

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DIANA KAELY DE JESUS PRADO

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ÁGUAS
RESIDUÁRIAS:
UMA REVISÃO SISTEMATIZADA E BIBLIOMÉTRICA**

SÃO CARLOS - SP

2023

DIANA KAELY DE JESUS PRADO

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ÁGUAS
RESIDUÁRIAS:
UMA REVISÃO SISTEMATIZADA E BIBLIOMÉTRICA**

Trabalho de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Graduação.
Orientador (a): Profa. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa.

SÃO CARLOS - SP

2023

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha avó materna in memoriam e à minha mãe,
fontes de força e amor imensuráveis.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, o maior suporte do meu caminho até aqui. Em todos os momentos em que eu duvidei da minha capacidade de ultrapassar as barreiras que surgiram em meu caminho, você sempre foi o meu motivo para acreditar em mim mesma.

Agradeço também a todos os familiares e amigos que contribuíram de várias formas para que eu evoluísse até me tornar a pessoa que sou hoje, sendo fonte de carinho nos momentos de desalento e as melhores companhias nas celebrações das conquistas.

Em especial agradeço ao meu companheiro que tem estado ao meu lado nos últimos e mais desafiadores anos de minha vida, nos quais me descobri capaz do que nunca conseguiria imaginar ser, seu amor e cuidado fizeram de cada dia da elaboração deste trabalho um dia melhor.

Por fim, agradeço aos professores da Universidade Federal de São Carlos que compartilharam comigo seus conhecimentos e despertaram em mim enorme admiração, especialmente, à minha orientadora que sempre manteve a confiança em meu trabalho e me forneceu completa atenção e apoio durante a elaboração do mesmo, bem como ao Prof. Túlio Queijo de Lima por aceitar o convite para compor a banca de avaliação deste trabalho.

EPÍGRAFE

Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar.

(Chico Science)

RESUMO

A elevação da temperatura do planeta em consequência do efeito estufa acelerou após a Revolução Industrial devido ao aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEEs) pela atividade humana, aumentando a frequência de mudanças no clima e desastres ambientais ao longo do globo. Tecnologias para gestão de resíduos e recuperação de bioenergia podem contribuir para a redução de GEE emitidos na atmosfera, ao apoiar a transição para uma economia circular. Dentro deste contexto, foi proposta uma avaliação do desenvolvimento da pesquisa global primária sobre a produção de biogás (biometano) a partir da digestão anaeróbia (DA) de águas residuárias (ARs) por meio de uma análise bibliométrica dos artigos publicados de 1995 a 2022, obtidos em uma busca avançada na plataforma *Web of Science* chegando a um total de 5.430 artigos que estudaram a produção de biogás através da DA de ARs nos últimos 27 anos, sendo que o ano de 2022 apresentou o maior número de publicações (557 artigos). Para a análise de palavras chaves, observou-se uma alta frequência de uso de “tratamento de águas residuárias” (377 ocorrências) e “lodo de esgoto” (155 ocorrências) em contraste com “recuperação de energia” (82 ocorrências), demonstrando um foco dos trabalhos, ainda, direcionados mais para o tratamento de ARs do que para a produção de biogás. A Elsevier se destacou como editora, com a publicação de ao menos 50% dos artigos analisados. Em relação aos países que mais produziram estudos, a China lidera com 21% das publicações e dentre as instituições nas quais os autores são afiliados destacou-se a Chinese Academy of Sciences (232 artigos). Os autores Bing-Jie Ni da University of Technology Sydney e Zhiguo Yuan da University of Queensland, destacaram-se tanto como os que mais publicaram quanto como os mais citados, enquanto na nona posição dentre os que mais publicaram apareceu o pesquisador Marcelo Zaiat do Brasil. Quanto às palavras chaves relativas a águas residuárias, destacou-se “água residuária de processamento de oliva” (72 ocorrências), resíduo que tem sido visto como um problema ambiental de grande gravidade devido à sua alta demanda química de oxigênio no processo de estabilização da matéria orgânica e toxicidade. Dentre os artigos mais relevantes avaliou-se as principais modelagens matemáticas para simulação dos sistemas, parâmetros de operação, composição do meio (AR, inóculo, entre outros), pré-tratamentos de substratos e tecnologias de melhoria de performance estudadas, conhecendo-se alguns dos principais avanços e desafios da produção de biogás a partir da DA de ARs.

Palavras-chave: Água residuária. Digestão anaeróbia. Biogás. Revisão sistemática. Análise bibliométrica. Artigos de pesquisa.

ABSTRACT

The increase in the temperature of the planet as a result of the greenhouse effect accelerated after the Industrial Revolution due to the increase in the emission of greenhouse gases (GHGs) by human activity, increasing the frequency of changes in climate and environmental disasters across the globe. Technologies for waste management and bioenergy recovery can contribute to the reduction of GHG emitted into the atmosphere, by supporting the transition to a circular economy. Within this context, an assessment of the development of primary global research on the production of biogas (biomethane) from anaerobic digestion (AD) of wastewater was proposed through a bibliometric analysis of articles published from 1995 to 2022, obtained in an advanced search on the Web of Science platform, reaching a total of 5,430 articles that studied the production of biogas through the wastewater AD in the last 27 years, with the year 2022 having the highest number of publications (557 articles). For the analysis of keywords, a high frequency of use of “wastewater treatment” (377 occurrences) and “sewage sludge” (155 occurrences) was observed in contrast to “energy recovery” (82 occurrences), demonstrating a focus of work, still directed more towards the wastewaters treatment than towards the production of biogas. Elsevier stood out as a publisher, publishing at least 50% of the analyzed articles. Regarding the countries that produced the most studies, China leads with 21% of the publications and among the institutions in which the authors are affiliated, the Chinese Academy of Sciences stood out (232 articles). The authors Bing-Jie Ni from the University of Technology Sydney and Zhiguo Yuan from the University of Queensland stood out both as the ones who published the most and as the most cited, while in the ninth position among those who published the most appeared the researcher Marcelo Zaiat from Brazil. As for the keywords related to wastewater, “wastewater from olive processing” (72 occurrences) stood out, waste that has been seen as a very serious environmental problem due to its high chemical demand for oxygen in the process of stabilization of the organic matter and toxicity. Among the most relevant articles, the main mathematical models for simulating the systems, operating parameters, composition of the medium (wastewater, inoculum, among others), pre-treatment of substrates and performance improvement technologies studied were evaluated, knowing some of the main advances and challenges of biogas production from wastewater AD.

Keywords: Wastewater. Anaerobic digestion. Biogas. Systematic review. Bibliometric analysis. Research articles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fontes de matéria orgânica.	7
Figura 4.1 - Esquema da busca realizada para análise bibliométrica e análise de artigos relevantes.	21
Figura 5.1 - Quantidade de artigos publicados por ano.	23
Figura 5.2 - Gráfico de frequência de uso da palavra chave.	24
Figura 5.3 - Gráfico de artigos por nomenclatura de empresas editoriais e instituições publicadoras.	26
Figura 5.4 - Gráfico de artigos publicados por jornais.	27
Figura 5.5 - Principais áreas de pesquisa dos estudos analisados.	28
Figura 5.6 - Gráfico de publicações por autor ao ano.	29
Figura 5.7 - Gráfico de quantidade de citações por autor.	30
Figura 5.8 - Quantidade de publicações por país do principal autor.	31
Figura 5.9 - Quantidade de autores por afiliação.	32
Figura 5.10 - Gráfico de frequência de uso de palavras chaves relativas a tipos de ARs.	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Principais águas residuárias estudadas em artigos relevantes, suas características e características dos sistemas de DA em que são alimentadas.	10
Quadro 4.1 - Aplicação da ferramenta SPIDER.	19
Quadro 5.1 - Principais informações dos artigos mais relevantes.	35

LISTA DE SIGLAS

AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AR	Água Residuária
C	Carbono
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
COP	Conferência das Partes
CPCI-S	Conference Proceedings Citation Index - Science
DA	Digestão Anaeróbia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ESCI	Emerging Sources Citation Index
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
MAB	Meio Anaeróbio Básico
N	Nitrogênio
PICO	<i>Population/problem, Intervention/exposure, Comparison and Outcomes</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
R	Coefficiente de correlação
R ²	Coefficiente de determinação
RNA	Redes Neurais Artificiais
SCI-EXPANDED	Science Citation Index Expanded
SPIDER	<i>Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation e Research type</i>
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WoS	Web of Science

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 GERAL	3
2.2 ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, AQUECIMENTO GLOBAL E GASES DE EFEITO ESTUFA	4
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA	5
3.2.1 Substratos Utilizados na Digestão Anaeróbia	7
3.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS	8
3.3.1 Principais Tipos de Águas Residuárias e Suas Características	8
3.3.2 Principais Parâmetros do Processo de Produção de Biogás a Partir de Águas Residuárias	14
4 METODOLOGIA	17
4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA	17
4.1.1 Extração de Dados	17
4.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	22
4.3 ANÁLISE DOS ESTUDOS MAIS RELEVANTES	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	23
5.1.1 Evolução das Publicações	23
5.1.2 Análise das Principais Palavras Chaves Utilizadas	24
5.1.3 Principais Editoras, Instituições Publicadoras e Jornais	25
5.1.4 Análise das Áreas de Pesquisa dos Estudos	27
5.1.5 Autores Mais Produtivos e Mais Citados	28
5.1.6 País e Afiliação de Autores	30
5.1.7 Águas Residuárias Mais Utilizadas na Produção de Biogás	32
5.2 ANÁLISE DOS ESTUDOS MAIS RELEVANTES	33
5.2.1 Modelagem Matemática	40
5.2.2 Composição do meio e Parâmetros Operacionais	40
5.2.3 Pré-tratamentos e Tecnologias	41
6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
7 REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura do planeta ocasionado pelo efeito estufa tem se acelerado após a Revolução Industrial devido ao aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEEs) através da atividade humana, o que tem levado à ocorrência, cada vez mais frequente, de mudanças no clima e desastres ambientais ao longo do globo. Com o objetivo principal de alcançar a neutralidade das emissões de GEEs na atmosfera a tempo de controlar a concentração desses gases em níveis que ainda permitam a adaptação natural dos ecossistemas da Terra iniciou-se, no ano de 1995, a realização anual da Conferência das Partes (COP), da qual participam os países que compõem a United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). As maiores realizações durante as COPs foram a adoção do Protocolo de Quioto em 1997 por, atualmente, 192 países e a adoção do Acordo de Paris em 2015 por 196 países (“Conference of the Parties (COP) | UNFCCC”, [s.d.]).

Um importante ponto do protocolo de Quioto é o estabelecimento de mecanismos baseados no mercado, que possibilitam que os países atinjam as suas metas de emissões sem que seja somente por meio de medidas nacionais, criando o “mercado de carbono” e estimulando investimentos em projetos de redução de emissões ou remoções de emissões internacionalmente. Esse ponto é fortalecido pelo acordo de Paris ao afirmar que os países desenvolvidos devem auxiliar os demais países financeiramente e que se deve realizar o desenvolvimento pleno e transferência de tecnologia para redução da emissão de GEE (“The Paris Agreement | UNFCCC”, [s.d.]).

Tecnologias para gestão de resíduos e recuperação de bioenergia podem contribuir para a redução da emissão de GEE na atmosfera, ao apoiar a transição para uma economia circular (FERREIRA et al., 2021). Um combustível limpo e renovável vem ganhando destaque no mercado, o biogás, que pode ser utilizado em motores geradores de energia elétrica e para a produção de biometano, um forte substituto do gás natural veicular (GNV) em veículos leves e até caminhões para transporte de cargas (“Biogás: a próxima fronteira da energia renovável.”, 2018).

O biogás pode ser produzido através de um processo biológico, chamado de digestão anaeróbia (DA). Este processo se caracteriza pela ação de um ecossistema de microrganismos anaeróbios, estritos ou facultativos, em sinergia durante a degradação de moléculas orgânicas complexas presentes em resíduos, por exemplo, carboidratos, proteínas e lipídeos, até a formação de metano (CH₄), em maioria, e dióxido de carbono (CO₂) (CREMONEZ et al., 2021).

Entre os substratos utilizados como fonte de biomassa no processo DA, as águas

residuais (ARs) tem ganhado atenção considerável devido às vantagens, tais como: altas possibilidades de carga orgânica, baixa exigência de nutrientes e ganho líquido positivo de energia (LIN et al., 2012). ARs de processos industriais, da pecuária e municipais são resíduos produzidos em ampla quantidade e necessitam de tratamento antes de serem dispostos novamente no ambiente. A utilização do processo de DA para realização desse tratamento possui a vantagem de permitir a recuperação de energia desses resíduos, agregando valor ao processo de tratamento (GREENFIELD and BATSTONE, 2005; NEGRI et al., 2016; SCARLAT et al., 2018; ABDESHAHIAN et al., 2016).

Em busca de melhoras na performance do processo de DA são realizados estudos em busca de compreender a influência dos parâmetros do processo sobre a degradação da matéria orgânica e de produção de biogás (temperatura, potencial de hidrogênio (pH) e tempo de retenção hidráulica (TRH)), bem como de superar as causas de inibição da atividade dos microrganismos anaeróbios.

Uma revisão sistemática com uma análise bibliométrica da pesquisa global promove a avaliação do comportamento do desenvolvimento da pesquisa produzida sobre o assunto, bem como os estudos mais relevantes ao tema, permitindo a avaliação dos avanços já obtidos e ainda requeridos, para aumentar a aplicação da produção de biogás em escala industrial. Diante deste contexto, este trabalho propõe uma avaliação, por meio de uma revisão sistemática, do desenvolvimento da pesquisa global nos últimos 27 anos, sobre a produção de biogás (biometano) a partir da DA de ARs geradas em larga escala, avaliando progressos, tendências e lacunas no tema da pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Este trabalho tem como objetivo contextualizar o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à produção de biogás por meio da DA de ARs para direcionar pesquisadores na realização de buscas e trabalhos sobre o tema, além de buscar um entendimento do desenvolvimento do processo e futuras perspectivas neste campo de pesquisa.

2.2 ESPECÍFICOS

De forma mais detalhada, procurou-se:

- a) Conhecer como as pesquisas a respeito da geração de biogás a partir de ARs evoluíram nos últimos anos no mundo, o uso de palavras chaves pelos autores, as editoras que publicam a pesquisa, os principais jornais onde as pesquisas são publicadas, as áreas de estudos, autores por número total de publicações e citações, além de instituições de afiliação dos autores;
- b) Apresentar as principais águas residuárias foco dos estudos obtidos para a análise realizada neste trabalho;
- c) Identificar os artigos mais relevantes já desenvolvidos nos últimos 27 anos relacionados à produção de biogás a partir de ARs e apresentar uma análise sobre os mesmos, quanto aos principais desafios da produção de biogás a partir de ARs, para se tornar cada vez mais atrativa ao mercado, ou seja, melhorar a sua eficiência, aplicabilidade e rentabilidade.
- d) Buscar conhecer nos trabalhos mais relevantes na área de pesquisa em questão, as modelagens matemáticas para simulação dos sistemas, parâmetros de operação, composição do meio (AR, inóculo, entre outros), pré-tratamentos de substratos e tecnologias de melhoria de performance mais estudadas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Como passo inicial deste trabalho, realizou-se um levantamento das informações necessárias para se compreender a influência dos GEEs na ocorrência de mudanças climáticas e a importância da redução das emissões destes gases pela substituição de combustíveis de origem fóssil por biocombustíveis como o biogás, produzido através da DA de resíduos orgânicos.

