

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

Mariane Gabriele de Sá

**PRÉ-TRATAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA PRESENTE NOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL**

São Carlos - SP

2023

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

Mariane Gabriele de Sá

**PRÉ-TRATAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA PRESENTE NOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof^a. Dra. Paula Rubia Ferreira Rosa

São Carlos - SP

2023

MARIANE GABRIELE DE SÁ

**PRÉ-TRATAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA PRESENTE NOS RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NO BRASIL PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL**

Trabalho de Graduação apresentado como exigência
parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química na Universidade Federal de
São Carlos. São Carlos, 14 de março de 2023.

Orientador(a)

Dr. (a) Paula Rubia Ferreira Rosa

Universidade Federal de São Carlos

Examinador(a)

Dr. (a) André Bernardo

Universidade Federal de São Carlos

Examinador(a)

Dr.(a) Fernanda Perpétua Casciatori

Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente meus pais, Marco e Rose, por todo apoio, suporte desde sempre e por terem me proporcionado as melhores oportunidades. Eu amo vocês. Ao meu irmão, Matheus, por estar sempre comigo.

Ao meu namorado, Arnon, por todo amor, compreensão e cumplicidade ao longo destes anos, sempre me apoiando, dando forças e acreditando em mim.

Agradeço também todos os amigos que fiz em São Carlos, que são pessoas que trago sempre comigo, em especial, Carol Borges, Paulinha, Tainan, Mila e Marcelle.

Aos meus amigos de vida, Carol Gaspar e Maicon, que mesmo de longe, sempre estiveram comigo.

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa, que sempre foi muito paciente, solícita e prestativa, um exemplo de profissional e pessoa.

RESUMO

A recuperação e aproveitamento energético dos resíduos é uma das principais formas de minimizar os impactos ambientais causados pela má gestão de resíduos. Uma das principais formas de realizar esta recuperação de energia e gerenciar resíduos seria a digestão anaeróbia (DA). Neste processo, é possível tratar a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), que ao mesmo tempo pode ser considerada como uma das fontes potenciais de energia renovável devido à geração de biocombustível durante o processo. Assim sendo, para um maior rendimento de biocombustíveis e digestibilidade destes substratos, técnicas de pré-tratamento são utilizadas, auxiliando na quebra de carboidratos complexos em açúcares simples, tornando-os assim, consumíveis para as bactérias presentes no meio. Após analisar as palavras chaves que mais eram utilizadas quando se tratava de sustentabilidade, gases do efeito estufa, utilizou-se as palavras “*anaerobic digestion*”, “*food waste*”, “*OFMSW*”, “*organic fraction municipal solid waste*” na primeira etapa da pesquisa. Com estas palavras, encontraram-se 992 artigos, no período de 1990-2023, utilizando a base de dados Web of Science, para então, realizar a análise bibliométrica, relatando sobre os pré-tratamentos existentes e já utilizados para a produção de biocombustíveis a partir de FORSU ou resíduos alimentares, sua efetividade e principais efeitos na digestão. Os anos de 2021 e 2022 foram os que mais tiveram artigos publicados, sendo que a China foi o país que mais publicou, com cerca de 37% dos artigos. Os autores asiáticos foram os que mais publicaram e foram citados ao longo destes anos, com destaque para Li Y e Li X. Dos artigos mais relevantes, o objetivo pela otimização da digestão anaeróbia é que mais aparece, sendo o pré-tratamento um dos temas utilizado para se obter esta otimização. O pré-tratamento químico foi o que mais possui publicações, com um total de 36 artigos, sendo este o mais utilizado atualmente. Para a engenharia química, a pesquisa ajudou a demonstrar alguns gargalos que ainda são presentes relacionados ao pré-tratamento do substrato, assim como obter a máxima eficiência da DA, ele auxilia também em parâmetros que podem ser utilizados em alguns tipos de pré tratamento.

Palavras-chave: FORSU, digestão anaeróbia, pré tratamento, análise bibliométrica, resíduos alimentares, biocombustível.

