

Revisão sistemática da produção de biogás a partir da co-digestão com macrófitas aquáticas utilizando o Methodi Ordinatio

Vianca Vanessa Benavides Ramos¹

Aluna, Universidade Federal de Integração Latinoamericana- UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil

Andréia Cristina Furtado²

Professora, Universidade Federal de Integração Latinoamericana- UNILA, Foz de Iguaçu, Brasil

Abstrac

In recent years, there has been a significant increase in the search for new energy sources due to industrialization and substantial population growth. To reduce the predominant role that fossil fuels have played in global consumption, several renewable energy sources have emerged to diversify the energy matrix, including sources generated from biomass, such as biogas, which involves the coordinated action of specialized microorganisms. in the degradation of a variety of organic substrates. Within this context, an assessment of the development of global primary research on biogas production from anaerobic co-digestion (AD) of macrophytes was proposed, using the Methodi Ordinatio research methodology for the selection of the PB bibliometric portfolio of articles from scientific relevance. Initially, 1285 scientific articles were selected to compose the raw database (BDB). Subsequently, the BDB articles were filtered and processed to be systematically analyzed. At this stage, 240 articles remained in a filtered data portfolio (PDF). For these selected articles, the most relevant articles referring to the main macrophytes used as co-substrate for biogas production were evaluated, being: *Eichornnia Crassipes* (EC), *Egeria Densa* (ED), *Hydrilla Verticillata* (HV), *Salvinia Molesta* (SM), resulting in EC being the macrophyte most studied by researchers. 21 articles were evaluated for analysis, through studies of the main mathematical modeling for system simulation, operational parameters, composition of the medium (macrophyte, inoculum, among others), and substrate pre-treatments. The results indicate that the use of aquatic plant biomass as a substrate for biogas production offers significant advantages in co-digestion, however it faces challenges in its production. It is essential to develop sustainable methods to convert this biomass into valuable products, through new technologies and pre-treatments to optimize the efficiency of biogas production.

Keywords: biogas, co-digestion, aquatic weed, energy efficiency

Resumo

Nos últimos anos, tem havido um aumento significativo na busca por novas fontes de energia devido à industrialização e ao substancial crescimento da população. Para diminuir o papel predominante que os combustíveis fósseis têm desempenhado no consumo global, diversas fontes de energias renováveis têm surgido para diversificar a matriz energética, entre essas estão as fontes geradas a partir da biomassa, como o biogás que envolve a ação coordenada de microrganismos especializados na degradação de uma variedade de substratos orgânicos. Dentro deste contexto, foi proposta uma avaliação do desenvolvimento da pesquisa global primária sobre a produção de biogás a partir da co-

¹ Emai: vianca.ramos@aluno.unila.edu.br (V.V. Benavides)

² Email: andrea.furtado@unila.edu.br (A.C. Furtado)

digestão anaeróbia (DA) de macrófitas, utilizando a metodologia de pesquisa *Methodi Ordinatio* para a seleção do portfólio bibliométrico PB, de artigos de relevância científica. Inicialmente, 1285 artigos científicos foram selecionados para compor o banco de dados brutos (BDB). Posteriormente, os artigos do BDB foram filtrados e tratados para serem analisados sistematicamente. Nesta etapa, restaram 240 artigos em um portfólio de dados filtrados (PDF). Para esses artigos selecionados, avaliou-se os artigos mais relevantes referentes às principais macrófitas usadas como co-substrato para a produção de biogás, sendo: *Eichornia Crassipes* (EC), *Egeria Densa* (ED), *Hydrilla Verticillata* (HV), *Salvinia Molesta* (SM), resultando a EC a macrófita mais estudada pelos pesquisadores. Foram avaliados 21 artigos para serem analisados, mediante os estudos das principais modelagens matemáticas para simulação de sistemas, parâmetros operacionais, composição do meio (macrófita, inóculo, entre outros), e os pré-tratamentos de substratos. Os resultados indicam, que a utilização da biomassa de plantas aquáticas como substrato para a produção do biogás oferece vantagens significativas na co-digestão, no entanto enfrenta desafios na sua produção. É essencial desenvolver métodos sustentáveis para converter essa biomassa em produtos valiosos, por meio de novas tecnologias e pré-tratamentos para otimizar a eficiência da produção de biogás.

Palavras-chave: biogás, co-digestão, macrófita, eficiência energética.

1. Introdução

A procura global de energia de 2022 a 2023, teve um aumento considerável correspondente a uma taxa média de crescimento anual de 0,7%, cerca de metade da taxa de crescimento da procura de energia ao longo da última década, atribuído ao crescimento da população mundial e o consumo de energia [1]. Os combustíveis fósseis são uma fonte que desempenham um papel dominante na geração de energia primária representando cerca de 82 % do consumo global total [2]. Isto tem levado os líderes políticos e cientistas a buscarem alternativas que sejam sustentáveis e de benefício ao meio ambiente [3]. Assim é realizada anualmente desde 1995 a Conferência das Partes (COP), com a participação dos países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do clima (UNFCCC). O objetivo dessa Conferência é alcançar a neutralidade das emissões de gases de efeito estufa e controlar sua concentração a níveis que permitam a adaptação dos ecossistemas terrestres. Destacam-se como principais marcos dessas conferências a aprovação do Protocolo de Kyoto em 1997 por 192 países e a ratificação do Acordo de Paris em 2015 por 196 países [4].

Dada a importância da redução da dependência de recursos não renováveis e insustentáveis, o uso de recursos energéticos baseados na biomassa é considerado uma solução viável para garantir um abastecimento sustentável de energia, promover o bem-estar humano e garantir a eco segurança, tudo dentro de um modelo de economia circular [3]. Consequentemente, há um interesse crescente na produção de biocombustíveis, como o biogás, o biodiesel e o bioetanol, que são relativamente baratos, renováveis e ecológicos [5].

O biogás é produzido por meio de um processo complexo que envolve a ação coordenada de microrganismos especializados na degradação de uma variedade de substratos orgânicos. A decomposição desses resíduos em ambientes anaeróbios (ausência de oxigênio) gera o biogás, composto principalmente por dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), além de outros gases em menor proporção [6]. É importante destacar que a eficiência de tratamento dos diferentes substratos orgânicos por intermédio da biodigestão anaeróbica, depende de alguns fatores, como a composição do substrato, teor de água, temperatura, pH, relação C:N, carga orgânica, tempo de retenção hidráulica e presença de nutrientes, os quais estão relacionados ao desenvolvimento e sobrevivência dos microrganismos envolvidos no processo [7].

Dentro das diversas fontes de energia renovável disponíveis, as biomassas aquáticas, como macroalgas, microalgas e plantas aquáticas invasoras, utilizadas na produção de biogás, foram pouco exploradas, embora sejam consideradas contribuintes importantes para a produção futura da biomassa [8]. As plantas aquáticas invasoras, também chamadas de macrófitas, são plantas indesejadas que crescem em corpos de água e causam problemas à fauna aquática e à qualidade da água, e podem causar danos ecológicos significativos aos recursos hídricos [9]. Devido ao crescimento acelerado das macrófitas em ambientes com alta disponibilidade de nutrientes, forma-se uma densa camada vegetal sobre os corpos de água, que prejudica a entrada de luz e o fornecimento de oxigênio, afetando negativamente a vida aquática [10]. De acordo com a lista da ICID (2012),

diversas espécies de plantas aquáticas invasoras são encontradas em climas tropicais e temperados, aguapé (*Eichhornia* sp.), lentilha de água (*Lemna gibba*, *Lemna minor*, *Spirodella polyrhizada*, *Polygonum*, etc), alface de água (*Pistia* sp), veludo aquático (*Azolla* sp.), taboa (*Typha* sp.), junco comum (*Phragmites* sp.) e nenúfar (*Nelumbo*, *Nymphae*, etc) são alguns exemplos comuns de ervas daninhas aquáticas encontradas. Para isto diferentes métodos (por exemplo, preventivo, mecânico, biológico e químico) estão sendo empregados para gerir essas plantas indesejadas em ambientes aquáticos. Normalmente, essa biomassa úmida é descartada a céu aberto em áreas não utilizadas ou queimada após secagem, práticas que parecem ser prejudiciais ao meio ambiente. A reutilização desses resíduos em processos industriais pode ser uma solução eficaz para lidar com o descarte inadequado de resíduos sólidos [10].

A utilização da biomassa de plantas aquáticas como fonte de biocombustível apresenta diversas vantagens em comparação às culturas energéticas terrestres. A biomassa de plantas aquáticas não depende necessariamente de recursos escassos, como terra cultivável e água doce. Devido à sua taxa de crescimento acelerada, a produtividade da biomassa de plantas aquáticas pode superar a de muitas culturas energéticas terrestres [8]. A ampla distribuição global de plantas aquáticas favorece sua utilização como matéria-prima, podendo ser utilizadas na produção de biometano, contribuindo para a segurança energética [9].

