

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

DIEGO ANGELO SACOMAN

**PERSPECTIVAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A
PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

SÃO CARLOS - SP

2024

DIEGO ANGELO SACOMAN

**PERSPECTIVAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A
PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Silva

SÃO CARLOS - SP

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Folha de Aprovação

Trabalho de graduação apresentado no dia _____ perante a
banca examinadora:

Edson Luiz Silva – Professor Doutor (UFSCar)

Ernesto Antonio Urquieta Gonzalez – Professor Doutor (UFSCar)

Wu Hong Kwong – Professor Doutor (UFSCar)

Dedico este trabalho à minha família e amigos,
especialmente a minha avó Cacilda, pelo
estímulo, carinho, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

De início, gostaria de agradecer a minha mãe Jucelena, por sempre acreditar no meu potencial, lutar dia a dia por mim e pelo meu irmão e me proporcionar uma educação de qualidade, sempre comemorando minhas conquistas. Agradeço também meu irmão Miguel, o meu companheiro, que sempre foi meu alívio. Um agradecimento especial a minha Avó Cacilda, meu porto seguro. Agradeço a toda a família, Adriana, Daniella, Lara, Eduardo, Juliano e Anderson, que desde o primeiro momento, nunca soltaram minha mão.

Sou grato também aos meus amigos que me acompanham e me apoiam há anos. Meus fixos, Gustavo, Flávia e Fernanda, por todos os momentos juntos, desde atualizações das nossas pautas, horas de amparo, até as infinitas aventuras. Também agradeço a Gabriela, Julia, Mateus, Isabela Abud, Isabela Cury, Victória, Leonardo, Gabriel, Giovana, Felipe, Ana Clara, Lidia, Maria Luiza e entre tantos outros, seja os que estão comigo desde o início e me ajudaram a superar inúmeros obstáculos nessa trajetória compartilhando desabafos e risadas, ou os que foram chegando durante os anos e fazendo a diferença em minha vida.

Também agradeço aos meus colegas e tutores dos projetos de extensão e ONG's que participei nessa caminhada: PET-EQ UFSCar, TETO Brasil, Operação Natal, Centro Acadêmico de Engenharia Química. Cada passo foi essencial.

Agradeço também aos meus amigos que o destino, e São Carlos, me deram de presente. Anderson e Luís Antônio, meus companheiros do Apto. 171A, por todos os momentos nesses anos. Giovana e Lucas, pelas horas em chamadas e risadas nos momentos difíceis. Luanna, Maria Julia, Pedro, Giovanna, Anna Julia, Luiza, Luana, Laura e entre inúmeros outros essenciais nesses anos, me apoiando em diversos momentos, ajudando nos desafios do dia a dia e presentes nos tempos de alegria.

Para finalizar, gostaria de agradecer aos professores, que foram cruciais nesse caminho, sendo capazes de transmitir o conhecimento dos mais diversos temas, formando e transformando excelentes profissionais para o futuro. Um agradecimento especial ao meu orientador desse trabalho, Prof. Dr. Edson Luiz Silva, que não só me orientou para que fosse entregue um trabalho digno, como me instruiu e me mostrou caminhos acerca de situações da vida nesse período.

RESUMO

A digestão anaeróbia de resíduos é um tema de pesquisa que tem ganhado crescente relevância devido à sua relação com o tema de sustentabilidade, no contexto da necessidade de lidar com resíduos orgânicos, principalmente industriais, que em diversos países são descartados em quantidades exorbitantes causando uma drástica poluição ambiental, além de que a alternativa conta com a produção de biogás, sobretudo do metano, e bioenergia. Desse modo, esse trabalho tem como objetivo a realização de uma análise bibliográfica e revisão sistemática da literatura, explorando os conceitos de digestão anaeróbia e co-digestão anaeróbia, a relação com substratos heterogêneos e suas eficiências. Além disso, a revisão bibliográfica analisa também as publicações científicas acerca do assunto do tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos, verificando diferentes abordagens, observando os parâmetros mais relevantes para o tratamento e a produção do biogás. Para a análise detalhada dos estudos científicos será utilizado o banco de dados Scopus e Web of Science. A partir dos dados expostos, pretende-se analisar os principais tópicos de estudo e, ressaltando os substratos mais catalogados, países e períodos com maiores publicações e concluir se a digestão anaeróbia é uma promissora estratégia para o tratamento de resíduos orgânicos, para minimizar o impacto ambiental.

Palavras chaves: digestão anaeróbia; co-digestão anaeróbia; tratamento de resíduos orgânicos; biogás; sustentabilidade.

ABSTRACT

Anaerobic digestion of waste is a research topic that has gained increasing relevance due to its relationship with the topic of sustainability, in the context of the need to deal with organic waste, mainly industrial, which in several countries is discarded in exorbitant quantities causing drastic environmental pollution, in addition to the alternative relying on the production of biogas, especially methane, and bioenergy. Therefore, this work aims to carry out a bibliographical analysis and systematic review of the literature, exploring the concepts of anaerobic digestion and anaerobic co-digestion, the relationship with heterogeneous substrates and their efficiencies. Furthermore, the literature review also analyzes scientific publications on the subject of anaerobic treatment of organic waste, verifying different approaches, observing the most relevant parameters for the treatment and production of biogas. For detailed analysis of scientific studies, the Scopus and Web of Science database will be used. Based on the data presented, we intend to analyze the main topics of study and, highlighting the most cataloged substrates, countries and periods with the largest publications, and conclude whether anaerobic co-digestion is a promising strategy for the treatment of organic waste, to minimize the environmental impact.

Keywords: anaerobic digestion; anaerobic co-digestion; organic waste treatment; biogas; sustainability..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração de resíduos sólidos urbanos por país em 2017	17
Figura 2 – Composição do Resíduo Sólido Urbano	18
Figura 3 – Etapas da digestão anaeróbia	20
Figura 4 – Desenho esquemático de um reator UASB	29
Figura 5 – Fluxo metodológico da obtenção e análise dos dados	32
Gráfico 1 – Influência da temperatura na taxa de crescimento relativo de metanógenos psicrófilos, mesófilos e termofílicos	27
Gráfico 2 – Quantidade de publicações com o assunto “anaerobic digestion” a cada década nos periódicos Web Of Science e Scopus	34
Gráfico 3 – Países com mais publicações acerca do tema de digestão anaeróbica	36
Gráfico 4 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” do tema digestão anaeróbica	37
Gráfico 5 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” e “methane” do tema digestão anaeróbica	37
Gráfico 6 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” e “solid waste” do tema digestão anaeróbica	38
Gráfico 7 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” e “UASB” do tema digestão anaeróbica	38
Gráfico 8 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic co-digestion” do tema digestão anaeróbica	39
Gráfico 9 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de digestão anaeróbica	41
Gráfico 10 – Número de publicações por área de Irimi Angelidaki	41
Gráfico 11 – Número de documentos e citações de Irimi Angelidaki	42
Gráfico 12 – Número de publicações por área de Yu-You Li	43
Gráfico 13 – Número de documentos e citações de Yu-You Li	44
Gráfico 14 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de digestão anaeróbia e reatores UASB	44

Gráfico 15 – Número de documentos e citações de Gatzke Lettinga	45
Gráfico 16 – Número de publicações com o tema “anaerobic digestion” no Brasil	46
Gráfico 17 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de digestão anaeróbia	47
Gráfico 18 – Número de publicações com o tema “anaerobic co-digestion” no Brasil	48
Gráfico 19 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de co-digestão anaeróbia no Brasil	48
Gráfico 20 – Número de publicações com o tema “anaerobic co-digestion”	49
Gráfico 21 – Número de publicações com o tema “anaerobic digestion” e “two-stages” no Brasil	52
Gráfico 22 – Número de publicações com o tema “anaerobic co-digestion” e “pre-treatment” no Brasil	54
Gráfico 23 – Número de publicações com o tema “anaerobic co-digestion”, “biogás” e “purification” no Brasil	56
Quadro 1 – Classificação e conceito de alguns resíduos	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais processos que podem ser tratados pela via anaeróbia	18
Tabela 2 – Quantidade de publicações a partir de cada palavra-chave nos periódicos Web Of Science e Scopus	32
Tabela 3 – Percentual de cada área de estudo na pesquisa de artigos com o assunto “anaerobic digestion”	34
Tabela 4 – Percentual de cada área de estudo na pesquisa de artigos com o assunto “coanaerobic digestion”	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
ASTBR	Reator Anaeróbio de Leito Estruturado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DTU	Universidade Técnica da Dinamarca
EESC	Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos
EUA	Estados Unidos da América
HCl	Ácido Clorídrico
HMF	Hidroximetilfurfural
HRAP	Lagoas de Alta Taxa
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
IBGE	Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
KOH	Hidróxido de Potássio
NO ₃ ⁻	Nitrato
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SBR	Reator por Lodos Ativados
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica

UASB Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo
UFMH Membrana de Ultrafiltração de Fluxo Lateral
USP Universidade de São Paulos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Resíduos Orgânicos	16
2.2 Digestão Anaeróbia.....	19
2.2.1 Hidrólise.....	20
2.2.2 Acidogênese.....	21
2.2.3 Acetogênese	21
2.2.4 Metanogênese.....	21
2.3 Co-digestão Anaeróbia	22
2.4 O Biogás.....	23
2.5 Métricas Quantitativas Do Processo De Digestão Anaeróbia	24
2.5.1 DBO – DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO	25
2.5.2 DQO – Demanda Química De Oxigênio	25
2.5.3 Sólidos Voláteis	25
2.5.4 Relação Carbono/Nitrogênio	25
2.5.6 Tempo De Detenção Hidráulica (TDH)	26
2.5.7 Temperatura	27
2.6 Principais Reatores Utilizados para o Processo de Digestão Anaeróbia.....	28
3. BASES DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICAS E ÍNDICE-H	30
3.1 Scopus	30
3.2 Web Of Science	30
3.3 Índice-H	30
4. METODOLOGIA.....	31
5. RESULTADOS	33
5.1 Publicações por Países	35
5.2 Publicações por Autores.....	40
5.3 O tema no Brasil.....	45
5.4 Análise e perspectivas futuras para o tema.....	49
6. CONCLUSÃO.....	58
7. SUGESTÕES PARA A CONTINUAÇÃO DO TRABALHO.....	59
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a progressiva geração de resíduos orgânicos tem se tornado um desafio ambiental e econômico de escala global. Os resíduos orgânicos, que incluem uma variedade de materiais biodegradáveis, como restos de comida e resíduos industriais e agrícolas, representam uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos e rurais. Segundo a Abrelpe (2022), Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, os resíduos orgânicos representam em torno de 50% de todo o material coletado e, em até cidades com maior industrialização como São Paulo, chegam a corresponder a 57,5% de todo o resíduo.

Com isso, sabe-se que o crescente aumento dos resíduos e sua heterogeneidade se deve a alguns motivos como: o aumento populacional nos últimos anos, assim como o consequente aumento de consumo de alimentos, e o avanço da urbanização e da industrialização, advindo desde o período da revolução industrial.

Ademais, com uma população que ultrapassa os 200 milhões de cidadãos, o Brasil se destaca como uma das nações que produzem uma quantidade significativa de resíduos sólidos. A destinação apropriada desses resíduos deveria ser realizada de acordo com as diretrizes legais vigentes e as tecnologias à disposição, visando soluções que sejam econômica e ambientalmente viáveis. No entanto, parte desses resíduos ainda enfrenta problemas como descarte inadequado a céu aberto, lançamento nas redes de esgoto públicas ou mesmo incineração.

Analisando os resíduos alimentares, por exemplo, cerca de 1,6 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados todos os anos no mundo todo. Isso equivale a um valor aproximado de 1,2 bilhões de dólares. Além disso, espera-se que a produção global de alimentos aumente 33% durante o próximo década, expondo que algo precisa ser realizado para minimizar esse desperdício (Pour; Makkawi, 2021).

Desse modo, aspirando o conceito de economia circular, diversos estudos são realizados avaliando a digestão anaeróbia para o tratamento desses resíduos orgânicos, visto que essa tecnologia, em parte dos casos, é considerada viável e sustentável. Esse processo de obtenção de metano tem sido considerado uma alternativa excelente visto a fonte de energia sustentável, quando comparado ao uso de combustíveis fósseis. Ademais, a conversão destas complexas substâncias orgânicas em biogás, podem ocorrer a formação de substâncias intermediárias, como ácidos fórmicos e, principalmente, ácido acético e propiônico (Schunurer; Jarvis, 2010).

Estima-se, segundo Amuda *et al.* (2008), que a essa técnica de fermentação é uma das técnicas mais antigas para o tratamento biológico de águas residuais, que ainda em uso até hoje,

e sua aplicabilidade pode ser variada em sistemas em batelada e em sistema contínuos ou semi-contínuo, a partir da influência do meio no processo. Com isso, dissertações e novas tecnologias interligadas ao assunto têm sido desenvolvidas nos últimos anos, com o intuito de otimizar o processo e aumentar a produção do biogás.

Dito isso, o presente trabalho tem como objetivo, inicialmente, coletar dados de estudos das últimas décadas acerca do tema de gestão de resíduos e produção de biogás por meio da digestão anaeróbia, e analisar tanto de modo quantitativo e qualitativo os resultados obtidos com as informações obtidas. Classificar os principais países, autores, períodos que tiveram ou têm maior impacto no desenvolvimento da temática e analisar quais são as perspectivas futuras para os estudos e analisar os resultados de teses já comprovadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Resíduos Orgânicos

Atualmente, tem-se diversas classificações para os dejetos provindo de alguma ação humana. No Quadro 1, estão expostas algumas classificações de resíduos de destaque no estudo desse trabalho, devido a usual taxa de matéria orgânica em suas composições.

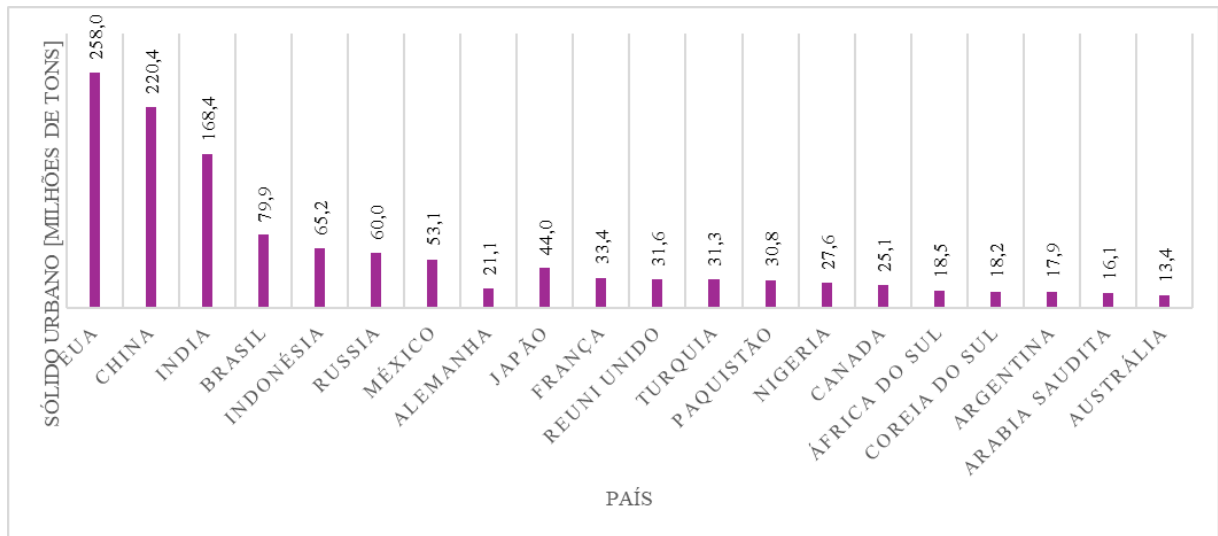
Quadro 1 – Classificação e conceito de alguns resíduos

	Resíduos domésticos e alimentares	Os originários de atividades domésticas em residências Urbanas e restos de alimentos.
Resíduos Sólidos Urbanos	Resíduos de limpeza urbana	Os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.
	Resíduos de serviço público de saneamento básico	Os originários de processos de esgoto e saneamento básico urbano.
	Resíduos da indústria alimentícia e de bebidas	Os originários de indústrias como de alimentos em geral, cervejarias, laticínios, açúcar, entre outros.
Resíduos Industriais	Resíduos da indústria químicas	Os originários de processos químicos, como solventes ou produtos químicos.
	Resíduos da indústria de papel e celulosa	Os originários das indústrias de papel e celulosa, como cascas de madeira, fibras e lodos.
Resíduos Agrossilvopastoril	Os originários das atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades.	

Fonte: Brasil (2019)

Ademais, na Figura 1, temos os países que mais geraram resíduos sólidos no ano de 2018. Analisando o gráfico, pode-se observar que os maiores ofensores quando o tema é resíduos sólidos são os Estados Unidos, China, Índia, Brasil e Indonésia. Pode-se relacionar a alta quantidade de resíduos tanto pela massa populacional desses países, quanto pelo desenvolvimento industrial e produtivo de algumas áreas. De acordo com Kaza *et al.* (2018), os EUA, país de maior destaque nos dados, tem uma geração per capita de 2,6kg/dia de resíduos.