ABSTRACT

The recovery and energy use of waste is one of the main ways to minimize the environmental effects caused by poor waste management. One of the main ways to carry out this energy recovery and generate waste would be anaerobic combustion (AD). In this process, it is possible to treat organic fraction municipal solid waste (OFMSW), which at the same time can be considered as one of the potent sources of renewable energy due to the generation of biofuel during the process. Therefore, for a greater yield of biofuels and digestibility of these substrates, pre-treatment techniques are used, helping to break down complex carbohydrates into simple sugars, thus making them consumables for the bacteria present in the environment. After analyzing the keywords that were most used when it came to sustainability, greenhouse gases, the words “anaerobic digestion”, “food waste”, “organic waste”, “organic fraction of urban solid waste” were used in the first stage of the research. With these words, 992 articles were found, in the period 1990-2023, using the Web of Science database, to then perform a bibliometric analysis, reporting on the existing pre-treatments and already used for the production of biofuel from OFMSW or food waste, its sequence and main effects on digestion. The years 2021 and 2022 were the ones with the most articles published, with China being the country that published the most, with about 37% of the articles. Asian authors were the ones who published the most and were cited over these years, with emphasis on Li Y and Li X. Of the most relevant articles, the objective of optimizing anaerobic digestion is the one that appears the most, with pretreatment being one of the themes used to obtain this optimization. Chemical pre-treatment was the one with the most publications, with a total of 36 articles, which is currently the most used. For chemical engineering, the research helped to demonstrate some bottlenecks that are still present related to substrate pretreatment, as well as obtaining maximum DA efficiency, it also helps in parameters that can be used in some types of pretreatments.

Keywords: OFMSW, anaerobic digestion, pretreatment, bibliometric analysis, food waste, biofuel.

LISTA DE SIGLAS

AGV – ácidos graxos voláteis

C - carbono

DA – digestão anaeróbia

GEE – Gases de efeito estufa

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

N - Nitrogênio

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

FORSU – fração orgânica de resíduos sólidos urbanos

PBM – Potencial de biometano

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SUASA - Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

TI – title (WoS)

TS – topic (WoS)

TSV – Total de sólidos voláteis

RA – resíduos alimentares

RSU – resíduos sólidos urbanos

WoS – Wef of Science

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 - Tendência global da emissão dos GEE	6
Figura 2.2.2 - Média do aumento da temperatura global entre 1880 e 2020	7
Figura 2.2.3 - Projeção da temperatura global até 2101	8
Figura 2.3.4 - Fornecimento total de energia por fonte.....	9
Figura 2.4.1 - Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil	14
Figura 2.5.1 - Cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões em 2022	15
Figura 2.8.1 - Caracterização geral do FORSU para o processo de DA	19
Figura 2.9.1 - Diagrama esquemático da digestão anaeróbia.....	20
Figura 2.10.1 - Etapas do processo de digestão anaeróbia.....	21
Figura 4.1.1 - Cluster das palavras chaves mais utilizadas	38
Figura 4.1.2 (a) - Evolução das publicações ao longo dos anos	39
Figura 4.1.2 (b) - Quantidade de artigos por categoria	40
Figura 4.1.4 - Quantidade de artigos publicados por países	41
Figura 4.1.5 - Autores que mais publicaram e foram mais citados	42
Figura 4.1.6 (a) - Top 10 áreas de pesquisa áreas de pesquisa das publicações	43
Figura 4.1.6 (b) - Top 10 jornais com mais artigos.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais métodos e parâmetros do pré-tratamento de resíduos orgânicos	24
Tabela 2 - 20 artigos mais citados da literatura de 2019 - 2023	46
Tabela 3 - Compilado dos objetivos específicos dos 20 trabalhos mais citados	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 SUSTENTABILIDADE	3
2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS	5
2.3 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL	9
2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	10
2.4.1 DEFINIÇÃO	10
2.4.2 GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	12
2.4.3 PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PLANARES)...	13
2.5 SISTEMA DE COLETA RSU.....	15
2.6 DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
2.7 TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
2.7.1 RECICLAGEM.....	17
2.7.2 COMPOSTAGEM.....	18
2.7.3 INCINERAÇÃO	18
2.9 Valorização do FORSU a partir da DIGESTÃO ANAEROBIA	19
2.10 ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE FORSU .	21
2.8.1 HIDRÓLISE.....	22
2.8.2 ACIDOGÊNESE.....	22
2.8.3 ACIDOGÊNESE.....	22
2.8.4 METANOGÊNESE	23
2.10 TÉCNICAS DE PRÉ-TRATAMENTO para o forsu	23
2.10.1 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO.....	28
2.10.1.2 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - SOLVENTE ÁCIDOS.....	28
2.10.1.2 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - SOLVENTES ALCALINOS	29
2.10.1.3 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - LIQUIDO IÔNICO	30
2.10.1.4 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - ORGANOSOLV.....	30
2.10.1.4 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - OZONIZAÇÃO	31
2.10.2 PRÉ-TRATAMENTO FÍSICO.....	31
2.10.2.1 ÁGUA QUENTE LIQUIDA	31

