WANG, H. et al. Establishing practical strategies to run high loading corn stover anaerobic digestion: Methane production performance and microbial responses. **Bioresource Technology**, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123364>.
- WEDWITSCHKA, H. et al. Material characterization and conditioning of cattle feedlot manure as feedstock for dry batch anaerobic digestion. **Waste Management**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.047>.
- WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**. 85, 849-860, 2010. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-009-2246-7>.
- WBA, World Biogas Association (2021) Biogas: Pathways to 2030 - Report March de 2021. <https://www.worldbiogasassociation.org/biogas-pathways-to-2030-report/>. Accessed 03 March 2023.
- WU, D. et al. Thermodynamics of volatile fatty acid degradation during anaerobic digestion under organic overload stress: The potential to better identify process stability. **Water Research**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118187>.
- YADAV, M. et al. Coupled treatment of lignocellulosic agricultural residues for augmented biomethanation. **Journal of Cleaner Production**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.142>.
- YAN, L. et al. Diversity of a mesophilic lignocellulolytic microbial consortium which is useful for enhancement of biogas production. **Bioresource Technology**, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.173>.
- YAN, J. et al. An innovative strategy to enhance the ensiling quality and methane production of excessively wilted wheat straw: Using acetic acid or hetero-fermentative lactic acid

bacterial community as additives. **Waste Management**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.001>.

YAO, Y.; CHEN, S.; KAFLE, G.K. Importance of "weak-base" poplar wastes to process performance and methane yield in solid-state anaerobic digestion. **Journal Environ Manage**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.025>.

ZEALAND, A.M.; ROSKILLY, A.P.; GRAHAM, D.W. Effect of feeding frequency and organic loading rate on biomethane production in the anaerobic digestion of rice straw. **Applied Energy**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.170>.

ZEALAND, A.M. et al. Microbial community composition and diversity in rice straw digestion bioreactors with and without dairy manure. **Appl Microbiol Biotechnol**, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9243-7>.

ZHANG, J. et al. Enhanced methane production by using phyto remediated *Halogeton glomeratus* as substrate via anaerobic digestion. **Renewable Energy**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.058>.

ZHANG, H. et al. Metal speciation distribution of anaerobic fermentation with alfalfa grass harvested from abandoned iron mine and the influence of metals addition. **Process Safety and Environmental Protection**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.034>.

ZHANG, H. et al. Process analysis of anaerobic fermentation of *Phragmites australis* straw and cow dung exposing to elevated chromium (VI) concentrations. **Journal of Environmental Management**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.058>.

ZHANG, Y. et al. A physicochemical method for increasing methane production from rice straw: extrusion combined with alkali pretreatment. **Applied Energy**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.011>.

ZHANG, H. et al. Effect of ferrous chloride on biogas production and enzymatic activities during anaerobic fermentation of cow dung and *Phragmites* straw. **Biodegradation**, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10532-016-9756-7>.

ZHAO, Y. et al. The effect of mixing intensity on the performance and microbial dynamics of a single vertical reactor integrating acidogenic and methanogenic phases in lignocellulosic biomass digestion. **Bioresource Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.080>.

ZHENG, Y. et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>.

ZHONG, Y. et al. Anaerobic co-digestion of energy crop and agricultural wastes to prepare uniform-format cellulosic feedstock for biorefining. **Renewable Energy**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.106>.

CAPÍTULO 2

ESTUDO DO PH E DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM ALTO TEOR DE METANO

Juliana Gomes Barreto Souza Leite¹, Elizama Aguiar-Oliveira², Patrícia Lopes Leal^{1,*}

¹ Instituto Multidisciplinar em Saúde, Universidade Federal da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil

² Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, Brasil

* Endereço para correspondência: (email: lealpat@yahoo.com.br)

Resumo

A biomassa é uma fonte de energia renovável, amplamente disponível e economicamente viável para utilização em processos de digestão anaeróbia para produção de biogás e metano (CH₄). Neste sentido, diversas tecnologias vêm sendo aprimoradas visando o melhor reaproveitamento de resíduos orgânicos, como os provenientes da agroindústria, para geração de energia renovável e também contribuir na minimização dos riscos ambientais causados pela disposição inadequada desses materiais. O objetivo deste trabalho foi definir as melhores condições operacionais para produção de biogás e CH₄, a partir da co-digestão anaeróbia de esterco bovino, manípueira e casca de café. Todos os ensaios apresentaram produção de biogás significativa com pelo menos 80 % de metano. A ferramenta estatística de planejamento experimental possibilitou identificar uma relação inversamente proporcional entre o pH e a temperatura, dentro das condições analisadas para estes fatores. Assim sendo, foi possível definir que a combinação de pH inicial acima de 9,5 e uma temperatura abaixo de 35 °C é capaz de resultar em volume de biogás > 600 cm³ e de CH₄ > 500 cm³. Por exemplo, o melhor desempenho experimental, foi obtido com pH inicial de 10,0 e temperatura de 30 °C, o que resultou em 798,72 cm³ de biogás e 638,98 cm³ de CH₄ acumulados ao final de 15 dias de retenção hidráulica. Estas melhores condições experimentais possibilitaram 58,53 % de remoção da demanda química de oxigênio e um pH final próximo à neutralidade (6,3). Isso representa boas condições de fermentação para bactérias metonogências e confirmam a viabilidade de se empregar a co-digestão dos três resíduos avaliados.

Palavras-chave: Codigestão anaeróbia. Delineamento Composto Central. Energia renovável.