Por fim, realizou-se um levantamento dos fundamentos do processo bioquímico de DA e dos substratos utilizados no processo. Além, de um levantamento de informações sobre o uso de ARs para produção de biogás e os principais parâmetros que podem afetar o sistema.

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, AQUECIMENTO GLOBAL E GASES DE EFEITO ESTUFA

As mudanças climáticas possuem efeitos que podem chegar a níveis catastróficos como, o aumento da temperatura global, o derretimento de geleiras polares que levam ao aumento do nível dos mares, tempestades mais intensas e períodos de seca mais frequentes, afetando diretamente a vida da população mundial (“Afinal, o que são as mudanças climáticas?”, 2022).

As mudanças climáticas são atribuídas diretamente a práticas do ser humano que vem se intensificando exponencialmente desde a Revolução Industrial. A emissão de gases originários da queima de combustíveis fósseis, o aumento do desmatamento e queimadas e a emissão de gases poluentes têm acumulado na atmosfera GEEs, principalmente o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). O efeito estufa é um fenômeno natural e importante para a sobrevivência do ser humano, pois é responsável por manter a temperatura do planeta ao reter parte da radiação solar que chega até a terra. Entretanto, o aumento rápido dos GEEs na atmosfera tem causado um aumento da temperatura terrestre, ao qual os ecossistemas terrestres não tiveram tempo suficiente para se adaptar (“Você sabe como os gases de efeito estufa aquecem o planeta?”, 2022).

A transição para o uso de energia limpa e de fontes renováveis é uma importante iniciativa para redução da emissão de GEEs (“Afinal, o que são as mudanças climáticas?”, 2022). Uma das fontes de energias renováveis são os biocombustíveis, tais como o biogás, que se originam de materiais vegetais e orgânicos. Dessa forma, o biocombustível se encontra dentro de um ciclo em que o CO_2 gerado após a sua combustão pode ser consumido por um vegetal que novamente poderá ser matéria prima direta ou indireta para a produção de um biocombustível. Isso ocorre na produção do biogás, que pode ser gerado por meio do processo de digestão anaeróbia (DA) de resíduos compostos de matéria orgânica (CHERNICHARO,

2007).

3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A DA é uma tecnologia convencional para a produção de energia renovável (biogás), na qual usa-se um substrato, que normalmente é composto por esterco animal, esgoto ou resíduo orgânico, transformando-o em biogás e digerido. O biogás pode ser recuperado como energia via cogeração e usado para geração de energia térmica e elétrica, enquanto o digerido pode ser usado como fertilizante (TAVERA-RUIZ et al., 2023).

A digestão da matéria orgânica é realizada através de diferentes fases nas quais microrganismos, facultativos ou estritamente anaeróbios, responsáveis por degradar moléculas orgânicas de diferentes níveis de complexidade, atuam formando um ecossistema que pode existir em equilíbrio (CHERNICHARO, 2007), quando não estão em um ambiente tóxico. A fase final da digestão anaeróbia é a responsável pela formação de CH_4 e CO_2 , os principais componentes do biogás. As etapas da DA podem ser separadas em:

- a) Hidrólise é a primeira fase do processo de DA, onde a matéria orgânica complexa como carboidratos, proteínas e lipídios são convertidos em compostos mais simples como açúcares, aminoácidos e peptídeos. Essa matéria orgânica complexa pode ser encontrada em resíduos líquidos como sólidos suspensos (material particulado), enquanto o material orgânico mais simples, formado após a hidrólise, pode ser encontrado dissolvido e a conversão de um material em outro é realizada através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Em meio anaeróbio, a hidrólise de matéria orgânica particulada ocorre usualmente de forma lenta (CHERNICHARO, 2007).
- b) Acidogênese é a fase em que as bactérias fermentativas acidogênicas transformam a matéria orgânica formada durante a hidrólise em diversos produtos mais simples, dentre os quais estão ácidos graxos voláteis (AGVs), H_2 , CO_2 , acetato, glicose, álcoois, ácido láctico, NH_3 e H_2S . A sua designação é devido aos AGVs serem os principais produtos dessas bactérias. A maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, entretanto as que são facultativas tem grande importância no sistema de DA, visto que, de certa forma, elas protegem as bactérias anaeróbias estritas contra a exposição a oxigênio que possa vir a se apresentar no meio (CHERNICHARO, 2007).
- c) Acetogênese é a fase da DA em que as bactérias acetogênicas cumprem sua função de degradar os produtos formados pelas acidogênicas, sendo estas

responsáveis por degradar pelo menos 50% da DQO biodegradável convertendo-a em propionato e butirato, que são convertidos pelas acetogênicas em acetato e H₂, além da produção de CO₂ a partir de outros compostos. Entretanto, as acetogênicas também são capazes de realizar o processo inverso consumindo H₂, CO₂ e acetato. As bactérias acetogênicas são as maiores formadoras de H₂ dentre as bactérias que fazem parte do ecossistema da DA, fazendo com que o pH do meio diminua (CHERNICHARO, 2007).

- d) Metanogênese é a última fase da DA, onde as *Archeas* metanogênicas consomem, a depender da espécie, o acetato formando CH₄ e CO₂ ou H₂ e CO₂ para formar o CH₄. Além desses, as *Archeas* metanogênicas também podem utilizar como substratos o ácido fórmico, o metanol, metilaminas e o CO. As acetoclásticas são as que utilizam o acetato, representando uma pequena quantidade das espécies de *Archeas* metanogênicas, mas são normalmente os microrganismos predominantes na DA sendo responsáveis por cerca de 60 a 70 % de toda a produção de CH₄. As hidrogenotróficas são as que consomem o H₂ para a produção do CH₄ e representam a grande maioria das espécies de *Archeas* metanogênicas, visto que a maioria das espécies deste domínio são capazes de realizar essa reação mesmo que também consumam o acetato (CHERNICHARO, 2007).

As principais reações realizadas pelas *Archeas* metanogênicas de forma sinérgica durante a metanogênese, são descritas pelas equações de (1) a (5) (CREMONEZ et al., 2021).



3.2.1 Substratos Utilizados na Digestão Anaeróbia

O substrato do processo de DA é, de forma geral, matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, presente em resíduos da agricultura, pecuária, agroindústrias, indústrias alimentícias, indústrias de papel e celulose, cervejarias, resíduos urbanos orgânicos, entre outros (FEAM, 2015), conforme é esquematizado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fontes de matéria orgânica.



Fonte: Adaptada de CATUMBA et al., 2022

(construída com imagens sob licença Pixabay e Pexels).

Podem ser utilizados para processamento a seco (Sólidos Totais na matéria prima $\geq 20\%$), semi-seco (Sólidos Totais na matéria prima 10-20%) e molhado (Sólidos Totais na matéria prima $\leq 10\%$) (KOMILIS et al., 2017). Embora, digestores anaeróbios que operam com digestão sólida possuam menores volumes quando comparados com os que operam com digestão líquida, devido à menor diluição do substrato, os sistemas de digestão líquida geralmente apresentam reações mais intensas com tempo de retenção do substrato menores (KAINTHOLA et al., 2019).

Os principais componentes do substrato da DA para a produção de biogás são os carboidratos, proteínas e lipídios (BATSTONE et al., 2002), que possuem subclassificações de acordo com suas propriedades, complexidade e, conseqüentemente, taxa de degradação.

3.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

A partir de uma seleção de artigos relevantes sobre o tema, foi construída uma visão das ARs estudadas, suas características e características do sistema de DA ao qual são alimentadas.

3.3.1 Principais Tipos de Águas Residuárias e Suas Características

Entre os vários substratos ricos em conteúdo orgânico para o processo de DA, as águas residuárias têm ganhado uma atenção considerável devido às vantagens, tais como: altas possibilidades de carga orgânica, baixa exigência de nutrientes e ganho líquido positivo de energia. Assim a utilização de águas residuárias como substrato para a produção de biogás, com o tratamento simultâneo de efluentes é uma alternativa atraente e eficaz, aproveitando a energia limpa de fontes renováveis em uma abordagem sustentável. Isso fornece duplo benefício, tanto na direção do tratamento de águas residuárias, juntamente com geração sustentável de bioenergia (LIN et al., 2012).

ARs de cervejaria são estudadas por ENITAN et al., 2015 e ENITAN et al., 2018. MAAMRI; AMRANI, 2019 e KHOUFI; LOUHICHI; SAYADI, 2015 estudam a co-digestão de AR de processamento de oliva com lodo ativado residual e com esterco de aves líquido, respectivamente. RUAN et al., 2017 e KARAMICHAILIDOU et al., 2022 estudam o sistema de produção de biogás a partir de AR da produção de papel e celulose. A co-digestão de AR de abatedouro e soro de leite é estudada por MANAV-DEMIR; UNAL, 2022. ANYANGO; WANDERA; RAUDE, 2022 também estuda a co-digestão de AR de abatedouro, mas com a lama de prensagem de açúcar (resíduo da recuperação de sacarose em filtro prensa). ARs de processamento de carne vermelha são estudadas por SCHMIDT et al., 2019 e SCHMIDT et al., 2018. AR de indústria petroquímica e de refinaria de petróleo são estudadas em co-digestão com esterco ativado e bagaço de cana de açúcar, respectivamente, por MEHRYAR et al., 2017 e SIDDIQUE; MUNAIM; AB. WAHID, 2016. PRAJAPATI; SINGH, 2020 e AMO-DUODU et al., 2021 estudam o uso das ARs urbanas/municipais. ARs de indústria de suco e de vinícola são estudadas, respectivamente, por ZERROUKI et al., 2021 e LAUZURIQUE et al., 2022. ANTWI et al., 2017 estuda a AR de processamento de amido de batata, enquanto o WADJEAM; REUNGSANG, 2018 estuda a co-digestão da AR de fécula de mandioca com efluente hidrogenado (processo de produção de hidrogênio). O Soro de látex desnatado (processo de desnatação de borracha) é estudado por RAKETH et al., 2021 e a AR de usina de açúcar é estudada por KUMAR et al., 2021.

O Quadro 3.1 indica as características das ARs e os principais parâmetros do processo para a produção de biogás a partir de ARs. A demanda química de oxigênio (DQO) das ARs

apresentadas variam desde $0,360 \pm 0,056$ gDQO/L até 500 ± 10 gDQO/L, a razão de carbono (C) por nitrogênio (N) varia entre 107 e 2,7, o pH vai de $9,17 \pm 0,04$ a $3,09 \pm 0,01$ e a temperatura (T) do meio varia entre 55 e 24 °C.

O rendimento de biogás e teor de metano se destacam para a co-digestão de AR de indústria petroquímica com esterco ativado e para a digestão de AR de processamento de amido de batata sob as condições estudadas, respectivamente.

Quadro 3.1 – Principais águas residuárias estudadas em artigos relevantes, suas características e características dos sistemas de DA em que são alimentadas.

Autores	Substrato/Inóculo	DQO (g/L) (Solúvel) ^a (meio) ^d	ST (g/L) (%) ^b (g/kg) ^f (meio) ^d	SV (g/L) (%) ^b (% ST) ^c (meio) ^d	C/N (meio) ^d	pH (meio) ^d	T (°C) (meio) ^d	Rend. biogás/CH ₄ * (l/g DQO) (l/g SV) ^e	Fração CH ₄ (%)
(ENITAN et al., 2015)	AR de Cervejaria	2,0 ^d	-	-	250/0,07 ^d	6,9 ^d	-	-	65,90
(MAAMRI; AMRANI, 2019)	Lodo ativado residual AR de processamento de oliva/ -	90,7 ± 1,8 128,1 ± 5,4/ -	150,0 ± 0,8 69,5 ± 3,1/ -	71,7 ± 0,5 (0,64 diluído) 57,4 ± 4,5/ -	-	7,80 ± 0,15 4,80 ± 0,10/ - 6,79 ± 0,01 a 8,16 ± 0,20 ^d	55 ^d	0,517 ^e	71,00
(KUMAR et al., 2021)	Resíduo de cogumelo AR de usina de açúcar/ Esterco de gado	12,24 ± 0,11 1,78 ± 0,06/ 10,16 ± 0,10	41,65 ± 1,99 ^b -/ 5,46 ± 0,22 ^b	64,23 ± 0,87 ^b -/ 3,12 ± 0,05 ^b	9,53 -/ 12,28	5,05 ± 0,05 6,57 ± 0,03/ 8,16 ± 0,08	-	-	63,05
(RUAN et al., 2017)	AR de produção de papel e celulose/ -	-	-	-	-	-	-	-	-
(MANAV-DEMIR; UNAL, 2022)	Soro de queijo AR de abatedouro Esterco de galinha Esterco de gado/ LAG de indústria de goma LA de estação municipal de tratamento de esgoto	105,15 ± 2,12 43,68 ± 1,85 118,43 ± 6,44 35,40 ± 3,08/ - -	47,0 ± 0,7 45,0 ± 1,1 - -/ 261,0 ± 4,7 56,0 ± 0,4	18,0 ± 0,7 21,0 ± 1,0 - -/ 201,0 ± 1,5 32,0 ± 0,4	-	4,96 ± 0,05 9,17 ± 0,04 - -/ - - 7,0 ± 0,1 ^d	35 ± 2 ^d	0,36*	> 50

Autores	Substrato/Inóculo	DQO (g/L) (Solúvel) ^a (meio) ^d	ST (g/L) (%) ^b (g/kg) ^f (meio) ^d	SV (g/L) (%) ^b (% ST) ^c (meio) ^d	C/N (meio) ^d	pH (meio) ^d	T (°C) (meio) ^d	Rend. biogás/CH ₄ * (l/g DQO) (l/g SV) ^e	Fração CH ₄ (%)
(SCHMIDT et al., 2019)	AR de processamento de carne vermelha/ LA de lagoa coberta	5,09 ±0,94 ^d	0,32 ± 0,04 ^b ^d	70 ± 4 ^{c d}	-	6,88 ^d	38 a 25,5 ^d	0,342	71,12
(ANTWI et al., 2017)	AR de processamento de amido de batata/ Lodo ativado de tratamento de esgoto municipal	4,03 ^d	-	-	-	7 ^d	35 ± 1 ^d	-	65 a 75
(ZERROU KI et al., 2021)	AR de indústria de suco de fruta/ -	500 ± 10/ -	110,00 ± 1,23/ -	0,85 ± 0,03/ -	-	3,09 ± 0,01/ - 7 ^d	35 ± 2 ^d	aumento de 60	até 64
(KARAMI CHAILIDO U et al., 2022)	AR de produção de papel e celulose/ -	-	-	-	-	-	-	-	-
(LAUZURI QUE et al., 2022)	AR de vinícola/ Digestão de lodo de esgoto	5,49 ± 0,25 ^a / 1,30 ± 0,04 ^a	- / 30,20 ± 0,26	- / 20,90 ± 0,33	-	6,50 ± 0,10/ 7,38 ± 0,02 7 ^d	35 ± 2 ^d	-	-
(PRAJAPATI; SINGH, 2020)	AR urbana Palha de trigo/ -	0,360 ± 0,056 - / 1,2	- 97,87 ± 0,72/ 1,30 ± 0,57	- 75,60 ± 0,77/ 64,80 ± 15,80	-	7,02 ± 0,08 - / 8,40 ± 0,02	37 ± 1 ^d	-	-