Figura 1 – Geração de resíduos sólidos urbanos por país em 2017



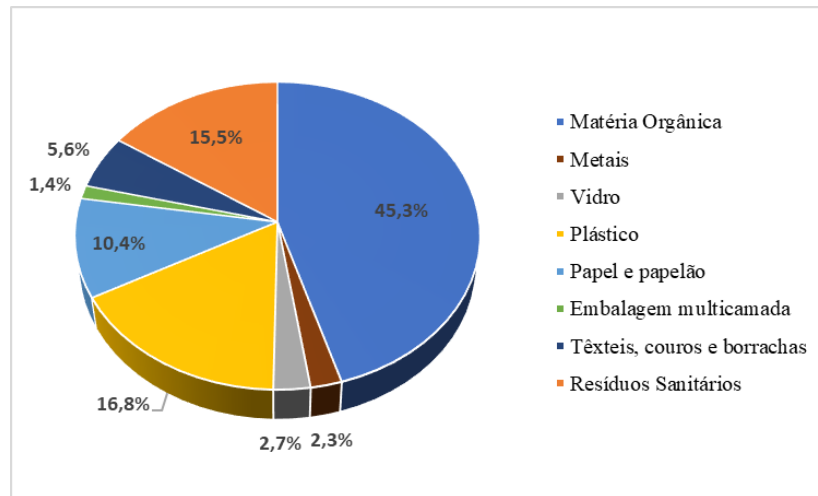
Fonte: Adaptado de Kaza *et al.* (2018)

A princípio, a degradação de qualquer categoria de compostos orgânicos pode ser realizada por meio de um processo anaeróbico, que se mostra mais eficaz e economicamente viável quando os resíduos são de fácil biodegradação. A seguir, por exemplo, está mostrado um gráfico que expõe que, cerca de metade do peso dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados no país é constituída por matéria orgânica, enquanto a outra metade é formada por resíduos recicláveis secos e rejeitos. Isso destaca uma grande oportunidade e a necessidade urgente de resolver o problema dos resíduos sólidos urbanos. É crucial adotar práticas e medidas que valorizem os resíduos recicláveis secos e orgânicos, especialmente por meio de estratégias regionalizadas (SINIR, 2020).

Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2019, cada cidadão brasileiro produziu em média 0,99 Kg de resíduos sólidos por dia. Isso se traduz em cerca de 200 mil toneladas diárias ou aproximadamente 75 milhões de toneladas anuais em todo o país. As prefeituras gastaram em torno de R\$ 24 bilhões no gerenciamento desses resíduos durante esse período Segundo Abrelpe, coautora do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), a expectativa é que até 2040 o país passe a aproveitar mais de 13 mil toneladas deste tipo de resíduo por dia.

Na figura 2, está disposta a composição dos RSU.

Figura 2 – Composição do Resíduo Sólido Urbano



Fonte: Adaptado de SINIR (2020)

Na tabela 1, tem-se alguns processos que, para gestão de seus resíduos, pode ser utilizado a digestão anaeróbia.

Tabela 1 – Principais processos que podem ser tratados pela via anaeróbia

Cervejarias	Curtumes	Abatedouros e frigoríficos
Laticínios	Produção de açúcar	Produção de refrigerantes
Produção de vinho	Produção de álcool	Processamento de café
Processamento de vegetais	Tratamento de esgoto	Produção de fermento

Fonte: GTZ/TBW (1997)

Os digestores anaeróbicos têm sido extensivamente empregados no tratamento de resíduos sólidos, abrangendo resíduos agrícolas, dejetos animais, lodos de estações de tratamento de esgoto e resíduos urbanos. Estima-se que milhões desses digestores tenham sido instalados globalmente para essa finalidade. Além disso, o processo também tem sido amplamente aplicado no tratamento de efluentes das indústrias alimentícias e de bebidas, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento.

É consciente, também, o impacto o qual a composição dos substratos desempenha no reator. A partir de cada resíduo, tem-se suas proporções de carboidratos, proteínas, celuloses, lipídeos, e entre tantos outros compostos que apresentam diferentes taxas de degradação, que influenciam diretamente a velocidade e o rendimento do processo, além da possibilidade de cada material ter a liberação de compostos intermediários, que podem afetar, em alguns casos, negativamente no desenvolvimento da fermentação (Lytras *et al*, 2021).

A comunidade acadêmica aponta que a principal desvantagem da utilização de resíduos sólidos orgânicos (RSO) biodegradáveis para a digestão anaeróbia é o baixo teor de nitrogênio, resultando em um desequilíbrio na relação C/N (Li *et al.*, 2022). Para contornar isso, a co-digestão anaeróbia com outros resíduos ricos em nutrientes tem sido amplamente estudada e será aprofundada no presente artigo.

2.2 Digestão Anaeróbia

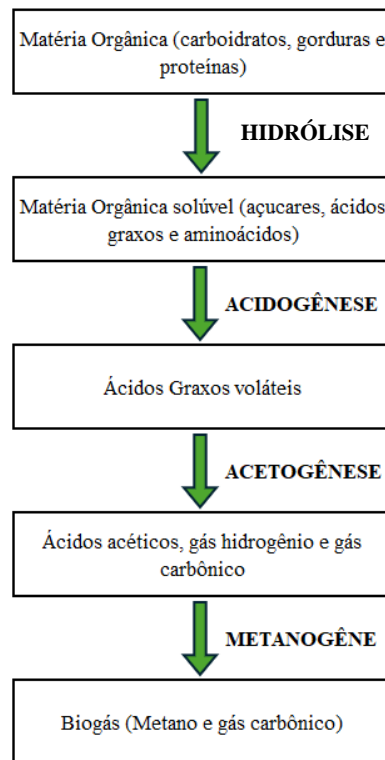
A digestão anaeróbica pode ser conceituada como um procedimento bioquímico realizado sob condições no qual não se há disponibilidade de oxigênio, por um grupo de variados microrganismos, que processam substâncias orgânicas complexas em uma mistura gasosa, composta essencialmente de metano e dióxido de carbono, denominada biogás. (Kiran *et al.*, 2016).

Esse grupo de microrganismos é considerado um sistema ecológico complexo, no qual cada microrganismo desempenha um papel crucial e indispensável no processo. Destacando brevemente as bactérias, as bactérias metanogênicas têm um papel de gerarem um gás insolúvel (metano), removendo assim o carbono orgânico do ambiente anaeróbico, além de consumir hidrogênio, criando, assim, um ambiente positivo para as bactérias acidogênicas fermentarem compostos orgânicos e produzirem ácido acético, que, por sua vez, é convertido em metano. (Chernicharo, 1997).

Além do biogás, tem-se, também, como produto da digestão um produto que geralmente é rico alguns nutrientes como nitrogênio e amônia (Christy; Gopinath; Divya, 2014), sendo esse lodo passível de ser utilizado como fertilizante devido a esses nutrientes (Adekunle; Okolie, 2015).

De acordo com Appels *et al.* (2008), a fermentação anaeróbica pode ser desmembrada em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como evidenciado na Figura 3.

Figura 3 – Etapas da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Kumar (2017)

2.2.1 Hidrólise

A hidrólise, primeira etapa da digestão anaeróbia, consiste na despolimerização, ou seja, na degradação das moléculas mais complexas em moléculas mais simples, com menor peso molecular, como açúcares, aminoácidos e peptídeos. (De Oliveira, 2023). A conversão dessas partículas em materiais dissolvidos é possível e realizada pelas exoenzimas que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, que facilitam a incorporação das substâncias produzidas pelas bactérias fermentativas (Bengtsson *et al.*, 2008).

Como a hidrólise é uma importante etapa para a taxa da digestão, estudos de diversos métodos são realizados na tentativa de acelerar essa fase. Sabe-se que a taxa de duração da hidrólise depende da composição do substrato, da temperatura, do pH, entre outros parâmetros. No intuito de otimizar esse processo, normalmente é trabalhado a uma temperatura entre 30°C e 50°C e com um pH entre 5,0 e 7,0 (Meegoda *et al.*, 2018).

2.2.2 Acidogênese

A próxima etapa da digestão, a acidogênese, bactérias denominadas “fermentativas acidogênicas” transformam os produtos gerados na hidrólise em produtos de cadeias ainda mais curtas, como ácidos orgânicos, ou chamados ácidos graxos voláteis (AGV), (especialmente ácido acético, butírico e propiônico), álcoois, hidrogênio, cetonas e dióxido de carbono (Bengtsson *et al.*, 2008). Além desses produtos, segundo Chernicharo (1997), nessa etapa também são produzidos amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas.

Outrossim, inúmeros estudos vêm sendo realizados que buscam separar as etapas da hidrólise e acidogênese em um primeiro reator, e as etapas da acetogênese e metanogênese em um segundo reator, com o intuito de otimizar a conversão dos compostos orgânicos com um tempo de residência menor (Bouallagui *et al.*, 2005).

2.2.3 Acetogênese

Segundo Chernicharo (1997), a acetogênese é uma fase intermediária na qual ocorre a conversão dos compostos resultantes da acidogênese, pelas bactérias sintróficas acetogênicas, que possuem esse nome devido a sua sobrevivência depender da atividade de organismos consumidores de hidrogênio. Esses compostos são transformados em acetato, hidrogênio e gás carbônico, ou seja, substratos apropriados para a bactérias metanogênicas da próxima etapa.

As bactérias acetogênicas presentes nessa fase necessitam de um período de adaptação ao ambiente em caso de alterações, como dosagem da matéria orgânica, ou seja, são extremamente sensíveis, além de crescerem de forma lenta. São estritamente anaeróbias e um pH considerado ótimo para essa espécie é em torno de 6,0 (Christy; Gopinath; Divya, 2014).

2.2.4 Metanogênese

Por fim, a última etapa da digestão anaeróbia de compostos orgânicos em metano é realizada pelas chamadas arqueobactérias metanogênicas. Essas possuem atributos singulares que as capacitam a habitar ambientes específicos nos quais há ausência ou baixas concentrações de receptores de elétrons, como oxigênio (O_2) e nitrato (NO_3^-). Esse micro-organismos utilizam majoritariamente o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono para a produção do biogás final.

As reações bioquímicas dessa última etapa são as mais lentas de todo o processo (Adekunle; Okolie, 2015). Para otimizar o tempo de decomposição anaeróbia de compostos, podem ser implementadas abordagens tanto de condições de projeto, quanto operacionais, no sistema de tratamento (Silva, 2009).

Segundo Visser (1995), dependendo da composição química presente no resíduo que passará pelo tratamento da digestão anaeróbia, pode ser incluída, após essas quatro etapas, uma quinta fase, a sulfetogênese. Despejos que possuem enxofre em sua composição são submetidos a essa fase, a qual ocorre a redução de sulfato e formação de sulfetos pelas bactérias sulforedutoras.

2.3 Co-digestão Anaeróbia

Em termos gerais, a co-digestão anaeróbia é conceituada como o tratamento de resíduos por meio da digestão anaeróbia, nos quais mais de um tipo de resíduos fermentáveis são combinadas e processadas juntas. (Ağdağ; Sponza, 2007).

A co-digestão é uma alternativa promissora para aumentar a eficiência da digestão anaeróbica de resíduos sólidos. Os rendimentos de biogás obtidos a partir da co-digestão de resíduos alimentares variam entre 0,3 e 0,8 L/g de sólidos voláteis, com proporções de metano entre 53% e 70%. Quando esses valores são comparados com uma digestão de apenas um substrato, são dados como valores baixos. Além disso, estima-se que a eficiência do processo possa melhorar entre 25% e 400% devido ao aumento da carga orgânica e a maior degradação dos sólidos voláteis com a adição de mais componentes (Cheong, *et al.*, 2022).

A adição de um co-substrato geralmente aumenta a produção de biogás, graças aos sinergismos positivos que ocorrem no processo de digestão e ao fornecimento de nutrientes que estão em falta. (Mata-Alvarez; Macé; Llabreés, 2000). Ademais, algumas outras vantagens envolvem a diluição de compostos tóxicos, o aumento da carga de matéria orgânica biodegradável, o melhor equilíbrio de nutrientes, mantendo um pH estável, adequado para as bactérias metanogênicas. (Wang *et al.*, 2012)

A co-digestão pode aprimorar também a capacidade de estabilização do sistema para as bactérias arquea metanogênicas, reduzir a sensibilidade a possíveis substâncias tóxicas e manter uma relação C/N, que vai ser detalhada posteriormente nesse trabalho, adequada no processo. Esses são alguns fatores essenciais para aprimorar a estabilidade da digestão anaeróbia e otimizar o aproveitamento da matéria orgânica. Além disso, proporção entre os substratos utilizados na co-digestão anaeróbia desempenha um papel fundamental para otimizar o

processo e garantir sua estabilidade. De acordo com resultados de pesquisas, a produção de metano é melhorada quando os substratos são digeridos em conjunto, contudo ainda há necessidade de estudos para determinar as proporções ideais a serem aplicadas na co-digestão. (Xie *et al.*, 2011)

De acordo com Li *et al.* (2011), a pesquisa sobre a co-digestão de resíduos sólidos vegetais emergiu como uma opção de otimização para lidar com esses resíduos orgânicos, uma vez que geralmente são direcionados para aterros sanitários onde tornam-se fontes significativas de emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera. Além disso, a co-digestão anaeróbica pode ser considerada, nos últimos anos, como sendo o tópico mais relevante e de maiores destaques dentro da área de pesquisa da digestão anaeróbica, visto que em torno de 50% dos artigos publicados entre os anos de 2012 e 2013, por exemplo, dissertam sobre o assunto.

2.4 O Biogás

Conforme estudado por Teghammar *et al.* (2012), nos últimos anos, devido ao crescimento do consumo de energia e a preocupação com o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, iniciou-se diversos estudos de formas alternativas de conversão de energia que fossem economicamente viáveis e menos poluentes. Nesse contexto, um dos meios para diminuir os impactos dessa problemática é o biogás, que se apresenta como uma alternativa para a produção de energia, sendo atualmente utilizado para aquecimento, geração de eletricidade e como combustível para veículos em diversos países ao redor do mundo.

O biogás é conceituado como o produto do processo de digestão anaeróbica. A constituição desse produto varia a partir de cada processo, com dependência no tipo de substrato, na temperatura, no pH, mas é definido principalmente de metano (CH₄) a uma concentração de 50 a 70% e dióxido de carbono (CO₂) a uma faixa de 30 a 50%. Além desses compostos, o biogás pode conter pequenas quantidades de outras substâncias, como nitrogênio (N₂), sulfetos de hidrogênio (H₂S) e vapor de água (H₂O) (Muñoz *et al.*, 2015).

Algumas consequências que essas impurezas trazem, de acordo com Abatzoglou e Boivin (2009), envolvem a eficiência da combustão, pois o poder calorífico do metano é aproximadamente 36 MJ/m³ de metano, nas condições padrões de temperatura e pressão, enquanto para o biogás com consideráveis impurezas, tendo em torno de 60 % de metano somente, o poder calorífico decai para aproximadamente entre 20 e 25 MJ/m³ de biogás. Além disso, compostos com sulfetos e amônia são extremamente corrosivos e tóxicos, o que podem causar mal funcionamento de motores ou válvulas.

Entretanto, hoje, foram desenvolvidos inúmeros processos para tratamento do biogás, que visam remover os compostos indesejáveis ampliando suas possíveis aplicações, que envolvem tantos métodos físicos, quanto químicos (Angelidaki *et al.* 2018).

No contexto do Brasil, segundo a EPE, Empresa de Pesquisa Energética, (2018), a participação das energias renováveis na matriz energética do Brasil permaneceu entre as mais altas do mundo, representando 42,9%, sendo aproximadamente somente 1,1% contribuição do biogás. Entretanto, com o passar dos anos, esse número tem aumentado e, estima-se que o Brasil detém o maior potencial energético mundial para a produção de biogás, podendo atingir cerca de 84,6 bilhões m³/ano. Dessa produção, seriam provenientes, 48% de resíduos do setor sucroalcooleiro, 45% de resíduos agroindustriais e 7% de resíduos de saneamento. Além disso, calcula-se que esse potencial produtivo atenderia quase 40% da demanda nacional de energia elétrica ou substituir 70% do consumo de diesel no país. (Abiogás, 2018).

De acordo com a Abiogás (2023), o investimento em novas usinas tem aumentado significativamente, e as previsões são muito promissoras. Um levantamento realizado pela organização indica a intenção de construir 25 novas plantas até 2030, com uma produção estimada de 2,3 milhões de m³ por dia. Entretanto, essa expansão da produção de biometano depende, em parte, de políticas públicas e aprimoramentos regulatórios, além da demanda do mercado, em especial de empresas com metas de redução de emissões e com a visão de que é preciso fazer mudanças importantes nos processos para garantir uma produção sustentável.

As matérias-primas utilizadas na produção de biogás podem ser cultivadas especialmente para esse fim. Um exemplo disso é a Alemanha, onde uma parcela significativa da produção de milho é destinada exclusivamente para a geração de biogás (European Biogas Association, 2017).

2.5 Métricas Quantitativas Do Processo De Digestão Anaeróbia

Segundo diversos estudos, sabe-se que é possível avaliar o potencial desse processo a partir do entendimento de certas propriedades químicas dos resíduos a serem tratados. Uma análise preliminar dessas características auxiliará na seleção do método de tratamento mais apropriado, permitindo estimar a geração de resíduos biológicos e produção de metano.

A seguir, serão apresentados alguns métodos de avaliar quantitativamente o processo de digestão anaeróbia.