2.10.2.2 EXTRUSÃO	31
2.10.2.3 ULTRASSÔNICO	32
2.10.2.4 MICROONDAS.....	32
2.10.2.4 TÉRMICO.....	33
2.10.3 PRÉ-TRATAMENTO BIOLÓGICO	33
2.10.4 PRÉ-TRATAMENTO COMBINADO	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICA	36
3.2 ANÁLISES DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICA MAIS CITADAS...	36
3.3 ANÁLISES DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICA POR TIPOS DE PRÉ TRATAMENTO	37
4 RESULTADOS.....	37
4.1 ANÁLISE GERAL DOS ARTIGOS.....	38
4.1.1 ESTUDO DAS PALAVRAS CHAVES: ANÁLISE QUANTITATIVA E FREQUÊNCIA	38
4.1.2 EVOLUÇÃO DAS PUBLICAÇÕES	39
4.1.3 ESTUDO DO PAÍSES E AUTORES QUE MAIS PUBLICARAM	40
4.1.4 ÁREAS DE PESQUISA E JORNAL	42
4.2 artigos mais citados nos últimos 5 anos.....	44
4.3 APRESENTAÇÃO DOS PRÉ TRATAMENTOS MAIS UTILIZADOS	51
5 CONCLUSÕES	53

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações que a população mundial vem enfrentando atualmente são referentes às mudanças climáticas, insegurança energética mundial, e um crescimento contínuo da exploração dos recursos naturais (PAUDEL et al. 2017). Com o intuito de diminuir cada vez mais a exploração destes recursos naturais, tornar a matriz energética mundial mais sustentável e economicamente viável, a busca por energias sustentáveis e biocombustíveis de segunda geração tornou-se uma tendência global. Em 1992 foi realizado a primeira COP (Conference of the Parties), que teve como principal objetivo discutir sobre as mudanças climáticas do planeta e propor mecanismos a fim de garantir a redução dos GEE's (PROCLIMA, 2023).

O biocombustível de segunda geração pode ser obtido a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal, preferencialmente as que se tornariam resíduos (DAMASCENO, 2012), sendo que estes podem ser, bagaço de cana, bagaço de malte, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU), resíduos da agricultura, entre outros. Além do aproveitamento destes resíduos como forma de complementar ou substituir os combustíveis fósseis não renováveis existentes de forma ambientalmente sustentável (PAUDEL et al. 2017), também é uma alternativa para que não ocorra a disposição destes em aterros e lixões.

No Brasil, a maior parte dos RSU coletados (61%) continuam sendo encaminhadas para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada em 2022. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada (ABRELPE, 2022).

De acordo com os dados disponíveis, nota-se que, aproximadamente, 40-70% do total de RSU gerado contém materiais orgânicos biodegradáveis, também conhecido como FORSU (PANIGRAHI, S.; DUBEY, B.K, 2019).

A produção de biocombustíveis depende principalmente do tipo e quantidade de macromolécula orgânica disponíveis no FORSU (CAMPUZANO; GONZALEZ-MARTÍNEZ, 2016). O FORSU é composto por uma mistura de resíduos de cozinhas, limpezas de parque, feiras-livres, entre outros. Sendo assim, segundo VALORGAS (2010) a quantidade de carbono presente no substrato varia de 37,6-51,3%, dependendo da região de onde é extraído, já a quantidade de hidrogênio e nitrogênio possuem uma média de $6,6 \pm 0,62\%$ e $2,9 \pm 0,6\%$, respectivamente.

A concentração destes elementos impacta diretamente a produção de biocombustíveis a partir da DA, visto que esta ocorre a partir da celulose, hemicelulose e lignina.