Autores	Substrato/Inóculo	DQO (g/L) (Solúvel) ^a (meio) ^d	ST (g/L) (%) ^b (g/kg) ^f (meio) ^d	SV (g/L) (%) ^b (% ST) ^c (meio) ^d	C/N (meio) ^d	pH (meio) ^d	T (°C) (meio) ^d	Rend. biogás/CH ₄ * (l/g DQO) (l/g SV) ^e	Fração CH ₄ (%)
(ANYANG O; WANDER A; RAUDE, 2022)	AR de abatedouro Lama de prensagem de açúcar/ Digestão de estrupe de laticínios	16,0 ± 0,1 7,36 ± 0,00/ 15,1 ± 0,1	3,5 ± 0,3 ^b 6,3 ± 0,3 ^b / 7,1 ± 0,3 ^b	3,2 ± 0,3 ^b 5,7 ± 0,6 ^b / 6,3 ± 0,3 ^b	9,65 26,23/ -	8,06 5,41/ 7,2	37 ± 1 ^d	-	-
(RAKETH et al., 2021)	Soro de látex desnatado/ Digestão de efluente de fábrica de óleo de palma	33,02 a 43,11/ -	33,28 a 44,74/ -	32,64 a 37,94/ -	-	5,22 a 5,78/ -	35 ^d	-	-
(KHOUI; LOUHICHI ; SAYADI, 2015)	AR de processamento de oliva Esterco líquido de aves/ Digestão de AR de processamento de oliva	150 ± 15 97 ± 9/ -	52,16 ± 6,00 49,3 ± 9,0/ 4,2 ^b	- -/ 2,3 ^b	-	7,2 ^d	37 ± 2 ^d	-	-
(MEHRYA R et al., 2017)	AR de refinaria de petróleo Bagaço de cana de açúcar/ Lodo ativado	-	1,73 ± 0,03 ^b 58,90 ± 0,01 ^b / 2,51 ± 0,10 ^b	2,69 ± 0,70 ^c 97,59 ^c / 49,35 ± 1,00 ^c	83,33 29,64/ 17,71	7,02 ± 0,05 a 7,70 ± 0,10 ^d	37 ± 1 ^d	-	-
(SCHMIDT et al., 2018)	AR de processamento de carne vermelha/ -	5,03 ± 1,05 ^d	0,31 ± 0,05 ^b / -	70,24 ± 4,53 ^c / -	2,7/ -	-	38 ^d	0,332	75%

Autores	Substrato/Inóculo	DQO (g/L) (Solúvel) ^a (meio) ^d	ST (g/L) (%) ^b (g/kg) ^f (meio) ^d	SV (g/L) (%) ^b (% ST) ^c (meio) ^d	C/N (meio) ^d	pH (meio) ^d	T (°C) (meio) ^d	Rend. biogás/CH ₄ * (l/g DQO) (l/g SV) ^e	Fração CH ₄ (%)
(WADJEA M; REUNGSA NG, 2018)	AR de fécula de mandioca Efluente hidrogenado/ Lodo anaeróbio	-	25,8 - / 133,5 ^f	11,03 - / 120,0 ^f 60,0 ^d	-	7,5 ^d	30 ± 2 ^d	-	-
(AMO- DUODU et al., 2021)	AR municipais/ Lodo anaeróbio ativado	2,38 ± 0,06 ^d	0,204 ± 0,024 ^d	0,106 ± 0,033 ^d	-	6,59 ± 1,30 ^d	40,0 ± 2,5 ^d	-	-
(ENITAN et al., 2018)	AR de cervejaria/ -	2,00 ± 1,14/ -	1,29 a 12,25/ -	-	-	4,6 a 7,3/ -	24 a 30,5/ -	-	-
(SIDDIQU E; MUNAIM; AB. WAHID, 2016)	AR de petroquímica Esterco ativado/ Lodo anaeróbio ativado residual	15,0 ± 0,3 16,0 ± 0,2/ 6,84 ± 0,20	10,50 ± 0,05 ^b 10,00 ± 0,06 ^b / 1,50 ± 0,01 ^b	7,50 ± 0,02 ^b 7,00 ± 0,04 ^b / 0,65 ± 0,01 ^b	107 10,9/ -	6,12 ± 0,20 7,43 ± 0,40/ 7,15 ± 0,03 6,8 ^d	37 ^d	418,65 ± 15,00 0,34 ± 0,02*	-

DQO: Demanda química de oxigênio; ST: Sólidos totais; SV: Sólidos voláteis; C: Carbono; N: Nitrogênio;

3.3.2 Principais Parâmetros do Processo de Produção de Biogás a Partir de Águas Residuárias

Um fator que influencia, desde o início, a performance de um digestor anaeróbio é a escolha do inóculo, ou seja, do ecossistema de bactérias que é adicionado ao sistema e sua quantidade no início da operação. O inóculo utilizado tem como principal influência a redução da fase *lag* do sistema, que ocorre durante a adaptação dos microrganismos ao meio antes de iniciarem a multiplicação, além de evitar problemas com acúmulo de substâncias inibidoras de microrganismos que atuam em diferentes fases da DA. Um inóculo mais adaptado ao substrato que se deseja utilizar no processo, tende a entrar em sinergia mais rapidamente e atingir a estabilidade de produção de biogás em menor tempo (JEIHANIPOUR et al., 2011).

Outro fator que influencia o processo bioquímico de DA é a composição da AR, mais especificamente, a complexidade das moléculas orgânicas presentes, a presença de compostos inibidores da atividade das bactérias responsáveis pela digestão da matéria orgânica e a razão de C/N, uma característica apresentada para grande parte das ARs descritas no Quadro 3.1.

As moléculas orgânicas que compõem a AR influenciam a velocidade da primeira fase do processo de digestão anaeróbia, a hidrólise, sendo que quando há maior presença de moléculas complexas a fase de hidrólise se torna a fase limitante do processo, ao limitar a disponibilidade de moléculas solúveis para as demais bactérias das etapas seguintes. No caso em que há uma maior presença de moléculas simples, como nas ARs de usinas de açúcar ricas em carboidrato simples, a fase limitante pode passar a ser a fase de metanogênese, já que esta fase pode sofrer efeitos do acúmulo de ácidos aos quais os microrganismos metanogênicos são sensíveis (CREMONEZ et al., 2021).

Açúcares presentes em ARs são carboidratos degradados facilmente e possuem potencial para alta produção de biogás de forma rápida, mas podem ocasionar a acidificação do meio. ARs ricas em lipídios, como AR de processamento de oliva, contém grande quantidade de moléculas que também possuem alto potencial de produção de biogás e são relacionadas positivamente com o rendimento específico de metano, mas são degradadas lentamente, o que pode requerer um pré-tratamento do substrato para auxiliar na quebra desse tipo de molécula. Já as ARs majoritariamente compostas por proteínas, como AR de abatedouro, não estão entre as mais adequadas para a digestão anaeróbia, devido à grande produção de compostos que inibem os microrganismos do sistema, embora as proteínas sejam as principais fornecedoras de nitrogênio (BRAUN et al., 2003).

A razão C/N é uma importante característica da composição do substrato por estar diretamente ligada com a produção de biogás a partir de ARs, formação de células bacterianas

desejadas e formação de compostos inibidores da atividade microbiana necessária (CREMONEZ et al., 2021). As moléculas de carbono presente no substrato são responsáveis pela formação direta do metano, mas, uma alta razão C/N pode comprometer a renovação e formação de novas células bacterianas de interesse pela baixa disponibilidade de nitrogênio. Já a baixa razão C/N com grande quantidade de amônio pode tornar o ambiente tóxico para a comunidade microbiana da DA, enquanto a presença de nitrito aumenta significativamente a solubilização, hidrólise e acidificação orgânica do substrato por possuir propriedades redox (ESPOSITO et al., 2012; ROCAMORA et al., 2020).

Por isso, é de grande importância o equilíbrio entre a quantidade de carbono e nitrogênio das ARs, que pode ser atingido pela utilização da co-digestão de substratos com diferentes composições. Razões de C/N entre 20 e 35 são consideradas ideais (WEILAND, 2006; KHALID et al., 2011).

Um sistema de produção de biogás a partir de ARs também está sujeito aos efeitos do biodigestor escolhido e dos parâmetros operacionais controláveis como, o pH, a temperatura e o TRH, quando aplicável.

O pH do meio está sujeito a variações influenciadas tanto pela geração de ácidos durante a DA, principalmente AGVs, quanto pela alcalinidade do substrato que alimenta o digestor. O pH é um parâmetro importante para a estabilidade do processo, por isso o seu controle é essencial. Como já citado anteriormente, a ação de microrganismos metanogênicos podem ser inibidas por pHs de valores muito baixos, enquanto pHs muito acima da neutralidade podem levar à formação de compostos tóxicos para a comunidade microbiana do processo (PANIGRAHI e DUBEY, 2019).

Quanto à temperatura, o processo pode ser classificado como psicrófilico (abaixo de 20 °C), mesófilico (20–45 °C) e termófilico (55–70 °C) (DIVYA et al., 2015; KUMAR et al., 2020). Processos que operam em temperaturas dentro da faixa mesófila, como ocorre na maior parte dos processos sintetizados na Quadro 3.1, podem ser mais facilmente implementados em países tropicais, devido à utilização da temperatura ambiente, além de garantir maior diversidade de microrganismos anaeróbios ativos (KAINTHOLA et al., 2019). Quando se deseja altos níveis de metano, conduzir o processo dentro dessa faixa de temperatura é muito utilizado. Enquanto temperaturas dentro da faixa termofílica, como ocorre no estudo de MAAMRI; AMRANI, 2019, favorecem uma maior taxa de hidrólise, também são responsáveis por limitar a quantidade de microrganismos ativos e podem levar ao acúmulo de compostos tóxicos para os microrganismos metanogênicos (CREMONEZ et al., 2021).

O TRH do sistema trata-se do tempo que a alimentação do digestor leva para atravessar

seu volume até sair e pode ser obtido pela razão entre o volume do digestor e a taxa de alimentação do mesmo. O TRH deve estar, de forma geral, relacionado com a velocidade de degradação do material durante a fase limitante do processo bioquímico, para controlar o grau de degradação da matéria orgânica (CHEN et al., 2018), que também é influenciada por parâmetros como a temperatura e o pH (CHERNICHARO, 2007).

4 METODOLOGIA

4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma revisão sistemática da literatura é realizada quando o autor da pesquisa pretende evitar que seu trabalho possua um viés e garantir que o mesmo seja transparente e reprodutível. Para que isso ocorra, inicialmente devem ser definidas as questões que o trabalho pretende responder e então, buscar reunir a pesquisa desenvolvida para melhor responder essas questões (MUNIR, 2022). O sucesso da reunião da pesquisa que permitirá responder da melhor forma as questões pode depender dos critérios de inclusão/exclusão adotados, o desenho da pesquisa, a limitação imposta ao escopo geográfico ou, até mesmo, a interpretação dos resultados (“What is a systematic review? - The Campbell Collaboration”, [s.d.]).

Neste trabalho procurou-se utilizar as diretrizes de uma revisão sistemática aplicáveis ao contexto de desenvolvimento do mesmo, produzindo um trabalho sistematizado, mas que não contempla integralmente todas as diretrizes de uma revisão sistemática, devido às suas limitações de execução e objetivos. A realização da busca em apenas uma plataforma de acesso a bases de dados de citações foi uma das limitações deste trabalho, mas pretendeu-se minimizar os seus efeitos com a escolha da base de dados de maior abrangência de trabalhos dentro das áreas relacionadas ao tema de interesse deste trabalho e a abordagem pretendida.

A busca pela pesquisa analisada neste trabalho realizou-se no dia 03 de janeiro de 2023, por meio da busca avançadas dentro da *Core Collection* da Web of Science (WoS), uma plataforma de acesso a bases de dados de citações de diversas áreas acadêmicas mantida pela Clarivate Analytics, selecionando as edições *Science Citation Index Expanded* (SCI-EXPANDED), *Conference Proceedings Citation Index - Science* (CPCI-S) e *Emerging Sources Citation Index* (ESCI) para eliminar edições que abrangem áreas de ciências humanas, sendo que estas não promovem estudos sobre o tema com a abordagem que este trabalho deseja analisar. A *Core Collection* contém cerca de 1,9 bilhões de referências citadas e 85,9 milhões de registros desde 1900 (“Web of Science Core Collection - Clarivate”, 2023).

Buscou-se os termos utilizados em títulos, resumos, palavras chaves e *KeyWords Plus*[®]. Este último trata-se de um termo particular da plataforma WoS, que são termos de índices gerados automaticamente a partir dos títulos de artigos citados pelos trabalhos. Os termos *KeyWords Plus*[®] devem aparecer mais de uma vez na bibliografia.

4.1.1 Extração de Dados

A ferramenta estratégica de pesquisa *Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation and Research type* (SPIDER), indicada para a realização de pesquisas de métodos

qualitativos e mistos, é aplicada na etapa de extração de dados, para a definição de termos de pesquisa a partir do estabelecimento dos objetivos da pesquisa por meio da formulação das questões que se deseja responder com o trabalho (MUNIR, 2022).

A ferramenta *Population/problem, Intervention/exposure, Comparison and Outcomes* (PICO) já foi citada como o melhor método de formulação de perguntas quando se deseja realizar um trabalho de revisão sistemática da literatura que seja quantitativa, sendo adotada pela Colaboração Cochrane (O'CONNOR, GREEN e HIGGINS, 2008), uma rede global independente, que busca elaborar revisões sistemáticas de ensaios clínicos randomizados, o melhor nível de evidência científica no mundo, para ajudar nas tomadas de decisões em saúde. Entretanto, a ferramenta PICO possui algumas desvantagens quando utilizada na realização de revisões qualitativas da literatura. Apesar disso, pode-se ver a ferramenta PICO como uma inspiração para a construção de uma ferramenta mais indicada para a realização de pesquisa qualitativa e de métodos mistos (COOKE; SMITH; BOOTH, 2012).

O termo *Population/problema* deu lugar ao termo *Sample* devido à avaliação de que em uma pesquisa qualitativa o conteúdo coletado é tipicamente menor, possuindo dados mais ricos e detalhados do que os quantitativos e dificilmente é esperado que sejam generalizados (COOKE; SMITH; BOOTH, 2012).

O termo *Phenomenon of Interest* foi considerado mais adequado do que *Intervention/exposure* por este não ser geralmente evidente em pesquisas qualitativas, já que estas possuem, em sua maioria, o objetivo de avaliar melhor, determinados comportamentos, decisões e experiências individuais (COOKE; SMITH; BOOTH, 2012).

O termo *Design* foi adicionado à ferramenta SPIDER para buscar robustez para o estudo e análise, já que esta é influenciada pelo desenho do estudo. Neste caso, o termo *Comparison* foi excluído por causa das características da pesquisa qualitativa de possuir natureza exploratória e tamanhos menores de amostra.

Os pesquisadores acreditavam que a introdução do “design” poderia aumentar a detecção de estudos qualitativos em bancos de dados onde os títulos e resumos não são estruturados ao solicitar a recuperação de tipos de estudos específicos (COOKE; SMITH; BOOTH, 2012).

O termo *Outcomes* foi substituído por *Evaluation* porque o que se produz por meio de uma pesquisa qualitativa pode não ser diretamente observável e, ainda, subjetivo. Por fim, o termo *Research Type* permite a adequação da pesquisa para métodos mistos e estratégias de pesquisa qualitativa ou quantitativa (COOKE; SMITH; BOOTH, 2012).