2.5.1 DBO – Demanda Bioquímica De Oxigênio

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um parâmetro utilizado para medir os compostos orgânicos biodegradáveis presentes no lodo e é utilizada como uma métrica para avaliar a eficiência global de um digestor anaeróbico. A DBO é uma representação dos níveis de atividade microbiana do oxigênio dissolvido em uma amostra de lodo ao longo de um determinado período de tempo. Em essência, a DBO é uma medida usada para calcular a quantidade de oxigênio dissolvido necessária para manter microrganismos aeróbios em uma amostra de lodo durante um intervalo, o que, por sua vez, possibilita estimar a concentração de compostos orgânicos biodegradáveis presentes no lodo (Delzer; Mckenzie, 1999).

2.5.2 DQO – Demanda Química De Oxigênio

Assim como a DBO, a Demanda Química de Oxigênio (DQO) oferece uma medida do oxigênio disponível em uma amostra de lodo, passível de ser consumido em uma reação com agentes oxidantes. Na digestão anaeróbica, a DQO geralmente representa a quantidade de compostos orgânicos presentes no lodo. A eficácia da digestão anaeróbica também pode ser avaliada usando a DQO; a diminuição da DQO pode impactar na quantidade da degradação que ocorre dentro de um digestor anaeróbico, refletindo o consumo dos compostos orgânicos (Van Lier; Mahmoud; Zeeman, 2008).

2.5.3 Sólidos Voláteis

De acordo com a U.S. Environmental Protection Agency (2001), os sólidos voláteis (SV) são definidos como a parte orgânica dos sólidos totais, embora uma definição mais precisa seja a quantidade de matéria em um lodo que se perde durante um processo de combustão. Dessa maneira, do mesmo modo que a DQO, o VS nada mais é que uma medida de matéria orgânica no substrato, embora o primeiro seja uma medida mais precisa. Porém, tanto essas quanto a DBO podem ser utilizadas como base para determinar a taxa de carregamento orgânico de um digestor (American Public Health Association, 1999).

2.5.4 Relação Carbono/Nitrogênio

Outra medida normalmente utilizada é a de proporção entre carbono e nitrogênio (C/N) em um substrato. Pode-se afirmar que a grande parte da composição de nitrogênio em um substrato provém da degradação de proteínas, ao considerar um composto com carboidratos, proteínas e lipídeos. Dessa forma, do mesmo modo que o carbono é necessário em uma concentração adequada para fornecer substrato apropriado para a digestão, o nitrogênio em uma concentração específica também é vital para preservar a formação de proteínas nos microrganismos. Após alguns estudos, concluiu-se que o aumento na razão C/N, acarretou na diminuição das concentrações de metano no biogás final. Foi considerado que uma proporção ótima de carbono e nitrogênio no substrato é em torno da relação de 25:1 (Zupančič; Grilc, 2012).

Além disso, segundo Callaghan *et al.* (2002) e Wang *et al.* (2012), a relação C/N tem ganhado destaque devido ao aumento do uso da co-digestão de múltiplos substratos. Um exemplo que podemos citar é que, sabe-se que as fezes de aves têm uma relação C/N relativamente baixa, devido ao alto teor de amônia em sua composição, possivelmente associado à ureia. Dessa maneira, substratos ricos em carbono, como a palha, são co-digeridos para prevenir possíveis inibições causadas pela amônia.

2.5.6 Tempo De Detenção Hidráulica (TDH)

Segundo Kwietniewsk e Tys (2014), o tempo de detenção hidráulica (TDH) representa o intervalo em que o material a ser processado e degradado permanece no biodigestor, e está diretamente ligado à velocidade de multiplicação das bactérias. Além disso, esse período é influenciado pelo tipo de alimentação e pela temperatura do sistema. (Jain *et al.*, 2015).

O TDH pode ser calculado pela seguinte equação a seguir (Turovskiy *et al.*, 2006):

$$TDH = \frac{\text{quantidade de lodo no digestor [volume]}}{\text{quantidade de lodo digerido num período de tempo } \left[\frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \right]}$$

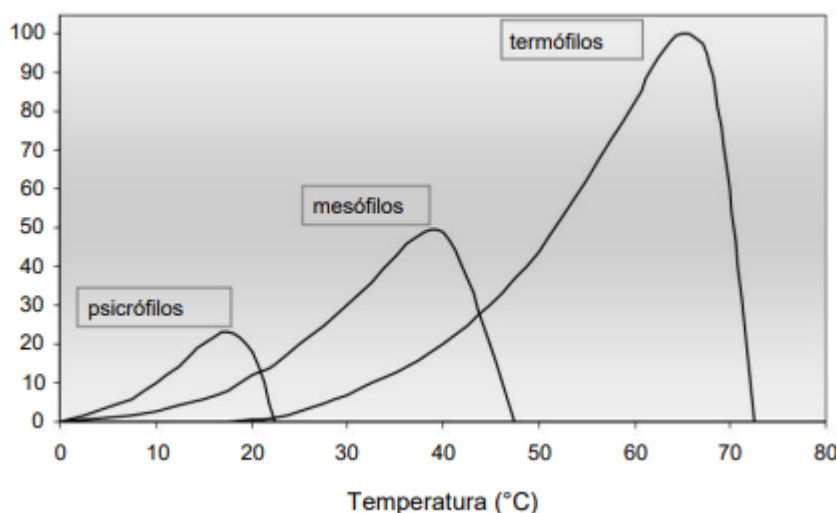
Segundo o mesmo autor, uma maneira de calcular o TDH em os sistemas de digestão contínuos é com base tanto na taxa de alimentação de lodo ou na taxa de remoção. Além disso, um exemplo de tempo de retenção em um processo é na digestão anaeróbia de lodo de esgoto a 35°C, com um tempo de retenção hidráulica de 4,2 dias.

2.5.7 Temperatura

É comprovado que a velocidade de qualquer processo sofre influência da temperatura. Além disso, sabe-se que é de extrema importância se definir uma temperatura operacional de um sistema, pois no caso deste trabalho, é de dependência da temperatura também a taxa de produção do biogás. Operando-se na faixa termofílica, comumente utilizada a faixa de variação de 48°C a 57°C, se produz maior quantidade do produto final, o biogás, em menor tempo, acarretando em um menor tempo de retenção hidráulica, se comparado com um sistema operacional na faixa mesofílica. (Lucas Júnior, 1994). Entretanto, apesar dos dados do ótimo desempenho da faixa termofílica, grande parte dos reatores operam ainda em faixa mesofílica, na faixa entre 30°C e 37°C, visto que nessas temperaturas, não é necessário aquecimento, minimizando, assim, os custos desse processo, além da maior instabilidade do processo. (Taricska *et al.*, 2009).

No gráfico 1, pode-se observar os dados de taxa de crescimento da biomassa no biodigestor, a partir da influência da temperatura.

Gráfico 1 - Influência da temperatura na taxa de crescimento relativo de metanógenos psicrófilos, mesófilos e termofílicos



Fonte: Chernicharo (1997)

Entretanto, temperaturas muito elevadas podem prejudicar a eficiência do processo também, pois, além de afetarem a taxa de crescimento da biomassa, conforme a Lei de Henry que disserta que temperaturas mais altas diminuem a capacidade de gases se dissolverem na fase aquosa, isso prejudica a interação com os microrganismos envolvidos no processo, ou seja,

desfavorece o uso do gás para gerar outros produtos durante a fermentação. A faixa de temperatura ideal para a maioria dos microrganismos metanogênicos, onde ocorre a produção ótima de metano, varia de 30°C a 55°C, geralmente (Lazaro, 2014).

2.6 Principais Reatores Utilizados para o Processo de Digestão Anaeróbia

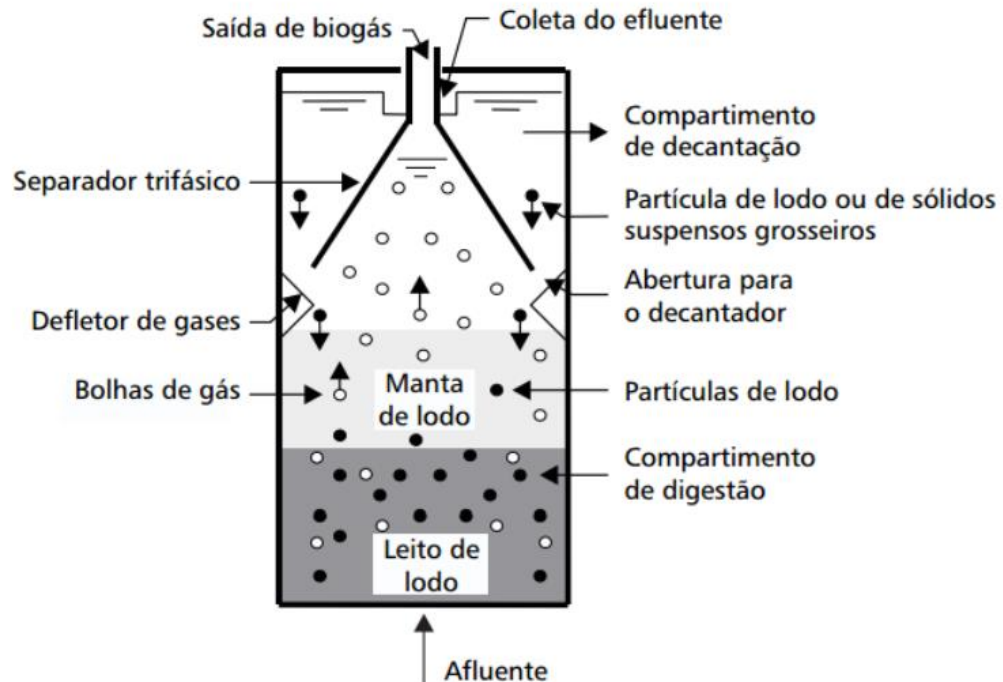
São inúmeros os exemplos de reatores anaeróbios que podem ser utilizados no tratamento de resíduos orgânicos por meio da digestão anaeróbia. Os mais comuns são os reatores UASB, os biodigestores tipo lagoa coberta e CSTR (mistura completa). A principal vantagem da utilização desses reatores é a conversão da matéria orgânica em biometano para o uso como fonte de energia térmica ou elétrica, economicamente viáveis no processo de produção (Mendonça *et al.*, 2017).

O principal é o reator UASB. O processo de tratamento por reatores UASB consiste, basicamente, no fluxo ascensional do efluente, passando por uma massa de lodo densa, caracterizada pela alta atividade da biomassa anaeróbia, responsável pela estabilização da matéria orgânica. A tecnologia do reator UASB é extremamente simples e não requer a instalação de nenhum dispositivo sofisticado ou mesmo a utilização de material suporte para imobilização e retenção de biomassa (Baréa, 2015).

Os reatores UASB tradicionais são divididos em três zonas principais: a zona de digestão, a zona de sedimentação e o separador de fases. A primeira zona, de digestão, é a qual o substrato ascende pelo leito e manta de lodo, sendo o local onde ocorre a digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no efluente a ser tratado. A zona de sedimentação é onde ocorre a ascensão do líquido, para os vertedores de coleta, com velocidade propícia à sedimentação dos sólidos que retornam ao compartimento de digestão. Por fim, a separação de fases é composta por defletores de gás, que têm a função de direcionar os gases impedindo o arraste de sólidos para os vertedores de coleta e, um separador trifásico, que é pra onde os gases são direcionados e consiste em um dispositivo para separação física das fases sólida, líquida e gasosa (Jordão; Pessoa, 2017).

Na Figura 4, está um desenho simplificado do reator UASB.

Figura 4 - Desenho esquemático de um reator UASB



Fonte: Prosab (1999)

Já o biodigestor de lagoa coberta é um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético que tem característica de baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente adaptável para acumular biogás. Esse modelo de reator tem sido amplamente empregado no meio rural para gerenciamento dos efluentes da produção animal e seu uso é usualmente utilizado para tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos. Além disso, é considerado de baixo nível tecnológico, com facilidade de construção e operação (Ricci *et al.*, 2022).

Por fim, tem-se o reator CSTR. Essa sigla é originada do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor* (reator com tanque agitado continuamente). A presença de um sistema de agitação aumenta os custos de implantação e manutenção de um CSTR, porém essa ferramenta otimiza a transferência de calor e mantém os sólidos em suspensão, favorecendo o contato entre as bactérias e o material orgânico. Para a estabilidade do processo em um reator CSTR, o bom funcionamento do sistema de agitação é fundamental, pois a utilização de um sistema de agitação implica em um ganho de 15% a 30% na produtividade de biogás (Karim *et al.*, 2005).

3. Bases de Pesquisa Bibliográficas e Índice-H

3.1 Scopus

De acordo com Enago Academy (2021), lançado em 2004, o Scopus é um serviço da Elsevier conceituada como uma base de dados multidisciplinar, abrange a literatura acadêmica de uma vasta gama de disciplinas, com acesso disponível por meio de assinaturas. Além de periódicos revisados por pares, o Scopus também indexa artigos de periódicos comerciais, livros, registros de patentes, publicações de conferências e páginas acadêmicas da web. O Scopus oferece um banco de dados internacional mais amplo que o Web of Science e fornece ferramentas inteligentes que podem ser vantajosas durante a pesquisa, como classificação de periódicos, perfis de autores, número de artigos publicados por uma revista em um determinado ano e frequência de uso de termos científicos.

3.2 Web Of Science

O Web of Science, anteriormente chamado de Web of Knowledge, é uma plataforma multidisciplinar de acesso por assinatura. Desenvolvido pelo Institute of Scientific Information e atualmente mantido pela Clarivate Analytics, este serviço de indexação oferece acesso a diversos bancos de dados que, em conjunto, cobrem uma variedade de áreas, tais como ciências da vida, ciências biomédicas, engenharia, ciências sociais, artes e humanidades. Sua cobertura se estende desde 1899 até o presente (Enago Academy, 2021).

3.3 Índice-H

O índice h, ou h-index, é uma medida utilizada para quantificar a produtividade e o impacto de pesquisas individuais ou em grupo, com base nos artigos mais citados. Ele é definido como o número de artigos por ele publicados que tenham recebido pelo menos o mesmo número de citações. Por exemplo, se o índice H de um pesquisador é 8, isso significa que ele tem pelo menos 8 artigos publicados, cada um deles com pelo menos 8 citações. Quanto maior o número de artigos de grande interesse publicados pelo pesquisador, maior será o número de citações obtidas e, conseqüentemente, maior será o seu índice H. Isso reflete a qualidade acadêmico-científica do pesquisador e sua capacidade produtiva (Thomaz; Assad; Moreira, 2011).

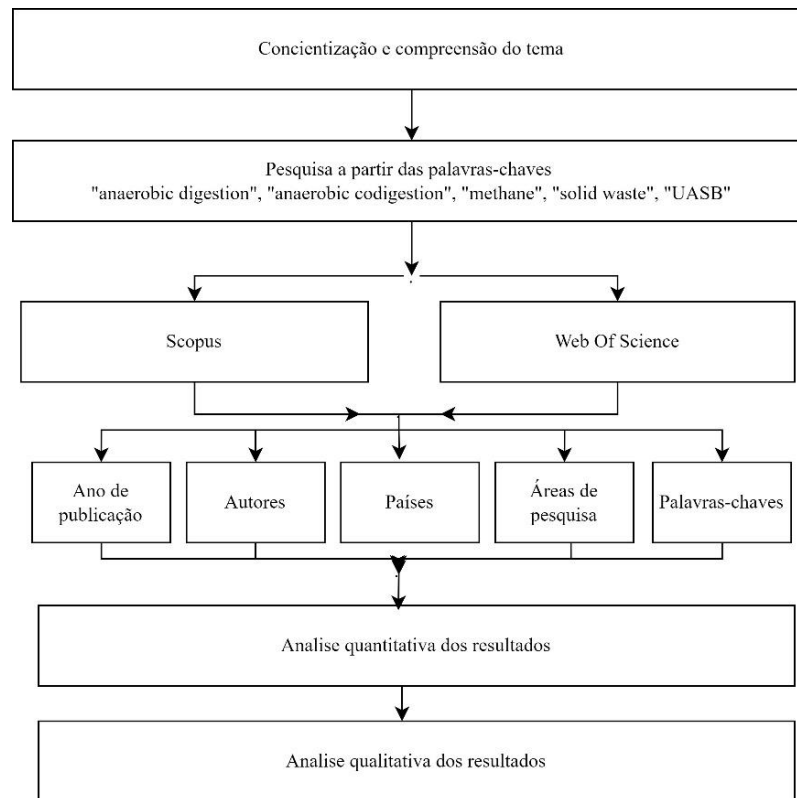
4. METODOLOGIA

De início, para compreender o tema e ser capaz de realizar as análises bibliográficas a fundo, foi necessário uma pesquisa inicial e um estudo detalhado a respeito dos conceitos e fundamentos que envolvem o fenômeno da digestão anaeróbica, e vias que o assunto aborda. O estudo foi feito baseando-se em conceituados artigos, livros renomados da literatura, tanto nacional quanto internacional.

Após a conscientização do tema, foi realizada a pesquisa para a análise bibliográfica mais detalhada, com dados científicos disponíveis encontrados na literatura. As bases utilizadas para a consulta foram “Thomson Reuters ISI Web of Knowledge (Web of Science)” e “Scopus”. Na investigação, foram utilizadas as palavras-chaves “anaerobic digestion”, “anaerobic co-digestion”, “solid waste”, “UASB” e “methane”, sendo compiladas e alternadas entre si. A partir dessa pesquisa foi feita uma análise baseada em “Ano de publicação”, sendo encontrado estudos a partir do ano de 1950, “Países”, “Autores”, “Áreas de pesquisa” e, por fim, uma análise e verificação de estudos e seus resultados, utilizando como base alguns artigos encontrados.