O grande desafio para a produção de biogás a partir do FORSU é a complexidade do substrato, uma vez que a maior parte deste composto é formada por materiais complexos, que não são facilmente digeridos pelos microorganismos, durante o processo de DA. Como estratégia para aumentar-se a produção de biogás e eficiência do processo de DA, um pré-tratamento adequado deve ser aplicado ao substrato (PAUDEL, 2017).

Existem diversas abordagens para o pré-tratamento de FORSU, como físico, químico, biológico e métodos combinados, que têm sido extensivamente investigados (Preethi et al. 2022; Panigrahi et al., 2020, Kumar et al. 2020). Pré-tratamento físico incluindo moagem, é importante para melhorar o desempenho da digestão anaeróbia pois o tamanho das partículas desses materiais sólidos tem um efeito significativo sobre a taxa de hidrólise (Zhang et al., 2014). Os pré-tratamentos químicos são mais amplamente utilizados em comparação com outros métodos de pré-tratamento, porque são simples, rápidos e eficazes na melhoria da biodegradabilidade de materiais orgânicos complexos (Kumar et al., 2020), porém podem possuir componentes que inibem a DA. Em contrapartida, o pré-tratamento físico-químico tem se mostrado promissor para a solubilização eficaz da matéria-prima e rendimento de metano (Preethi et al., 2022). Estudos recentes mostraram que a eficiência energética e o rendimento de biogás de FORSU podem aumentar significativamente se os métodos de pré-tratamento térmico forem integrados a processos químicos ou biológicos (Hashemi et al., 2021). Porém, a viabilidade destes pré-tratamentos, não está bem definida, abrindo perspectivas para o cenário de pré-tratamento de biomassa e DA nos processos combinados de biogás-bioquímicos.

Com o propósito de se atingir a máxima geração do biocombustível, não há dúvida de que o uso de um pré-tratamento é a abordagem mais eficaz para aumentar a sua produção (PAUDEL, 2017).

Diante deste contexto, o presente trabalho aborda uma discussão a respeito do uso de metodologias de pré-tratamento de FORSU e resíduos alimentares para produção de biocombustíveis, avaliando progressos, tendências e lacunas em determinados campos ou temas de pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é elucidar o progresso e as tendências de pesquisas relacionadas a técnicas de pré-tratamentos de RSU para a produção de biocombustíveis, apresentando uma análise bibliométrica entre 1990-2022 e também nos últimos 5 anos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Discorrer a respeito da produção de resíduos sólidos na sociedade e seus impactos para as cidades;
- Apresentar e discutir sobre técnicas de pré-tratamento que sejam eficientes para tornar estes resíduos adequados para a produção de biogás e como isso pode impactar na sociedade em todas as esferas;
- Discutir sobre os desafios e perspectivas têm sido fornecidos para apoiar futuras pesquisas e tomadas de decisão neste campo de Ciência e Tecnologia;
- Realizar um estudo de palavras chaves, através de uma ferramenta sistemática de busca;
- Realizar uma busca avançada no *Web of Science*, buscando entender como as pesquisas a respeito de técnicas de pré-tratamento de FORSU para a produção de biocombustível, evoluíram nos últimos anos em diferentes partes do mundo, e autores baseados no número total de citação e publicações, e também em outros parâmetros;
- Apresentar os estudos 20 estudos mais citados nos últimos 5 anos, que foram desenvolvidos quanto aos principais desafios de pré-tratamento de FORSU para a produção de biogás;
- Apresentar os pré-tratamento mais utilizados, dentro destes artigos mais citados, nos últimos 5 anos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SUSTENTABILIDADE

O conceito de sustentabilidade pode ser definido como a busca por desenvolvimento econômico utilizando-se recursos naturais com maior racionalidade e procurando tecnologias que possam poluir menos o meio ambiente. Dessa forma, sustentabilidade refere-se à uma associação entre o crescimento econômico, cuidado com o meio ambiente e responsabilidade social. A preocupação com esse conceito, nos tempos atuais, tem sido um desafio e é pauta de discussão nas mais diversas organizações, sejam públicas ou privadas (STEFANELLI; RAMALHO; ARAÚJO, 2013).