No entanto, a biomassa aquática apresenta certas limitações em comparação com a biomassa terrestre. Por exemplo a produção em grande escala e a viabilidade econômica na obtenção de produtos de base biológica representam os principais desafios associados a esses recursos de biomassa. Assim, é crucial desenvolver métodos econômicos e sustentáveis para transformar a biomassa aquática colhida em produtos de alto valor [8].

Neste artigo serão estudadas as macrófitas, de maior abordagem na produção de biogás dado com resultado da revisão sistemática, utilizando o método bibliométrico *Methodi Ordinatio* para a seleção de artigos científicos relevantes. Esta pesquisa tem como objetivo contextualizar o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à produção de biogás por meio da co-digestão anaeróbica de macrófitas, avaliar as modelagens matemáticas para simulação dos sistemas, os parâmetros operacionais, a composição do meio (macrófita, inóculo, entre outros), e pré-tratamentos de substratos, visando orientar pesquisadores na condução de estudos e projetos nessa área.

2. Materiais e métodos

A variedade de estudos conduzidos por vários pesquisadores oferece uma extensa e abrangente fonte de informações para artigos de revisão, como este. Assim, uma etapa crucial ao redigir um artigo de revisão é identificar artigos e publicações que se relacionem diretamente com o objetivo em foco, formando o conjunto de referências bibliográficas essenciais que seria o portfólio bibliográfico (PB) do artigo.

Este artigo apresenta uma análise sistemática da literatura utilizando a metodologia *Methodi Ordinatio*, que tem como objetivo selecionar e classificar os artigos de acordo sua relevância científica [11].

2.1 Methodi Ordinatio.

A metodologia de seleção de portfólio *Methodi Ordinatio*, é considerado um método de múltiplos critérios no auxílio da decisão (MCDA), devido a que emprega uma equação para classificar os papéis, chamado de *Index Ordinatio* (*Inordinatio*), e tem como objetivo selecionar e classificar os documentos de acordo com a relevância científica, levando em consideração os principais fatores considerados num artigo científico: I) número de citações, II) ano de publicação e III) fator de impacto, ou métricas do periódico [11].

Esta metodologia apresenta nove fases, descritas na sequência, em duas seções. Na primeira seção estão descritas, as cinco primeiras fases do *Methodi Ordinatio*, para a seleção do portfólio bibliográfico bruto. Na segunda seção, as últimas quatro fases do *Methodi Ordinatio* representam o processo de seleção da base de dados coletada priorizando as publicações pelo modelo multicritério de avaliação (*Inordinatio*) [12].

2.1.1 Seção 1: Banco de artigos brutos- BDB

Fase 1: Estabelecendo a intenção da pesquisa

A condição ideal é que o pesquisador já tenha um problema de pesquisa e prossegue com a sua solução. Mas nesta etapa tem casos em que ainda não seja delimitado o problema de pesquisa, ele pode iniciar o processo a partir de palavras aleatórias e construir sua intenção à medida que explora as bases de dados [12].

O problema de pesquisa não é uma regra proposto após a leitura dos artigos, basta estabelecer a intenção da pesquisa para começar a dar uma lida aos artigos. Utilizando a intenção como a linha de pesquisa, deste jeito se pode identificar as possíveis palavras-chave da pesquisa. Neste caso a intenção de pesquisa descrita seria: Os efeitos da co-digestão de macrófitas com outros resíduos orgânicos nas taxas de produção de biogás ou metano.

Fase 2: Pesquisa preliminar exploratória com palavras-chave em bases de dados

Após identificar o propósito da pesquisa, as palavras-chave e as potenciais combinações, é conduzida uma busca inicial exploratória nas bases de dados indicadas pelos pesquisadores com a finalidade de avaliar a relevância das palavras e combinações escolhidas, além de identificar possíveis termos relacionados ao objetivo da pesquisa.

Nesta etapa, avalia-se os resultados e o período, considerando a importância de artigos clássicos na área. Ao utilizar um recorte temporal amplo, como 10 anos, garante-se a inclusão dessas obras. A escolha do prazo depende dos critérios do pesquisador para garantir a relevância dos artigos selecionados, eliminando aqueles que não contribuem para a pesquisa

Fase 3: Definição e combinação de palavras-chave e bases de dados

Nesta fase definem-se e limitam-se as palavras-chave e combinações relevantes, bem como as bases de dados mais significativas a serem utilizadas na busca sistemática. As palavras-chave foram interligadas por meio da expressão lógica (AND), e foram utilizadas 4 combinações mostradas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Resultado da busca utilizando as palavras-chave e combinações.

Palavras chaves e combinações	SPRINGER	SCIENCE DIRECT	SCOPUS	TOTAL
1 biogas AND "Co-digestion" AND "Aquatic weed"	keywords (biogas AND "Co-digestion" AND "Aquatic weed") 239	Find articles with these terms ("energy efficiency" AND "Aquatic weed" 25	(TITLE-ABS-KEY (biogas AND "co-digestion" AND "Aquatic weed") AND ALL (biogas AND "co-digestion" AND "Aquatic weed")) 9	273
2 "Energy efficiency" AND "Aquatic weed"	keywords ("energy efficiency" AND "Aquatic weed") 245	Find articles with these terms ("energy efficiency" AND "Aquatic weed") 25. Title, abstract, keywords: energy efficiency, Aquatic weed 6	ALL ("energy efficiency" AND "Aquatic weed") 37	313
3 "Co-digestion" AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed"	keywords ("Co-digestion" AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed") 331	Find articles with these terms ("Co-digestion" AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed") 25	ALL ("Co-digestion" AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed") 17	373
4 biogas AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed"	keywords (biogas AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed") 238	Find articles with these terms (biogas, energy efficiency, Aquatic weed) 27	TITLE-ABS-KEY (biogas AND "energy efficiency" AND "Aquatic weed") 61	326
TOTAL DE ARTIGOS				1285

Fase 4 y Fase 5: Pesquisa definitiva e procedimento de filtragem

Após realizar o acesso no Portal da CAPES, o próximo passo é salvar os dados dos artigos no gerenciador de referências, neste caso usou-se o gerenciador JabRef.

Na sequência, pode-se remover os artigos duplicados, os documentos que não são artigos, e artigos que estão fora do tema de pesquisa, dados mostrados na **Tabela 2**. As 5 fases para a composição do portfólio de dados filtrados (PDF) estão resumidas na **Figura 1**.

Tabela 2. Procedimento de filtragem de artigos

Procedimento de filtragem	Artigos excluídos
Número inicial de artigos	558
Documentos duplicados	147
Exclusão por tipo de documento	21
Exclusão de artigos fora do tema	150
Total de artigos excluídos	318
Número resultante de artigos no portfólio	240

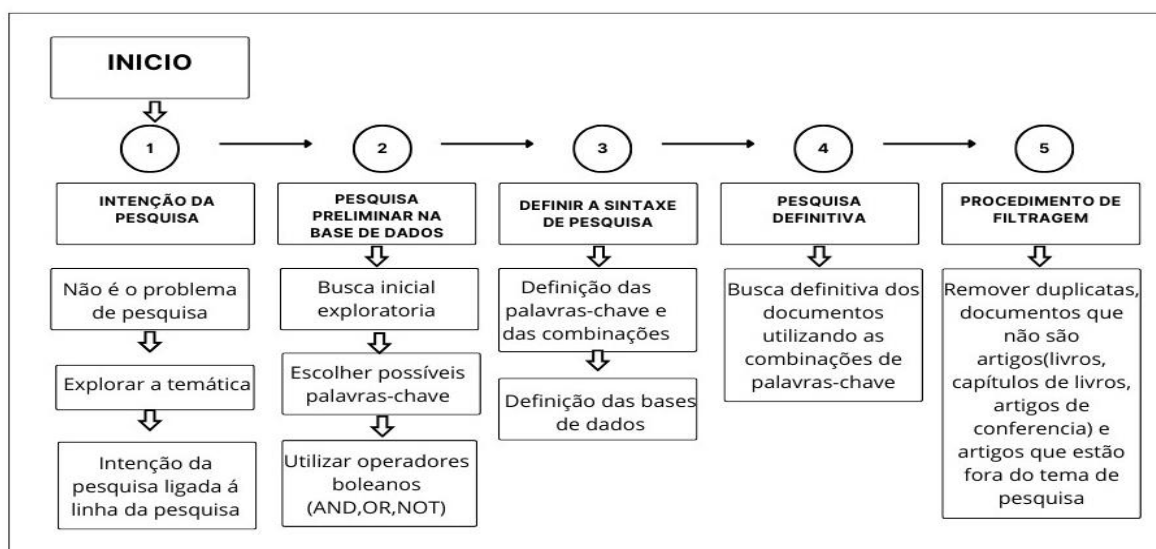


Figura 1. Descrição do procedimento para a composição do PDF (5 primeiras fases) do Methodi Ordinatio adaptado de [11].