Dessa maneira, foram realizadas, com as pesquisas encontradas, não só análises quantitativas, destacando números de informações do artigo e dos resultados obtidos, senão análises qualitativas, notando as perspectivas do futuro em relação ao tema e as características e parâmetros dos processos. Uma linha da metodologia foi exposta na Figura 5. Os resultados das análises estão expostos no tópico a seguir.

Figura 5 – Fluxo metodológico da obtenção e análise dos dados



Fonte: Autoria própria (2024)

5. RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos a partir das pesquisas realizadas, além das análises e discussões a respeito das observações constatadas.

Na Tabela 2, tem-se um breve resumo dos dados encontrados por meio de cada periódico, com as palavras-chaves utilizadas, a quantidade de publicações postadas e o período de publicações disponíveis, dividido por cada meio de pesquisa.

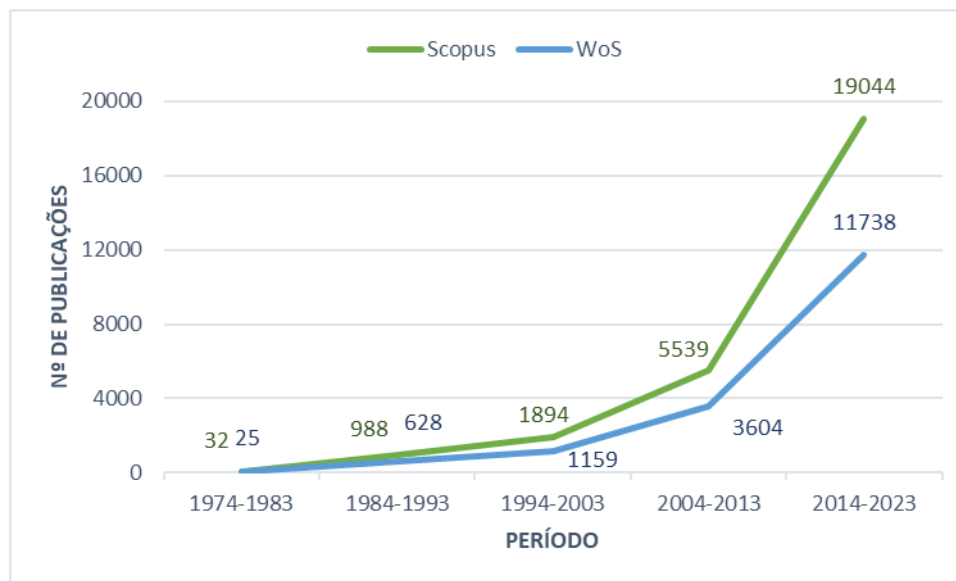
Tabela 2 – Quantidade de publicações a partir de cada palavra-chave nos periódicos Web Of Science e Scopus

WEB OF SCIENCE		SCOPUS	
“Anaerobic digestion”		“Anaerobic digestion”	
1950 - 2023	17035	1970 - 2023	27504
“Anaerobic digestion”; “Methane”		“Anaerobic digestion”; “Methane”	
1950 - 2023	7016	1970 - 2023	11800
“Anaerobic digestion”; “Solid waste”		“Anaerobic digestion”; “Solid waste”	
1971 - 2023	2597	1981 - 2023	4534
“Anaerobic digestion”; “UASB”		“Anaerobic digestion”; “UASB”	
1981 - 2023	345	1985 - 2023	654
“Anaerobic co-digestion”		“Anaerobic co-digestion”	
1981 - 2023	115	1995 - 2023	953

Fonte: Adaptado de Web Of Science (2023); Adaptado de Scopus (2023)

Com os dados iniciais, pode-se observar que a base de dados Scopus possui uma maior quantidade de títulos em relação ao tema de digestão anaeróbia, mesmo quando comparamos com as diversas palavras-chaves de pesquisa. No Gráfico 2 pode-se observar o número de publicações a cada 10 anos e, nota-se tanto a disparidade entre a quantidade de publicações entre as duas bases, quanto o número de publicações, que aumentou exponencialmente ao longo dos anos.

Gráfico 2 - Quantidade de publicações com o assunto “anaerobic digestion” a cada década nos periódicos Web Of Science e Scopus



Fonte: Adaptado de Web Of Science (2023); Scopus (2023)

Nas tabelas 3 e 4, tem-se as informações numéricas e de proporções das principais áreas das pesquisas e estudos, tanto de digestão anaeróbia quanto para co-digestão anaeróbia. Pode-se concluir o que se era esperado: apesar da divergência em números absolutos de publicações, as proporções dos temas com o número total são análogas.

Tabela 3 – Percentual de cada área de estudo na pesquisa de artigos com o assunto “anaerobic digestion”

Área de pesquisa	Quantidade de artigos	Percentual
Ciências Ambientais	19336	70%
Energia	9366	34%
Engenharia Química	7954	29%
Engenharia	5192	19%
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	3079	11%
Química	2802	10%
Agricultura e Ciências Biológicas	2627	10%
Imunologia e Microbiologia	2246	8%

Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Tabela 4 – Percentual de cada área de estudo na pesquisa de artigos com o assunto “anaerobic co-digestion”

Área de pesquisa	Quantidade de artigos	Percentual
Ciências Ambientais	692	73%
Energia	491	52%
Engenharia Química	319	33%
Engenharia	154	16%
Agricultura e Ciências Biológicas	66	7%
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	65	7%
Química	59	6%
Imunologia e Microbiologia	42	4%

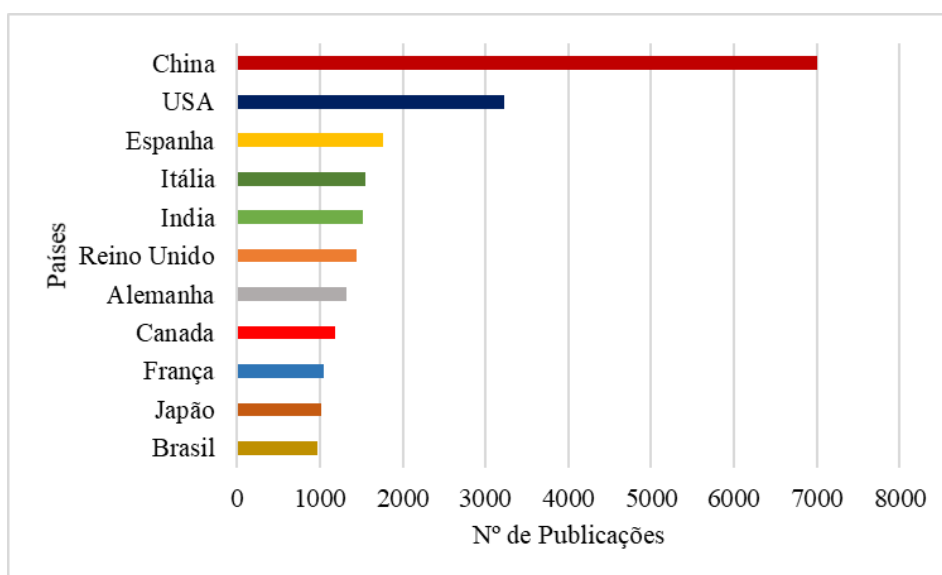
Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Nota-se a grande quantidade de pesquisas focadas na área ambiental e na área de energia. Essas informações fazem sentido, visto que o crescimento conforme os anos do campo de pesquisa desse processo veio a partir da necessidade de tratamento de resíduos e da substituição relacionada aos combustíveis renováveis. Além disso, é importante ressaltar as áreas de engenharia química e agricultura nas publicações, visto que grande parte dos substratos e co-substratos, como apresentados na Tabela 1, são originados dos tratamentos de esgoto, resíduos industriais e da agropecuária, como estrume.

5.1 Publicações por Países

Foram obtidos e analisados o número de publicações por países. A seguir, é exposto o gráfico com dados encontrados de estudos por países.

Gráfico 3 – Países com mais publicações acerca do tema de digestão anaeróbica

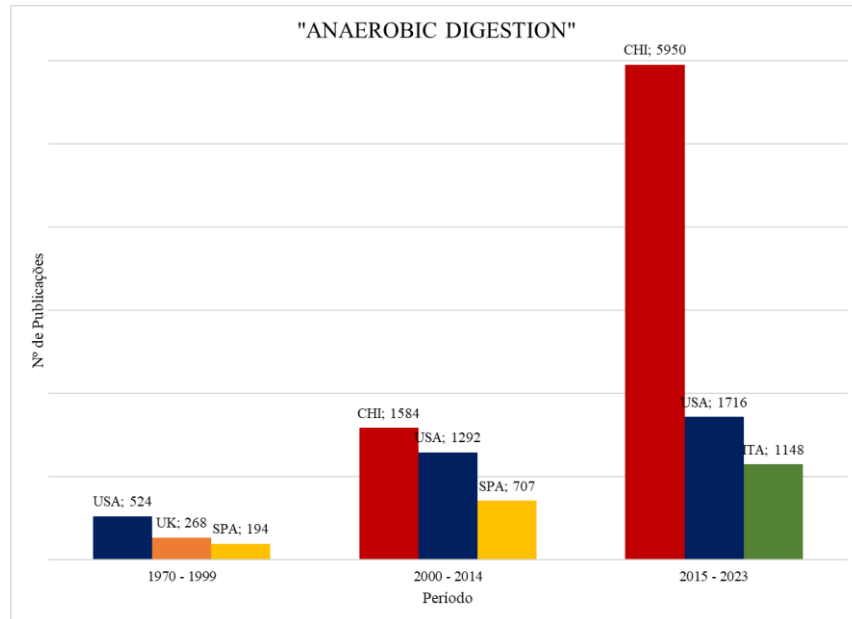


Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

O país com maior número de publicações é a China, com 6998, o que equivale a cerca de 25% de todos os estudos. Em seguida, tem-se Estados Unidos e Espanha. O Brasil está na 11ª posição, com 972 publicações, equivalente a 3,5% do total.

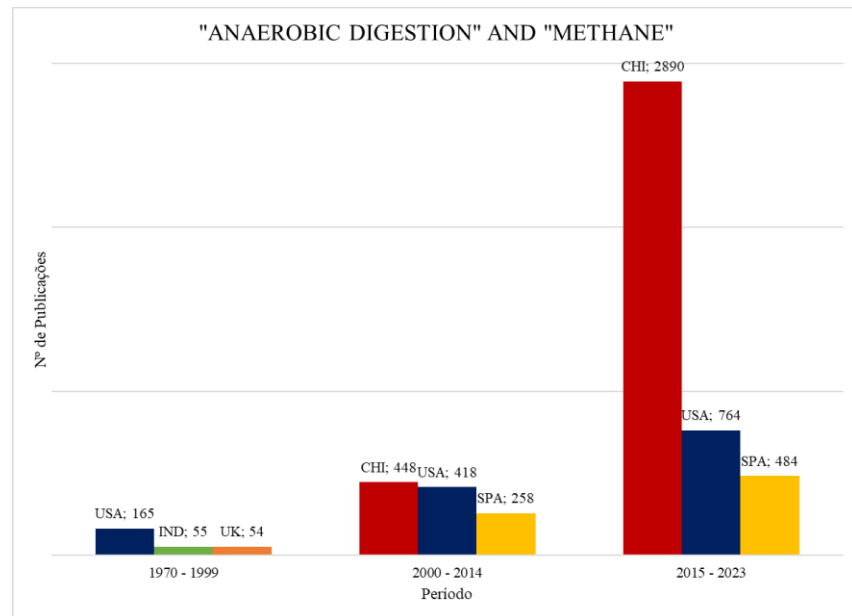
A partir disso, compilou-se os três principais países de cada pesquisa em cada período segregado para melhor avaliação. A base principal utilizada para a compilação desses dados, apresentados nos gráficos a seguir, foi a base Scopus.

Gráfico 4 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” do tema de digestão anaeróbica



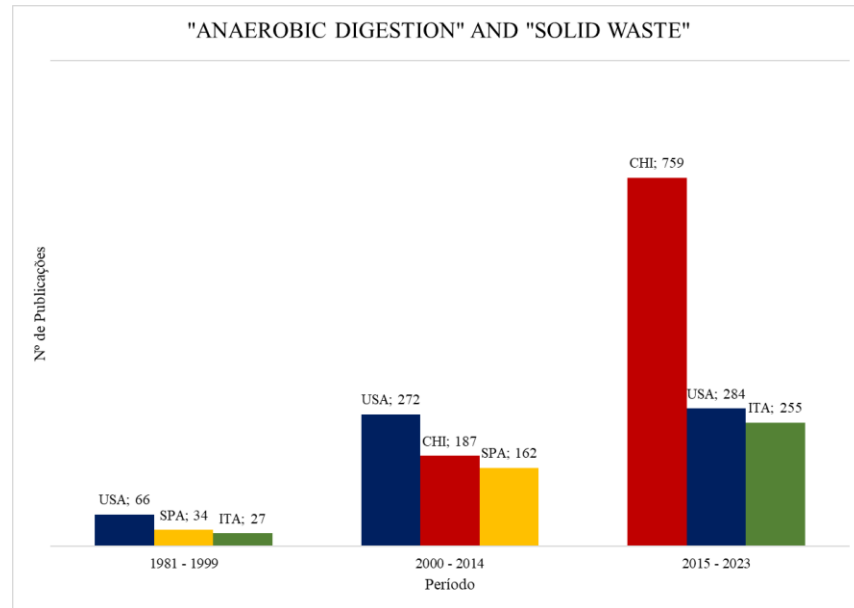
Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Gráfico 5 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” e “methane” do tema de digestão anaeróbica



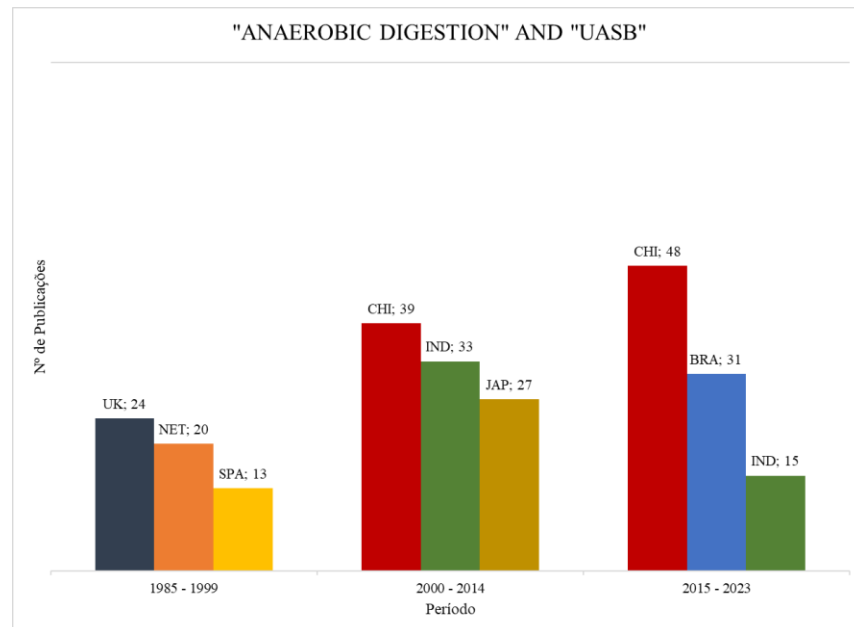
Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Gráfico 6 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” e “solid waste” do tema de digestão anaeróbica



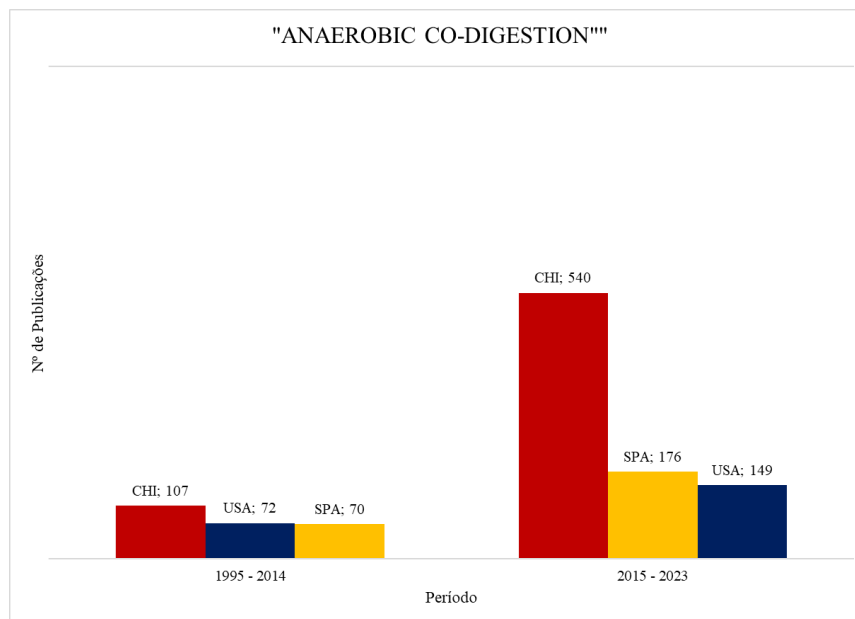
Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Gráfico 7 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic digestion” e “UASB” do tema de digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Gráfico 8 – Número de publicações, por período, dos principais países utilizando a palavra-chave “anaerobic co-digestion” do tema de digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

A partir da consolidação dos dados obtidos, é possível realizar algumas afirmações. A primeira, é de grande notoriedade o avanço da China no peso de número absoluto de publicações nos últimos anos.