De acordo com o objetivo do trabalho, aplicou-se a ferramenta estratégica de pesquisa

SPIDER para definição dos termos utilizados na busca, com a escolha de termos que especificam o grupo de amostragem da ocorrência do fenômeno de interesse, o fenômeno de interesse, como o estudo se desenhou, as avaliações que foram realizadas a partir do estudo e o tipo de estudo realizado, enquanto os booleanos aplicados entre os termos foram definidos de acordo com a abrangência desejada em equilíbrio com a qualidade desejada para a pesquisa e são apresentados no Quadro 4.1. Entre os termos dentro dos grupos relativos a cada letra da ferramenta SPIDER utilizou-se o booleano OR para que não fosse necessário a ocorrência de todos esses termos durante a busca, enquanto entre os grupos de termos utilizou-se o booleano AND para garantir a ocorrência de ao menos um termo de cada grupo, com exceção para o último grupo de termos que foi antecedido pelo booleano OR para evitar a restrição que os termos pertencentes ao grupo “RESEARCH TYPE” proporcionam à pesquisa.

Quadro 4.1 - Aplicação da ferramenta SPIDER.

Ferramenta SPIDER	Termos e booleanos
SAMPLE	[(wastewater)] AND
PHENOMENON OF INTEREST	[(biogas) OR (methane) OR (anaerobic digestion)] AND
DESIGN	[(case study) OR (comparison) OR (modeling) OR (screening) OR (investigating) OR (investigation) OR (evaluating) OR (evaluation)] AND
EVALUATION	[(enhancing) OR (improving) OR (improve) OR (operation) OR (characterization) OR (model) OR (impacts) OR (effects) OR (design) OR (control) OR (performance) OR (methods) OR (behavior) OR (influence) OR (experience) OR (technology) OR (optimization)] OR
RESEARCH TYPE	[(qualitative) OR (quantitative) OR (mixed methods)]

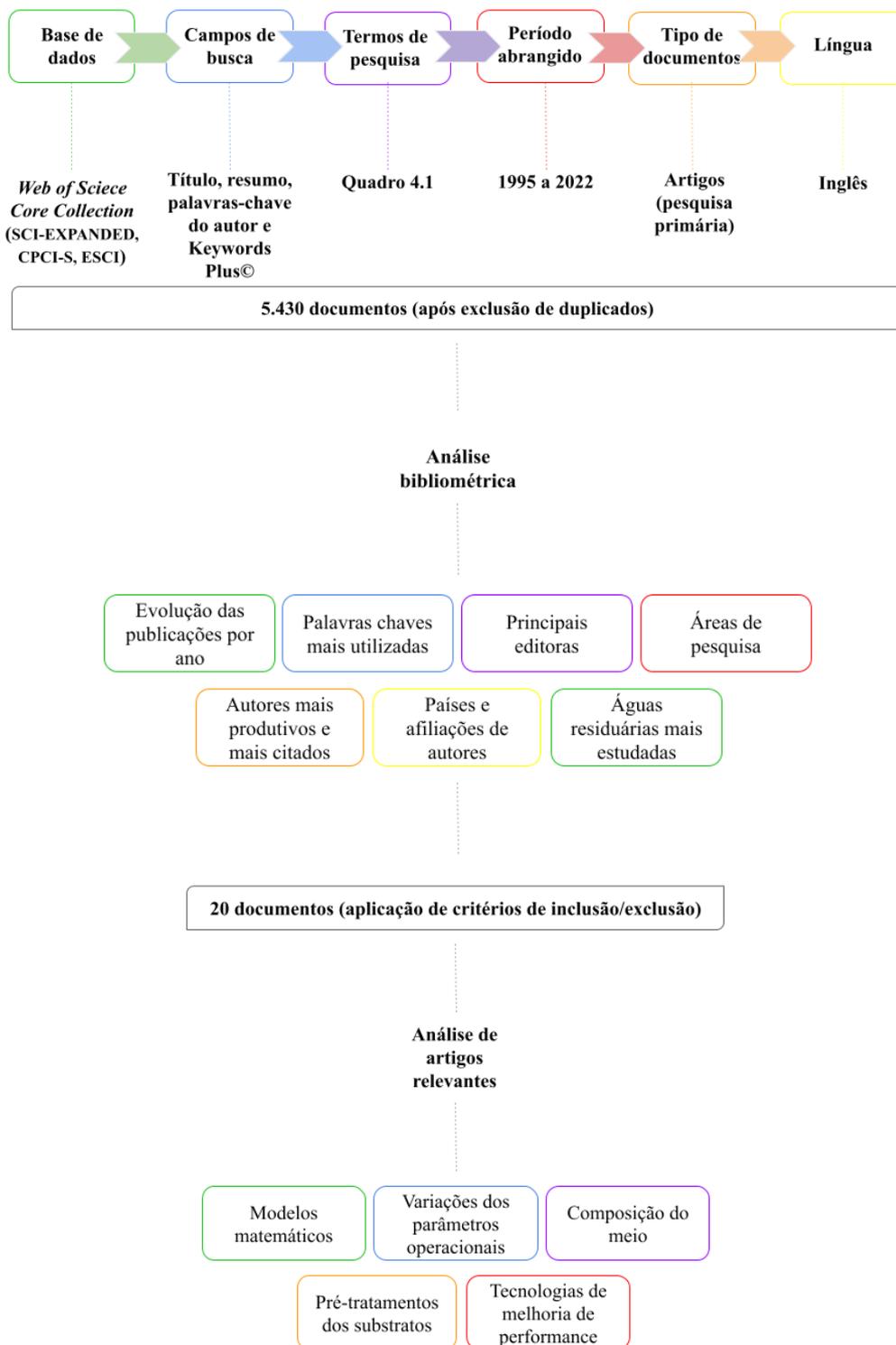
A busca inicial, com apenas os termos de pesquisa, forneceu 6.322 documentos. Ao adicionar um filtro de período para reduzir a busca ao intervalo entre os anos de 1995 e 2022, obteve-se 6.199 documentos. Ao reduzir a busca a somente a pesquisa primária (excluindo-se artigos de revisão), selecionou-se apenas os artigos encontrados, o que forneceu 5.499 documentos.

Como este trabalho deseja avaliar a pesquisa global, selecionou-se apenas artigos de língua inglesa, a principal língua utilizada no meio científico mundial. A aplicação desse filtro forneceu 5.433 documentos.

Ordenaram-se os artigos na plataforma WoS por relevância, que classifica os registros em ordem decrescente com base em um sistema de classificação que considera quantos dos

termos de pesquisa são encontrados em cada registro. Nos registros são levados em conta o título, resumo, palavra-chave e *KeyWords Plus*[®], com um peso maior para o título e palavra-chave (“Web of Science Todas as bases de dados Ajuda”, 2020). Extraiu-se as informações dos artigos que são fornecidas pela WoS em forma de tabelas eletrônicas para Excel. Ao utilizar a opção de “Dados” e “Estatísticas da coluna” no aplicativo Planilhas Google Online, verificou-se a existência de artigos duplicados e excluiu-se uma das cópias. Por fim, a busca forneceu 5.430 documentos e tem o seu esquema apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Esquema da busca realizada para análise bibliométrica e análise de artigos relevantes.



Fonte: Adaptada de CATUMBA et al. e 2022; SILLERO et al., 2022.

4.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica permite que as informações científicas de documentos publicados sejam utilizadas para avaliar progressos, tendências e lacunas em determinados campos ou temas de pesquisa. Os resultados de uma análise bibliométrica podem fornecer tanto sugestões de pesquisas, quanto de formulações políticas (AMPESE et al., 2022).

Carregou-se as informações dos 5.430 documentos, fornecidas em planilha eletrônica para Excel pela WoS, no aplicativo PowerBI para Desktop e tratou-se os dados com a utilização do Power Query, de forma a fornecer as informações desejadas.

Após o tratamento de dados, gerou-se os gráficos de evolução das publicações por ano, palavras chaves mais utilizadas, principais editoras, áreas de pesquisa, autores mais produtivos e mais citados, países e afiliações de autores e águas residuárias mais estudadas, utilizando os recursos disponibilizados no aplicativo Power BI para Desktop.

4.3 ANÁLISE DOS ESTUDOS MAIS RELEVANTES

Para a realização da análise dos artigos relevantes da pesquisa obtida, aplicou-se critérios de inclusão e exclusão, para a seleção dos 30 artigos mais relevantes, dentre os 5.430 artigos utilizados para a análise bibliométrica.

Inicialmente essa aplicação é realizada no título, palavras-chave e resumo dos documentos. Os critérios de inclusão/exclusão permitem a seleção de artigos que:

- a) avaliam a produção de biogás a partir da DA;
- b) o substrato foco é: ARs não sintéticas.

Utilizando os artigos selecionados para a realização da análise dos estudos apresentados na íntegra, detectou-se a existência de 10 artigos que não atendem a todos os critérios de inclusão/exclusão, reduzindo os estudos que tiveram os seus resultados apresentados neste trabalho a 20.

A análise dos artigos mais relevantes foi realizada para a compreensão da importância e desafios dos diferentes aspectos da produção de biogás a partir de ARs. Por isso, são identificados os principais aspectos abordados como objetivo de estudo dos artigos analisados, sendo divididos em 5 grupos: modelos matemáticos para a simulação do sistema, os efeitos de variações dos parâmetros operacionais, composição do meio (AR, inóculo, entre outros), o uso de pré-tratamentos dos substratos e tecnologias de melhoria de performance da produção de biogás a partir de ARs.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

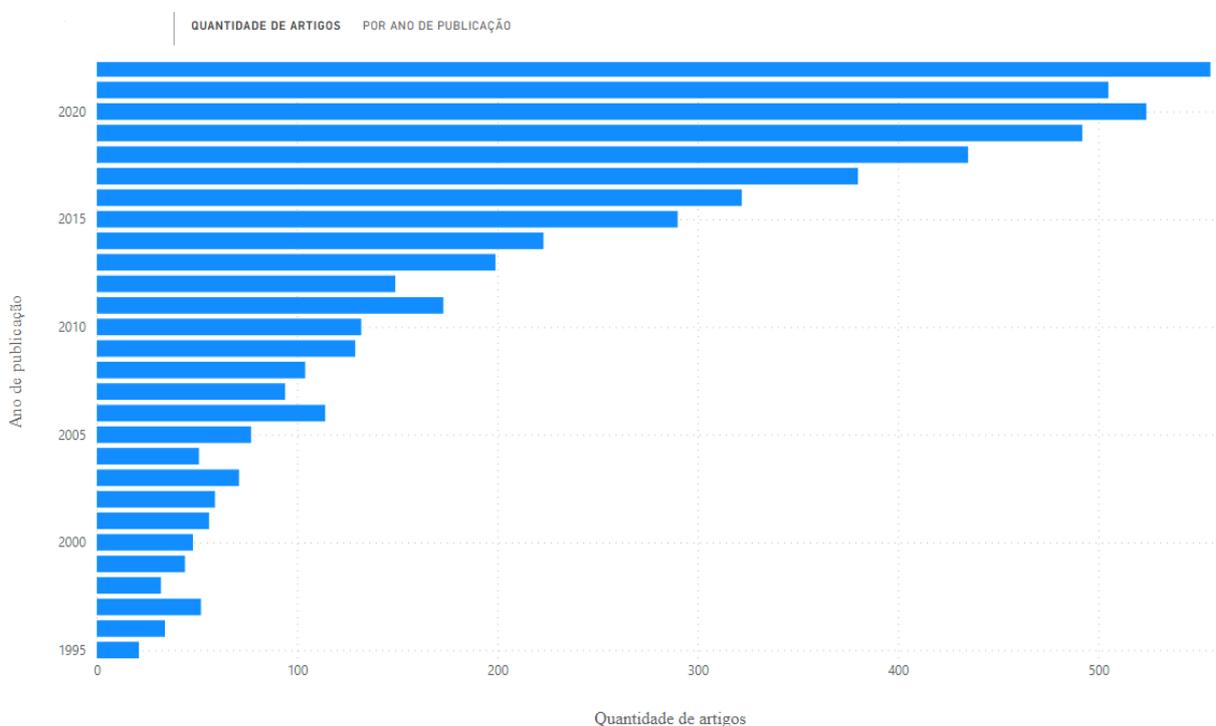
5.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A avaliação das informações de artigos fornecidos pela busca realizada para este trabalho, permitiu a aplicação de uma diversidade de análises, em relação ao comportamento da pesquisa primária, desenvolvida globalmente, sobre a produção de biogás a partir de ARs e em relação aos principais tópicos abordados sobre o assunto. Quanto à literatura de pesquisa, 5.430 artigos estudam o tema de interesse entre os anos de 1995 e 2022.

5.1.1 Evolução das Publicações

A Figura 5.1 apresenta a evolução da quantidade de artigos publicados anualmente, nos últimos 27 anos. Foi possível observar que na primeira década o número de artigos foi relativamente baixo (468 publicações) mas, após 2014 houve um crescimento acelerado da pesquisa, ultrapassando a marca de 200 publicações por ano, o que coincide com a adoção do Acordo de Paris em 2015, por mais de 190 países. O ano de maior número de publicações foi em 2022, com 556 trabalhos publicados.

Figura 5.1 - Quantidade de artigos publicados por ano.



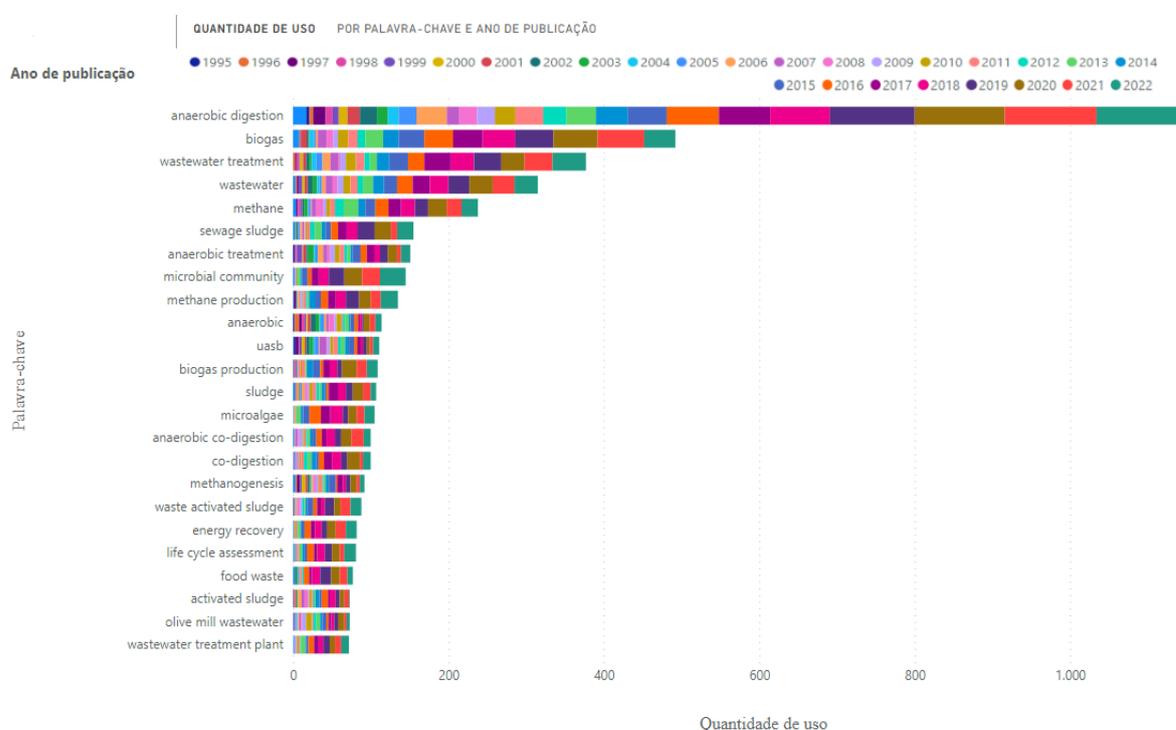
Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

5.1.2 Análise das Principais Palavras Chaves Utilizadas

A análise apresentou as palavras chaves utilizadas pelos autores, conforme mostra o gráfico da Figura 5.2, onde são visíveis as primeiras 24 palavras-chave mais aplicadas aos trabalhos nos 27 anos de abrangência da pesquisa.