2.1.2 Seção 2: Processo de seleção de artigos de relevância científica

As últimas 4 fases vêm com o processo para a seleção final do portfólio bibliográfico. Para tal, alguns parâmetros tiveram que ser estabelecidos, para obter o Rankin de artigos de relevância científica, mostrados na **Figura 2**.

PARÂMETROS ESTABELECIDOS PELO PESQUISADOR

VALOR DE VARIAÇÃO (Δ , Λ , Ω)	10
ANO DE BUSQUEDA	2023

Figura 2. Parâmetros Methodi Ordinatio

O parâmetro valor de variação, é um valor arbitrário entre 1 e 10, onde 1 se refere aos mais antigos trabalhos publicados e 10 a artigos recentes. O parâmetro ano de pesquisa, é o ano em que a pesquisa ocorreu, neste caso, em 2023.

Usando os parâmetros mencionados, e os critérios fator de impacto (métricas do periódico), ano de publicação e número de citações do Journal Citation Reports (JCR), pode-se determinar o índice Inordinatio (Equação 1), que fornece a classificação dos artigos de acordo com a sua relevância científica.

$$InOrdinatio_{2,0} = \left\{ \left[\Delta * (IF) \right] - \left[\lambda * \left(\frac{ResearchYear - PublishYear}{CitedHalfLife} \right) \right] + \Omega \right\} * \left[\frac{Ci}{(ResearchYear + 1) - PublishYear} \right] \quad (1)$$

Onde: Δ , é um valor que varia de 0 a 10, no qual o pesquisador atribui a importância das métricas em sua pesquisa, é o indicador que influencia a escolha pela submissão de artigos para periódicos, a preferência por citações, pontuação em concursos, avaliação de pós graduação, entre outros; IF, representa o Fator de Impacto; as métricas do periódico selecionado (CiteScore do ano passado, ou estimativa do JCR no caso de um CiteScore inexistente), sendo o pesquisador capaz de adotar a que melhor se adequa ao seu portfólio. λ , representa o valor que varia de 0 a 10 que o pesquisador atribuirá á importancia da moeda do portfólio em sua pesquisa. ResearchYear: ano em que a pesquisa está sendo feita. PubYear: ano de publicação do artigo. Cited Half-Life, representa a mediana da meia-vida citada dos periódicos JCR (7,6), permite descobrir se material mais antigo ou mais recente está recebendo atenção. Ω , é o valor que varia de 0 a 10 que o pesquisador atribuirá a importância da média anual de citações de publicações. Ci, representa o número total de citações encontradas no Google Acadêmico.

As últimas fases 8 e 9 são realizadas em conjunto para determinar a disponibilidade dos artigos completos e finalizar com o alinhamento dos artigos mantidos na base de dados final, como mostra a **Figura 3**. Os resultados para o portfólio bibliográfico foram obtidos e analisados conforme descrito nos Resultados e Discussões.

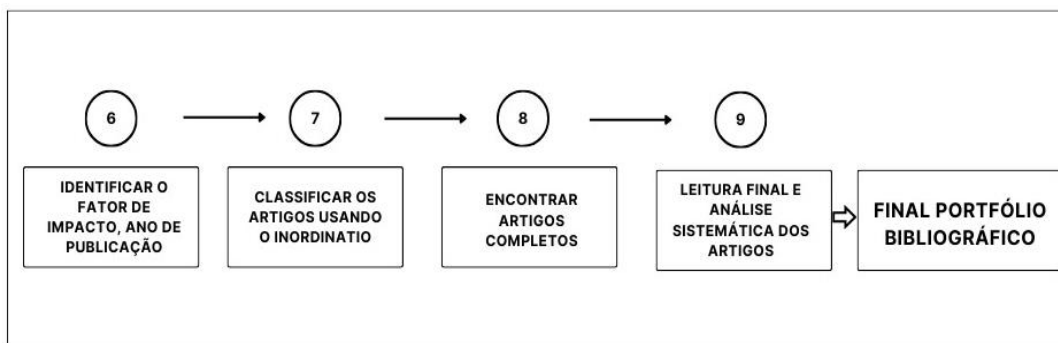


Figura 3. Procedimento de seleção do portfólio bibliográfico final (4 últimas fases) do Methodi Ordinatio adaptado de [11]

3. Resultados e discussões

Os resultados da pesquisa de outubro de 2023 e janeiro de 2024 geraram 158 documentos na base de dados SCIENCE DIRECT, 124 para SCOPUS, e 1053 resultados para o SPRINGER. Esses resultados compilam o não filtrado banco de dados de artigos brutos. Depois de estabelecer o banco de dados brutos, os filtros foram aplicados para limitar o número de resultados de pesquisa da consulta predefinida.

Filtros usados foram: (1) A data estabelecida desde o ano 2000; e (2) tipos específicos de artigos foram escolhidos: artigos e resenhas. Assim o resultado da pesquisa usando os filtros indicou 108 resultados de documentos SCIENCE DIRECT, 124 para SCOPUS, e 326 resultados para o SPRINGER, restringindo a base de dados para 558 artigos.

Estes artigos foram analisados utilizando a metodologia Methodi Ordinatio. Foram mantidos no banco de dados os artigos cujos títulos estavam alinhados ao tema. Foram analisadas similaridades dos artigos com o tema de pesquisa, JCR, número de citações, idade e autoria em comum. Após estabelecido o portfólio bibliográfico (PB), foi realizada uma análise sistemática para uma melhor compreensão dos resultados da pesquisa. O resultado deixou o portfólio bibliográfico (PB) de 240 artigos.

3. 1.1 Evolução das publicações.

A **Figura 4** apresenta a evolução do número de artigos publicados anualmente ao longo dos últimos 23 anos. Durante a primeira década, foi observado um volume relativamente baixo de artigos (18 publicações), no entanto a partir de 2014, houve um crescimento exponencial na produção das pesquisas desde 20 artigos por ano até chegar a 100 artigos no 2023.

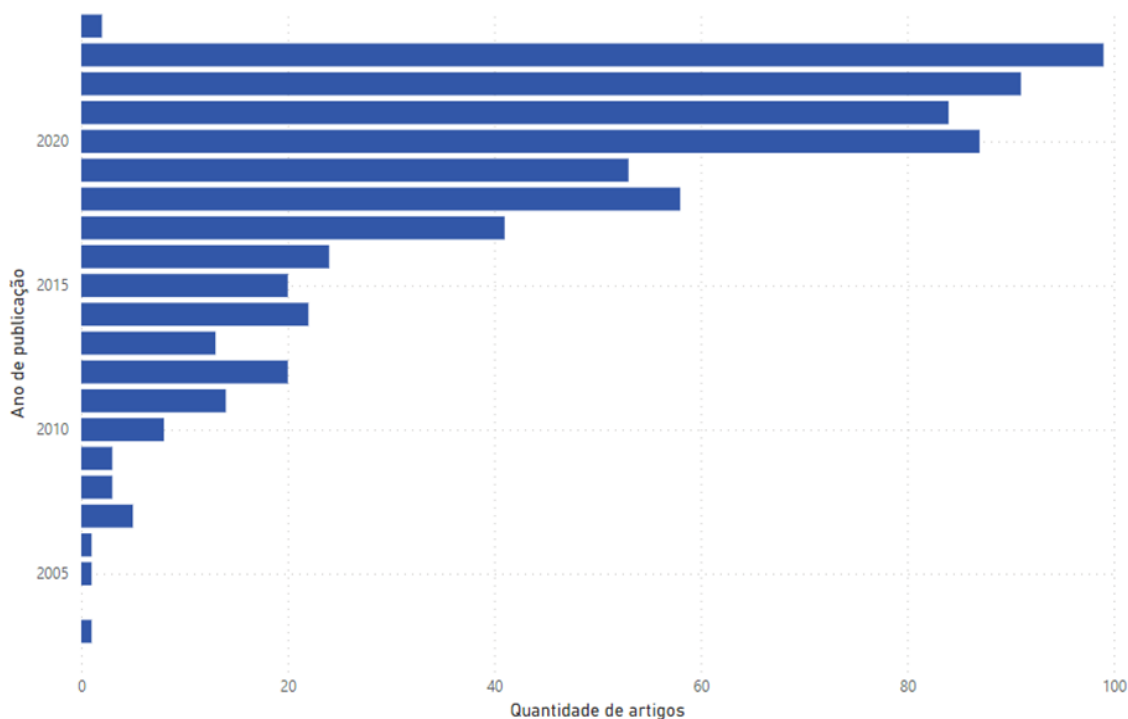


Figura 4. Quantidade de artigos publicados por ano

3.1.2 Análise das principais palavras chaves utilizadas

A análise apresentou as palavras chaves mais utilizadas pelos autores, conforme mostra-se na **Figura 5**, onde podem ser vistas as primeiras 27 palavras-chave mais aplicadas aos trabalhos do banco de dados de 664 artigos nos 23 anos de abrangência da pesquisa.