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia cresceu acentuadamente nos últimos anos devido aos impactos ambientais causados pelo uso dos combustíveis fósseis (KABEYI e OLANREWAJU, 2022). O maior percentual da oferta mundial de energia ainda se dá por meio de fontes poluentes e não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural que representavam, ainda em 2019, 85 % do consumo de energia primária, com projeção de aumento de 9 % até 2030 (QADIR et al., 2020; RASHEDI et al., 2020). Políticas públicas têm sido formuladas com objetivo de reduzir o uso de combustível fóssil, melhorar a segurança energética, proteger o meio ambiente e promover o crescimento econômico, incentivando a busca por fontes renováveis energéticas (ALTOÉ et al., 2017)

A energia advinda de biomassa é candidata a ser um dos recursos de energia renovável mais amplamente utilizados devido à garantia de geração contínua e elevada disponibilidade no mundo (FORSTER-CARNEIRO et al., 2013; LISO e MARK, 2020). A cadeia agroindustrial brasileira gera aproximadamente 291 milhões de toneladas de resíduos por ano, e são considerados subprodutos com pouco ou nenhum valor de mercado (SIQUEIRA et al., 2022). Isso inclui os resíduos de confinamento de animais, resíduos de limpeza de grãos, produtos que apodrecem em armazéns, e que, ao final, se tornam passivos ambientais significativos, descartados de forma inadequada, contaminando o solo e a água, e emitindo gases gerados por sua decomposição (PERES et al., 2019).

Um dos maiores problemas, no modelo intensivo de confinamento de bovinos, é a quantidade de dejetos produzidos diariamente numa área reduzida, no Brasil esse período de confinamento é de curta duração, sendo produzido, em média 38,5 kg/dia de esterco por cabeça (SENÉS-GUERRERO et al., 2019). No ano de 2021, o Brasil atingiu o efetivo de 224,6 milhões de cabeças de bovinos, considerando que 6,5 milhões foram bovinos terminados no modelo intensivo de confinamento, com 90 dias, gerando aproximadamente 22,5 milhões de toneladas de esterco bovino (IBGE, 2021; HERRERA et al., 2021). Conseqüentemente, a disposição desses resíduos se torna um desafio para criadores e especialistas, pois envolve aspectos técnicos, sanitários e econômicos (DOTTO e Wolff, 2012).

Além da pecuária, o Brasil é referência mundial na produção de mandioca, cuja produção em 2021, atingiu 18,4 milhões de toneladas (CONAB, 2022a; IBGE, 2022). No que se refere à geração de subprodutos da mandiocultura, destaca-se a farinha de mandioca a partir do processamento da raiz, no qual é gerado uma grande quantidade de resíduo líquido

(manipueira). Este resíduo contém alta concentração de ácido cianídrico (HCN; média de 3.5 mg / L⁻¹), resultante da hidrólise de glicosídeos cianogênicos (HASAN et al., 2015), além de elevada carga orgânica expressa em Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 14.043 - 141.030 mg / L⁻¹ e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) de 1.968 - 44.624 mg / L⁻¹ (COSTA et al., 2022). Tais atribuições à manipueira a tornam extremamente prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente, se não tratado adequadamente ou disposto incorretamente em recursos naturais, como solo e água. Estima-se que para cada tonelada processada de raízes de mandioca são obtidos em média 300 litros de manipueira, este efluente equivale à poluição causada por uma população de 150 para 200 habitantes/dia (PERES et al., 2019).

O Brasil também ocupa lugar de destaque na cafeicultura, é líder na produção de grãos, com estimativa de 53,4 milhões de sacas, para o ano de 2022, o que confere ao país a contribuição de, aproximadamente, um terço da produção mundial (OIC, 2021; CONAB, 2022b). No Brasil, as cerejas de café são, geralmente, processadas pelo método seco e, conseqüentemente, tal beneficiamento dos grãos gera acúmulo de casca do café, que pode alcançar 50% da cereja seca de café obtida. Ou seja, para cada tonelada de grãos de café produzido, uma tonelada de cascas é gerada (DU F et al., 2021). Diferentes utilizações para o uso da casca do café têm sido sugeridas, como ração animal e cobertura do solo (OLIVEIRA e FRANCA, 2015). No entanto, considerando a grande quantidade de resíduos gerados, ainda há a necessidade de buscar melhores alternativas e usos mais rentáveis e viáveis desse resíduo (SANTOS et al., 2018).

Considerando, portanto, que o Brasil é potencial produtor de biomassa aplicável a geração de energia renovável como o biogás, novas rotas tecnológicas vêm sendo propostas a fim de viabilizar o reaproveitamento dos resíduos agroindustriais atrelado à bons rendimentos de biogás produzido. Em relação ao biogás, o potencial teórico de produção brasileiro é de 84,6 bilhões de metros cúbicos (bm³) por ano, o que seria suficiente para suprir 40% da demanda interna de energia elétrica e 70% do consumo de diesel, porém o país explora apenas 3% desse potencial (CIBIOGÁS, 2022). O principal constituinte do biogás é o metano (CH₄, 60 - 70 %) e o dióxido de carbono (CO₂, 30 - 40 %), além de pequenas quantidades de outros gases considerados contaminantes, como: sulfeto de hidrogênio (H₂S) e amônia (NH₃) (RASI et al., 2007). É importante avaliar a combinação de substratos (co-digestão) e os parâmetros dos sistemas para otimização do processo, como temperatura e pH, que podem influenciar na maximização da qualidade (teor de CH₄) e do rendimento de biogás (SARKER et al., 2019).