Pode-se observar que as palavras chaves mais frequentes foram: Digestão anaeróbia (*anaerobic digestion*, com 1.151 ocorrências); Biogás (*biogas*, com 492 ocorrências); Tratamento de água residuária (*wastewater treatment*, com 377 ocorrências); Água residuária (*wastewater*, com 315 ocorrências); e Metano (*methane*, com 238 ocorrências).

Figura 5.2 - Gráfico de frequência de uso da palavra-chave.



Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

Dentre as palavras chaves mais utilizadas pelos autores da pesquisa avaliada, destacaram-se termos utilizados na busca, demonstrando a relevância da pesquisa obtida com relação ao tema de interesse. Entretanto, foi possível analisar a presença de palavras-chave que não foram utilizadas na busca e puderam fornecer informações de tendências da pesquisa relacionada ao assunto foco deste trabalho.

É de destaque a predominância da palavra-chave “wastewater treatment” e em seguida “sewage sludge” (155 ocorrências), atrelando a pesquisa que trata da digestão anaeróbia de AR ao tratamento deste resíduo, com maior foco no tratamento de esgoto. Isso permite a observação

de uma lacuna da pesquisa em relação à abrangência de ARs estudadas.

Outra palavra-chave que se destacou pelo seu uso nos estudos avaliados é “microbial community” (145 ocorrências). Uma observação mais próxima mostrou uma maior presença dessa palavra-chave em trabalhos publicados a partir de 2019, demonstrando uma maior atenção da comunidade de pesquisadores sobre o tema recentemente.

Em contrapartida, a palavra-chave “UASB” (111 ocorrências) esteve presente de forma homogênea ao longo dos anos, representando um longo desenvolvimento de pesquisas que abordaram o estudo deste tipo de reator utilizado na DA de ARs. O mesmo pôde ser observado em relação ao uso das palavras chaves “co-digestion” e “anaerobic co-digestion” (100 ocorrências de cada).

Ao fim do gráfico apresentado na Figura 5.2 encontra-se a palavra-chave “energy recovery” (82 ocorrências), o que fortaleceu a percepção de que ainda há uma baixa disponibilidade de pesquisas com foco na recuperação de energia por meio da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de ARs quando comparado à disponibilidade de pesquisas com foco no tratamento de ARs utilizando o mesmo processo.

5.1.3 Principais Editoras, Instituições Publicadoras e Jornais

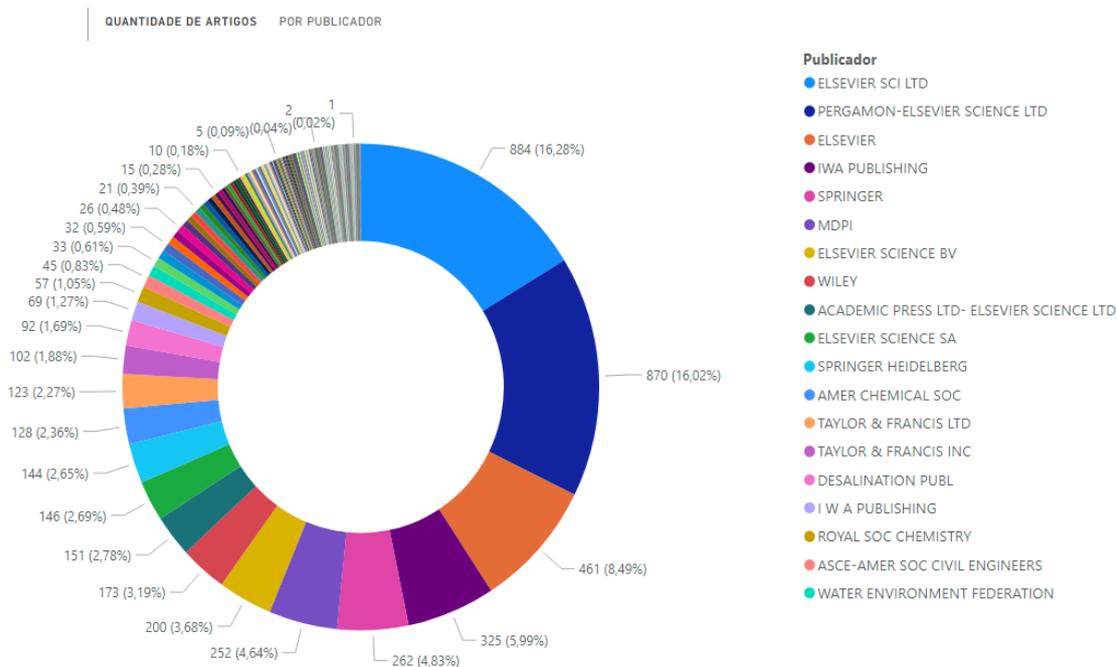
O termo publicador para a WoS trata-se de empresas editoriais e instituições publicadoras, como universidades, que são responsáveis pela publicação do estudo em jornais ou revistas científicas, por exemplo, mas não são, necessariamente, localizadas no país ao qual pertencem o (s) autor (es) do estudo.

A quantidade de publicações realizadas pelas principais empresas editoriais é apresentadas no gráfico da Figura 5.3. Durante a análise dessas informações, percebeu-se à ocorrência de variações na grafia do nome de um mesmo publicador, por exemplo, as publicações realizadas pela Elsevier localizada em Amsterdam (sede da empresa) foram atribuídas à ELSEVIER SCIENCE BV, enquanto as publicações realizadas pela Elsevier localizada em Oxford foram atribuídas à ELSEVIER SCI LTD.

Foi possível realizar uma avaliação dos maiores publicadores por comparação entre as diferentes nomenclaturas utilizadas sem que fosse possível visualizar de forma exata o percentual total de artigos por publicador, visto que todas as publicações de uma editora puderam ser atribuídas a mais de uma nomenclatura. Pôde-se observar no gráfico da Figura 5.3 que ao menos cerca de 50% dos artigos avaliados são publicados pela Elsevier, revelando uma dominância majoritária da pesquisa acadêmica, obtida na busca, por parte de apenas uma empresa editorial. Além da Elsevier, se destacaram também a Springer (ao menos 8,47% das

publicações), IWA Publishing (ao menos 7,26% das publicações), MDPI (ao menos 4,64% das publicações) e a Taylor & Francis (ao menos, 4,15% das publicações).

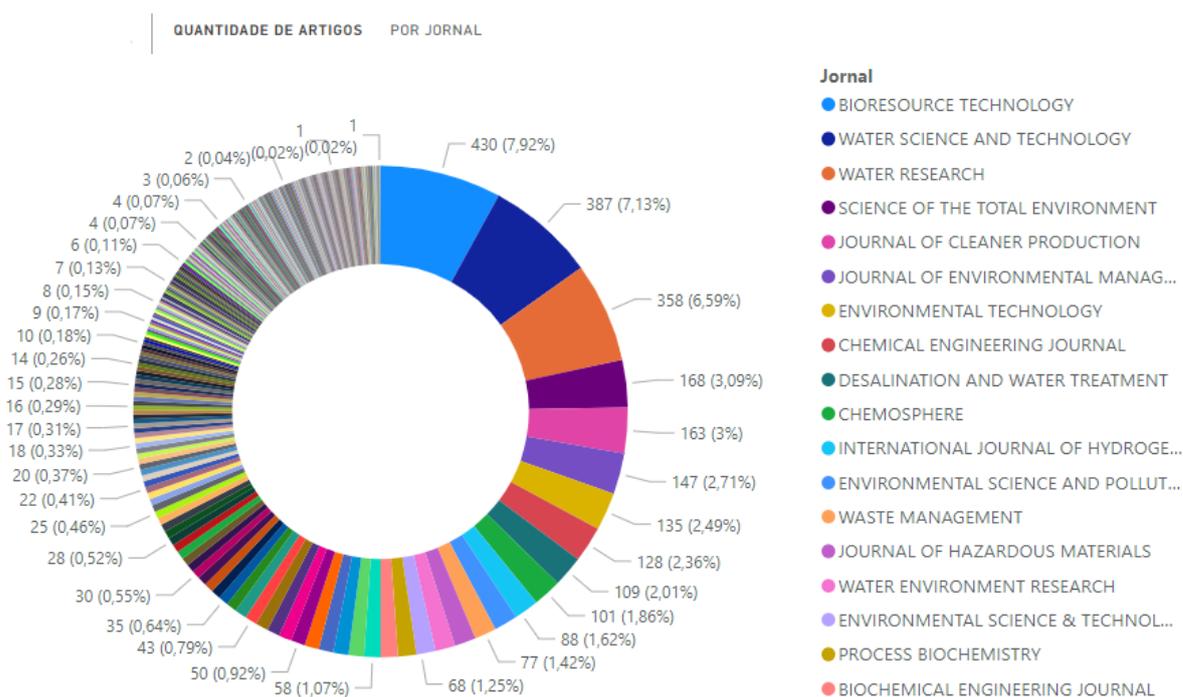
Figura 5.3 - Gráfico de artigos por nomenclatura de empresas editoriais e instituições publicadoras.



Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

Na Figura 5.4 é apresentado o gráfico dos jornais onde os artigos selecionados pela busca realizada para este trabalho foram publicados. Os três principais jornais que mais publicaram são Bioresouce Technology com 430 artigos, Water Science Technology com 387 artigos e Water Research com 358 artigos.

Figura 5.4 - Gráfico de artigos publicados por jornais.

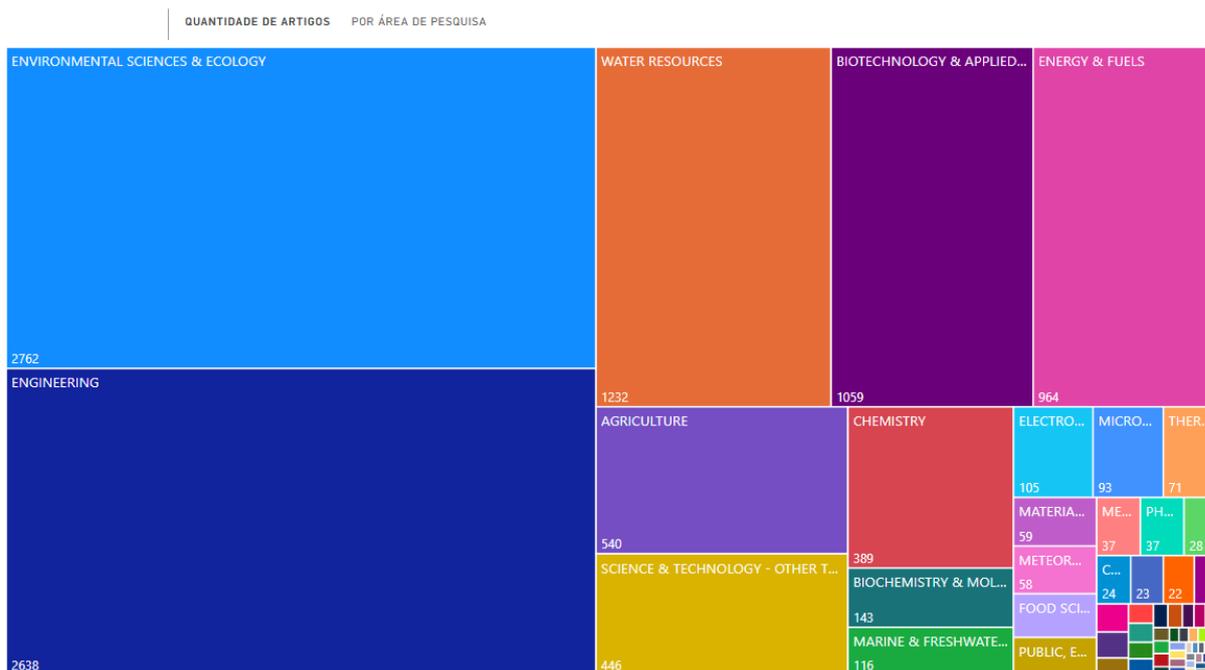


Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

5.1.4 Análise das Áreas de Pesquisa dos Estudos

Os estudos relacionados à produção de biogás a partir de águas residuárias se destacaram em 5 principais áreas de publicação: Ciências Ambiental & Ecologia (2.762 artigos), Engenharia (2.638), Recursos Hídricos (1.232 artigos), Biotecnologia & Microbiologia aplicada (1.59 artigos) e Energia & Combustíveis (964 artigos), conforme apresenta a Figura 5.5.

Figura 5.5 - Principais áreas de pesquisa dos estudos analisados.



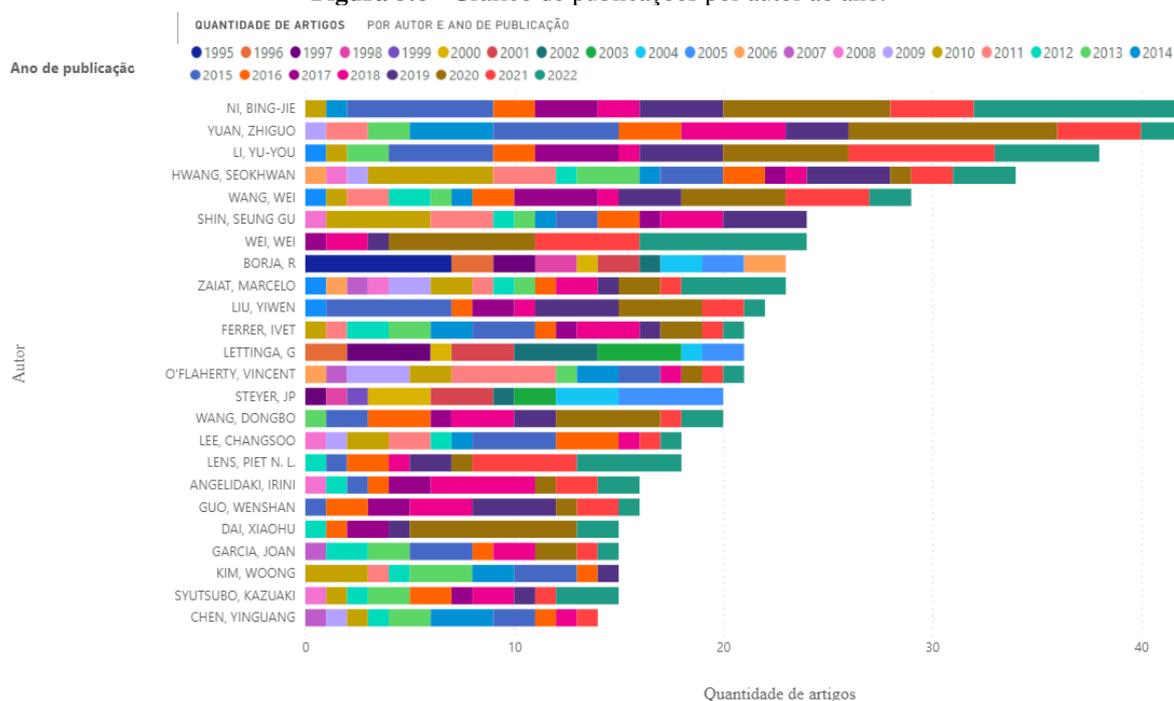
Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

5.1.5 Autores Mais Produtivos e Mais Citados

Ao realizar a análise das informações relacionadas aos autores dos artigos abrangidos pela pesquisa, identificou-se os 24 autores que mais publicaram por meio do gráfico apresentado na Figura 5.6. Os 5 principais pesquisadores que publicaram foram: Bing-Jie Ni (42 artigos), Zhiguo Yuan (42 artigos), Yu-You Li (38 artigos), Seokhwan Hwang (34 artigos), Wei Wang (29 artigos).