Pode-se observar as palavras chaves mais frequentes foram: Biogás (Biogas, 200 ocorrências), Digestão anaeróbica (Anaerobic digestion, 160 ocorrências), Co digestão (co-digestion, 82 ocorrências), Jacinto de água (Water hyacinth, 85 ocorrências), Eficiência energética (energy efficiency, 75 ocorrências).

Na pesquisa avaliada, os autores destacaram as palavras-chave mais utilizadas, que refletiam os termos de busca relevantes para o tema em questão. Foi observado que a palavra-chave Jacinto de água (Water Hyacinth) foi uma das macrófitas mais utilizadas na busca, vinculando a pesquisa sobre a utilização de macrófitas na produção de biogás. Além disso, foi possível analisar a presença de palavras-chave que não foram utilizadas na busca e puderem fornecer informações de tendências na pesquisa relacionadas ao assunto abordado no

trabalho. Vale ressaltar a importância da palavra-chave “sustentabilidade” e, em seguida, “economia circular”, o que reforçou a ideia de que há uma baixa disponibilidade de pesquisas com foco na sustentabilidade por meio da produção de biogás a partir de co-digestão anaeróbica de macrófitas quando comparado à disponibilidade de pesquisas com foco no uso de macrófitas utilizando o mesmo processo.

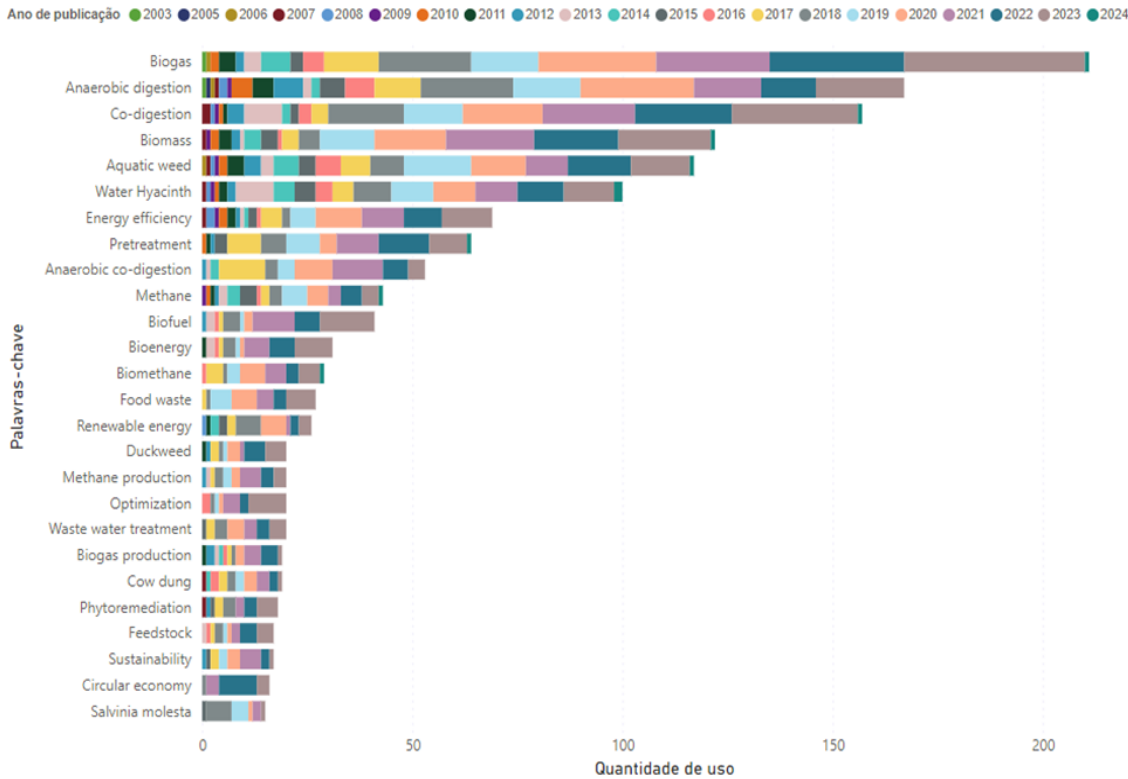


Figura 5. Quantidade de uso de palavras-chave por ano de publicação

3.1.3 Principais Jornais

Outra análise realizada foi em relação ao jornal onde os artigos foram publicados. Os 10 principais jornais como maior número de artigos referentes ao tema da produção de biogás com macrófitas estão listados na **Figura 6**. Resultando os três principais jornais que mais publicaram: Bioresource Technology com 102 artigos, Renewable and Sustainable Energy Reviews com 72 artigos, Renewable Energy com 48 artigos

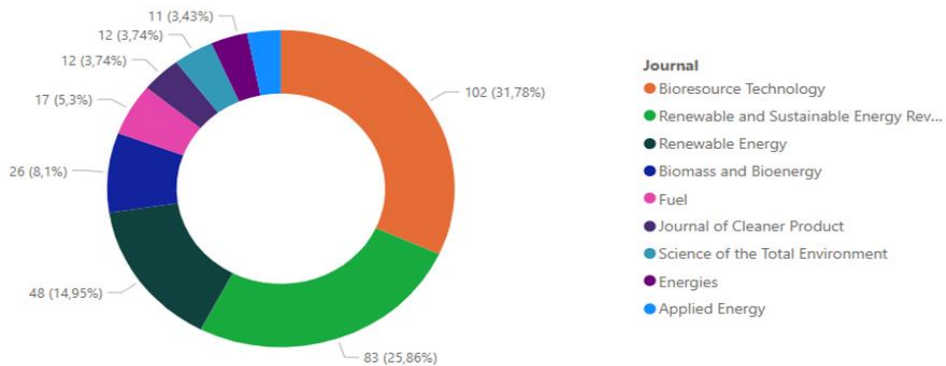


Figura 6. Quantidade de artigos por Jornal

3.1.4 Autores mais produtivos e mais citados

Para finalizar a análise sistemática do portfólio bibliográfico (PB), foram examinados os autores e coautores. O PB, composto por 240 artigos, engloba um total de 718 autores. Dos quais, 708 autores tiveram menos que 5 artigos publicados referente ao tema da pesquisa, unicamente 10 autores tiveram mais que 5 artigos publicados como mostrado na **Figura 7**.

Os autores que têm menos publicações totalizam 542. Esses escritores têm apenas uma obra no PB escolhido. Assim, foram posteriormente examinados para avaliar sua importância e contribuição no contexto da relação entre as macrófitas e outros substratos utilizados na co-digestão e a eficiência da produção de biogás.

Já os 3 principais autores com mais publicações na base de dados são Ajay Kalamdhad, professor do departamento de Engenharia, no Instituto Índio de Tecnologia Guwahati, Índia, Mitsuhiro Koyama, Doutor de Engenharia, professor (associado) Universidade Nagasaki, Japão, Yu-You Li, professor de Engenharia Ambiental da Universidade de Tohoku, Japão

Na **Figura 7** pode-se constatar um maior destaque para os 3 primeiros autores que mais publicaram, enquanto os seguintes não se distanciariam grandemente em número de publicação de um para outro, demonstrando certa homogeneidade de publicações entre os autores.

Uma observação destacada foi o fato de que a maioria de publicações feitas a partir do ano 2021 pelos 3 autores mais prolíficos revela que suas obras sobre o tema são predominantemente recentes e atualizadas.