Para o estudo da combinação de diferentes parâmetros de processo já é conhecida a ferramenta estatística de Planejamento Experimental (RODRIGUES e IEMMA, 2005). A

matriz de Delineamento Composto Central (DCC) é um dos exemplos de aplicação desta ferramenta para se determinar as melhores condições de processo que resultem nos melhores rendimento de metano (DIMA et al., 2020). Por exemplo, o efeito da concentração de esterco suíno (250 gSV) e da proporção polpas residuais de mandioca/água (1:1,22 kg/l) foi otimizada com a aplicação da ferramenta e foi possível alcançar o rendimento máximo de biogás de $7,43 \pm 0,58$ l/kg de polpas residuais de mandioca (JARO et al., 2021). Como também, a co-digestão anaeróbia de *Prosopis juliflora*, aguapé, folhas secas e esterco bovino, em condições de pH (7) e temperatura ($35,5^{\circ}\text{C}$), alcançou produção máxima de $396,0 \pm 6$ L / kg - SV de CH_4 e biodegradabilidade anaeróbia de 76,6 % (PRABHU et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi obter melhores desempenhos da produção de biogás e metano a partir de esterco bovino, casca de café e manipueira, para tanto, foram investigados parâmetros importantes como pH e temperatura com o auxílio da ferramenta estatística de planejamento experimental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Amostras de manipueira foram coletadas em casas de produção de farinha de mandioca, localizadas na microrregião do município de Vitória da Conquista/BA, e transportadas ao laboratório, em recipientes plásticos descontaminados e devidamente vedados. Para garantir a evaporação do HCN (ponto de ebulição $25,6^{\circ}\text{C}$) das amostras de manipueira até sua utilização, foram expostas às condições não controladas de ambiente com incidência solar e circulação de ar, durante o período de 15 dias, em recipiente aberto (BRADBURY et al., 1999), em seguida, foram utilizadas no processo fermentativo.

As amostras de casca de café (*Coffea arabica* L.) foram obtidas de produtores rurais do município de Barra do Choça/BA. A secagem do material foi procedida em incubadora BOD microprocessada BT 62 da marca Biothec[®], a 50°C , até apresentar estabilidade de peso, e posteriormente foi triturado, peneirado e armazenado à temperatura ambiente.

Amostras de esterco bovino foram provenientes de animais experimentais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), confinados e alimentados apenas com forrageiras. A utilização das amostras nos processos de co-digestão anaeróbia ocorreu em sua forma fresca, assim que coletadas com saco plástico estéril.

2.2 MONTAGEM E ABASTECIMENTO DOS BIODIGESTORES DE BANCADA

Biodigestores de bancada foram confeccionados utilizando frascos kitassatos de 250 ml, ligados por meio de mangueiras de silicone aos seus respectivos gasômetros, tipo cúpula flutuante, que consistiram de tubos de PVC (100 e 75 mm) de 20 cm, o tubo interno continha marcações verticais de 1 cm para medição do biogás e comportava volume máximo de 880 cm³ de biogás (Figura 1). Os biodigestores foram operados em batelada, o volume da carga orgânica foi definido como 43,3 ml de cada resíduo (casca de café, manipueira e esterco bovino) para 40 ml de água destilada (LEITE et al., 2020). Medidor de pH de Bancada (Microprocessado) MPA - 210 foi utilizado para o ajuste do pH com solução hidróxido de sódio (NaOH) 10 M. Os biodigestores foram mantidos em BOD para o controle da temperatura, pelo tempo de retenção hidráulica (TRH) de 15 dias.



Figura 1- Biodigestores de bancada confeccionados utilizando frascos kitassatos de 250 mL, ligados por meio de mangueiras de silicone aos seus respectivos gasômetros.

2.3 ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSO

O delineamento composto central (DCC) 2² com 4 experimentos em condições variadas e a triplicata dos pontos centrais, totalizando 7 experimentos, foi realizado para avaliar a influência do pH e da temperatura (T, °C) na produção de biogás (cm³) e gás metano (CH₄, cm³), com objetivo de estudar as melhores condições fermentativas. As variáveis pH

inicial (pH) e temperatura (T) foram avaliadas no maior nível codificado (+1) como: 10,0 e 50 °C e no menor nível codificado (-1) como: 8,0 e 30 °C, respectivamente.

As respostas avaliadas foram a produção de biogás (cm³) e de metano (cm³). De posse dos valores obtidos, foi realizada a Análise de Coeficientes com 85 % de confiabilidade, com a finalidade de se abranger maior número de coeficientes significativos do modelo (RODRIGUES e IEMMA, 2005). Em sequência foi realizada, para o modelo simplificado, a análise da variância (ANOVA) com 95 % de confiabilidade e as Curvas de Contorno foram geradas para se auxiliar na determinação das melhores condições de processo (RODRIGUES e IEMMA, 2005). As análises e as curvas de contorno foram feitas utilizando o software Statistica[®] v. 10.0.

2.4 QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DO BIOGÁS

O biogás foi quantificado no tempo zero (primeiro dia de incubação) e posteriormente, em intervalos de 48 h, ao longo de 15 dias foi medido por meio de um sistema de deslocamento de água (Figura 1). Os valores obtidos foram transformados para cm³ de acordo com as condições normais de temperatura e pressão (CNTP), utilizando a pressão local do município de Vitória da Conquista- BA (763,56 mmHg) (Equação 01) (BARANA e CEREDA, 2000). Para avaliar a qualidade do biogás produzido, as concentrações de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e amônia (NH₃) foram quantificadas, utilizando o kit de análise de biogás da Alfakit[®], de acordo com as recomendações do fabricante.

$$\frac{P_0 \times V_0}{T_0} = \frac{P_1 \times V_1 \times F}{T_1}$$

Equação (01)

Onde: P₀- pressão na CNTP, V₀- volume na CNTP, T₀- temperatura na CNTP, P₁- pressão local de Vitória da Conquista- BA, V₁- volume medido, T₁- temperatura medida, F- fator de correção de umidade.

2.5 ANÁLISE DO EFLUENTE

Foi realizada análise da demanda química de oxigênio (DQO) do digestato, ao final de 15 dias de retenção hidráulica (TRH), para quantificação da eficiência de remoção da matéria orgânica (Equação 02) e o pH foi medido.

$$\text{Remoção (\%)} = \frac{DQO_j - DQO_f}{DQO_f} \times 100$$

Equação (02)

Para análise da DQO foi utilizado o kit da Alfakit[®], segundo as instruções do fabricante. A amostra foi filtrada e posteriormente colocada em tubos de ensaio junto com o dicromato de potássio (1,5 ml) e o ácido sulfúrico (2,5 ml), com auxílio do bloco digestor microprocessado AT 509, a temperatura foi elevada a 150 °C por duas horas. A quantidade de matéria orgânica susceptível a ser oxidada foi quantificada com auxílio do biofoto microprocessado a 600 nm.