Em nona posição no gráfico aparece o primeiro pesquisador brasileiro dentre os autores que mais publicaram no mundo, o pesquisador Marcelo Zaiat, atualmente afiliado à Universidade de São Paulo da Cidade de São Carlos-SP trabalhando na linha de pesquisa em Biotecnologia Ambiental, com um número total de 23 publicações desde 1995, sendo um maior número de publicações concentradas no ano de 2022 (5 publicações).

Figura 5.6 - Gráfico de publicações por autor ao ano.

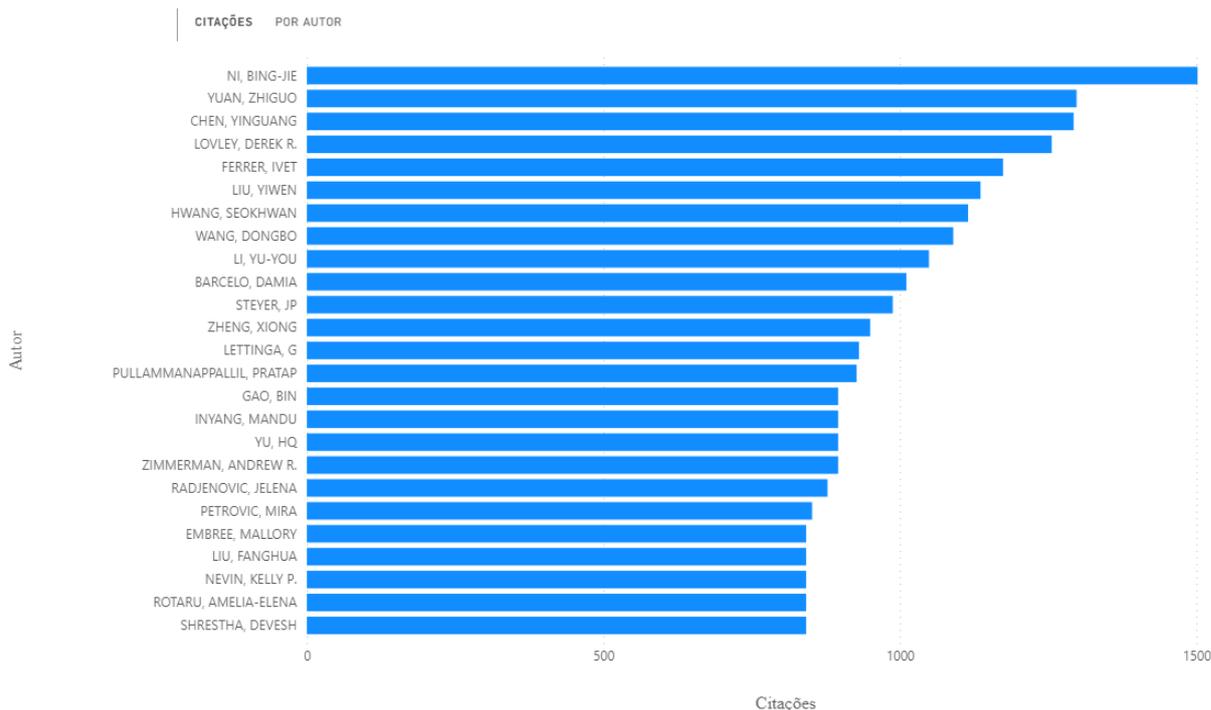


Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

No gráfico da Figura 5.6 pode-se constatar um maior destaque para os 5 primeiros autores que mais publicaram, enquanto os seguintes não se distanciaram grandemente em número de publicação de um para o outro, o que demonstrou uma certa homogeneidade de publicações entre estes autores.

Um ponto que chamou atenção foi a predominância de publicações realizadas a partir do ano de 2015 pelos cinco autores que mais publicaram, revelando que a maior quantidade de publicações realizadas por eles dentro do tema possui uma característica de pesquisa mais recente e, portanto, mais atual.

Em relação aos pesquisadores mais citados, apresentados no gráfico da Figura 5.7 se destacaram: Bing-Jie Ni (1.502); Zhiguo Yuan (1.298); Yinguang Chen (1.293); Derek R. Lovley (1.256); e Ivet Ferrer (1.174).

Figura 5.7 - Gráfico de quantidade de citações por autor.

Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

Dentre os autores que mais publicaram, os dois primeiros deles foram também os dois mais citados, de acordo com o gráfico da Figura 5.7, o que pôde ser percebido como uma relevância atribuída à pesquisa produzida pelos pesquisadores Bing-Jie Ni da University of Technology Sydney, Zhiguo Yuan da University of Queensland, no meio acadêmico.

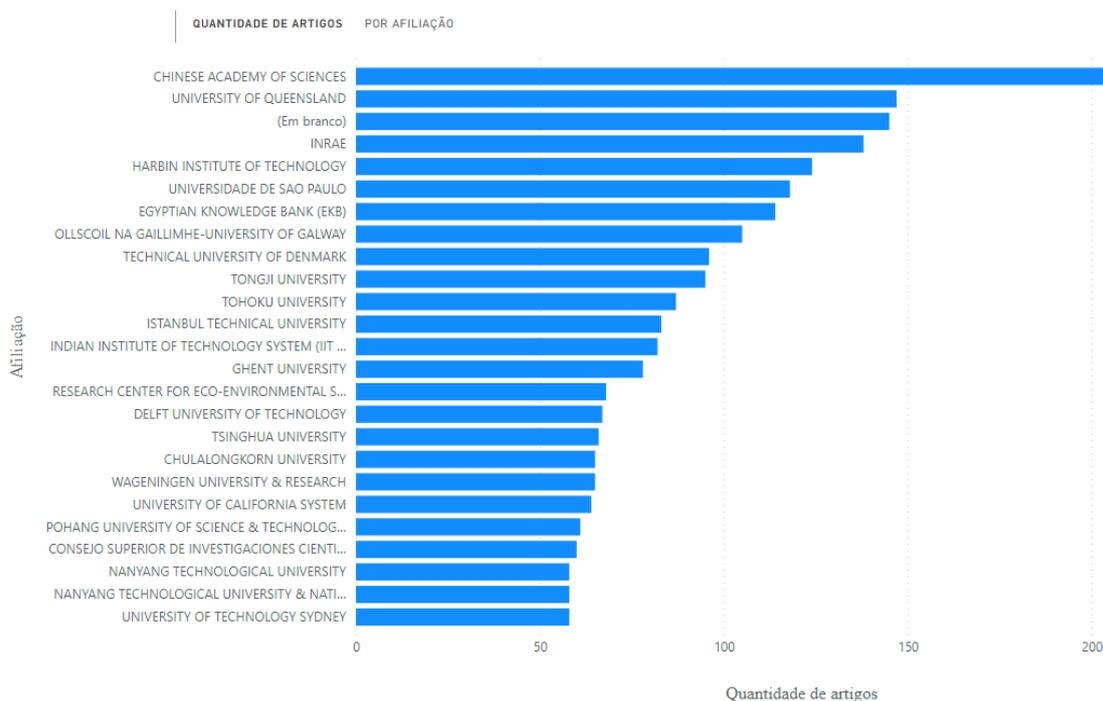
5.1.6 País e Afiliação de Autores

A Figura 5.8 apresenta os países aos quais pertencem os autores das maiores quantidades de publicações. Com destaque para os 5 principais países, 1.158 artigos (cerca de 21%) foram publicados por autores da China, 581 (cerca de 10%) por autores dos Estados Unidos, 443 (cerca de 8%) por autores da Espanha, 312 (cerca de 6%) por autores do Brasil e 278 (cerca de 5%) por autores da Austrália.

Figura 5.8 - Quantidade de publicações por país do principal autor.

Fonte: Plataforma WoS.

Quando avaliadas as informações de afiliação dos autores dos artigos da busca realizada para este trabalho, apresentadas na Figura 5.9, verificou-se que dentre as Instituições que mais afiliam os autores estão a Chinese Academy of Science (232 artigos publicados por autores afiliados), University of Queensland (147 artigos publicados por autores afiliados), Institut National de la Recherche Agronomique (INRAE) (138 artigos publicados por autores afiliados), Harbin Institute of Technology (124 artigos publicados por autores afiliados) e a brasileira Universidade de São Paulo (118 artigos publicados por autores afiliados). A quantidade de artigos que aparecem como “(Em branco)” trata-se de artigos para os quais não foram preenchidas as informações de afiliação pela WoS na planilha de dados disponibilizada para exportação.

Figura 5.9 - Quantidade de autores por afiliação.

Fonte: Aplicativo PowerBI para Desktop.

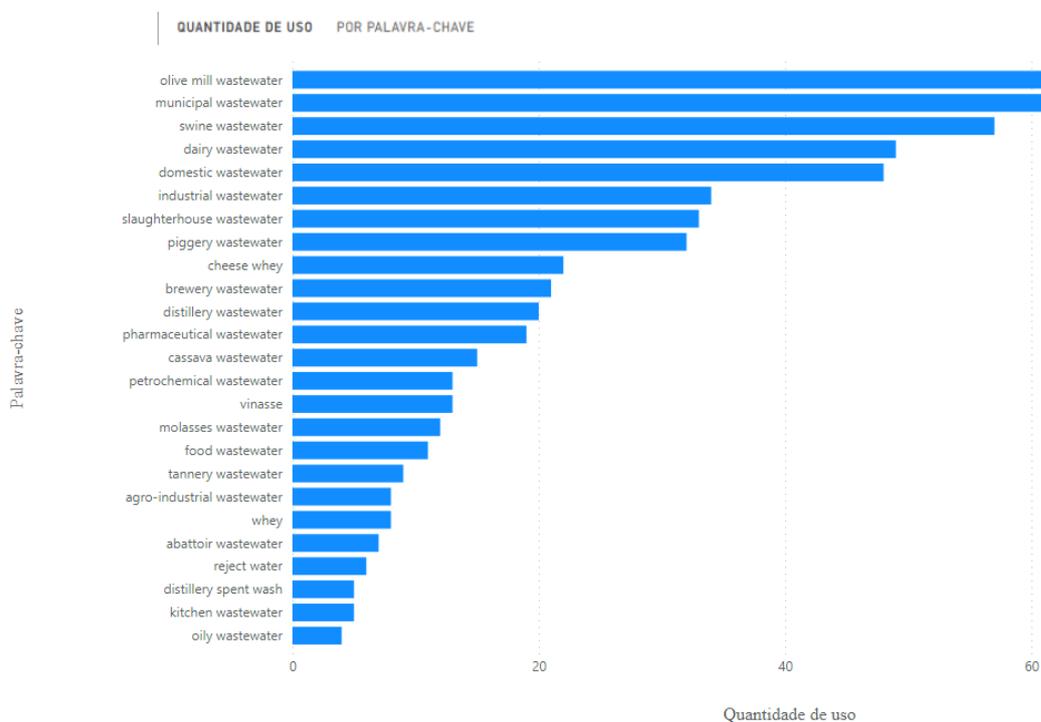
A Chinese Academy of Sciences se destacou como a maior afiliadora dos pesquisadores que atuaram nos estudos avaliados, com 232 estudos de autores afiliados, conforme o gráfico da Figura 5.9, o que constata uma alta produtividade da instituição governamental, localizada na *People's Republic of China*, em relação ao desenvolvimento da pesquisa sobre o uso da DA de ARs para a produção de biogás. O Brasil se destaca dentre os maiores afiliadores de pesquisadores que trabalham com o tema, com a Universidade de São Paulo, com cerca de 118 estudos de autores afiliados, uma instituição, também, governamental, além de que o país é o 4º em autores que mais produziram artigos da pesquisa.

5.1.7 Águas Residuárias Mais Utilizadas na Produção de Biogás

A partir da filtração manual de somente palavras chaves referentes a tipos de ARs, foi analisada a frequência de uso de diferentes AR pelos autores dos artigos obtidos pela busca entre 1995 e 2022, a partir do gráfico apresentado na Figura 5.10.

Destacou-se o foco dos trabalhos nas águas residuárias de processamento de oliva (*olive mil wastewater*, com 73 ocorrências), nas águas residuárias municipais (*municipal wastewater*, com 63 ocorrências), nas águas residuárias de suínos (*swine wastewater*, com 57 ocorrências), nas águas residuárias domésticas (*domestic wastewater*, com 48 ocorrências) e nas águas residuais de matadouro (*slaughterhouse wastewater*, com 33 ocorrências).

Figura 5.10 – Gráfico de frequência de uso da palavra chave relativa ao tipo de ARs.



Fonte: Aplicativo Power BI para Desktop.

O International Olive Council (IOC) registrou entre 2018 e 2019 uma produção mundial de mais de 3,3 milhões de toneladas de óleo de oliva. O resíduo originário do processamento de oliva tem sido visto como um problema ambiental de grande gravidade devido à sua alta DQO no processo de estabilização da matéria. É reconhecida, de forma geral, uma alta toxicidade do resíduo de processamento de oliva que é atribuível à presença de fenóis (MAAMRI, S.; AMRANI, M., 2019).

5.2 ANÁLISE DOS ESTUDOS MAIS RELEVANTES

Durante a avaliação qualitativa dos artigos mais relevantes, que apresentam estudos sobre a produção de biogás (biometano) a partir da digestão anaeróbia de águas residuárias, verificou-se a predominância de estudos classificados em 5 grupos, os que avaliam modelos matemáticos para a simulação do sistema (55%), a composição do meio (AR, inóculo, entre outros) (40%), os efeitos de variações dos parâmetros operacionais (35%), o uso de pré-tratamentos dos substratos (10%) e tecnologias de melhoria de performance da DA (10%).

O Quadro 5.1 apresenta uma síntese das principais informações dos artigos relevantes selecionados. As publicações dos artigos se concentraram entre os anos de 2015 e 2022, demonstrando uma alta relevância de estudos recentes em relação ao tema deste trabalho. O número máximo de citações ocorreu para o estudo de ANTWI et al., 2017 (66 citações),

enquanto os trabalhos de LAUZURIQUE et al., 2022 e ANYANGO; WANDERA; RAUDE, 2022 ainda não possuem citações, o que pode ser atribuído à sua data recente de publicação (ano de 2022). Dois artigos foram publicados na revista/jornal Renewable Energy e três na Bioresource Technology, já as demais publicações foram realizadas em diferentes revistas/jornais.