Com o decorrer dos anos, os avanços tecnológicos, estabelecidos principalmente após a Revolução Industrial, e o aumento significativo da população trouxeram diversos impactos negativos no meio ambiente. As atividades produtivas realizadas na sociedade capitalista extraem do meio ambiente o que é necessário para o seu desenvolvimento, porém devolve a eles grandes quantidades de resíduos sólidos, líquidos e gasosos nocivos e amplamente poluentes. Ou seja, além de explorar seus insumos, a atividade produtiva ainda o poluí. O mesmo que anteriormente era visto como fonte inesgotável de recursos, atualmente é foco de preocupação (ARAÚJO et al, 2006).

A perspectiva econômica da sustentabilidade é um adjetivo atrelado ao desenvolvimento promovida pela percepção, ao longo do século XX, de que o padrão de produção e consumo crescente em todo o mundo seria incompatível com a capacidade de o planeta se recuperar, principalmente nos últimos 25 anos. Então é levantado o conceito de sustentabilidade, baseada na finitude dos recursos naturais e sua possível escassez futura (NASCIMENTO, 2012).

Sartori, Latrônico e Campos (2014) dispõe sobre a sustentabilidade que:

A emergência do desenvolvimento sustentável como projeto político e social da humanidade tem promovido a orientação de esforços no sentido de encontrar caminhos para sociedades sustentáveis. É crescente o interesse sobre sustentabilidade e mais recentemente, as abordagens referentes a estratégias, produção mais limpa, controle da poluição, eco eficiência, gestão ambiental, responsabilidade social, ecologia industrial, investimentos éticos, economia verde, eco design, reuso, consumo sustentável, resíduos zero, dentre inúmeros outros termos.

A evolução do conceito de sustentabilidade ambiental teve início de fato em meados da década de 1960 e 1970, juntamente com o início da preocupação com as problemáticas ambientais e pela escassez de recursos no contexto pós segunda guerra mundial. Na obra conhecida como “O relatório do clube de Roma”, elaborada por Meadows e colaboradores (1972) os autores chamavam a atenção para os efeitos ambientais negativos, proporcionados pela atividade humana e que, caso

as perspectivas de crescimento continuassem, resultaria em um decréscimo incontrolável da qualidade de vida, além de ter consequências catastróficas para a espécie humana, apresentando modelos complexos que anunciavam o esgotamento das reservas de recursos naturais, o aumento populacional e a irreversível degradação ambiental (CAVALCANTI, 2011).

Conforme visto, o crescimento da população mundial e o desenvolvimento econômico tem alcançado níveis cada vez maiores com o passar dos anos. Diante desse contexto, os problemas e impactos causados ao meio ambiente também se intensificam. Verificam-se taxas de poluição em níveis alarmantes. Torna-se, assim, uma preocupação fundamental a busca iniciativas sustentáveis, que são alternativas às tradicionalmente utilizadas, porém que podem acarretar em uma redução nos impactos negativos causados ao meio ambiente pelas atividades produtivas, bem como uma maior conscientização da sociedade, sobre a importância desse tema e da aplicação dessas práticas, para que se alcance um futuro mais saudável para o planeta (STEFANELLI; RAMALHO; ARAÚJO, 2013).

A busca pelo desenvolvimento sustentável tem sido um dos movimentos mais importantes da atualidade, visto que, atualmente, tem se notado diversas mudanças no clima do nosso planeta.

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

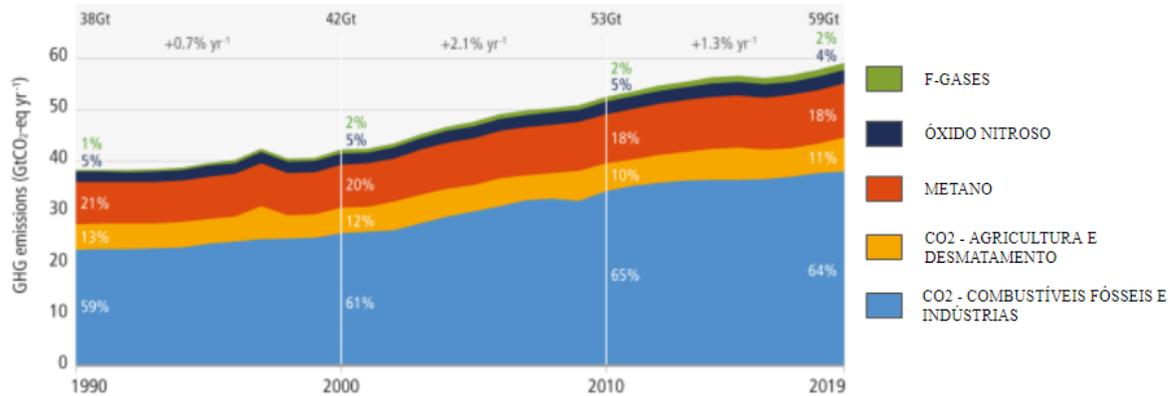
O aquecimento global tem dominado o clima da Terra desde o início da era industrial. Mas para diferentes magnitudes de aumento de temperatura, as mudanças climáticas correspondentes exerceriam diferentes impactos sobre os ecossistemas naturais globais e sociedades humanas. A questão de qual nível de aquecimento global é considerado um limiar de aquecimento perigoso tem sido amplamente debatido (LI et al. 2018).