3 RESULTADOS

O processo de co-digestão foi conduzido de acordo com os parâmetros observados na Tabela 1. A partir da matriz DCC 2², é possível observar que todos os ensaios permitiram a produção de biogás com, pelo menos, 80% de CH₄. Dentre os resultados obtidos (Tabela 1), o ensaio 3 (pH = 10 e 30 °C) foi o que apresentou maior desempenho quanto à produção de biogás (798,72 cm³) e CH₄ (638,98 cm³). O ensaio 2 obteve a segunda maior produção de biogás, com apenas 27,57 % de biogás e 23,05 % de CH₄ a menos que o ensaio 3, em condições diferentes de pH (8) e temperatura (50 °C). Já a menor produção de biogás e CH₄, 82,05 % de biogás e 80,92 % de CH₄ a menos que o ensaio 3, foi obtida com as condições do ensaio 1, que tinha a mesma condição de pH inicial do ensaio 2 em combinação com a mesma temperatura do ensaio 3. Os pontos centrais (Tabela 1) apresentaram valor médio de 341,33 ± 9,65, o que indicou um bom desvio entre as triplicatas.

Tabela 1- Matriz codificada DCC 2² para os fatores pH (pH) e temperatura (T, °C), e para as respostas volume de biogás produzido (cm³) e metano (CH₄, cm³) quantificado ao longo de 15 dias de TRH. Os valores reais de cada fator são apresentados entre parênteses.

Ensaio	Fatores		Respostas	
	pH	T (°C)	Biogás (cm ³)	CH ₄ (cm ³)
1	-1 (8)	-1 (30)	143,36	121,86
2	-1 (8)	+1 (50)	578,45	491,68
3	+1 (10)	-1 (30)	798,72	638,98
4	+1 (10)	+1 (50)	327,68	286,72
5 (C)	0 (9)	0 (40)	327,68	278,53
6 (C)	0 (9)	0 (40)	348,16	295,94
7 (C)	0 (9)	0 (40)	348,16	295,94

A Análise dos Coeficientes para o ajuste de um modelo quadrático para cada resposta avaliada foi realizada conforme demonstrado na Tabela 2 para a seleção dos coeficientes do modelo que fossem estatisticamente significativos ($p < 0.15$).

Tabela 2- Análise dos Coeficientes estatisticamente significativos para as respostas biogás e metano (CH₄) considerando os fatores pH inicial e temperatura.

Biogás (cm³)				
Variáveis	Efeito	Erro puro	t- valor	p- valor
Média	410,316	34,684	11,830	*0,001
pH	101,148	45,882	2,204	*0,115
Temperatura (T)	- 8,988	45,882	-0,196	0,857
pH e T	- 226,533	45,882	-4,937	*0,016
CH₄ (cm³)				
Média	344,236	27,227	12,643	*0,001
pH	78,040	36,018	2,166	*0,119
Temperatura (T)	4,390	36,018	0,121	0,911
pH e T	-180,520	36,018	- 5,011	*0,015

* valores estatisticamente significativos (p < 0.15)

Em seguida, obteve-se os modelos simplificados para as respostas biogás (Equação 03) e metano (Equação 04) com R² de 0,9059 e 0,9082, respectivamente. Estes valores de R² não são ideais, porém ressalta-se que a co-digestão é um processo complexo e que pode naturalmente apresentar variabilidade, tanto na sua execução quanto nas metodologias analíticas aplicadas, no entanto, isso não diminui a importância dos dados obtidos. Além disso, como foi realizada uma quantidade menor de ensaios experimentais (característica da ferramenta estatística), é mais interessante reduzir o rigor da análise estatística de forma a não se desperdiçar dados e ser possível obter uma visão mais realista do sistema em análise.

$$Y\%_{Biogas} = 410,316 + 101,148 (pH) - 226,533 (pH).(T)$$

Equação (03)

$$Y\%_{Metano} = 344,236 + 78,040 (pH) - 180,520 (pH).(T)$$

Equação (04)

A realização da ANOVA (Tabela 3) indicou, tanto para a resposta biogás quanto para o metano, que ambos os termos Regressão e Falta de Ajuste foram estatisticamente significativos. Isso significa que os modelos simplificados (Eqs. 3 e 4) são capazes de descrever as respostas, porém, apresentam baixa capacidade de predição ao comparar valores teóricos com experimentais (o que já foi indicado pelos valores de R²). Neste caso, optou-se por realizar uma análise das Curva de Contorno gerada em comparação com os experimentos realizados (Tabela 1), de forma a se definir boas condições para a co-digestão anaeróbia de esterco bovino, manipueira e casca de café.

Tabela 3- Análise de variância (ANOVA) para os modelos matemáticos simplificados obtidos para as respostas produção de biogás e de metano (CH₄)

Biogás (cm³)						
	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F_{Cal}	F_{Tab}	p- valor
Regressão	246191,2	2	123095,6	19,245	6,944	*0,00886
Resíduo	25585,2	4	6396,3			
Falta de ajuste	25305,6	2	12652,8	90,506	19,000	*0,01088
Erro puro	279,6	2	139,8			
Total	271776,4	6				
CH₄ (cm³)						
Regressão	154710,8	2	77355,4	19,778	6,944	*0,00843
Resíduo	15644,4	4	3911,1			
Falta de ajuste	15442,3	2	7721,15	76,409	19,000	*0,01292
Erro puro	202,1	2	101,05			
Total	170355,2	6				

* valores estatisticamente significativos (p < 0,05)