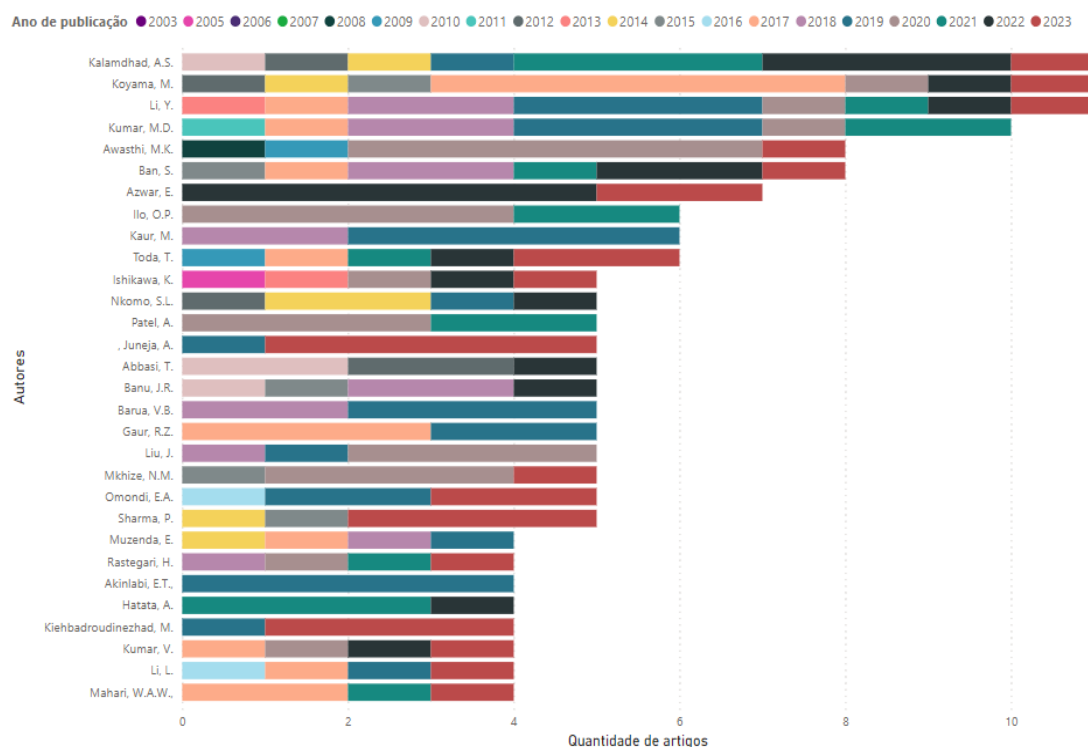


Figura 7. Quantidade de artigos por autor por ano de publicação

Na Figura, destaca-se os pesquisadores mais citados: S. A. Abbasi, Professor na Universidade Pondicherry, India (1151), Tasneem Abbasi, professora na Universidade Pondicherry, India (1151), Martina Poeschl, estudante de doutorado no programa de pesquisa energética Charels Parsons Energy da Science Foundation Ireland, Universidade College Dublin, Irlanda (1102), Mitsuhiro Koyama (1100), Doutor de Engenharia, professor (associado) Universidade Nagasaki, Japão.

Dentre os autores que mais publicaram, o terceiro deles foi também um dos mais citados, de acordo com a **Figura 8**, o que pode ser percebido como uma relevância atribuída a pesquisa no meio acadêmico.

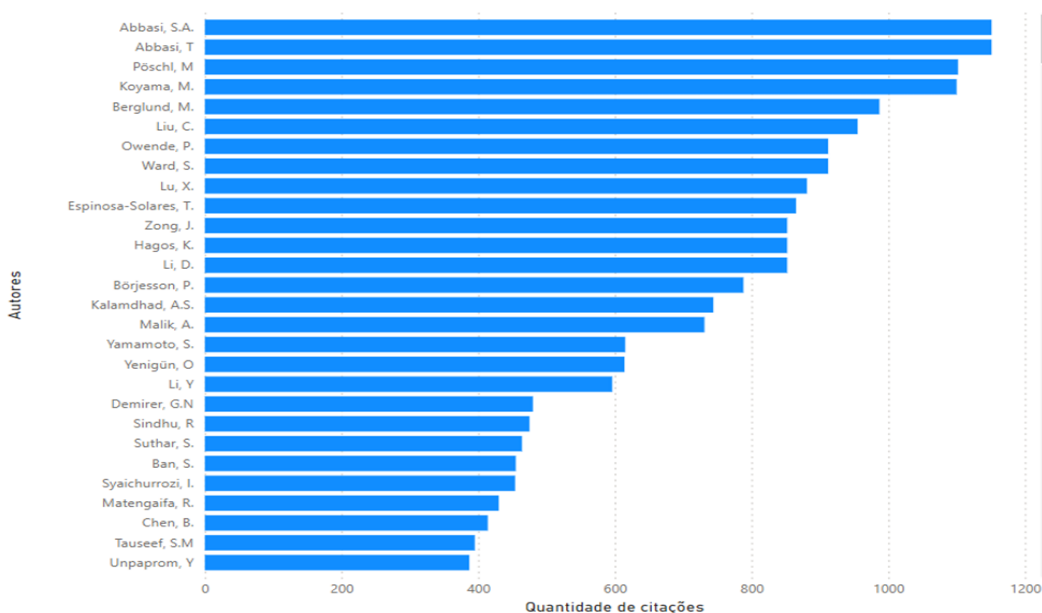


Figura 8. Quantidade de citações por autores

3.2 Análise dos estudos mais relevantes

É importante destacar que a seleção dos artigos foi feita de acordo com critérios estabelecidos pelos pesquisadores, podendo resultar na escolha de cinco, dez ou mais artigos relevantes. Neste estudo optou-se por analisar e revisar 21 artigos do PB

Durante a avaliação qualitativa dos artigos mais relevantes com foco em estudos sobre a relação entre as macrófitas e outros substratos utilizados na co-digestão e a eficiência da produção de biogás, verificou-se a predominância de estudos classificados em 4 grupos, os efeitos de variações dos parâmetros operacionais (71,43%), o uso de pré-tratamentos dos substratos (33,33%), as modelagens matemáticas (19,05%), os que avaliam a composição do meio (AR, inóculo, entre outros) (23,81%). Mostrados na seguinte **Tabela 3**

Tabela 3. Principais informações dos artigos mais relevantes

Ranking	Autores	Classificação	Objetivos	Jornal	Ano	Citações
1	Zhen et al. [14]	Parâmetros operacionais	Avaliar a viabilidade da co-digestão anaeróbia mesófila de (LE) e (ED), colhidas de uma calha de teste Avaliar o rendimento de metano e as alterações de diferentes parâmetros, operacionais	Applied Energy	2015	167
2	Kainthola et al. [13]	Parâmetros operacionais Modelagem	Avaliar a viabilidade da co-digestão dos substratos hydrilla verticillata e palha de arroz em termos de produção de biogás Analisar o efeito interativo da operação parâmetros (relação C/N, relação F/M e pH) Avaliar a metodologia de superfície de resposta utilizada para a definição do delineamento experimental na co-digestão da HV e a palha e arroz	Fuel	2019	104

Tabela 3. Cont 1

Ranking	Autores	Classificação	Objetivos	Jornal	Ano	Citações
3	Syaichurrozi, I. [15]	Modelagem	Comparar três modelos cinéticos para analisar a performance da digestão	Renewable Energy	2018	93
		Parâmetros operacionais	Avaliar as proporções de diferentes massas da SM e palha de arroz para produção de biogás no desempenho			
4	Unpaprom et al. [19]	Pré-tratamentos	Avaliar o uso pré-tratamento químico no jacinto de água triturado para melhorar a produção do metano	Biomass Conversion and Biorefinery	2021	66
5	Barua et al. [17]	Parâmetros operacionais	Avaliar o efeito da proporção de mistura de aguapé (EC) e cascas de banana	Renewable Energy	2019	58
		Pré-tratamentos	Avaliar o pré-tratamento em forno de ar quente			
6	Syaichurrozi et al. [27]	Pré-tratamentos	Avaliar o impacto do pré-tratamento com ácido sulfúrico na macrófita <i>Salvinia Molesta</i>	Journal of Environmental Chemical Engineering	2019	66
7	Sharma, B. & Suthar, S. [2]	Parâmetros operacionais	Avaliar as características físico-químicas do digestor (pH, demanda química de oxigênio solúvel (sCOD))	Environmental Technology & Innovation	2021	34
			Avaliar o papel do biocarbono na biometanação do aguapé (<i>Eichhornia crassipes</i>)			
8	Barua et al. [18]	Parâmetros operacionais	Avaliar e determinar a proporção ideal de alimento para microrganismo (F/M)	Fuel	2018	31
		Pré-tratamentos	Avaliar (o pré-tratamento microbiano para F/M) ideal.			
9	Bhui, I et al. [22]	Parâmetros operacionais	Avaliar os ácidos graxos voláteis na digestão anaeróbica em escala descontínua de duas potenciais ervas daninhas aquáticas (jacinto de água e salvinia)	Bioresource Technology	2018	42
10	Sudjarid et al. [24]	Parâmetros operacionais	Avaliar os efeitos da temperatura e das taxas de co-digestão na produção de biogás sob condições anaeróbicas dos substratos: Resíduos orgânicos municipais e da <i>Hydrilla verticillata</i>	Interdisciplinary Research Review	2018	0
11	Karouach, F. et al [21]	Composição do meio	Avaliar o emprego da monodigestão, técnicas de co-digestão de aguapé e esterco locais.	Fuel	2024	0
		Pré-tratamentos	Avaliar o impacto do pré-tratamento alcalino-térmico na estabilidade dos parâmetros, na eficiência da produção de biometano			
12	Koyama et al. [30]	Pré-tratamentos	Avaliar o efeito do pré-tratamento termoquímico alcalino sobre a digestibilidade anaeróbica de duas espécies de macrófitas submersas que têm conteúdo de lignina significativamente diferente	Biochemical Engineering Journal	2015	39