Até meados dos anos 2000, era compreendido a liderança na relevância das pesquisas globais, na temática de modo geral, de países desenvolvidos como Estados Unidos, países do Reino Unido e países da União Europeia. Entretanto, esse cenário vem se modificando nos últimos anos.

Esse avanço é fruto de medidas políticas de incentivo a pesquisa no país. Desde a década de 90, a China vem realizando uma série de reformas de grande impacto na área de Ciência & Tecnologia, que tem tido consequências de melhorias, tanto na educação superior quanto nas atividades de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), especialmente por meio dos Planos Quinquenais do Governo Central (Tartaruga, 2017).

A ideia da China de investimento e incentivo a área da pesquisa teve seus princípios bem anteriores. De acordo com André Sollitto (2020), Deng Xiaoping (1904-1997) assumiu como líder máximo, em 1978, destacando em seu discurso histórico o pedido aos cientistas do país a busca por conhecimento de forma obsessiva. Desde então, principalmente a partir do 10º Plano Quinquenal, investimento na área de desenvolvimento foram realizados, e continuam sendo até os dias de hoje, chegando em 2021 a uma aplicação ao equivalente de 2 trilhões de

reais na área de P&D, valor correspondente a quase um quarto do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro.

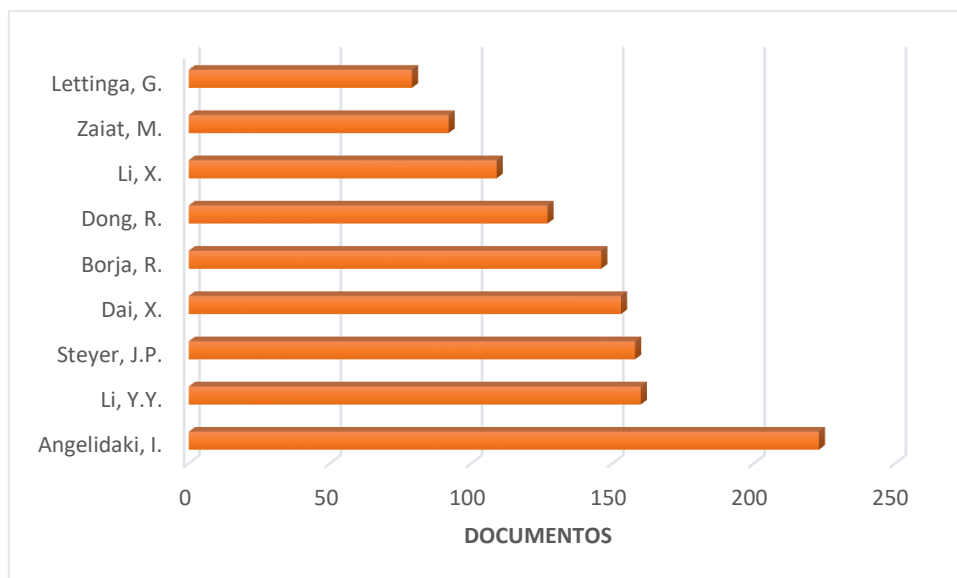
Além disso, outros países que, pelos gráficos com os dados consolidados, estão na busca do mesmo incentivo à pesquisa e vem crescendo aos poucos no cenário de relevância de pesquisas mundial. Ainda segundo Tartaruga (2017), as principais nações que vêm aparecendo no cenário mundial das inovações hoje fazem parte do grupo BRICS, no qual além do já destaque dado a China, temos países nessa crescente como Brasil e Índia.

Outro ponto que se pode observar quando destacamos artigos que tratam de Reatores Anaeróbio de Fluxo Ascendente, os UASB, temos um grande destaque em países tropicais, como Índia e Brasil e, mesmo não estando entre os primeiros países, temos o México com uma quantidade notável quando comparado com os outros tópicos. Esse destaque pode ser justificado diante das descobertas obtidas em testes de laboratório e em escala piloto, que ressaltaram os benefícios dessa tecnologia, especialmente em países de clima tropical, onde a temperatura se mostrou um fator de vantagem para o desempenho efetivo do reator UASB (Chernicharo *et al.*, 2018).

5.2 Publicações por Autores

A partir dos dados apresentados, pode-se destacar alguns autores de maior número de publicações e maior relevância quando se considera o tratamento de resíduos por meio da digestão e co-digestão anaeróbia.

Gráfico 9 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de digestão anaeróbia

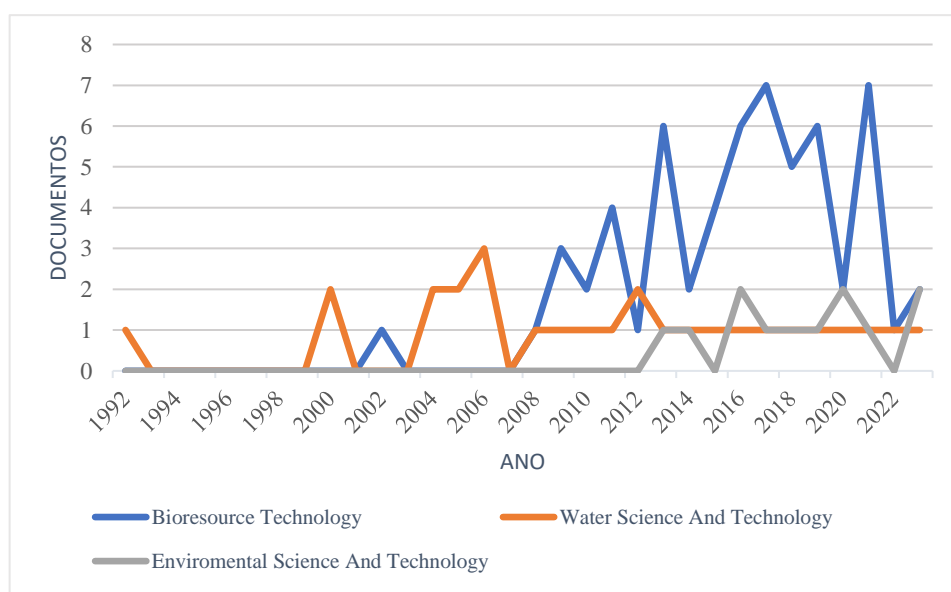


Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

O primeiro autor de grande destaque de números de publicações baseados nas bases de pesquisa utilizadas, é a pesquisadora dinamarquesa Irini Angelidaki. Atualmente, Irini é professora na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU) com uma vasta experiência e pesquisa em conversões de biomassa para bioprodutos, bioenergia e produção de biocombustíveis. (DTU, 2023).

No gráfico 10, nota-se o disparado crescimento de publicações da autora que são relacionados com pesquisa e inovações em temas de tecnologia de recursos biológicos, além de inúmeros outros campos que a pesquisadora já atuou.

Gráfico 10 – Número de publicações por área de Irini Angelidaki

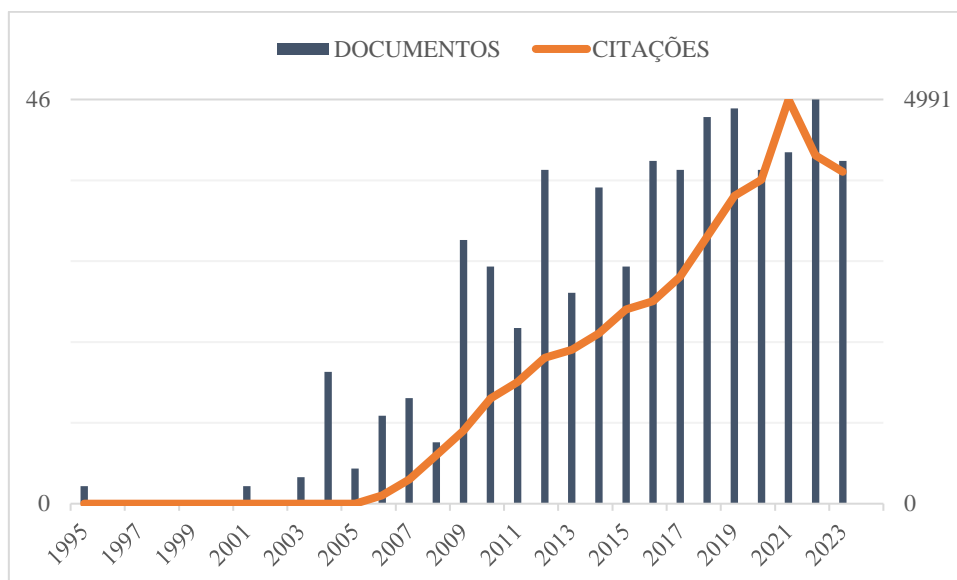


Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

De acordo com perfil no website da Universidade Técnica da Dinamarca, Irini tem mais de 600 artigos publicados, como autora ou co-autora, sendo cerca de 220 relacionados com o tema de digestão anaeróbia a partir da base Scopus, e 40 em processo de desenvolvimento. De acordo com ela, bactérias e leveduras, no futuro, serão fábricas que produzirão não só combustíveis, mas também produtos químicos, plásticos e até proteínas. Alinhado com esse discurso, nos últimos anos, a autora tem participado de várias iniciativas e pesquisas com essa visão. Um dos exemplos desse tipo de perspectiva e estudo é na parceria da DTU Environment e da Nordzucker, uma empresa de açúcar do norte da Europa, que viabiliza o uso de resíduos de vegetais de beterraba sacarina para a produção de etanol. Os pesquisadores especialistas examinaram os procedimentos e comprovaram a viabilidade da utilização pela empresa das mesmas matérias-primas para a produção do ácido succínico, que hoje tem maior valor de mercado que o próprio etanol. Este composto é empregado como agente amaciante na fabricação de tintas, polímeros e cosméticos, os quais atualmente são predominantemente derivados do petróleo bruto (Gottems, 2020).

No gráfico 11 estão expostos os números de documentos e citações da autora. Em 2021, destaca-se pela autora apresentar cerca de 46 documentos e 4830 citações. Ademais, segundo o Scopus, a índice-h da autora, atualmente, é de 101.

Gráfico 11 – Número de documentos e citações de Irini Angelidaki



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

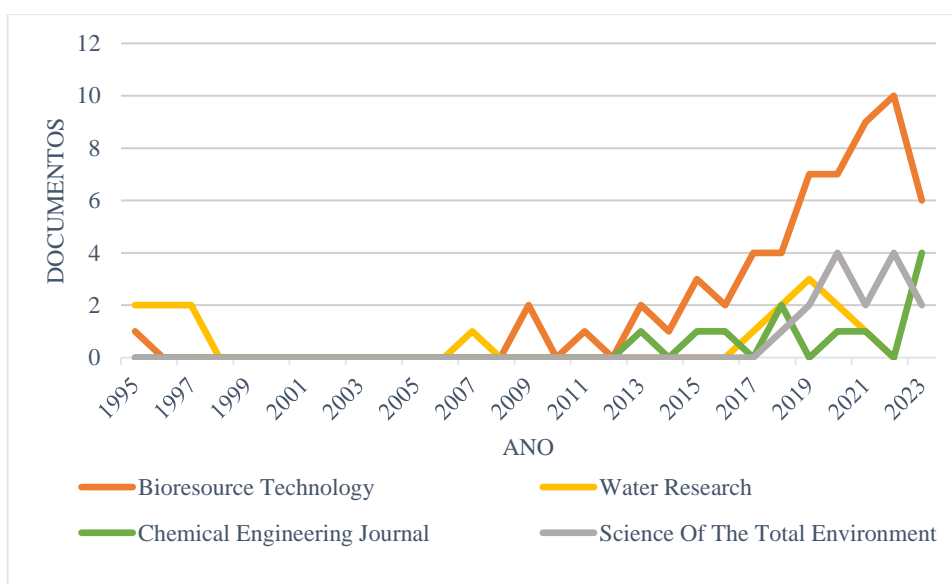
Outros recentes estudos que tiveram participação da pesquisadora envolvem, por exemplo, estudos de simulação para avaliar a eficiência de processos de co-digestão anaeróbia

em processos de batelada e contínuos, como por exemplo *Laminaria digitata*, um iodo de origem marítima com esterco bovino (Sun, *et al.*, 2019); além estudos com resíduos da fabricação de antibiótico para geração de gases combustíveis, com foco resolução dos prejuízos que o próprio antibiótico residual causa nas atividades microbianas (Zhang, *et al.*, 2023).

Além de Irini, outro nome que tem destaque quando falamos de número de publicações e citações de artigos envolvendo o tema de digestão anaeróbia é Yu-You Li. Hodiernamente, Li pesquisador e professor na Universidade de Tohoku, em Sendai, Japão. Em seus últimos estudos com maior conhecimento, o cientista tem exposto visões tanto de alternativas de pré-tratamento para desintegrar o lodo de esgoto antes da digestão anaeróbia para otimizar a produção do biogás, sejam tratamentos mecânicos, térmicos, químicos ou biológicos (Zhen *et al.*, 2017); como também estudos para avaliação dos parâmetros, como temperatura e pH, na digestão de resíduos sólidos alimentares em processos de dois estágios (Chu *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010).

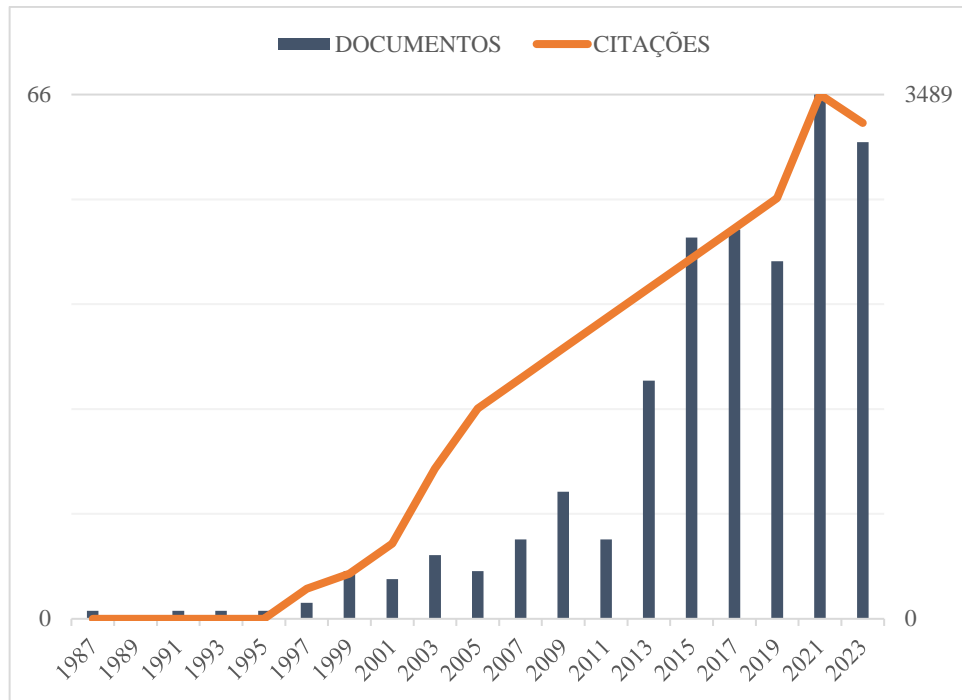
No gráfico 12, estão os temas das pesquisas mais relevantes de Li. Pode-se dar destaque, do mesmo modo que de Irina, para temas de tecnologia de recursos biológicos, pela quantidade excedente de publicações em relação aos demais temas. Quanto a números de publicações e citações gerais do autor, temos as seguintes informações apresentadas no Gráfico 13, com um valor, em 2022 de 66 publicações e 3489 citações, com um índice-h de 69.

Gráfico 12 – Número de publicações por área de Yu-You Li



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

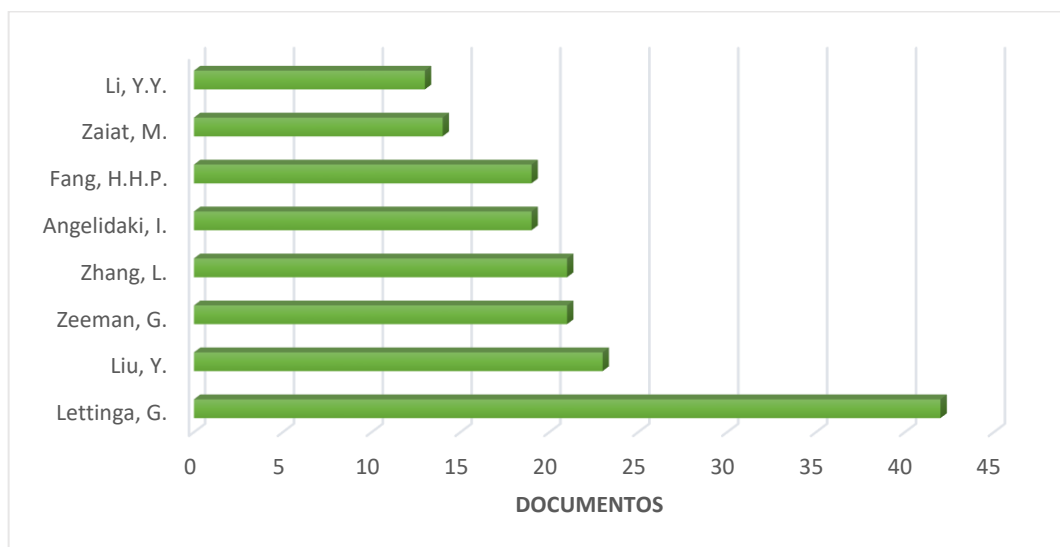
Gráfico 13 – Número de documentos e citações de Yu-You Li



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Ademais, quando analisamos artigos que envolvem reatores UASB, o nome de destaque, de acordo com o Gráfico X, é Gatzte Lettinga. Lettinga é pesquisador na Universidade de Wageningen, na Holanda, e seu destaque é justificável por ser o pioneiro quando se discute reator anaeróbico de fluxo ascendente.