As Curvas de Contorno (Figura 2) obtidas não indicam condições de otimização das duas respostas avaliadas mas fornecem dados importantes sobre os fatores. De forma geral, observa-se tanto para a resposta biogás (Figura 2a) quanto para metano (Figura 2b) que as regiões em cor vermelho indicam as combinações de pH e T que resultam nas maiores respostas, ou seja, nas duas regiões extremas com combinação de maior T e menor pH e de menor T e maior pH. Estes resultados são um reflexo do comportamento observado pelos valores experimentais dos ensaios 2 e 3, com condições dos fatores em níveis opostos (Tabela 2), como mencionado anteriormente. De forma geral, considerando os valores experimentais selecionados para os fatores pH e T, as Curvas de Contorno sugerem a obtenção de volumes de biogás acima de 600 cm³ e de metano acima de 500 cm³ nas condições em torno de pH = 8,0 e 50 °C (próximo ao ensaio 2) e em torno de pH = 9,5 – 10,0 e T = 35 – 40 °C (próximo ao ensaio 3). Dentre estas duas áreas de melhores respostas, destaca-se o ensaio 3 como mencionado anteriormente.

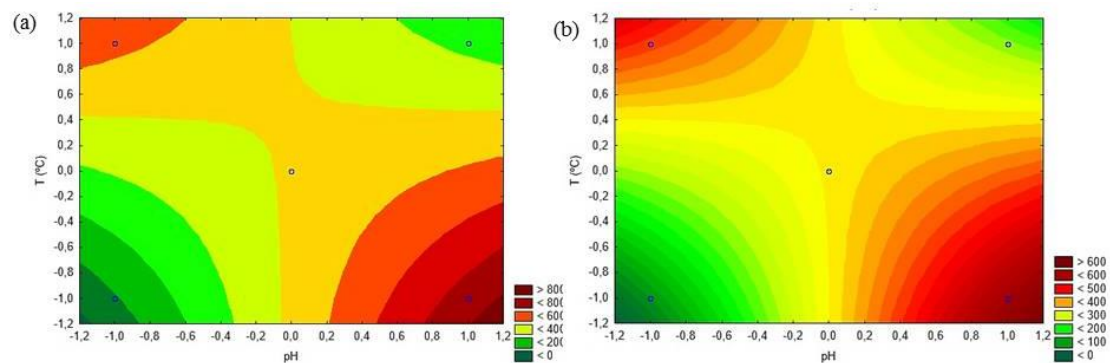


Figura 2- Curvas de Contorno considerando a interação entre os fatores pH (pH) e temperatura (T, °C) para a produção (cm³) de biogás (a) e metano (b).

O biogás quantificado, ao longo de 15 dias de biodigestão, está representado na Fig. 3, na qual pode-se observar um pico de produção (614,41 cm³) para o ensaio 3, no 3º dia. A partir do 5º dia, notou-se diminuição do volume de biogás acumulado (122,89 cm³) seguido de aumento de biogás produzido (184,33 cm³), ao 9º dia. Após esse período, os valores de biogás se mantiveram estáveis até o final do processo de biodigestão (Figura 3). O ensaio 2, que apesar de ter alcançado a segunda melhor produção de biogás, não manteve o acúmulo ao longo dos 15 dias, com declínio de produção depois do 3º dia. O ensaio 4 demonstrou comportamento semelhante aos pontos centrais do delineamento (5, 6 e 7), com aumento da produção de biogás nos primeiros 7 dias e posterior declínio. O ensaio 1 apresentou aumento da produção de biogás até o 3º dia (143,36 cm³), com posterior diminuição do biogás acumulado no 9º dia (20,48 cm³) que se manteve até o término do 15º dia.

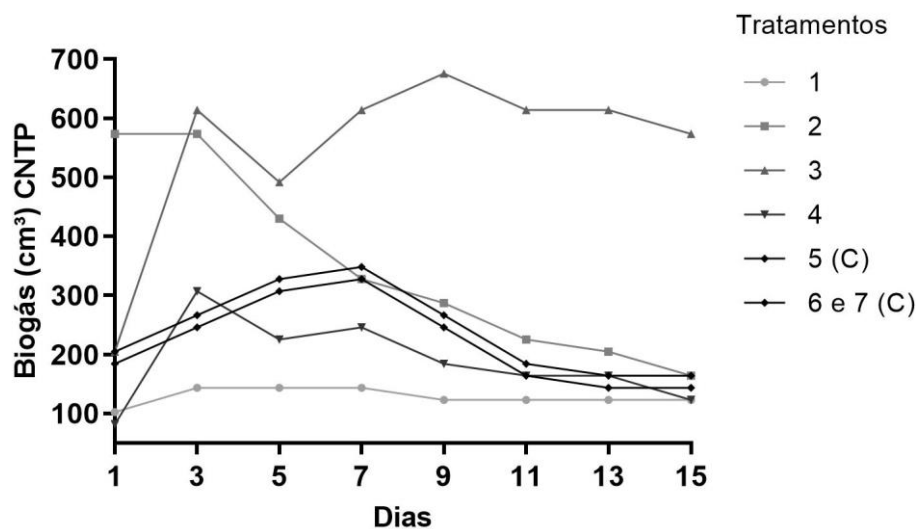


Figura 3- Média de produção acumulada de biogás obtidos em biodigestores operados com esterco bovino, maniepeira e casca de café, durante 15 dias de TRH.