Tabela 3. Cont 2

Ranking	Autores	Classificação	Objetivos	Jornal	Ano	Citações
13	Castro & Y.A. and Agblevor, F.A. [12]	Composição do meio	Avaliar a qualidade do metano da digestão anaeróbica nos diferentes tipos de água (salobra versus água doce). Avaliar as características físico-químicas e cinética de biometanação do jacinto de água de dois locais com diferentes tipos de água (salobra versus água doce)	Environmental Science and Pollution Research	2020	14
14	Banerjee et al [16]	Composição do meio Parâmetros operacionais	Avaliar a produção de biogás a partir do aguapé usando esterco de vaca como catalisador Analisar os efeitos do pH, temperatura e dosagem de esterco de vaca para produção de biogás	Cellulose	2023	0
15	Ingabire et al. [20]	Parâmetros operacionais Modelagem	Avaliar o efeito da relação substrato jacinto de água: Resíduos de peixe, concentração de inóculo (CI) e diluição Otimizar a produção de biogás usando o software Design-Expert sobre diversas condições operacionais	Energy Reports	2023	3
16	Dutra, J. et al [29]	Pré-tratamentos	Avaliar os efeitos da hidrólise ácida e básica,	Bioresource Technology Reports	2019	5
17	Sathyan et al [25]	Parâmetros operacionais	Avaliar o tempo de reação quanto a concentração dos substratos	Biomass Conversion and Biorefinery	2023	0
18	Nam et al [22].	Parâmetros operacionais	Avaliar a recirculação da aeração de biogás na biometanação melhorado em escala agrícola, com substrato de jacinto de água no sistema digestor de biogás HDPE	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	2023	55
19	Omondi et al. [4]	Parâmetros operacionais Modelagem	Determinar a proporção ideal de Resíduos de Matadouro Rumiar (RMR) para co-digestão com aguapé. Aplicar modelos cinéticos para descrever a produção de biogás em reatores em lote	International Journal of Renewable Energy Development	2023	27
20	Sutaryo, S. et al [27].	Parâmetros operacionais Composição do meio	Determinar a produtividade de um reator de tanque agitado contínuo (CSTR) Co digerindo esterco de vaca leiteira e Salvinia Molesta em várias proporções de sólidos voláteis (VS) Avaliar produção de metano de planta inteira de SM, sistema de parte aérea e raízes individualmente.	Asia-Pacific Journal of Science and Technology	2023	1

21	Kawaroe et al [26].	Parâmetros operacionais Composição do meio	Analisar a biodegradabilidade de <i>Salvinia molesta</i> (SM) para produção de biogás através de processo anaeróbio	Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia	2019	3
----	---------------------	---	---	---	------	---

3.2.1 Modelagem matemática

As modelagens matemáticas para simulação de sistemas de digestão anaeróbica são de grande importância, devido a que são criados para finalidades específicas, tais como estabelecer parâmetros de processo, simulação, otimização e controle de processos, para estimar a produção de biogás do sistema e alcançar uma maior performance do sistema [5].

Omondi et al. [5] chegou pelo modelo Gompertz modificado que descreve detalhadamente os dados experimentais para os substratos estudados com fatores de correlação (R^2) variando de 0,994-0,99 em comparação com 0,9988-0,994 e 0,963-0,983 para os modelos Logístico e Cinético de Primeira Ordem, respectivamente. Esses coeficientes indicaram que os modelos cinéticos se encaixam de forma precisa aos dados experimentais da digestão anaeróbica. No entanto, o parâmetro da soma residual mínima dos quadrados (RMSE, minimum residual sum of squares) revelou uma diferença mais evidente entre os modelos cinéticos; o modelo Gompertz modificado mostrou o menor RMSE, variando de 0,017 a 0,02. Castro et al. [13], identificou o modelo Gompertz modificado como o melhor modelo cinético para performance de produção do metano para as macrófitas, na co-digestão anaeróbica e do digestor de metano em grande escala.

Kainthola et al. [14], estudo a Superfície de Resposta por Modelo Quadrático com a análise de variância (ANOVA) para avaliar a adequação e importância do modelo de regressão matemática, sendo o valor R^2 de 0,9675 revelou que este modelo matemático poderia explicar a variabilidade de 96,75% na resposta do rendimento do metano. Um bom modelo deve ter um valor de R^2 na faixa de 0,75 a 1 o que indica um melhor ajuste do modelo.

Zhen et al. [15] e Syaichurrozi [16] revelaram que o modelo Cone se ajusta melhor à evolução real da produção de metano, conforme evidenciado pelo baixo erro de previsão quadrática e a correlação de ajuste da remoção de SV é $R^2=0,992$.

No estudo do Banerjee et al. [17], constatou-se que a produção do biogás da macrófita EC foi otimizada usando o Desing-Expert software. A produção média do biogás (PMB) ideal foi de 0,058 m³/kg EC, rendimento cumulativo de metano (RCM) de 0,055 m³-kg EC e a concentração de metano de 83,33%.

3.2.2 Composição do meio e parâmetros ocupacionais

Barua et al. [18], Barua et al [19], Unpaprom et al. [20], Sharma et al. [3], Ingabire et al. [21], Castro et al. [13], Omondi et al. [5], Karouach et al. [22], Banerjee et al. [17], Nam et al. [23], Bhui et al. [24], estudaram a co-digestão da macrófita *Eichhornia Crassipes* (EC). Kainthola et al. [14], Sudjarid et al. [25], Sathyan et al. [26], estudaram a co-digestão da macrófita *Hydrilla Verticillata* (HV). Bhui et al. [24], Kawaroe et al. [27], Sutaryo et al. [28], Syaichurrozi [16] e Syaichurrozi et al. [29] estudaram a co-digestão da macrófita *Salvinia Molesta* (SM). Dutra et al. [30], Zhen et al. [15], Koyama et al. [31], estudaram a co-digestão da macrófita *Egeria Densa* (ED).

Kainthola et al. [14], Karouach et al. [22], constatam a produção de biogás com a co-digestão de macrófitas, melhorou a progressão físico-química e bioquímica em comparação com a monodigestão, devido ao desequilíbrio nutricional que pode inibir a produção de biogás/metano, indicando não ser recomendado adotar uma monodigestão para produzir biogás.

A composição química das macrófitas, como acontece com qualquer biomassa lignocelulósica, pode ser uma fonte adequada de carbono e nutrientes para processos biotecnológicos [30]. Para Sathyan et al. [26] a biomassa lignocelulósica é muito econômica, pois são renováveis e naturalmente abundantes. No entanto, tem

uma maior porcentagem de conteúdo de lignina cristalina rígida que dificulta o acesso dos microorganismos aos carboidratos de fácil digestão como a celulose e a hemicelulose.

No estudo apresentado por Dutra et al. [30], o baixo nível de lignina encontrado em ED (7,1%), poderia representar uma vantagem para o bioprocessamento. Assim como Banerjee et al. [17], mostrou que a EC possui alto teor de celulose (10 % lignina, 33% hemicelulose e 25% celulose).

Kainthola et al. [14]expressou a importância de equilibrar a relação C/N, a relação F/M e os níveis de pH, no processo da digestão anaeróbica, utilizando a co-digestão do resíduo agrícola, palha de arroz e HV, a macrófita não só equilibrou a relação C/N inadequada, mas também melhorou a estabilidade do processo de fermentação.

Para Kainthola et al. [14], as ótimas condições encontradas foram na proporção C/N (29,7), proporção F/M (2,15) e pH (7,34) mostrando um rendimento do metano de 287,6 ml CH₄/g.

No estudo de Banerjee et al [17] verificou que a eficácia do processo de DA, pode ser afetada pelas mudanças de pH dos valores ideais devido às variações de temperatura, utilizando a macrófita EC como biocatalizador, sendo as alterações de T e pH tem efeitos diferentes, quando a temperatura ideal (47,7 C) e ajustada e o pH reduzido um 10 % resultando numa queda de 9,48% na produção média do biogás (PMB). Mas quando o pH está no nível ideal (7,194), uma diminuição de 10 % na temperatura pode levar a uma redução de 8,23% na PMB.

Para Unpaprom et al. [20], mostrou a ótima concentração da macrófita EC é na razão 1:1 da Co digestão da mistura com esterco de porco (EP) produziu o maior rendimento de metano e a composição biogás: CO₂ (29,08%), metano, CH₄ (68,89%). Enquanto no estudo de Barua et al. [18], foi constatado que a proporção de mistura ideal está entre 1,5 e 2 para a concentração de cascas de banana junto com a macrófita jacinto de água.