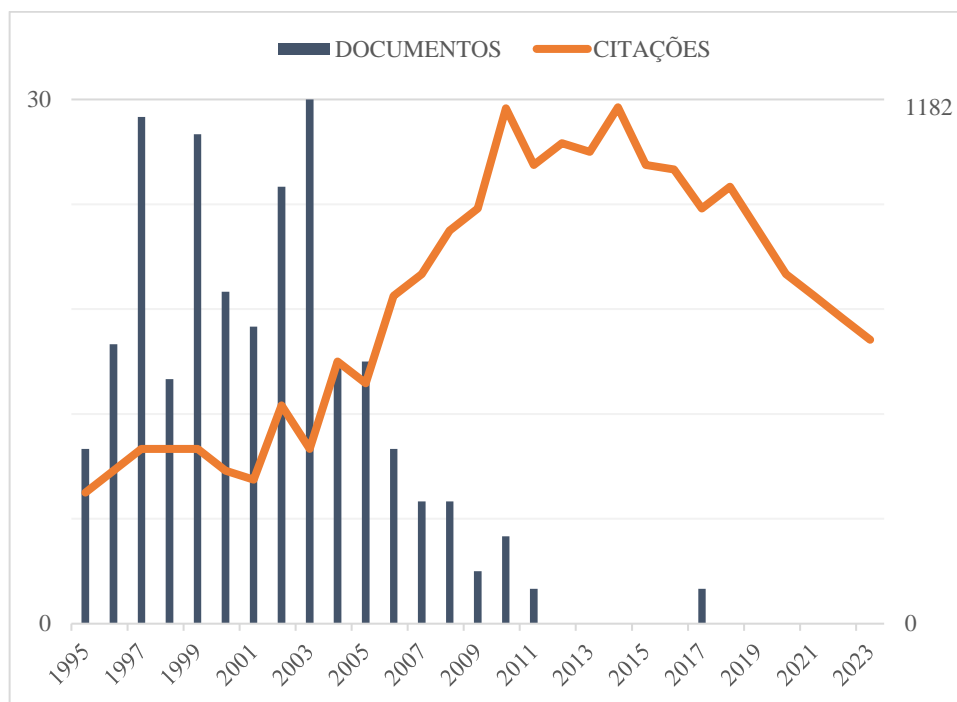
Gráfico 14 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de digestão anaeróbia e reatores UASB



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

De acordo com a base Scopus, nos últimos anos, Lettinga teve publicações de artigos, somente capítulos de livros. Porém, observando as citações de estudos do autor, temos um constante número, de cerca de 1000 citações por ano, com um índice-h de 86.

Gráfico 15 – Número de documentos e citações de Gatze Lettinga

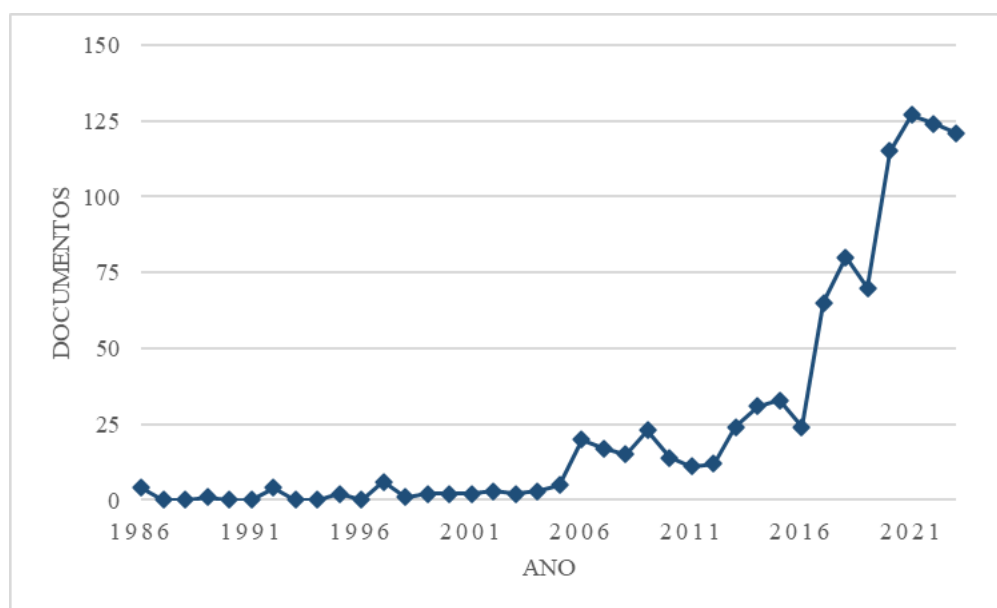


Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

5.3 O tema no Brasil

No Brasil, pode-se afirmar que o tema digestão anaeróbia tem ganhado campo e visibilidade nos últimos anos. Com base no gráfico 16, observa-se um exponencial crescimento a partir de 2013.

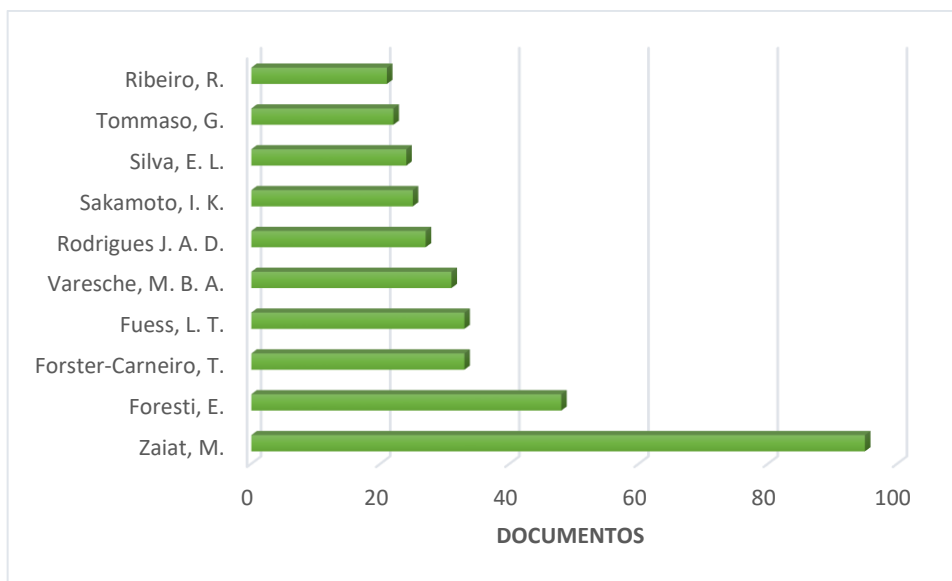
Gráfico 16 – Número de publicações com o tema “anaerobic digestion” no Brasil



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

No Gráfico 17, tem-se os dados em relação aos maiores nomes responsáveis pelas pesquisas no país. Hoje, o maior contribuinte nos estudos em relação a esse processo é Marcelo Zaiat. Marcelo, atualmente, é professor titular junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). As pesquisas que o autor desenvolve são da área de tratamento biológico de águas residuárias, atuando principalmente no desenvolvimento de biorreatores anaeróbios e aplicação do conceito de biorrefinaria a estações de tratamento biológico de águas residuárias. (FAPESP, 2023).

Gráfico 17 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de digestão anaeróbia

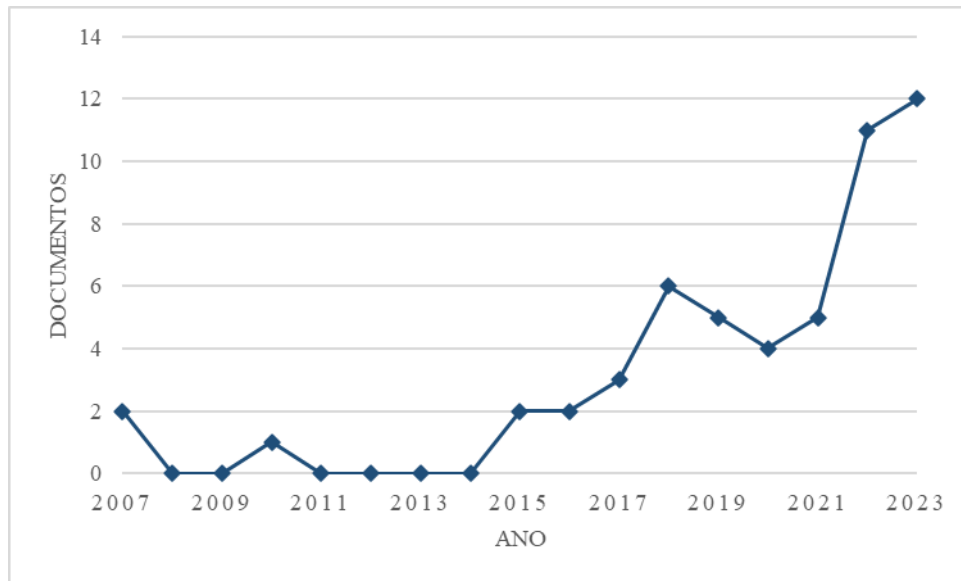


Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Além disso, estudos de processos com reator UASB também são muito presentes nas pesquisas de Marcelo. Considerando alguns estudos relevantes e recentes do autor, temos um estudo da digestão anaeróbia de vinhaça de cana-de-açúcar em dois estágios, utilizando um reator anaeróbio de fluxo ascendente e um reator anaeróbio de leito estruturado (ASTBR) (Fuess *et al.*, 2017) e digestão anaeróbia termofílica de vinhaça de cana-de-açúcar crua em um reator UASB (Júnior *et al.*, 2016).

Outrossim, analisando os estudos que envolvem a co-digestão anaeróbia no Brasil, ou seja, a junção de dois substratos que podem aumentar a eficiência do processo, pode-se afirmar que é uma área de pesquisa ainda mais nova no país.

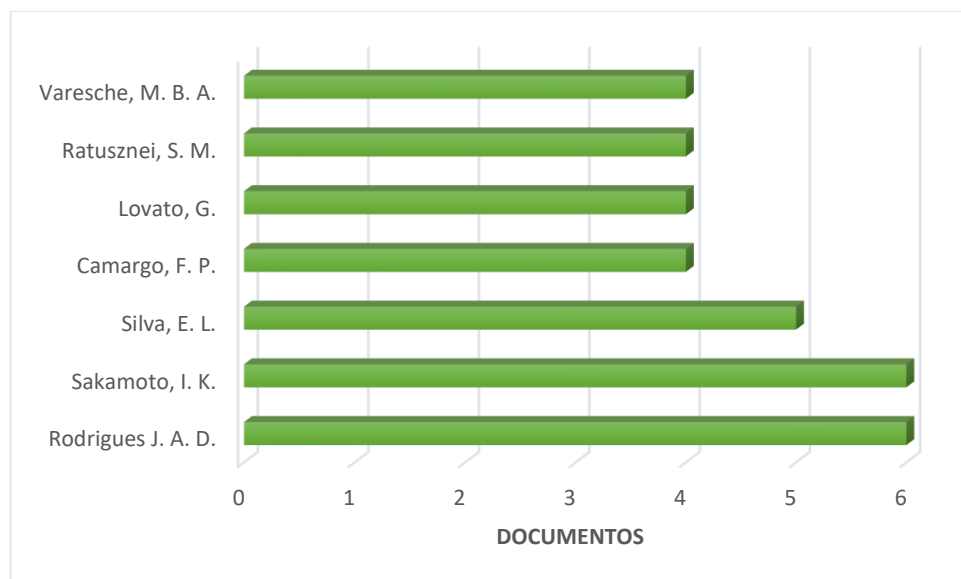
Gráfico 18 – Número de publicações com o tema “anaerobic co-digestion” no Brasil



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Em relação aos autores brasileiros no campo de estudo da co-digestão, de acordo com a base Scopus, não se tem no país um nome com um número ressaído de publicações atualmente, com possível justificativa do tema ser mais recente no país. Temos diversos nomes, como mostrado no gráfico a seguir, que contribuem para o campo.

Gráfico 19 – Listagem de autores com maiores números de publicações acerca do assunto de co-digestão anaeróbia no Brasil



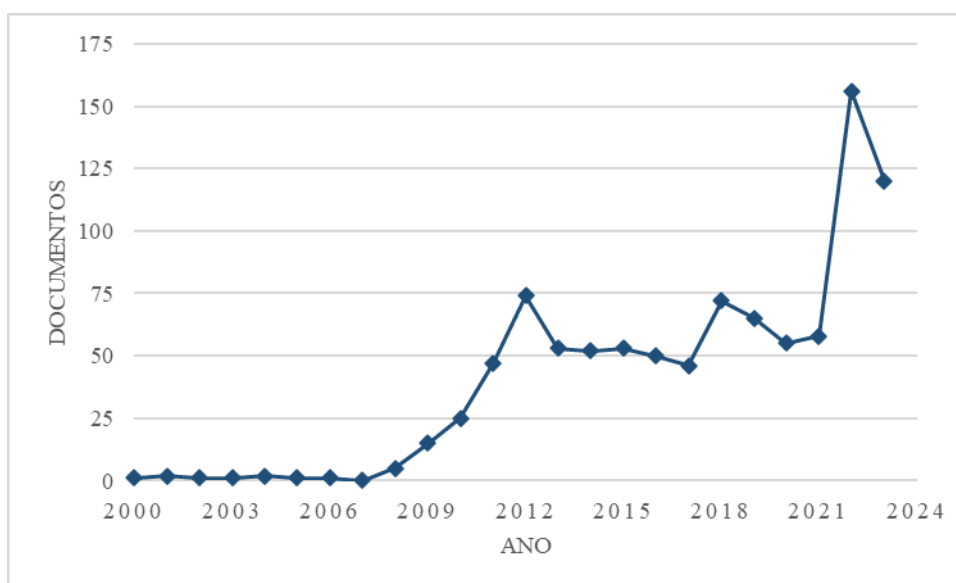
Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

5.4 Análise e perspectivas futuras para o tema

A partir dos dados bibliográficos colhidos, foi possível observar e destacar alguns temas os quais tiveram um alto crescimento nos últimos anos, e podem continuar se expandindo ainda mais nos próximos anos com o intuito de otimizar os processos e aumentar as eficiências. E a partir da análise dos temas em alta, foi realizado uma análise mais específica, a partir de alguns estudos encontrados e dos resultados obtidos. O primeiro deles é a própria co-digestão anaeróbica.

Além dos dados já apresentados no presente trabalho, a seguir é exposto o gráfico de números de publicações com a palavra-chave “anaerobic co-digestion” ao longo dos últimos anos.

Gráfico 20 – Número de publicações com o tema “anaerobic co-digestion”



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Observa-se que esse campo de pesquisa, que avalia o desempenho de processos que utilizam mais de um substrato para a digestão, tem crescido nos últimos anos e tem trazido inúmeras otimizações das eficiências dos processos. De acordo com Jingura e Matengaifa (2009), essa combinação de diferentes tipos de resíduos no tratamento, pode trazer melhorias no desempenho do processo, resultando em um significativo aumento na produção de biogás e na qualidade do biofertilizante que é gerado. Ademais, também é viável realizar combinações para ampliar a quantidade de matéria orgânica altamente biodegradável e integrar biomassa mais adequada à estabilização biológica dos resíduos (Lopes; Leite; Prasad 2004).

Nesse contexto, foram selecionados alguns estudos para observação e análise dos resultados obtidos com a mistura dos mais diversos resíduos.

Foram encontrados inúmeros dados de estudos que analisam a co-digestão com misturas de resíduos sólidos. Uma pesquisa analisou a co-digestão anaeróbia em um reator UASB de estágio único com a mistura de resíduos alimentes e lodo de esgoto. Comprovou-se uma eficiência de remoção de DQO em torno de 72% e, variando o TDH observou-se um maior teor de metano, de 76,8%, no biogás em tempo de retenção maior (Ratanatamskul; Onnum; Yamamoto, 2014). Foi proposto também a mistura de lixiviados maduros refratários, um resíduo líquido de aterros, com águas residuárias, obtendo-se um resultado da eficiência de remoção de DQO de 67% se comparado sem a inserção das águas (Kawai *et al.*, 2012).

Kumari *et al.* (2018) realizaram também um estudo da avaliação da co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos, realizando algumas combinações de misturas em escala laboratorial em processos mesofílicos na proporção de 1:2. Na primeira mistura, foi introduzido no sistema com um reator UASB resíduos de cozinha com lodo de esgoto. Com essa combinação, obteve-se uma eficiência de remoção de DQO de 76,85%. No segundo experimento, foi combinado resíduos de jardim com lodo de esgoto novamente, resultando em uma eficiência de remoção de DQO de 86,52%. Para a terceira combinação, foi misturado resíduos florais com esterco de vaca, observando-se uma eficiência de 80,27%. E por fim, a mistura de água residual da indústria de laticínios e esterco de vaca resultou na eficiência de remoção de DQO de 86,56%.

Lima *et al.* (2023), propuseram o estudo da eficiência da mistura de vinhaça, um resíduo líquido gerado no processo de produção de etanol a partir da cana de açúcar e lodo de ETA, resíduo gerado no processo de tratamento de água. O estudo foi realizado em um processo de dois-estágios, ou seja, com dois reatores e concluiu-se que com dois reatores UASB em série, realizando uma recirculação dos efluentes, houve uma melhora no desempenho e a estabilidade do processo tanto em condições mesófilas, quanto termofílicas. Obteve-se um rendimento de 20 a 22 L de biogás por litro de vinhaça, com uma concentração de metano de 65%.