A população global vem aumentando em uma taxa anual de 1,05%, e em 2057 acompanhando essa taxa, a população estimada ultrapassaria 10 bilhões de pessoas (SHAH et al. 2021). Diretamente proporcional com o aumento da população, ocorre o aumento da demanda energética, como dito anteriormente, uma maior geração de resíduos, aumento das atividades industriais, sendo que estes fatores são um dos principais contribuintes para o aumento da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa.

Além do CO₂, outros gases também são responsáveis pelo efeito estufa, como: metano, que são emitidos principalmente por atividades agroindustriais, queima de biomassa, gestão de resíduos, óxido nitroso, também relacionado a atividades agropecuárias, sendo o uso de fertilizantes a fonte principal, e os gases fluorados, que são emitidos em processos industriais,

refrigeração e o uso de uma variedade de produtos de consumo contribuem para as emissões de gases fluorados, que incluem hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) (EPA, 2017). Na Figura 2.2.1 pode-se observar a tendência da emissão desses gases nos últimos anos.

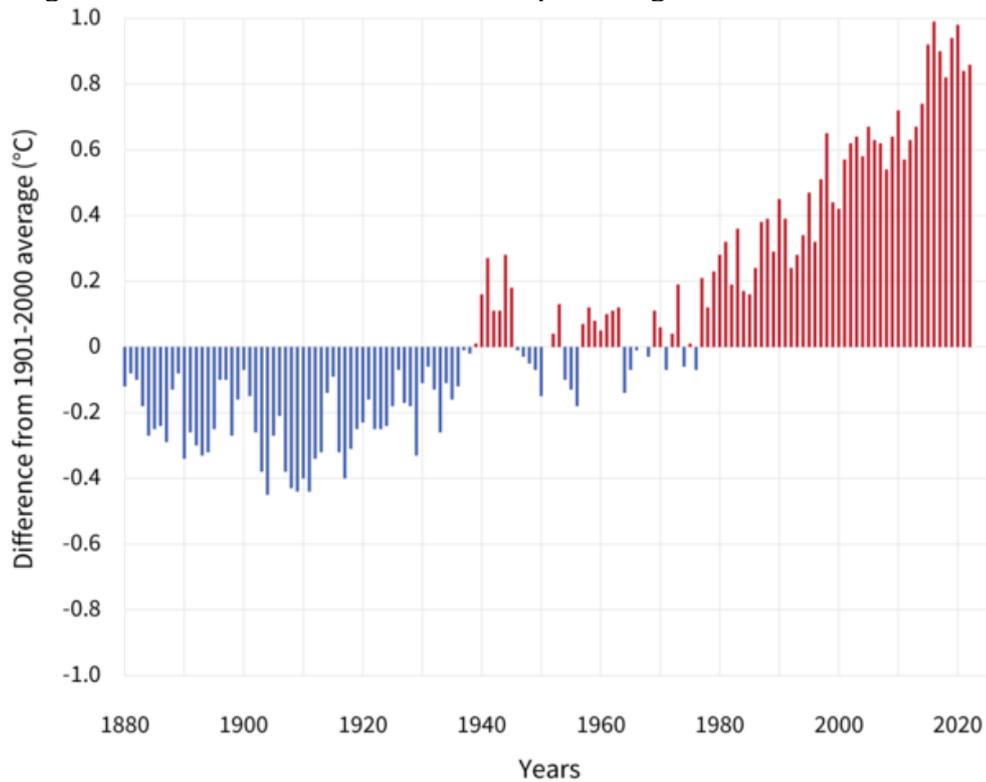
Figura 2.2.1 - Tendência global da emissão dos GEE



Fonte: IPCC (2019)

De acordo com NOAA (2023), a médias das temperaturas globais mostram que a maioria das áreas estão esquentando mais que esfriando, como pode ser observado na Figura 2.2.2 e que este aumento é diretamente proporcional à emissão de gases do efeito estufa.