Syaichurrozi et al. [16], também apresentou que a seu maior rendimento de biogás (113,92 ± 6,90 mL/g SV) foi obtido da razão de SM:PA de 40:60 (C/N de 34,80) em 18 dias. O biogás produzido a partir de SM:RS de 40:60, continha 60,58% de CH₄, 38,69% de CO₂, 0,73% de H₂. Enquanto no Sutaryo et al. [28], foi constatado que a produção de metano aumentou significativamente com a co-digestão da SM. Para Bhui et al. [24], observou que os ácidos graxos voláteis (AGV) influenciam significativamente o teor de metano nas proporções 1:1 para a codigestão de SM e esterco bovino, e na proporção 3:1 para a co-digestão de EC e esterco bovino.

No estudo realizado por Zhen et al. [15], foi constatada a viabilidade da adição da macrófita ED na co-digestão anaeróbica de resíduos de lodo ativado (RLA), os resultados mostraram que a adição de ED ajudaria a melhorar bastante a produção de metano de lodo, o maior rendimento de metano foi em média 198,32 mL/g SV para a proporção RLA:ED de 0,7:0,3, e o rendimento do RLA sozinho foi cerca de 176,36 ml/g de SV. ED melhorou a solubilização de co-substratos e evitou os acúmulos de ácidos graxos voláteis (AGV) e amônia livre (NH₃) e imediata inibição, induzindo um ambiente de digestão estável

A velocidade de decomposição dos resíduos aumentou conforme a diluição foi incrementada, resultando em maior produção de biogás e na estabilidade do processo foi constatada no estudo de Ingabire et al. [21]. Assim como a adição de elementos essenciais ao meio resultou em um aumento na eficiência da degradação da matéria orgânica, Sharma et al. [3], observou a adição de biocarbono no digestor anaeróbico da macrófita aguapé (EC) teve impacto sinérgico no processo de biometanação e a produção de biogás melhorou em 20,35 com suplementação de biocarbono de 1%.

3.2.3 Pré-tratamentos

Diferentes técnicas de pré-tratamento beneficiam a degradação da estrutura da biomassa, tornando-a mais acessível aos microorganismos, reduzindo o período da hidrólise e melhorando a taxa de conversão para aumentar o rendimento de metano. As diversas técnicas de pré-tratamento de substratos incluem processos físicos, químicos e biológicos [26].

O estudo de Koyama et al. [31], revelou que as macrófitas submersas contém uma quantidade substancial de ácidos hidroxinâmicos, que representam 27,2-59,4% do total de fenóis de lignina. Consequentemente constatou que a macrófita ED apresentou mudanças da lignocelulose na fração sólida após 3,0 h de pré-tratamento termoquímico alcalino na DA mesófila, o teor de lignina, hemicelulose e celulose foram significativamente reduzidos com o aumento do NaOH e da temperatura de pré-tratamento de 60 a 80°C. Também Koyama et al. [31] mostrou que as macrófitas foram trituradas até o tamanho da partícula seja entre 0,5 a 1,5 cm e preservadas a -20 °C. Karouach et al. [22], constatou o pré-tratamento álcali-térmico utilizando KOH em diferentes

concentrações, chegando a uma eficácia do pré-tratamento na melhoria da solubilização, biodegradabilidade e produção de metano das misturas em comparação com os não tratados.

Unpaprom et al. [20], também apresentou que a eficácia do pré-tratamento alcalino depende do teor de lignina da biomassa e que os álcalis mais comuns utilizados são o (hidróxidos de sódio, amônio, cálcio e potássio).

No estudo de Barua et al. [18], verificou-se que a co-digestão anaeróbica de Jacinto de água (EC) e casca de banana junto com pré-tratamento de forno de ar quente, é uma forma eficiente de melhorar a produção de biogás e acelerar o período de hidrólise do que a monodigestão. No entanto Barua et al [18], também mostrou que no conjunto com uma proporção de mistura apropriada melhora significativamente a quantidade de substrato solúvel, acelerando a biodegradação e aumentando a produção de biogás, melhorando assim o comportamento do digestor.

Para Dutra et al. [30], os pré-tratamentos químicos têm um aumento no índice da cristalinidade nos substratos em comparação dos substratos não tratados. Dutra et al. [30], verificou que altos rendimentos 76% foram observados no pré-tratamento alcalino na macrófita ED, representando um importante ponto de partida para sua utilização em processos fermentativos ou enzimáticos. Para Syaichurrozi et al. [29], o efeito do pré-tratamento com ácido sulfúrico na produção de biogás de SM, diminuiu o teor de lignina e aumentou o teor de extrato livre de nitrogênio (carboidrato não fibroso). Assim como Barua et al. [19] A relação F/M ideal desempenhou um papel significativo junto com o processo de pré-tratamento microbiano para acelerar o período de hidrólise e aumentar a geração de biogás.

No estudo de Nam et al. [23], mostrou a recirculação da aeração de biogás na biometanação foi uma oportunidade da melhoria da produção do biogás. A recirculação de aeração de biogás para o biodigestor melhorado de polietileno de alta densidade, aprimorado uma excelente abordagem para aumentar significativamente a produção de biogás. Considerando essa questão, é importante que o custo da implementação de novas tecnologias e pré-tratamentos seja levado em consideração.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERACIONES FINAIS

Neste estudo de revisão, através de uma revisão de literatura sobre a produção de biogás na co-digestão utilizando macrófitas para melhorar a produção de biogás, foram apresentadas as principais diretrizes dos estudos realizados entre 2000 e 2023. Isso foi feito por meio de uma análise bibliométrico de 1285 artigos obtidos em uma pesquisa nas plataformas SCIENDIRECT, SCOPUS e Springer.

Este artigo de revisão que usando a metodologia Methodi Ordinatio, foi possível estabelecer uma análise sistemático de 1285 artigos encontrados nas plataformas de busca: SCIENCDIRECT, SCOPUS e Springer. Com a filtragem inicial, 558 artigos ficaram na base de dados.

A análise bibliométrica mostrou que após 2015 houve um crescimento acelerado da pesquisa, dando nos últimos quatro anos quase 100 artigo por ano, o que coincidiu com a adoção do acordo de Paris em 2015 durante a COP 21.

Foi notado que as palavras “biogás”, “co-digestão” e “jacinto de água” foram usadas com alta frequência, pelo menos 211, 117 e 159 ocorrências respectivamente, em comparação com a palavra “salvinia molesta” com 15 ocorrências. Isso mostra que os trabalhos estão mais focados na macrófita jacinto de água do que outras macrófitas aquáticas. Além disso, foi possível analisar a presença de palavras-chave que não foram utilizadas na busca e puderem fornecer informações de tendências na pesquisa relacionadas ao assunto abordado no trabalho. Vale ressaltar a importância da palavra-chave “sustentabilidade” e, em seguida, “economia circular”, o que reforçou a ideia de que há uma baixa disponibilidade de pesquisas com foco na sustentabilidade por meio da produção de biogás a partir de co-digestão anaeróbica de macrófitas quando comparado à disponibilidade de pesquisas com foco no uso de macrófitas utilizando o mesmo processo.

Dentre os jornais que mais publicaram foram Bioresource Technology com 102 artigos, Renewable and Sustainable Energy Reviews com 72 artigos, Renewable Energy com 48 artigos. Sendo os autores, Ajay Kalamdhad, professor do departamento de Engenharia, no Instituto Índio de Tecnologia Guwahati, Índia, Mitsuhiro Koyama, Doutor de Engenharia, professor (associado) Universidade Nagasaki, Japão, Yu-You Li, professor de Engenharia Ambiental da Universidade de Tohoku, Japão os que mais destacaram na produção de estudos.

Para avaliar os avanços já alcançados e ainda necessários para aumentar a aplicação de produção de biogás com a co-digestão de macrófitas, foi realizado uma análise dos artigos mais relevantes sobre o tema, no qual foram selecionados artigos referentes a quatro das macrófitas, mas estudadas. Esses artigos foram selecionados após a aplicação de critério de inclusão/exclusão ao trabalho completo, resultando em uma análise de 21 artigos.

Entre os estudos de modelagem matemática, destacou-se a eficácia do modelo de Gompertz para simular a produção cumulativa de metano em termos de monitoramento de controle do processo de co-digestão anaeróbica e do digester de metano em grande escala e utilização de Desing-Expert software para otimização do biogás. Foram apresentados os efeitos de potencializar a produção de biogás na co-digestão com as macrófitas, a melhoria da progressão físico-química e bioquímica em comparação com a monodigestão.