Tem sido comumente estudado também a co-digestão anaeróbia se misturando o lodo de águas residuais, ou seja, esgoto com biomassa de microalgas. Wang *et al.* (2013) observaram que a co-digestão de lodo de esgoto e *Chlorella sp.* produziu até 79% mais biogás do que quando comparado a um digestor UASB idêntico em processo mesofílico alimentado apenas com a biomassa, comprovando não só o aumento significativo da produção de metano, como também a redução de sólidos e a taxa de desidratação do lodo digerido. Um outro estudo para avaliar o tratamento de águas residuais em pequenas comunidades, conduzido por Gonçalves *et al.*

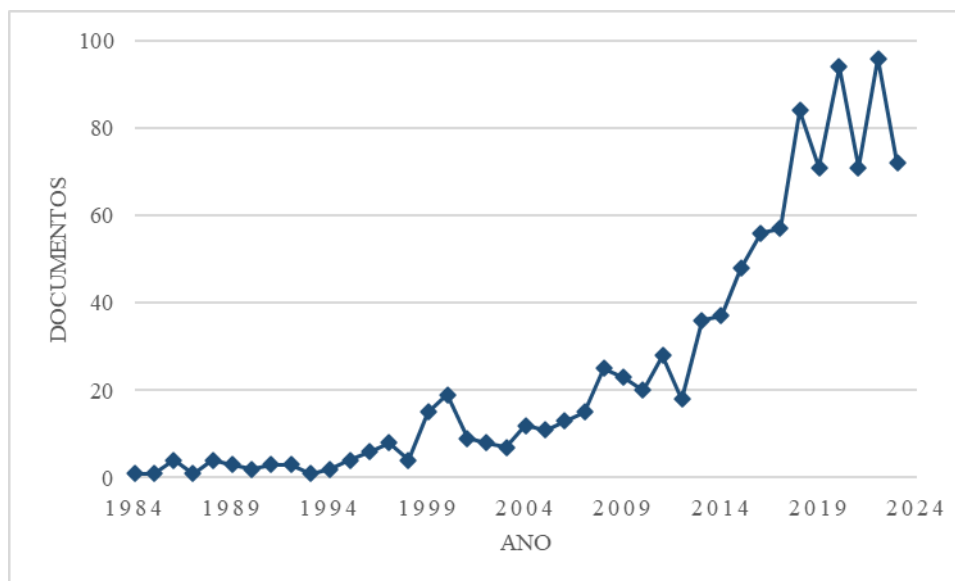
(2020), foi misturado em um reator de manta de lodo de fluxo ascendente uma mistura de águas residuais municipais com microalgas provenientes de lagoas de alta taxa (HRAP) e obtiveram uma remoção de matéria orgânica de 63%. Com base nos resultados do estudo, os autores concluíram que, nesse caso, houvesse a necessidade de um pré-tratamento auxiliar da biomassa de microalgas para otimizar ainda mais a produção de biogás. Por fim, em um estudo diferente, foi relatado que o co-digestão de águas residuais municipais e biomassa de microalgas em um reator UASB produziu até 25% mais metano do que o mesmo reator alimentado apenas com águas residuais municipais, quando é comparado o valor de 55% a 70% de remoção da DQO para a digestão de somente das águas residuais com 65% a 80% para o reator UASB seguido por sistema de lagoas de polimento (Vassalle *et al.*, 2020).

Montes *et al.* (2019), também realizaram um estudo combinando resíduos líquidos provenientes da produção de gin destilado e águas residuárias da cultura de suínos. Um reator anaeróbico de fluxo ascendente, em processo mesofílico, foi alimentado com os substratos e obteve um resultado de eficiência da remoção de DQO de, aproximadamente, 97%. Foi realizado o teste aumentando a carga orgânica do no reator de 28,5 kg DQO/m³.d para 32,0 kg DQO/m³.d, o processo se tornou instável, sofrendo acidificação excessiva, abaixando o pH e inibindo a metanogênese.

Afinal, mais um trabalho investigou a co-digestão anaeróbia de uma mistura de resíduos alimentares e águas residuais domésticas, por meio de um reator anaeróbico de manta de lodo de fluxo ascendente (UASB) para produção de biogás. O reator, operado sob condições de temperatura mesófila, teve uma eficiência de remoção da demanda química de oxigênio de 80% e 56% de teor de metano no gás final. Nesse caso, quando operado por mais de 10 dias a remoção de DQO começou a diminuir e atingiu 61% após 10 dias, com teor de metano em torno de 37%. A justificativa dessa deterioração se dá ao acúmulo de ácidos graxos de cadeia longa no lodo, de acordo com os autores (Chan; Toledo; Shim 2018).

Outro tema que tem ganhado espaço nas últimas pesquisas são os processos de digestão ou co-digestão anaeróbia em dois estágios. No gráfico a seguir, é possível acompanhar o crescimento de trabalhos que utilizam esse processo em dois estágios, como forma de otimizar o processo. Foram utilizadas as palavras-chaves “anaerobic digestion” e “two-stages” na pesquisa, obtendo um total de 969 artigos.

Gráfico 21 – Número de publicações com o tema “anaerobic digestion” e “two-stages” no Brasil



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

É notável o crescimento do assunto, principalmente após o ano de 2012. Além disso, quando analisamos os países que mais contribuíram até os dias de hoje com estudos em biorreatores em processos de dois estágios, temos o Brasil ocupando a 3ª posição, com cerca de 65 artigos, equivalente a 7% de todos os resultados. Em 1ª colocação está a China com 199 artigos, e por conseguinte, os Estados Unidos, com 103 publicações.

Nos processos de digestão anaeróbia em duas etapas, as duas primeiras etapas do processo, a hidrólise e acidogênese, ocorrem no primeiro reator, denominado reator acidogênico. As demais etapas, acetogênese e metanogênese, ocorrem no segundo reator, denominado reator metanogênico. Assim, quando se tem dois estágios, é possível ter mais estabilidade do processo, a partir do controle das condições ideais do ambiente para os microrganismos, aumentando a eficácia e assim, aumentando a produção do biogás. (Yuan *et al.*, 2023; Shi *et al.*, 2020).

No estudo realizado em laboratório por Adarme *et al.* (2022), foi proposta duas configurações para a co-digestão dos subprodutos de biorrefinaria de cana-de-açúcar, sendo eles vinhaça, hidrolisado de hemicelulose, extrato de levedura e cinzas de bagaço de cana de açúcar. Para o primeiro sistema, foi estudado a co-digestão em um único reator por lodos ativados (SBR), obtendo-se um resultado inferior ao do sistema conseguinte. Já no sistema de dois-estágios, utilizando um reator SBR e por conseguinte, um reator UASB, foi alcançada uma eficiência de remoção de DQO superior a 80%. Além da notável diferença de eficiência dos

dois processos, é explorando mais a fundo o estudo, pode-se avaliar alguns parâmetros que sofrem alteração, de causa direta para esse aumento de biogás gerado, como a atuação de cada fase do processo e a interação da comunidade microbiana em cada sistema.

Outra pesquisa de análise de co-digestão anaeróbia em estágios nos mostrou a alta eficiência na mistura de restos alimentares com água residual de cozinha. Foi comprovado que num sistema de um reator de hidrólise de tanque agitado, seguido por um sistema de biorreator de membrana anaeróbica, o que se compreende como um UASB e uma membrana de ultrafiltração de fluxo lateral (UFMH), pode ser alcançado uma remoção de DQO de 94% com proporção média de CH_4 de até 73%, dependente dos parâmetros e variáveis utilizadas no processo (Le *et al.*, 2022).

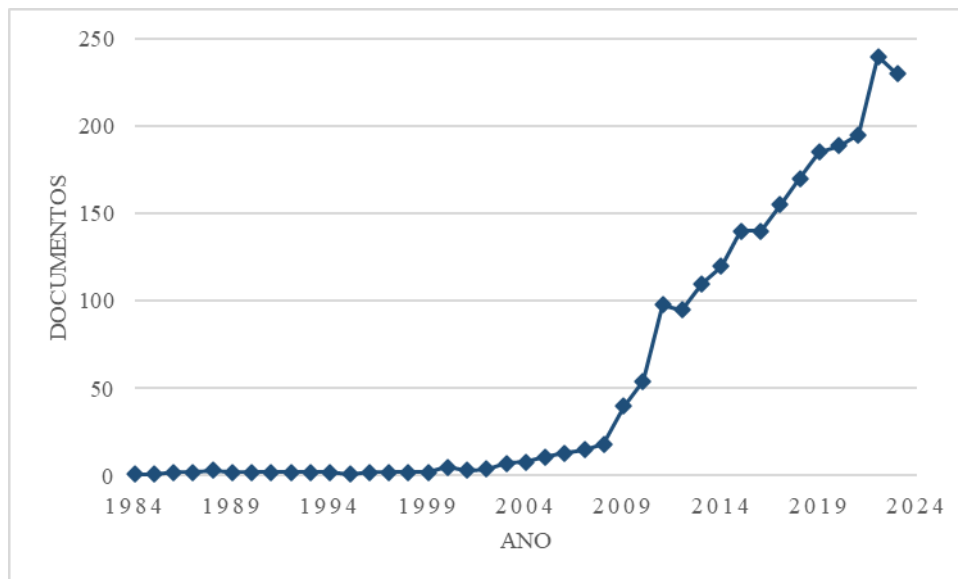
Chu *et al.* (2008) estudaram também o processo de co-digestão a partir de resíduos alimentares com uma pequena fração orgânica de sólidos urbanos, em um sistema de dois estágios com pH combinado, com produção de hidrogênio termofílico e produção de metano mesofílico, com uma recirculação do lodo digerido. No final do experimento, foi obtido na etapa da produção de metano uma eficiência de 464 mL de CH_4 /g de sólido volátil, com presença de 70-80% de metano no gás final.

Seguindo a linha de resíduos alimentares, pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul avaliaram o desempenho da co-digestão de restos de alimentos com borra de café, tanto proveniente de uso doméstico quanto industrial, de uma produtora de café solúvel. Foram realizados experimentos com proporções de 25%, 50%, 75% e 100%. Destacando os melhores desempenhos na produção de biogás, tem-se as proporções de 25% na mistura com as borras domésticas ou industriais e de 75% com borras domésticas, obtendo um resultado nesses contextos de em média 330 mL de CH_4 /g de sólidos voláteis totais, com presença de aproximadamente 55% de metano no biogás. O experimento com mistura de 75% com borras industriais não ficou na linha do esperado devido à liberação de compostos inibidores com o aumento de borra de café.

Com isso, tem-se estudos registrados do tema, desde quando foi proposto pela primeira vez, de aproximadamente 50 anos atrás. Entretanto, grande parte dos estudos realizados foram conduzidos somente em escala laboratorial. Dessa maneira, para melhorar seu desempenho para operação e aplicação em escala industrial, ainda é necessário estudos do processo em dois estágios.

Outra perspectiva para o campo nos próximos anos é o estudo de pré-tratamentos do processo de digestão anaeróbia.

Gráfico 22 – Número de publicações com o tema “anaerobic digestion” e ‘pre-treatment” no Brasil



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

O principal objetivo dos pré-tratamentos é desestruturar a matriz das substâncias poliméricas extracelulares e a parede celular, tornando os nutrientes mais disponíveis para os micróbios, acelerando assim a conversão de sólidos orgânicos e a produtividade do biogás e, então, do metano. Um dos substratos mais investigados em relação aos pré-tratamentos é o lodo de esgoto, pois a estrutura microscópica complexa e os componentes tornam o lodo de esgoto especialmente difícil de hidrolisar.

Após a análise de estudos, pode-se classificar os pré-tratamentos em alguns tipos principais. O primeiro é o tratamento mecânico, que envolvem conceitos ultrassônicos e de irradiação. O pré-tratamento ultrassônico consiste na desintegração do lodo, no qual as ondas s causam compressão e rarefação periódicas ao se propagarem pelo meio (Harris; McCabe, 2015). Os resultados com esse método vão de uma otimização de 27% na produção de biogás até 90%, dependendo do tipo de substrato (Zhen *et al.*, 2017). Já no método de irradiação por micro-ondas, ocorre a rotação de dipolos sob campos eletromagnéticos oscilantes o que gera um efeito térmico que aquece o líquido intracelular até o ponto de ebulição e leva a ruptura das células (Tang *et al.*, 2010). De acordo com Appels *et al.* (2013), foi realizado um estudo sobre o impacto do pré-tratamento por micro-ondas na solubilização do lodo e na digestão anaeróbica semi-contínua em escala piloto, no qual se obteve o resultado que esse pré-tratamento resultou em uma solubilização eficaz da matéria orgânica presente no lodo, além de um aumento significativo de 50% na produção de biogás.

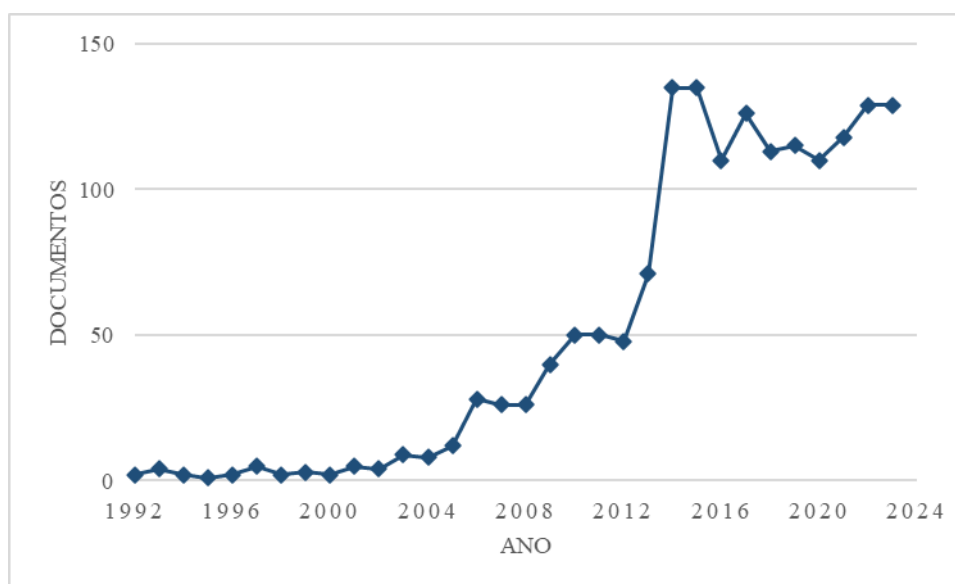
Mais um método são os pré-tratamentos químicos. O pré-tratamento químico utiliza agentes químicos potentes para alterar a estrutura da parede celular e da membrana, promovendo assim a disponibilidade da matéria orgânica do lodo para a ação de enzimas. Os principais reagentes mencionados na literatura incluem ácidos e bases. A hidrólise ácida emprega ácidos como HCl e H₂SO₄, enquanto o tratamento alcalino é realizado com bases como KOH, Ca(OH)₂ e amônia. Esses tratamentos possuem algumas vantagens como a facilidade de operação, baixo custo e alta eficiência na conversão do metano, além de evitar a necessidade de alta temperatura. Algumas desvantagens são a possibilidade de formação de subprodutos tóxicos, como furfural e hidroximetilfurfural (HMF), fortes inibidores da fermentação microbiana e além da grande corrosividade devido aos níveis extremos de pH, necessitando de materiais específicos para os equipamentos (Zhen *et al.*, 2017). Um dos estudos mostrou que o pré-tratamento alcalino, utilizando NaOH de lodo de celulose e papel resultou em um aumento de 83% na produção de metano (Lin *et al.*, 2009).

Outro método de pré-tratamento, já utilizado e mais estabelecido são as hidrólises térmicas. Nessa alternativa, o desempenho do processo é dependente tanto da temperatura do tratamento, quanto do tempo do processo (Pilli *et al.*, 2015). Devido às vantagens inerentes desse método, que incluem a eliminação de patógenos, redução do volume do lodo, remoção de odores e o aumento de cerca de 50% na produção de metano, vários tipos de processos em grande escala já são comercializados em todo o mundo, como CambiTHP™ e Biothelys®. Os principais parâmetros operacionais são 150-165 °C, 20-30 min, 8-9 bar para Cambi e 165 °C, 30 min, 9 bar para Biothelys (FCIWEM, 2012).

Entretanto, as pesquisas deixam claro a necessidade de mais estudos para confirmar o potencial dos métodos mais tecnológicos e emergentes e a importância de informações suplementares, para avaliar de forma confiável essas tecnologias. A consideração econômica e ambiental é destacada como um aspecto significativo na seleção de uma tecnologia de pré-tratamento, dado que, embora possam melhorar a redução de lodo e a recuperação de metano, também podem levar a um aumento no consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, outro viés que tem ganhado espaço nos estudos dos últimos anos são os métodos de purificação do biogás, para aumentar a eficácia e utilização desse produto da digestão anaeróbica. No gráfico a seguir, o qual contém uma relação de número de publicações de artigos a partir das palavras chaves “biogas” e “purification”, é notório o crescimento de pesquisas que envolvem a busca pelas tecnologias de purificar cada vez mais o biogás.

Gráfico 23 – Número de publicações com o tema “anaerobic digestion”, “biogás” e “purification” no Brasil



Fonte: Adaptado de Scopus (2023)

Na análise de estudos que envolvem a purificação de biogás para a utilização, foram encontrados alguns métodos mais aplicados, baseados em fenômenos físicos-químicos, e que utilizam processos como absorção, adsorção ou membranas.