Após 15 dias de biodigestão, foi avaliada a concentração de amônia (NH₃) na composição do biogás (Tabela 4). Observou-se que o ensaio 2 apresentou maior concentração de NH₃ (85 ppmV), todos os demais ensaios apresentaram a concentração de 15 ppmV. O digestato (material remanescente da biodigestão) foi avaliado quanto a porcentagem de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) e pH final (Tabela 4). A Correlação de Pearson entre as variáveis (remoção de DQO e pH final), com a produção de biogás, foram significativas ($p < 0,05$) e positivas ($r = 0,97$ e $0,99$, respectivamente). O 3º ensaio que obteve melhor desempenho experimental apresentou 58,53 % de remoção da DQO com pH = 6,3. A porcentagem de remoção de DQO foi diretamente proporcional a produção de biogás de todos os ensaios, ou seja, com o aumento da quantidade de remoção de DQO a quantidade de gás produzido no sistema também aumentou. A eficiência de remoção da DQO foi menor que 60 % para todos os ensaios, provavelmente pela difícil biodegradabilidade dos substratos utilizados, ricos em lignocelulose. O pH final mais ácido (4,8) é observado no ensaio 1 que obteve menor produção de biogás e CH₄.

Tabela 4- Características físico-químicas do digestato (DQO e pH) e do biogás (NH₃) ao completar 15 dias de retenção hidráulica (TRH) da co-digestão de esterco bovino, manipueira e casca de café em iguais proporções, com variações da temperatura e do pH inicial

Ensaio	Digestato		pH	Biogás
	DQO			NH ₃ (ppmV)
	Final	Remoção* (%)		
1	249,82	19,83	4.8	15
2	170,37	45,33	5.9	85
3	129,22	58,53	6.3	15
4	212,14	31,92	5.3	15
5 (C)	224,67	27,90	5.3	15
6 (C)	195,51	37,26	5.5	15
7 (C)	195,51	37,26	5.5	15

*Baseado na DQO inicial de 311,61 mgL⁻¹O₂ para todos os ensaios, antes do pH inicial ser ajustado.

4 DISCUSSÃO

A tecnologia de biogás apresenta vários benefícios ambientais, econômicos e sociais. Por meio da digestão anaeróbia é possível tratar e reutilizar vários resíduos orgânicos, diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE), de odores e potenciais patógenos (KASINATH et al., 2021). O biogás pode ser distribuído através da infraestrutura de gás natural existente e usado nas mesmas aplicações que o gás natural. Além da utilização para eletricidade renovável e produção de calor, o biogás pode substituir os combustíveis fósseis no setor de transporte (HOLM-NIELSEN et al., 2009).

Considerada a importância do biogás e do CH₄, o presente trabalho alcançou a produção de forma eficiente ao final de 15 dias de TRH, quando comparado a outros estudos envolvendo monodigestão e codigestão de esterco bovino, manipueira e resíduos de café. A monodigestão de esterco bovino (250 mL) em temperatura ambiente (25 - 35 °C) com 30 dias de TRH produziu 625 cm³ de biogás (NASIR et al., 2015). Já a monodigestão da manipueira não produziu biogás, somente quando co-digerida com 25% de esterco bovino, obteve 446 e 1929,6 cm³ de biogás em 15 e 30 dias de TRH, respectivamente (MADEIRA et al., 2020). Polpa de café, pré-tratada com NaOH, e esterco de vaca (1: 3) foram co-digeridos por 90 h de TRH, em pH = 8 e 40 °C de temperatura, alcançou a produção de 144 mL/kg de CH₄ (SELVANKUMAR et al., 2017). Neste presente trabalho, a co-digestão de manipueira, esterco bovino e casca de café associada à ferramenta de planejamento experimental (DCC), possibilitou definir as melhores condições operacionais como pH inicial de 10,0 e temperatura de 30 °C, o que resultou em uma produção de biogás de 798,72 cm³ e CH₄ de 638,98 cm³, o que equivale a, respectivamente, 7975,07 mL/kg e 5900,09 mL/kg (considerando a massa de resíduos totais utilizados com a adição de manipueira).

A definição das melhores condições de processo (fermentação) para produção de biogás é crucial e envolve uma série de parâmetros físico-químicos, como pH e temperatura, que são parâmetros importantes para garantir o metabolismo de diferentes espécies bacterianas em condições satisfatórias (GUENDOUZ et al., 2021). O pH é importante na fase de hidrólise da DA, principalmente para substratos em que a acidificação ocorre facilmente no início da digestão como a manipueira (ZHAI et al., 2015; MADEIRA et al., 2020; DU N et al., 2021). Estudos relatam inibição da atividade microbiana e da produção de ácidos graxos voláteis (AGV) em pH ≤ 4, afetando a eficiência da produção de biogás e CH₄ (MA et al., 2013; FENG et al., 2018; WANG et al., 2021). A faixa ideal de pH no processo de DA é de 6-8, ou seja, valores abaixo daqueles registrado no presente trabalho (pH 8, 9 e 10) (YANG et al., 2015). A faixa de pH para produção de biogás é relativamente ampla e o valor de pH inicial varia de acordo com o substrato utilizado e com as técnicas de biodigestão (ZHAI et al., 2015).

O controle da temperatura é fundamental para a eficiência da digestão anaeróbia, influencia na quantidade e na qualidade do biogás produzido, quanto ao teor de metano (DOBRE et al., 2014). A faixa de temperatura utilizada neste estudo (30, 40 e 50 °C), é geralmente aplicada no processo de digestão anaeróbia, por apresentar um bom desempenho operacional (RISBERG et al., 2013). Um estudo foi realizado com casca, polpa e mucilagem de café em diferentes temperaturas de fermentação (21, 30 e 37 °C) e foi observado que

apesar da produção de CH₄ ter ocorrido rapidamente à 37 °C, o rendimento de CH₄ foi praticamente igual para a fermentação à 30 e 37°C, ambas temperaturas mesofílicas (CHALA et al., 2019). Apesar da maioria dos biodigestores serem operados em temperatura mesofílica a transição para temperatura termofílica pode ser promissora por encurtar o tempo de biodigestão e aumentar a degradação de resíduos lignocelulósicos (YANG et al., 2015), além de promover maiores taxas de degradação, também é relatado maiores rendimentos de metano e maior inativação de patógenos (RISBERG et al., 2013). Contudo, deve ser avaliada, por também estar relacionada com aumento de ácidos graxos voláteis (AGV) e diminuição do pH, podendo causar inibição da produção de biogás (YANG et al., 2015).