Dentre os artigos analisados foi verificado a importância do uso das macrófitas para equilibrar a relação C//N, F/M e os níveis de pH, no processo da Digestão Anaeróbica, uma temperatura ideal mostrada nos processos de DA foi de 47,7 °C, e o pH de 7,194, a eficácia do processo de DA, será mais afetada pelas mudanças de pH dos valores ideais devido às variações de temperatura. Também se mostrou como a adição de elementos essenciais ao meio resultou na eficiência da degradação da matéria orgânica, a adição de biocarbono teve um impacto sinérgico no processo de biometanação. Assim como a velocidade de decomposição dos resíduos aumentou conforme a diluição foi incrementada, resultando em uma maior produção de biogás.

Outra razão da importância mostrada nos artigos foi a utilização de diferentes técnicas de pré-tratamento e o seu benefício considerável na degradação da estrutura da biomassa, tornando-a mais acessível aos microrganismos. Isso reduziria o tempo de hidrólise, melhorando a taxa de conversão para aumentar o rendimento do metano, um dos tratamentos mais utilizados pelos autores foi o tratamento alcalino termoquímico, chegando a uma eficácia na melhoria da solubilização, biodegradabilidade e produção de metano das misturas em comparação com os não tratados. O uso da recirculação de aeração de biogás para o biodigestor, aumentou significativamente a produção de biogás.

Novas tecnologias e pré-tratamentos são oportunidades para resolver problemas que afetam a utilização da DA em diferentes contextos. A utilização da biomassa de plantas aquáticas como fonte de biocombustível apresenta diversas vantagens em comparação a outras biomassas terrestres devido a sua elevada disponibilidade, mas também apresenta certas limitações, como é a produção em grande escala e sua viabilidade econômica. Assim é crucial desenvolver métodos econômicos e sustentáveis para transformar a biomassa aquática em produtos de alto valor, com o desenvolvimento de novas tecnologias e pré-tratamentos para aumentar a eficiência na produção de biogás.

Referências

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2023, (2023).
- [2] Energy Institute, "Statistical Review of World Energy," Energy Institute, (2023).
- [3] B. Sharma, S. Suthar. Enriched biogas and biofertilizer production from Eichhornia weed biomass in cow dung biochar-amended anaerobic digestion system. Environmental Technology & Innovation, (2021) 21, 101201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101201>
- [4] UNITED NATIONS, "UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION," (1992).
- [5] E. A. Omondi, P. K. Ndiba, P. G. Njuru, Characterization of water hyacinth (*E. crassipes*) from Lake Victoria and ruminal slaughterhouse waste as co-substrates in biogas production. SN Applied Sciences. (2019) <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0871-z>
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "THE STATE OF FOOD AND AGRICULTURE," (2019).
- [7] L. Fleck, M. Hermínia, F. Tavares, E. Eyng, Produção de biogás como fonte alternativa de energia: uma revisão RESUMO. Revista Eletronica Cientifica Inovação e Tecnologia. (2018)
- [8] C. G. de Azevedo, R. J. dos Santos, C. T. Hiranobe, A. F. Zanette, A. E. Job, and M. J. Silva, The invasive *Egeria densa* macrophyte and its potential as a new renewable energy source: A study of

- degradation kinetics and thermodynamic parameters. *Science of The Total Environment*, (2023). 856, 158979. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158979>
- [9] S. Nawaj Alam, B. Singh, A. Guldhe, Aquatic weed as a biorefinery resource for biofuels and value-added products: Challenges and recent advancements. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, (2021) 100235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100235>
- [10] R. Gusain, S. Suthar, Potential of aquatic weeds (*Lemna gibba*, *Lemna minor*, *Pistia stratiotes* and *Eichhornia sp.*) in biofuel production. *Process Safety and Environmental Protection*,(2017) 109, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.030>
- [11] R. N. Pagani, B. Pedroso, C. B. dos Santos, C. T. Picinin, J. L. Kovaleski, *Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation and presenting Findex and RankIn*. *Quality and Quantity*, (2023), 57(5), 4563–4602. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01562-y>
- [12] R. N. Pagani, J. L. Kovaleski, L. M. Resende, *Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication*. *Scientometrics*,(2015), 105(3), 2109–2135. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>
- [13] Y. A. Castro, F. A. Agblevor, Biomethanation of invasive water hyacinth from eutrophic waters as a post weed management practice in the Dominican Republic: a developing country. *Environmental Science and Pollution Research*, (2020), 27(12), 14138–14149. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07927-w>.
- [14] J. Kainthola, A. S. Kalamdhad, V. V. Goud, Optimization of methane production during anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla *verticillata* using response surface methodology. *Fuel*. (2019), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118312936>
- [15] G. Zhen, X. Lu, T. Kobayashi, Y.-Y. Li, K. Xu, Y. Zhao, Mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and *Egeria densa*: Performance assessment and kinetic analysis. *Applied Energy*, (2015) 148, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.038>
- [16] I. Syaichurrozi, Biogas production from co-digestion *Salvinia molesta* and rice straw and kinetics. *Renewable Energy*, (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117307772>.
- [17] S. Banerjee, S. Sivamani, R. Namdeti, B.S.N. Prasad, Optimization of biomethanation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) using biocatalyst. *Cellulose*, (2023) <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05076-0>
- [18] V. B. Barua, V. Rathore, A.S. Kalamdhad, Anaerobic co-digestion of water hyacinth and banana peels with and without thermal pretreatment. *Renewable Energy*. (2019)
- [19] V. B. Barua, A. S. Kalamdhad, Anaerobic biodegradability test of water hyacinth after microbial pretreatment to optimise the ideal F/M ratio, *Fuel*, (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236117316538>
- [20] Y. Unpaprom, T. Pimpimol, K. Whangchai, Sustainability assessment of water hyacinth with swine dung for biogas production, methane enhancement, and biofertilizer. *Biomass Conversion and Biorefinery* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00850-7>
- [21] H. Ingabire, M. Twizerimana, and M. M. M'Arimi, (2023). Effect of co-digestion with water hyacinth, inoculum concentration and dilution on biogas production of fish waste. *Energy Reports*, 9, 286–290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.072>
- [22] F. Karouach, W. ben Bakrim, A. Ezzariai, I. Mnaouer, M. Ibourki, M. Kibret, M. Sobeh, M. Hafidi, L. Kouisni, Valorization of water hyacinth to biomethane and biofertilizer through anaerobic digestion technology. *Fuel*, (2024), 358, 130008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130008>

- [23] T. S.Nam, N. Van Cong, N., & van Thao, H. , Enhancing renewable energy production from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) by a biogas-aerating recirculation system: A case study in the Vietnamese Mekong Delta. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100340>.
- [24] I. Bhui, A. K. Mathew, S. Chaudhury, & S. Balachandran, Influence of volatile fatty acids in different inoculum to substrate ratio and enhancement of biogas production using water hyacinth and salvinia. *Bioresource Technology*, (2018), 270, 409–415. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.055>
- [25] W. Sudjarid, and P. Jarupunphol, Anaerobic digestion of municipal organic waste by using *Hydrilla verticillata* (Linnaeus f.) Royle as a co-substrate, *Interdisciplinary Research Review*, (2018). <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/jtir/article/view/126272>
- [26] A. Sathyan, S. Koley, M. Khwairakpam Effect of thermal pretreatments on biogas production and methane yield from anaerobic digestion of aquatic weed biomass *Hydrilla verticillata*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, (2023), <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04890-7>
- [27] M. Kawaroe, H. Effendi, Z. I. Palupi, Utilization of aquatic weed *Salvinia molesta* as a raw material for biogas production. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, (2019), <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jphpi/article/view/27891>
- [28] S. Sutaryo, A. N. Sempana, I. Prayoga, F. G. Chaniaji, S. D. Dwitama, N. F. Sugandi, A. Purnomoadi, A. J. Ward, Increased methane yield from dairy cow manure by co-substrate with *Salvinia molesta*. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, (2023), 28(3). <https://doi.org/10.14456/apst.2023.39>
- [29] I. Syaichurrozi, P. K. Villta, N. Nabilah, R. Rusdi, Effect of sulfuric acid pretreatment on biogas production from *Salvinia molesta*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, (2019), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343718307802>
- [30] J. C. F. Dutra, M.F. Passos, L.A.S. Nascimento, R. Maciel Filho, G. Mockaitis, Biodegradability study of *Egeria densa* biomass using acid and basic pre-treatments for use in bioprocessing of energy products. *Bioresource Technology Reports*, (2019), 6, 279–284. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.03.014>
- [31] M. Koyama, S. Yamamoto, K. Ishikawa, S. Ban, S., T. Toda, Enhancing anaerobic digestibility of lignin-rich submerged macrophyte using thermochemical pre-treatment. *Biochemical Engineering Journal*, (2015), 99, 124–130.