Quadro 5.1 – Principais informações dos artigos mais relevantes.

Relevância	Autor	Classificação	Objetivo	Jornal/Revista	Citações	Ano
1	(ENITAN et al., 2015)	Modelagem	Avaliar a aplicabilidade do modelo de geração de metano modificado (MGMM), para prever e aumentar a taxa de produção de metano em um reator UASB alimentado com águas residuais de cervejaria.	Environmental Modeling and Assessment	11	2015
2	(MAAMRI; AMRANI, 2019)	Modelagem Composição do meio	Avaliar dois modelos cinéticos para analisar a performance da digestão: Equação de Gompertz modificada (EGM) e Equação logística modificada (ELM). Melhorar a biodegradabilidade do lodo ativado residual (LAR), por meio da co-digestão com AR de processamento de oliva (ARPO) em diferentes frações, pela avaliação do potencial bioquímico de metano (em inglês BMP).	Applied Ecology and Environmental Research	1	2019
3	(KUMAR et al., 2021)	Modelagem Parâmetros operacionais Tecnologia	Comparar a metodologia de superfície de resposta (MSR) e a RNA para a otimização da performance do reator utilizado para a digestão. Avaliar o efeito e a otimização dos parâmetros controlados, durante o processo de DA eletrocinética assistida de resíduos de cogumelo co-digeridos com AR de usina de açúcar, para a produção de biometano. Avaliar o uso da DA eletrocinética assistida para melhora da produção de biogás, variando a aplicação de tensão de 0 a 3 V.	Renewable Energy	10	2021

Relevância	Autor	Classificação	Objetivo	Jornal/Revista	Citações	Ano
4	(RUAN et al., 2017)	Modelagem	Investigar a viabilidade do sistema de controle da DA de AR de produção de papel e celulose, baseado em aproximação para a previsão da qualidade do efluente e produção de biogás	Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering	15	2017
5	(MANAV-DEMIR; UNAL, 2022)	Modelagem Parâmetros operacionais	Prever a produção de biogás utilizando modelos cinéticos. Investigar o BMP da co-digestão do soro de leite com os demais substratos apresentados na Tabela 3.1, em diferentes frações e utilizando dois tipos de inóculos.	Water, Air, and Soil Pollution	1	2022
6	(SCHMIDT et al., 2019)	Parâmetros operacionais	Investigar o efeito da redução da temperatura, de 38° para 25°C com o objetivo de simular a faixa de temperatura ambiente que afeta uma lagoa anaeróbia coberta tratando AR de matadouro. Avaliar o efeito do aumento da taxa de carregamento orgânico (TCO), após a redução da temperatura para verificar os limites de TCO nas diferentes temperaturas.	Journal of Environmental Chemical Engineering	20	2019
7	(ANTWI et al., 2017)	Modelagem	Estimar o rendimento de biogás e metano durante o tratamento de AR de processamento de amido de batata em um reator de manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (em inglês UASB), utilizando modelos de RNA de configuração <i>feedforward backpropagatio</i> (BP) de três camadas e regressão não linear múltipla (RnLM), com otimização dos parâmetros do processo anaeróbio para a identificação do efeito dos mesmos na metanação.	Bioresource Technology	66	2017

Relevância	Autor	Classificação	Objetivo	Jornal/Revista	Citações	Ano
8	(ZERROUKI et al., 2021)	Modelagem Pré-tratamento	Descrever a produção cumulativa de biogás por modelo cinético. Avaliar a eficiência do ultrassom na solubilização da matéria orgânica e fermentação de AR de indústria de suco de fruta.	Water Science and Technology	2	2021
9	(KARAMICHA ILIDOU et al., 2022)	Modelagem	Propor um novo esquema de função basal radial (FBR), baseado no algoritmo de médias <i>fuzzy</i> não simétricas, aprimorado com um otimizador baseado na evolução diferencial.	Computers and Chemical Engineering	2	2022
10	(LAUZURIQU E et al., 2022)	Parâmetros operacionais Composição do meio	Estudar o efeito da relação substrato-inóculo e o efeito da concentração de cinzas flutuantes (CF) na digestão anaeróbia de AR de vinícola.	Journal of Water Process Engineering	0	2022
11	(PRAJAPATI; SINGH, 2020)	Modelagem Tecnologias	Testar a produção de metano e prever o seu desempenho. Avaliar a integração da co-digestão anaeróbia de AR urbana e palha de trigo, com a bioeletrolise em diferentes condições de suprimento de tensão em busca de maior rendimento de biogás.	Renewable Energy	18	2020
12	(ANYANGO; WANDERA; RAUDE, 2022)	Composição do meio	Investigar o desempenho do tratamento de AR de abatedouro co-digerida com lama de prensagem de açúcar (LPA), quanto à recuperação de energia em forma de biometano,	Water (Switzerland)	0	2022
13	(RAKETH et al., 2021)	Pré-tratamento	Aprimorar o tratamento anaeróbio do soro de látex desnatado (SLD), pela redução do teor de sulfato (inibidor do sistema de produção de biogás), investigando o efeito do tempo de mistura e carga de cinzas de seringueira (CS), adicionadas ao substrato anteriormente à digestão, para a remoção de sulfato do SLD.	Biochemical Engineering Journal	5	2021
14	(KHOUI; LOUHICHI; SAYADI, 2015)	Composição do sistema	Obter a proporção ótima na co-digestão de AR de processamento de oliva e esterco líquido de aves.	Bioresource Technology	63	2015

Relevância	Autor	Classificação	Objetivo	Jornal/Revista	Citações	Ano
15	(MEHRYAR et al., 2017)	Modelagem Composição do meio	Avaliar 3 modelos matemáticos (modelo de Gompertz modificado, função logística e função de transferência) em relação ao ajuste com os dados reais de processo para o BMP, bem como 3 algoritmos para a modelagem de dados de produção de biogás por rede neural artificial (RNA) BP, regressão generalizada e RBF. Avaliar a produção de biogás, BMP e remoção de DQO _{solúvel} da co-digestão de AR de refinaria de petróleo com bagaço de cana (BC).	BioResources	9	2017
16	(SCHMIDT et al., 2018)	Composição do sistema	Realizar o monitoramento da quantidade, qualidade e estabilidade do processo de produção de biogás a partir da DA de AR de processamento de carne vermelha, após a adição de oligoelementos (Fe, Ni, Co, Mn e Mo), que se apresentam no substrato abaixo dos níveis recomendados na literatura	Bioresource Technology	26	2018
17	(WADJEAM; REUNGSANG, 2018)	Parâmetros operacionais Composição do meio	Investigar proporções ótimas de AR de fécula de mandioca, efluente hidrogenado e lodo anaeróbio para a produção de metano em batelada, com o uso do projeto de mistura <i>D-optimal</i> . Avaliar o aumento da produção de metano pela suplementação com meio basal (MB) modificado e meio anaeróbio básico (MAB) modificado.	Chiang Mai Journal of Science	4	2018
18	(AMO-DUODU et al., 2021)	Modelagem Composição do meio	Avaliar a dinâmica cinética da DA quanto ao biogás cumulativo produzido, por meio dos modelos cinéticos de Gompertz e Chen & Hashimoto modificados de primeira ordem. Investigar a bioestimulação do processo de DA de AR municipal em busca de melhorar a eficiência de tratabilidade, produção de biogás e estabilidade cinética	Polymers	8	2021

Relevância	Autor	Classificação	Objetivo	Jornal/Revista	Citações	Ano
19	(ENITAN et al., 2018)	Composição do meio Parâmetros operacionais	Investigar a eficiência de um reator UASB, para o tratamento de AR de cervejaria e geração de biogás, para recuperação de energia por meio da DA, com foco na análise do efeito de parâmetros físico-químicos sobre produção de metano e na dinâmica e abundância de <i>Archeas</i> produtoras de metano, com a utilização de métodos padrão e hibridização in-situ fluorescente, respectivamente.	Physics and Chemistry of the Earth	6	2018
20	(SIDDIQUE; MUNAIM; AB. WAHID, 2016)	Parâmetros operacionais	Melhorar a co-digestão anaeróbia da AR petroquímica com esterco ativado, encontrando o TRH ótimo em um <i>continuous stirred tank reactor</i> (CSTR), pela investigação da influência do mesmo, na geração de biogás e metano.	Journal of Cleaner Production	10	2016

5.2.1 Modelagem Matemática

As modelagens matemáticas para a simulação de sistemas de DA de águas residuárias são de grande importância, para estimar a produção de biogás (biometano) do sistema e melhorar a sua produção através do estudo da relação entre os parâmetros de processo e o rendimento específico de biometano e da otimização destes parâmetros, para alcançar uma maior performance do sistema (ENITAN et al., 2015).

ENITAN et al., 2015 chegou a um coeficiente de correlação (R) de 0,747 entre o rendimento de metano real e o estimado pelo modelo de geração de metano modificado. MANAV-DEMIR; UNAL, 2022 destacou um melhor desempenho da predição da produção de biogás pelo modelo de primeira ordem e a função transferência. O modelo de Gompertz foi apresentado como melhor modelo cinético para a análise da performance da DA de ARs, em específico a produção cumulativa de metano, por MAAMRI; AMRANI, 2019, ZERROU KI et al., 2021, PRAJAPATI; SINGH, 2020, AMO-DUODU et al., 2021 e MEHRYAR et al., 2017.

Com a implementação de algoritmos de redes neurais artificiais (RNA) para modelar a produção de biogás, MEHRYAR et al., 2017, KUMAR et al., 2021 e ANTWI et al., 2017 revelaram uma maior efetividade do algoritmo *backpropagation* (BP), em alguns casos, com coeficientes de determinação (R^2) acima de 96%.

RUAN et al., 2017 e KARAMICHAILIDOU et al., 2022 revelaram um desempenho preditivo superior, da taxa de produção de biogás, nos modelos *Fuzzy Neural Networks* (FNN) em relação a modelos *Neural Networks* (NN), em um dos casos, chegando a R^2 maior que 90%

5.2.2 Composição do meio e Parâmetros Operacionais

MAAMRI; AMRANI, 2019, MANAV-DEMIR; UNAL, 2022, ANYANGO; WANDERA; RAUDE, 2022, KHOUFI; LOUHICHI; SAYADI, 2015, MEHRYAR et al., 2017, WADJEAM; REUNGSANG, 2018 e KUMAR et al., 2021 estudaram a co-digestão de ARs. MAAMRI; AMRANI, 2019, ANYANGO; WANDERA; RAUDE, 2022, MEHRYAR et al., 2017 e WADJEAM; REUNGSANG, 2018 mostraram o efeito de potencializar a produção de metano com a co-digestão em comparação com a monodigestão de cada substrato utilizado, sendo que o trabalho desenvolvido por MEHRYAR et al., 2017 revelou a impossibilidade de qualquer atividade microbiana no meio quando realizada a monodigestão da AR de refinaria de petróleo.

Já o estudo realizado por KHOUFI; LOUHICHI; SAYADI, 2015 demonstrou uma variação insignificante na produção de metano durante a co-digestão quando comparado com a monodigestão da AR de processamento de oliva e o estudo realizado por MANAV-DEMIR;

UNAL, 2022 mostrou que o maior potencial bioquímico de metano foi obtido para o soro de queijo, em estudo, diluído.

ANYANGO; WANDERA; RAUDE, 2022 afirmou que a co-digestão pode ser aplicada para lidar com a inibição de amônia que ocorre durante a digestão da AR rica em proteínas, assim como com a inibição por acidificação causada por AR rica em açúcares.

WADJEAM; REUNGSANG, 2018 também apresentou o efeito positivo na produção de metano com a adição de meio anaeróbico básico (MAB).

O aumento da eficiência de degradação da matéria orgânica, da produção de biogás e estabilidade de processo com a adição de elementos deficientes do meio foi constatada no estudo de SCHMIDT et al., 2018, enquanto no AMO-DUODU et al., 2021 o mesmo foi constatado para a adição de magnetita (Fe_3O_4), um bioestimulante.

LAUZURIQUE et al., 2022 observou o aumento da produção específica de metano de até 79% e redução da fase lag com a adição de cinzas flutuantes ao meio, mas em altos níveis de concentração também ocasionou inibição da produção de metano.

Para KUMAR et al., 2021, SCHMIDT et al., 2019 e ENITAN et al., 2018 a temperatura foi vista como um importante parâmetro influenciador da performance da DA quanto à produção de biogás, embora no estudo realizado por KUMAR et al., 2021 o parâmetro que mais influenciou a produção de biogás foi a fração de AR na alimentação do sistema. SCHMIDT et al., 2019 constatou a necessidade da redução da taxa de carregamento orgânico com a redução de temperatura.

No estudo realizado por SIDDIQUE; MUNAIM; AB. WAHID, 2016 foi constatada como a alteração do TRH do sistema afetou positivamente a taxa de degradação da matéria orgânica e rendimento de biogás quando utilizada em valores ótimos em um CSTR, alcançando uma eficiência de remoção de DQO de até $98,5 \pm 0,5\%$. Já no sistema de um reator de manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (em inglês UASB) estudado por (ENITAN et al., 2018), a remoção de DQO alcançou 78,97%, destacando a forte relação entre o pH e o teor de biogás produzido.

5.2.3 Pré-tratamentos e Tecnologias

Dentre os artigos analisados foi verificado o uso do ultrassom para o tratamento do substrato por ZERROUKI et al., 2021, o uso da redução de sulfato por meio da adição de cinzas de seringueira ao substrato antes de alimentar o sistema de DA por RAKETH et al., 2021, o uso da DA eletrocinética assistida por KUMAR et al., 2021 e o uso da bioeletrólise por PRAJAPATI; SINGH, 2020).

Encontrou-se no ultrassom uma solução para a solubilização de matéria orgânica (quebra de moléculas mais complexas) apresentando um aumento de até 60% na produção de biogás com um teor de até 64% de metano e aumento de remoção de DQO de 35%. No caso de ARs ricas em lipídios (moléculas complexas) o uso do ultrassom pode ser responsável por uma aceleração da fase de hidrólise do processo de DA.

A adição de cinzas de seringueira ao substrato para a remoção de sulfato foi atribuída por (RAKETH et al., 2021), em parte, ao mineral essencial adicional lixiviado das cinzas de seringueira. Essa prática tem importante aplicação para evitar a inibição do meio por um composto que pode ser tóxico aos microrganismos anaeróbios que produzem o biogás e redução de teor de sulfeto de hidrogênio (gás tóxico a humanos) no biogás.

Para (KUMAR et al., 2021) a DA eletrocínética assistida foi uma oportunidade de melhoria da produção de biogás em comparação com a ausência de tensão aplicada, assim como a bioeletrólise foi responsável por um aumento do rendimento de metano do sistema.