5 CONCLUSÃO

Os resíduos agroindustriais são uma importante fonte de energia renovável, considerando, sua ampla disponibilidade no Brasil e em todo o mundo. Apresentam um grande potencial de produção de biogás e metano, quando utilizados em processo de digestão anaeróbia. Este estudo mostrou que é possível obter uma operação estável dos substratos (casca de café, manipueira e esterco bovino), quando submetidos à Codigestão anaeróbia em diferentes parâmetros operacionais de pH e temperatura. Obteve-se produção de biogás e metano de forma eficiente em menos de 15 dias de retenção hidráulica, dado à característica lignocelulósica da casca de café, que foi apenas triturada. Esses resultados demonstram, que os resíduos utilizados são viáveis e promissores para produção de bionergia. Novos estudos podem ser desenvolvidos visando o aumento da produção, em escala piloto, e o estudo da influência de outros fatores operacionais.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coodenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (Fapesb).

7 REFERÊNCIAS

ALTOÉ, L. et al. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. *Estudos Avançados*, 31, 285-297, 2017 DOI: <https://www.scielo.br/j/ea/a/vPxbFKL9Jvwwg559c6cgCZWp/abstract/?lang=pt>

- BARANA, A.C.; CEREDA, M.P. "Cassava wastewater (manipueira) treatment using a two-phase anaerobic biodigestor." **Food Science and Technology** 20: 183-186, 2000. DOI: <https://www.scielo.br/j/cta/a/ZkzxB4d4zBmgxvKSSmRrb/abstract/?lang=en>
- BRADBURY, M.G.; EGAN, S.V.; BRADBURY, J.H. Picrate paper kits for determination of total cyanogens in cassava roots and all forms of cyanogens in cassava products. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 79, n. 4, p. 593-601, 1999. DOI: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(19990315\)79:4%3C593::AID-JSFA222%3E3.0.CO;2-2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1097-0010(19990315)79:4%3C593::AID-JSFA222%3E3.0.CO;2-2)
- CHALA, B.; OECHSNER H.; MÜLLER, J. Introducing temperature as variable parameter into kinetic models for anaerobic fermentation of coffee husk, pulp and mucilage. **Applied Sciences**, 9(3), 412, 2019. DOI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/3/412>
- CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. Panorama do Biogás no Brasil. Relatório Técnico nº 001/2022, 2022. <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>. Accessed 06 March 2023.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento (2022a) Análise mensal mandioca, abril de 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-mandioca/item/19296-mandioca-analise-mensal-setembro-2022>>. Acesso 18 novembro 2022.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento (2022b) Safra brasileira de café. Tabela de dados estimativas da produção e colheita, maio de 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafes>>. Acesso 20 maio 2022.
- COSTA, R.C. et al. Critical analysis and predictive models using the physicochemical characteristics of cassava processing wastewater generated in Brazil. **Journal of Water Process Engineering**, 47, 102629, 2022. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714422000721>
- DIMA, A.D. et al. Optimization of substrate composition in anaerobic co-digestion of agricultural waste using central composite design. **Biomass and Bioenergy**, 138, 105602, 2020. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953420301367>
- DOBRE, P.; NICOLAE, F.; MATEI, F. Main factors affecting biogas production-an overview. **Romanian Biotechnological Letters**, 19(3), 9283-9296, 2014. DOI: http://rombio.eu/vol19nr3/lucr%201_Dobre%20Paul_Main%20factors%20affecting%20biogas%20production_revistaRBL_2014%20_1_.pdf
- DOTTO, R.B.; WOLFF, D.B. "Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos." **Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas** 13.1 13-26, 2012. DOI: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/1291>
- DU, F. et al. Maximizing the value of Korshinsk peashrub branches by the integration of *Pleurotus tuoliensis* cultivation and anaerobic digestion of spent mushroom substrate, 2021. **Renewable Energy**. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.053>.
- DU, N. et al. Study on the biogas potential of anaerobic digestion of coffee husks wastes in Ethiopia. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 2, p. 291-301, 2021.
- FENG, K.; LI, H.; ZHENG, C. Shifting product spectrum by pH adjustment during long-term continuous anaerobic fermentation of food waste. **Bioresource technology**, v. 270, p. 180-188, 2018. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418312884>
- Forster-Carneiro, T. et al. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, 77, 78-88, 2013. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001262>