O método mais utilizado ainda hoje é o de absorção física utilizando um sistema de lavagem de água. O processo é baseado na retirada das impurezas devido a diferença de solubilidade entre as impurezas e o metano, sendo esta cerca de 26 vezes menor. Nesse sistema, o biogás é inicialmente pressurizado e depois passa por uma coluna de absorção na qual ocorre o fenômeno. Uma grande desvantagem desse método é a grande quantidade de água necessária. (Bauer *et al.*, 2013). Ao fim do processo, após uma secagem, pode-se obter um biogás com até 99% de pureza (Sun *et al.*, 2015).

Outros métodos físico-químicos são comumente utilizados, como a absorção física com solventes orgânicos, que tem basicamente o mesmo princípio que o método de lavagem de água, e pode chegar a uma pureza de 98%; tem-se também a adsorção por oscilação de pressão, que é baseada na separação das impurezas utilizando a afinidade molecular com o adsorvente e, ao final do processo, pode-se obter um biogás com 98% de pureza, porém pode ser ocasionado uma faixa de perda de metano no processo (Augelletti; Conti; Annesini, 2017); outro viés é a separação por membrana, que leva em conta a seletiva permeabilidade das membranas a partir das propriedades dos compostos, com uma eficiência de pureza do metano ao final do processo de 95% (Bauer *et al.*, 2013).

Contudo, um viés que tem sido cada vez mais desbravado nesse segmento de pesquisas são os métodos que utilizam tecnologias biológicas. Esses métodos se baseiam em fenômenos quimiautotróficos ou fotossintéticos, e sua grande vantagem é a conversão do CO₂ em produtos que contêm energia ou alto valor agregado com valores de pressão e temperatura em níveis moderados, o que reforça o tema acerca de sustentabilidade e economia circular. Porém, os estudos que envolvem essas tecnologias ainda estão em fase inicial de desenvolvimento e enfrentam ainda grandes desafios para sua aplicação prática (Angelidaki *et al.*, 2018).

6. CONCLUSÃO

Com a coleção de dados obtidas, tanto com a análise quantitativa dos estudos quanto com a análise mais aprofundada dos conteúdos, é afirmativo concluir que o tema acerca da gestão de resíduos e produção de biogás a partir da digestão anaeróbia é de extrema importância para as tecnologias atuais, visto seu impacto em relação não só à sustentabilidade, senão em relação à economia e reaproveitamento de rejeitos. É possível ressaltar também os principais temas de pesquisa interligados com o assunto e os autores com maior impacto no desenvolvimento do tema nas últimas décadas.

Também se conclui como o tema tem expectativas de, ao longo dos anos, estar cada vez mais presente nas teses por todo o mundo, na intenção de desenvolvimento de novos meios e tecnologias que otimizem os processos, aumentem a conversão ao produto e ampliem a gama de resíduos utilizados nesses sistemas, seja avaliando desde os pré-tratamentos dos substratos, às misturas de componentes e melhorias no processo, até ao pós-tratamento na purificação do biogás.

7. SUGESTÕES PARA A CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

No contexto do presente estudo, algumas sugestões de trabalhos futuros com continuidade do proposto por este podem ser:

- Realização de uma nova análise acerca da gestão de resíduos e produção de biogás por meio da digestão anaeróbia após um período de tempo e comparar os avanços e mudanças ocasionadas.
- O acompanhamento dos novos estudos conforme os anos para análise e comprovações das hipóteses de vieses em ascensão expostas nesse estudo.
- Análise bibliográfica mais profunda e individual de cada perspectiva a respeito do tema comprovada nesse estudo, como os pré-tratamentos do lodo, a co-digestão anaeróbia, os sistemas com mais de um estágio e a purificação do biogás.
- Aprofundar nos parâmetros de controle de processos nos reatores da digestão anaeróbia e avaliar os rendimentos e impactos com os estudos desse viés.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABREPEL). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: fevereiro, 2024.
- ADARME, O. F. H. et al. Biogas production by anaerobic co-digestion of sugarcane biorefinery byproducts: Comparative analyses of performance and microbial community in novel single-and two-stage systems. **Bioresource Technology**, v. 354, p. 127185, 2022.
- ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, n. 03, p. 205-212, 2015.
- AĞDAĞ, O. N.; SPONZA, D. T. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. **Journal of hazardous materials**, v. 140, n. 1-2, p. 75-85, 2007.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20ed.; American Public Health Association: Washington, DC, USA, 1999.
- AMUDA, O. S. et al. Conversion of sewage sludge to biosolids. **Biosolids engineering and management**, p. 65-119, 2008.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018.
- APPELS, L. et al. Influence of microwave pre-treatment on sludge solubilization and pilot scale semi-continuous anaerobic digestion. **Bioresource technology**, v. 128, p. 598-603, 2013.
- APPELS, L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in energy and combustion science**, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO (ABIOGÁS). Participação do biogás junto com o carvão mineral é retrocesso para a renovável, 2023. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/posts/abiogas-participacao-do-biogas-junto-com-o-carvao-mineral-e-retrocesso-para-a-renovavel#:~:text=Participa%C3%A7%C3%A3o%20do%20biog%C3%A1s%20junto%20com%20o%20carv%C3%A3o%20mineral%20%C3%A9%20retrocesso%20para%20a%20renov%C3%A1vel,-Participa%C3%A7%C3%A3o%20do%20biog%C3%A1s&text=A%20ABiog%C3%A1s%20sinalizou%20como%20extremamente,e%20Energia%20h%C3%A1%20muito%20tempo.>>. Acesso em: fevereiro de 2024

AUGELLETTI, R.; CONTI, M.; ANNESINI, M. C. Pressure swing adsorption for biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1390-1398, 2017.

BARÉA, L.C. **Projeto compartilhando conhecimento: recomendações técnicas de projeto de estações de tratamento de esgoto**. Curitiba: Editora Sanepar, 2015.

BAUER, F. et al. Biogas upgrading-Review of commercial technologies. **SGC Rapport**, 2013.

BENGTSSON, O. et al. Identification of common traits in improved xylose-growing *Saccharomyces cerevisiae* for inverse metabolic engineering. **Yeast**, v. 25, n. 11, p. 835-847, 2008.

BOUALLAGUI, H. et al. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process biochemistry**, v. 40, n. 3-4, p. 989-995, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Programa Nacional Lixão Zero. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/Programa-Lixao-Zero.pdf/@@download/file/Programa-Lixao-Zero.pdf>

CALLAGHAN, F. J. et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. **Biomass and bioenergy**, v. 22, n. 1, p. 71-77, 2002.

CHAN, P. C.; TOLEDO, R. A.; SHIM, H. Anaerobic co-digestion of food waste and domestic wastewater—Effect of intermittent feeding on short and long chain fatty acids accumulation. **Renewable Energy**, v. 124, p. 129-135, 2018.

CHEONG, W. L. et al. Anaerobic co-digestion of food waste with sewage sludge: simulation and optimization for maximum biogas production. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1075, 2022.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário—Parte 1: Tópicos de Interesse. **Revista DAE**, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias)**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. **UFMG**. 1997, 240 p.

CHRISTY, P. M.; GOPINATH, L. R.; DIVYA, D. A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 167-173, 2014.

CHU, C.F. et al. A pH-and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 18, p. 4739-4746, 2008.

DE OLIVEIRA, M. V. A. **Produção de metano através da co-digestão anaeróbia de soro de leite e resíduos caprinos**. 2023. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em

Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

DELZER, G. C.; MCKENZIE, S. W. Biochemical Oxygen Demand. **United States Geological Survey: Richmond, VA, USA**, 1999.

DTU. Technical University of Denmark. Irimi Angelidak Profile. Disponível em: <https://www.dtu.dk/english/person/irini-angelidaki?id=4803&entity=profile>. Acesso em: dezembro de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>>. Acesso em: março de 2024.

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. EBA Statistical Report. Belgium, 2017. Disponível em: < <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2017-published-soon/>>. Acesso em: março de 2024.

FAPESP. Pesquisador Marcelo Zaiat. Biblioteca Virtual da Fapesp. 2023. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/pesquisador/3234/marcelo-zaiat/>>. Acesso em: dezembro de 2023.

FCIWEM R.T. Esholt STW – Thermal hydrolysis plant-new process provides ‘green’ energy from sewage sludge. **UK Water Projects**. 2012.

FUESS, L. T. et al. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. **Applied Energy**, v. 189, p. 480-491, 2017.

GONÇALVES, R.F. et al. Co-digestion of municipal wastewater and microalgae biomass in an upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Algal Research**, Volume 52, 2020.

GOTTEMS, L. Microrganismos e CO₂ querem ser protagonistas da bioeconomia. Agrolink, 2020. Disponível em: < https://www.agrolink.com.br/noticias/microrganismos-e-co2-querem-ser-protagonistas-da-bioeconomia_437055.html>. Acesso em: fevereiro de 2024.

GTZ/TBW. **Promotion of anaerobic technology for the treatment of municipal and industrial sewage and wastes**. 8ed. Supraregional sectoral Project. 1997.

HARRIS, P. W.; MCCABE, B. K. Review of pre-treatments used in anaerobic digestion and their potential application in high-fat cattle slaughterhouse wastewater. **Applied Energy**, v. 155, p. 560-575, 2015.

JAIN, S. et al. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 142-154, 2015.

JINGURA, R. M.; MATENGAIFA, R. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1116-1120, 2009.

JORDÃO, E. P., PESSOA, C., A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8^a ed. Rio de Janeiro. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.

JÚNIOR, A. D. N. F. et al. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. **Renewable Energy**, v. 89, p. 245-252, 2016.

KARIM, K.; HOFFMANN, R. K.; KLASSON, T. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. **Water Research**. 2005.

KAWAI, M. et al. Biodegradability and methane productivity during anaerobic co-digestion of refractory leachate. **International biodeterioration & biodegradation**, v. 72, p. 46-51, 2012.

KAZA, S. et al. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. World Bank Publications, 2018.

KIRAN, E. U. et al. Production of biogas via anaerobic digestion. In: **Handbook of biofuels production**. Woodhead Publishing, 2016. p. 259-301.

KUMARI, K. et al. Anaerobic co-digestion of different wastes in a UASB reactor. **Waste Management**, v. 77, p. 545-554, 2018.

KUMAR, A., SAMADDER, S.R. An Empirical Model for Prediction of Household Solid Waste Generation Rate - A Case Study of Dhanbad, India. **Waste Management**, v. 68, p. 3-15, 2017.

KWIETNIEWSKA, E.; TYS, J. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 34, p. 491-500, 2014.

LAZARO, C. Z et al. Sugarcane vinasse as substrate for fermentative hydrogen production: The effects of temperature and substrate concentration. **International Journal of Hydrogen Energy**, São Carlos, v. 39, p. 6407-6418, 2014.

LE, T. S. et al. Two-stage anaerobic membrane bioreactor for co-treatment of food waste and kitchen wastewater for biogas production and nutrients recovery. **Chemosphere**, v. 309, p. 136537, 2022.

LEE, D. Y. et al. Continuous H₂ and CH₄ production from high-solid food waste in the two-stage thermophilic fermentation process with the recirculation of digester sludge. **Bioresource technology**, v. 101, n. 1, p. S42-S47, 2010.

LI, B. Y. et al. Production of volatile fatty acid from fruit waste by anaerobic digestion at high organic loading rates: Performance and microbial community characteristics. **Bioresource Technology**, v. 346, p. 126648, 2022.

Li, Y. et al. Solid-State Anaerobic Digestion for Methane Production from Organic Waste. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 15, 821-826, 2011.

LIMA, V. O. et al. Anaerobic digestion of vinasse and water treatment plant sludge increases methane production and stability of UASB reactors. **Journal of Environmental Management**, v. 327, p. 116451, 2023.

LIN, Y. et al. Alkali pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, n. 1, p. 366-373, 2009.

LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. **Bioresource technology**, v. 94, n. 3, p. 261-266, 2004.

LUCAS JÚNIOR, J.; **Algumas considerações sobre o uso de estrume de suínos como substrato para três sistemas de biogestores anaeróbios**. 1994. Tese (Livre-Docência). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

LYTRAS, G. et al. Food waste valorization based on anaerobic digestion. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 1677-1697, 2021.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000.

MEEGODA, J. N. et al. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 10, p. 2224, 2018.

MONTES, J. A. et al. Biogas production from the liquid waste of distilled gin production: Optimization of UASB reactor performance with increasing organic loading rate for co-digestion with swine wastewater. **Bioresource technology**, v. 274, p. 43-47, 2019.

MUÑOZ, R. et al. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, p. 727-759, 2015.

PILLI, S. et al. Thermal pretreatment of sewage sludge to enhance anaerobic digestion: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 6, p. 669-702, 2015.

POUR, F. H.; MAKKAWI, Y. T. A review of post-consumption food waste management and its potentials for biofuel production. **Energy Reports**, v. 7, p. 7759-7784, 2021.

PROSAB. **Rede cooperativa de pesquisas**. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Local de Edição: RiMa, Artes e Textos, 1º edição. Rio de Janeiro, 1999.

RATANATAMSKUL, C.; ONNUM, G.; YAMAMOTO, K. A prototype single-stage anaerobic digester for co-digestion of food waste and sewage sludge from high-rise building for on-site biogas production. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 95, p. 176-180, 2014.

RICCI, M. R.; VAZ, C. R.; Produção de biogás a partir de dejetos de animais: uma revisão sistemática e metassíntese de evidências dos biodigestores CSTR e Lagoa Coberta. **XXIV ENGEMA**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2022.

SCHNURER, A.; JARVIS, A. Microbiological handbook for biogas plants. **Swedish Waste Management U**, v. 2009, p. 1-74, 2010.

SCOPUS. Disponível em: <<https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>>. Acesso em: dezembro de 2023.

SHI, X. et al. Two-stage anaerobic digestion of food waste coupled with in situ ammonia recovery using gas membrane absorption: Performance and microbial community. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122458, 2020.

SILVA, J. L. **Desempenho do Reator Anaeróbio Horizontal com Chicanas no tratamento da manipueira em fases separadas e estabilização do pH com conchas de sururu**. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

SINIR. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. Resíduos Sólidos Urbanos. 2020. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2023.

SOLLITTO, A. China aposta na ciência e ganha força como potência de inovação. Revista Veja. Tecnologia. 2022. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/tecnologia/china-aposta-na-ciencia-e-ganha-forca-como-potencia-de-inovacao>>. Acesso em: dezembro de 2023.

SUN, H. et al. Co-digestion of *Laminaria digitata* with cattle manure: a unimodel simulation study of both batch and continuous experiments. **Bioresource technology**, v. 276, p. 361-368, 2019.

SUN, Q. et al. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 51, p. 521-532, 2015.

TANG, B. et al. Energy efficiency of pre-treating excess sewage sludge with microwave irradiation. **Bioresource technology**, v. 101, n. 14, p. 5092-5097, 2010.

TARICKSKA, J. R. et al. Anaerobic digestion. **Biological treatment processes**, p. 589-634, 2009.

TARTARUGA, I. G. P. Inovações tecnológicas na China: lições e perspectivas. **Panorama Internacional**, v. 2, n. 3, 2017.

TEGHAMMAR, Anna et al. Enhanced biogas production from rice straw, triticale straw and softwood spruce by NMMO pretreatment. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 116-120, 2012.

THOMAZ, P. G.; ASSAD, R. S.; MOREIRA, L. F. P. Uso do fator de impacto e do índice H para avaliar pesquisadores e publicações. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 96, p. 90-93, 2011.

TUROVSKIY, I. S. et al. Wastewater sludge processing. **Wiley-Interscienc**, 2006.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2001. Disponível em: < https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/method_1684_draft_2001.pdf>. Acesso em: março de 2024.

VAN LIER, J.B.; Mahmoud, N.; Zeeman, G. **Anaerobic Wastewater Treatment. In Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design**, International Water Association: London, UK, 2008.

VASSALLE, L. et al. Upflow anaerobic sludge blanket in microalgae-based sewage treatment: Co-digestion for improving biogas production. **Bioresource Technology**, v. 300, p. 122677, 2020.

VISSER, A. **The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. Internacional course on anaerobic tretatment**. Wageningen Agricultural Univeresity, Wageninguen. 1995.

WANG, M. et al. Anaerobic co-digestion of microalgae *Chlorella* sp. and waste activated sludge. **Bioresource technology**, v. 142, p. 585-590, 2013.

WANG, X. et al. Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition. **PloS one**, v. 9, n. 5, p. e97265, 2012.

WANG, X. et al. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource technology**, v. 120, p. 78-83, 2012.

WEB OF SCIENCE. Disponível em: < https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_pcollection>. Acesso em: dezembro de 2023.

XIE, S. et al. Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage. **Bioresource technology**, v. 102, n. 10, p. 5728-5733, 2011.

YUAN, T. et al. Biochar regulates enzymes activity and interspecies electron transfer to promote bioenergy recovery from a continuous two-stage food waste anaerobic digestion process. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 135690, 2023.

ZHANG, Z. et al. Mechanistic insights into Fe₃O₄-modified biochar relieving inhibition from erythromycin on anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, v. 344, p. 118459, 2023.

ZHEN, G. et al. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 559-577, 2017.

ZUPANČIČ, G. D.; GRILC, V.. Anaerobic treatment and biogas production from organic waste. **Management of organic waste**, v. 2, p. 57-63, 2012.