Novas tecnologias e pré-tratamentos são oportunidades de solucionar problemas que comprometem o uso da DA em diferentes cenários, entretanto o maior desafio neste caso é a viabilidade econômica do uso das mesmas. Pensando nisso, o desenvolvimento de novas tecnologias e pré-tratamentos precisam levar em conta o custo de sua aplicação.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, com uma ampla análise da literatura relacionada à produção de biogás a partir de ARs, foram demonstradas as principais tendências dos trabalhos nos anos de 1995 até 2022 a partir de uma análise bibliométrica da pesquisa obtida por meio de uma busca na plataforma WoS, que reuniu 5.430 artigos. O estudo realizado envolveu as seguintes conclusões:

- a) A análise bibliométrica mostrou que após 2014 houve um crescimento acelerado da pesquisa, ultrapassando a marca de 200 publicações por ano, o que coincidiu com a adoção do acordo de Paris em 2015 durante a COP 21.
- b) Dentre as palavras chaves foi observada uma alta frequência de uso de “tratamento de águas residuárias” (ao menos 377 vezes) e “lodo de esgoto” (ao menos 155 ocorrências) em contraste com a frequência de uso de “recuperação de energia” (ao menos 82 ocorrências), demonstrando um foco dos trabalhos ainda direcionados mais para o tratamento de ARs do que para a produção de biogás.
- c) Dentre as empresas editoriais, a Elsevier se destacou com a publicação de ao menos 50% dos artigos analisados. Já os jornais que mais publicaram foram Bioresouce Technology com 430 artigos, Water Science and Technology com 387 artigos e Water Research com 358 artigos.
- d) Ao analisar as áreas de pesquisa dos artigos, Ciências Ambientais & Ecologia e Engenharia se destacaram em relação às demais, com 2.777 e 2.650 artigos, respectivamente.
- e) Os autores Bing-Jie Ni da University of Technology Sydney e Zhiguo Yuan da University of Queensland foram os que mais se destacaram, tanto como os que mais produziram estudos, quanto como os mais citados.
- f) Em relação aos países que mais produziram conhecimento por parte dos autores nacionais, a China se destaca isoladamente dos outros países, responsável por cerca de 21% dos estudos. O mesmo foi observado para as afiliações dos pesquisadores, com um destaque isolado para a Chinese Academy of Sciences, instituição governamental da China que apareceu como afiliadora em 232 publicações de autores.
- g) Em relação aos tipos de águas residuárias, se destacou o foco na “água residuária de processamento de oliva” (ao menos 72 ocorrências), “água residuária de suínos” (57 ocorrências) e “água residuária doméstica” (48 ocorrências).

Para uma avaliação, também, dos avanços já obtidos e ainda requeridos para aumentar a aplicação da produção de biogás em escala industrial foi realizada uma análise dos artigos mais relevantes em relação ao tema de interesse, selecionados após a aplicação de critérios de inclusão/exclusão ao trabalho na íntegra, reduzindo a análise a 20 artigos.

Dentre os estudos de modelagens matemáticas se destacou a eficiência do modelo de Gompertz para simulação da produção cumulativa de metano e do uso de RNAs para modelar a produção de biogás. Foram apresentadas opções de aditivos para a suplementação de nutrientes em falta no meio (oligoelementos) e bioestimulação (magnetita), com o objetivo de melhorar a performance do processo, enquanto o uso da co-digestão se apresentou como uma opção para lidar com a inibição promovida por compostos tóxicos como a amônia e melhorar a produção de biogás (biometano). Dentre os parâmetros que influenciam a performance da DA se destacaram a temperatura, o TRH e o pH.

Dentre os artigos analisados foi verificado o uso do ultrassom para a quebra de moléculas complexas, o uso da redução de sulfato (inibidor) por meio da adição de cinzas de seringueira ao substrato antes de alimentar o sistema de DA, que auxilia também na redução do teor de sulfeto de hidrogênio (gás tóxico a humanos) no biogás, o uso da DA eletrocinética assistida e o uso da bioeletrólise para aumentar o rendimento de metano durante a DA. Novas tecnologias e pré-tratamentos são oportunidades de solucionar problemas que comprometem o uso da DA em diferentes cenários, entretanto o maior desafio neste caso é a viabilidade econômica do uso das mesmas. Pensando nisso, o desenvolvimento de novas tecnologias e pré-tratamentos precisam levar em conta o custo de sua aplicação.

Por fim, o trabalho cumpriu o objetivo de apresentar um conhecimento sobre o desenvolvimento da pesquisa já realizada e direcionar pesquisadores na realização de buscas e trabalhos sobre o tema, além de conhecer os principais avanços e desafios para que a produção de biogás a partir da DA de ARs se torne cada vez mais atrativa ao mercado.

7 REFERÊNCIAS

ABDESHAHIAN, P., LIM, J.S., HO, W.S., HASHIM, H., LEE, C.T., 2016. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 714–723.

Afinal, o que são as mudanças climáticas?. 2022. Disponível em:

<<https://www.unicef.org/brazil/historias/afinal-o-que-sao-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 3 mar. 2023.

AMO-DUODU, G. et al. Effect of engineered biomaterials and magnetite on wastewater treatment: Biogas and kinetic evaluation. *Polymers*, v. 13, n. 24, 2021.

AMPESE, L. C. et al. Research progress, trends, and updates on anaerobic digestion technology: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 331, n. December 2021, 2022.

ANTWI, P. et al. Estimation of biogas and methane yields in an UASB treating potato starch processing wastewater with backpropagation artificial neural network. *Bioresource Technology*, v. 228, p. 106–115, 2017.

ANYANGO, B. N.; WANDERA, S. M.; RAUDE, J. M. Abattoir Wastewater Treatment in Anaerobic Co-Digestion with Sugar Press Mud in Batch Reactor for Improved Biogas Yield. *Water (Switzerland)*, v. 14, n. 16, p. 1–16, 2022.

BATSTONE, D.J., KELLER, J., ANGELIDAKI, S.V., KALYUZHNYI, S.V., PAVLOSTATHIS, S.G., ROZZI, A., SANDERS, W.T.M., SIEGRIST, H., VAVILIN, V.A., 2002. The IWA anaerobic digestion model No 1 (ADM1). *Water Sci. Technol.* 45, 65–73.

Biogás: a próxima fronteira da energia renovável. 2018. Disponível em:

<<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogas>>. Acesso em: 8 mar. 2023.

BRAUN, R., BRACHTL, E., GRASMUG, M., 2003. Codigestion of proteinaceous industrial waste. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 109, 139–153.

CATUMBA, B. D. et al. Sustainable Feedstocks and Challenges in Biodiesel Production: An Advanced Bibliometric Analysis. *Bioengineering*, v. 9, n. 10, 2022.

CHEN, Y., XIAO, K., JIANG, X., SHEN, N., ZENG, R.J., ZHOU, Y., 2018. Long solid

retention time (SRT) has minor role in promoting methane production in a 65 °C single-stage anaerobic sludge digester. *Bioresour. Technol.* 247, 724–729.

CHERNICHARO, C. A. de L.. *Reatores anaeróbicos*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 379 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v.5). ISBN 85-7041-130-8.

Conference of the Parties (COP) | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>>. Acesso em: 3 mar. 2023.

COOKE, A.; SMITH, D.; BOOTH, A. Beyond PICO: The SPIDER tool for qualitative evidence synthesis. *Qualitative Health Research*, v. 22, n. 10, p. 1435–1443, 2012.

CREMONEZ, P. A. et al. Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 281, n. August 2020, 2021.

DIVYA, D., GOPINATH, L.R., MERLIN CHRISTY, P., 2015. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42, 690–699.

ENITAN, A. M. et al. Anaerobic Digestion Model to Enhance Treatment of Brewery Wastewater for Biogas Production Using UASB Reactor. *Environmental Modeling and Assessment*, v. 20, n. 6, p. 673–685, 2015.

ENITAN, A. M. et al. Principal component analysis and characterization of methane community in a full-scale bioenergy producing UASB reactor treating brewery wastewater. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 108, n. May 2016, p. 1–8, 2018.

ESPOSITO, G., FRUNZO, L., GIORDANO, A., LIOTTA, F., PANICO, A., PIROZZI, F., 2012. Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 11 (4), 325–341.

FERREIRA S.F., BULLER L.S., MACIEL-SILVA F.W., SGANZERLA W.G., BERNI M.D., FORSTER-CARNEIRO T. Waste management and bioenergy recovery from açaí processing in the Brazilian Amazonian region: a perspective for a circular economy. *Biofuels, Bioprod Biorefining*, 2021;15:37 e 46.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ). Belo Horizonte, 2015.

GREENFIELD, P.F., BATSTONE, D.J., 2005. Anaerobic digestion: impact of future greenhouse gases mitigation policies on methane generation and usage. *Water Sci. Technol.*

52 (1–2), 39–47.

IOC. Disponível em: <<https://www.internationaloliveoil.org/wp-content/uploads/2021/12/IOC-Olive-Oil-Dashboard-1.html#production-2>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

JEIHANIPOUR, A., NIKLASSON, C., TAHERZADEH, M.J., 2011. Enhancement of solubilization rate of cellulose in anaerobic digestion and its drawbacks. *Process Biochem.* 46, 1509–1514.

KAINTHOLA, J., KALAMDHAD, A.S., GOUD, V.V., 2019. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. *Process Biochem.* 84, 81–90.

KARAMICHAILIDOU, D. et al. Modeling biogas production from anaerobic wastewater treatment plants using radial basis function networks and differential evolution. *Computers and Chemical Engineering*, v. 157, p. 107629, 2022.

KHALID, A., ARSHAD, M., ANJUM, M., MAHMOOD, T., DAWSON, L., 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Manag.* 31 (8), 1737–1744.

KHOUFI, S.; LOUHICHI, A.; SAYADI, S. Optimization of anaerobic co-digestion of olive mill wastewater and liquid poultry manure in batch condition and semi-continuous jet-loop reactor. *Bioresource Technology*, v. 182, p. 67–74, 2015.

KOMILIS, D., BARRENA, R., GRANDO, R.L., VOGIATZI, V., SANCHEZ, A., FON, X., 2017. A state of the art literature review on anaerobic digestion of food waste: influential operating parameters on methane yield. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 16, 347–360.

KUMAR, P. et al. Electrokinetic assisted anaerobic digestion of spent mushroom substrate supplemented with sugar mill wastewater for enhanced biogas production. *Renewable Energy*, v. 179, p. 418–426, 2021.

KUMAR, A., SAMADDER, S.R., 2020. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: a review. *Energy* 197, 117253.

LAUZURIQUE, Y. et al. Biogas production from winery wastewater: Effect of the substrate-inoculum ratio on fly ash addition and iron availability. *Journal of Water Process Engineering*, v. 47, n. May, 2022.

LIN, C. Y. et al. Fermentative hydrogen production from wastewaters: A review and prognosis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 20, p. 15632–15642, 2012.

MAAMRI, S.; AMRANI, M. Evaluation and modeling of methane yield efficiency from co-digestion of waste activated sludge and olive mill wastewater. *Applied Ecology and Environmental Research*, v. 17, n. 2, p. 5259–5274, 2019.

MANAV-DEMIR, N.; UNAL, E. Comparison of Performances of Kinetic Models for Biomethane Production with Cheese Whey Mixtures. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 233, n. 8, 2022.

MEHRYAR, E. et al. Anaerobic co-digestion of oil refinery wastewater with bagasse; evaluating and modeling by neural network algorithms and mathematical equations. *BioResources*, v. 12, n. 4, p. 7325–7340, 2017.

MUNIR, K. Sustainable food waste management strategies by applying practice theory in hospitality and food services- a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 331, n. November 2020, 2022.

NEGRI, M., BACENETTI, J., FIALA, M., BOCCHI, S., 2016. Evaluation of anaerobic degradation, biogas and digestate production of cereal silages using nylon-bags. *Bioresour. Technol.* 209, 40–49.

O'CONNOR, D., GREEN, S., & HIGGINS, J. P. T. (2008). Defining the review question and developing criteria for including studies. In J. P. T. Higgins & S. Green (Eds.), *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. Retrieved from www.cochrane-handbook.org

PANIGRAHI, S., DUBEY, B.K., 2019. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renew. Energy* 143, 779–797.

PRAJAPATI, K. B.; SINGH, R. Enhancement of biogas production in bio-electrochemical digester from agricultural waste mixed with wastewater. *Renewable Energy*, v. 146, p. 460–468, 2020.

RAKETH, M. et al. Sulfate removal using rubber wood ash to enhance biogas production from sulfate-rich wastewater generated from a concentrated latex factory. *Biochemical Engineering Journal*, v. 173, n. February, p. 108084, 2021.

ROCAMORA, I., WAGLAND, S.T., VILLA, R., SIMPSON, E.W., FERNANDEZ, O., BAJON FERNANDEZ, Y., 2020. Dry anaerobic digestion of organic waste: a review of operational parameters and their impact on process performance. *Bioresour. Technol.* 299, 122681.

RUAN, J. et al. Application of fuzzy neural networks for modeling of biodegradation and biogas production in a full-scale internal circulation anaerobic reactor. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, v. 52, n. 1, p. 7–14, 2017.

SCARLAT, N., DALLEMAND, J. F., FAHL, F., 2018. Biogas: developments and perspectives in Europe. *Renew. Energy* 129, 457–472.

SCHMIDT, T. et al. Effect of trace element addition and increasing organic loading rates on the anaerobic digestion of cattle slaughterhouse wastewater. *Bioresource Technology*, v. 264, n. March, p. 51–57, 2018.

SCHMIDT, T. et al. Investigating the impact of seasonal temperature variation on biogas production from covered anaerobic lagoons treating slaughterhouse wastewater using lab scale studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, n. 3, p. 103077, 2019.

SIDDIQUE, M. N. I.; MUNAIM, M. S. A.; AB. WAHID, Z. Role of hydraulic retention time in enhancing bioenergy generation from petrochemical wastewater. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 504–510, 2016.

SILLERO, L. et al. A bibliometric analysis of the hydrogen production from dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 64, p. 27397–27420, 2022.

TAVERA-RUIZ, C. et al. Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 173, n. May 2022, 2023.

The Paris Agreement | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>>. Acesso em: 3 mar. 2023.

Um passeio no mundo livre. Intérprete: Chico Science e Nação Zumbi. Compositor: Chico Science et al. *In: Afrociberdelia*. SONY MUSIC ENTERTAINMNT (BRASIL) I.C.L., 1996. 1 Album, faixa 6 (4 min). Disponível em: <<https://open.spotify.com/track/3yOvaLT5jMBem06folN4tq?autoplay=true>>. Acesso em: 3 de março de 2023.

Você sabe como os gases de efeito estufa aquecem o planeta?. 2022. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/voce-sabe-como-os-gases-de-efeito-estufa-aquecem-o-planeta>>. Acesso em: 3 mar. 2023.

WADJEAM, P.; REUNGSANG, A. Determining the optimum proportions of cassava starch wastewater, hydrogenic effluent and anaerobic sludge for methane production. *Chiang Mai Journal of Science*, v. 45, n. 7, p. 2609–2622, 2018.

Web of Science Core Collection - Clarivate. 2023. Disponível em: <<https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/web-of-science/web-of-science-core-collection/>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

Web of Science Todas as bases de dados Ajuda. 2020. Disponível em: <https://images.webofknowledge.com/WOKRS5132R4.2/help/pt_BR/WOK/hs_sort_options.html>. Acesso em: 3 mar. 2023.

WEILAND, P., 2006. State of the art of solid-state digestion—recent developments. Solid-state digestion—state of the art and further R&D requirements 24, 22–38.

What is a systematic review? - The Campbell Collaboration. Disponível em: <<https://www.campbellcollaboration.org/what-is-a-systematic-review.html>>. Acesso em: 3 mar. 2023.

What is the Kyoto Protocol? | UNFCCC. Disponível em: <https://unfccc.int/kyoto_protocol>. Acesso em: 3 mar. 2023.

ZERROUKI, S. et al. Enhanced biogas production from anaerobic digestion of wastewater from the fruit juice industry by sonolysis: Experiments and modelling. *Water Science and Technology*, v. 84, n. 3, p. 644–655, 2021.