- GUENDOUZ, N. et al. Evaluation of the biogas potential of a lignocellulosic residue. **Water Science and Technology**, 84(8), 1827-1838, 2021. DOI: <https://iwaponline.com/wst/article/84/8/1827/83976/Evaluation-of-the-biogas-potential-of-a>
- HASAN, S.D.M. et al. Volatile fatty acids production from anaerobic treatment of cassava waste water: effect of temperature and alkalinity. **Environmental technology**, 36(20), 2637-2646, 2015. DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2015.1041426>
- HERRERA, A.M. et al. Carbon footprint analysis of bioenergy production from cattle manure in the Brazilian central-west. **BioEnergy Research**, 14, 1265-1276, 2021. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-020-10216-6>
- HOLM-NIELSEN, J.B.; AL, S.T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource technology**, 100(22), 5478-5484, 2009. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408011012>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (2021). Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Pesquisa da Pecuária Municipal 2021. Disponível em : <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em 16/11/2022
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (2022). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), Tabela 2 - Área, Produção e Rendimento Médio - Confronto das safras de 2021 e das estimativas para 2022. Disponível em : <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=resultados>. Acesso em 18/11/2022.
- JARO, R.H. et al. Biogas production from waste pulps of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) via anaerobic digestion. **Energy, Ecology and Environment**, 6(3), 204-212, 2021. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40974-020-00182-2>
- KABEYI, M.J.B.; OLANREWAJU, O.A. Biogas production and applications in the sustainable energy transition. **Journal of Energy**, 2022. DOI: <https://www.hindawi.com/journals/jen/2022/8750221/>
- KASINATH, A. et al. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 150, 111509, 2021. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121007887>
- LEITE, J.G.B.S.; OLIVEIRA, E.A.; LEAL, P.L. Valorização de resíduos agroindustriais para produção de biogás.. In: Anais online do 1º simpósio nacional sobre inovação em engenharia e ciência de alimentos - INECA2020. Anais. Itapetinga(BA) Canal INECA 2020 (YouTube), 2020. Disponível em: < <https://www.even3.com.br/anais/ineca2020/286386-valorizacao-de-residuos-agroindustriais-para-producao-de-biogas/> >. Acesso em: 05/07/2022 18:57
- LISOWYJ, M.; MARK, M.W. "A review of biogas and an assessment of its economic impact and future role as a renewable energy source." **Reviews in Chemical Engineering** 36.3 (2020): 401-421. DOI: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/revce-2017-0103/html>
- MA, J. et al. A simple methodology for rate-limiting step determination for anaerobic digestion of complex substrates and effect of microbial community ratio. **Bioresource technology**, 134, 391-395, 2013. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413002289>
- MADEIRA, J.G.F. et al. Optimum Co-Digestion Ratio of Cattle Manure and Manipueira in a Single-Stage Anaerobic Digester for Biogas Production. **CLEAN–Soil, Air, Water**, 48(12), 2000096, 2020. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/clen.202000096>
- NASIR, A. et al. Experimental Investigation on the effects of digester size on biogas production from cow dung, 2015. DOI: <http://repository.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/3592>
- OIC, Organização Internacional do Café (2021). Relatório sobre o mercado de café, out. 2021. Disponível em:

http://www.consorcioquesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/dezembro/relatorio_oic_outubro_2021.pdf. Acesso em 25 maio 2022

OLIVEIRA, L.S.; FRANCA, A.S. An overview of the potential uses for coffee husks. Coffee in health and disease prevention, 283-291, 2015. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095175000310>

PERES, S. et al. Anaerobic digestion process for the production of biogas from cassava and sewage treatment plant sludge in Brazil. **BioEnergy Research**, 12, 150-157, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9942-z>

PRABHU, A.V. et al. Parametric optimization of biogas potential in anaerobic co-digestion of biomass wastes. **Fuel**, 288, 119574, 2021. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120325709>

QADIR, S.A.; TAHIR, F.; AL-FAGIH, L. Impact of fossil fuel subsidies on renewable energy sector. In 12th Int. Exergy, Energy Environ. Symp.(IEEEES-12), Doha, Qatar, 2020.

RASHEDI, A.; KHANAM, T.; JONKMAN, M. On reduced consumption of fossil fuels in 2020 and its consequences in global environment and exergy demand. **Energies**, 13(22), 6048, 2020. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/22/6048>

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**, 32(8), 1375-1380, 2007. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206003033>

RISBERG, K. et al. Biogas production from wheat straw and manure—impact of pretreatment and process operating parameters. **Bioresource Technology**, 149, 232-237, 2013. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413014855>

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos, 2005. DOI: <https://repositorio.usp.br/item/001692759>

SANTOS, L.C. et al. Production of biogas (methane and hydrogen) from anaerobic digestion of hemicellulosic hydrolysate generated in the oxidative pretreatment of coffee husks. **Bioresource Technology**, 263, 601-612, 2018. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418306977>

SARKER, S. et al. A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants. **Applied Sciences**, 9 (9), 1915, 2019. DOI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1915>

SELVANKUMAR, T. et al. Process optimization of biogas energy production from cow dung with alkali pre-treated coffee pulp. **3 Biotech**, 7, 1-8, 2017. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-017-0884-5>

SENÉS-GUERRERO, C. et al. "Biogas-producing microbial composition of an anaerobic digester and associated bovine residues." **MicrobiologyOpen** 8.9, 2019: e00854.

SIQUEIRA, M.U. et al. Brazilian agro-industrial wastes as potential textile and other raw materials: a sustainable approach. **Materials Circular Economy**, 4(1), 9, 2022. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42824-021-00050-2>

WANG, R. et al. Novel strategy for enhancing acetic and formic acids generation in acidogenesis of anaerobic digestion via targeted adjusting environmental niches. **Water research**, 193, 116896, 2021. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135421000944>

YANG, L. et al. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 44, 824-834, 2015. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500012X>

ZHAI, N. et al. Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. **Waste management**, 38, 126-131, 2015. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15000082>

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biogás por meio da tecnologia de digestão anaeróbia é uma alternativa madura, eficiente e barata para produção de energia renovável, considerando a alta disponibilidade de matéria-prima, como os resíduos agrícolas, industriais e municipais. Países em todo o mundo tem incentivado pesquisas de otimização, produção e utilização do biogás como fonte de energia elétrica, calor e combustível. O biogás é uma fonte de energia limpa, inesgotável e cada vez mais competitiva com os combustíveis fósseis, que apesar de serem a principal fonte energética no mundo, são os principais emissores de gases de efeito estufa (GEE). Além de ser uma fonte de bioenergia, o biogás também é uma alternativa adequada para a gestão de resíduos orgânicos, que representam bilhões de toneladas por ano, e podem ser aproveitados e transformados em um produto de valor agregado. A produção de biogás, portanto, apresenta elevado potencial de crescimento e é uma alternativa para sanar os impactos ambientais causados pela utilização desenfreada dos combustíveis fósseis. Diante, disso, torna-se importante estudos que possibilitem uma visão panorâmica dos avanços tecnológicos envolvendo a utilização de resíduos para produção de biogás e metano, como também, a realização de pesquisas que objetivem sua otimização, visto que, vários fatores podem interferir no processo de digestão anaeróbia.