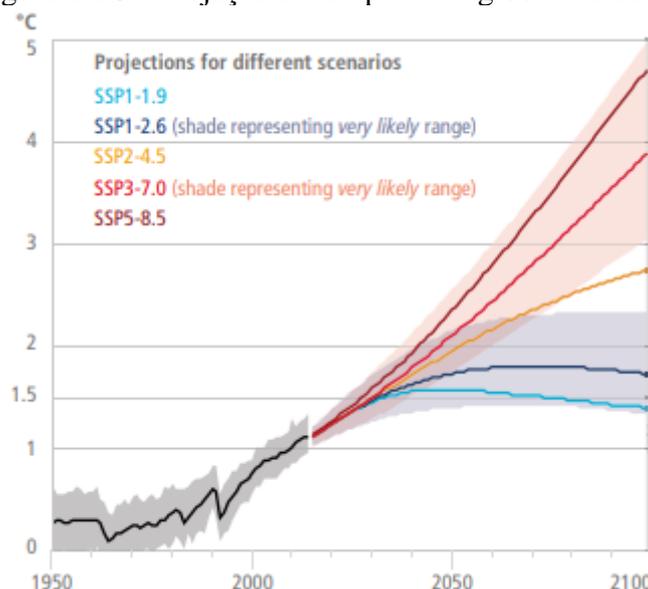
Figura 2.2.2 - Média do aumento da temperatura global entre 1880 e 2020



Fonte: NOAA (2023)

A temperatura da Terra vem aumentando em uma média de $0,08^{\circ}\text{C}$ por década desde 1880, sendo que 2022 foi o sexto ano mais quente segundo os dados medidos pelo instituto NOAA. As 10 temperaturas mais quentes já registradas ocorreram desde 2010. De acordo com 2017 U.S. Climate Science Special Report (USCSSR), se as emissões de GEE continuarem crescendo como tem sido desde 2000, no final do século, a temperatura global terá aumentado, em no mínimo, $2,8^{\circ}\text{C}$. A projeção de temperatura pode ser observada na 2.2.3.

Figura 2.2.3 - Projeção da temperatura global até 2101



Fonte: IPCC (2022)

Como forma de mitigar os impactos causados pelo aquecimento global, em 12 de dezembro de 2015 foi assinado o Acordo de Paris, que tem como principal objetivo a redução da emissão dos causadores do efeito estufa e limitação do aumento de temperatura do planeta abaixo de 2°C, sendo que este buscava fazer a substituição do protocolo de Kyoto.

O encontro estabeleceu um acordo juridicamente vinculativo e universal sobre o clima, visando manter o aquecimento global abaixo de 2°C até 2100. Como parte do acordo, cada país signatário indicou sua contribuição nacionalmente determinada (NDC) para o cumprimento de metas estabelecidas para a redução das emissões de GEE. No acordo, é ressaltada a importância da cooperação entre os principais emissores – China (27%), Estados Unidos da América (13%), União Europeia (8%), Índia (7%), Federação Russa (6%), Japão (3%) e Brasil (2%) (WORLD BANK, 2021).

Carvalho et al. (2022) menciona que a proposta brasileira visa reduzir as emissões de GEE em 37% em relação aos níveis de 2005, até 2025, além de ter indicado uma contribuição subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão 2005, até 2030.

Porém, segundo o Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2022 as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) continuam aumentando – cerca de 12% a mais que em 2010. Portanto, para serem compatíveis com a meta de 2°C, as emissões em GEE precisam parar de crescer em 2025 e depois cair 43% até 2030, em

relação aos níveis de 2019, que foram de 59 gigatoneladas de CO₂ equivalente (GtCO₂e) (WRI BRASIL, 2022).

Em 2021 na conferência da COP21, o principal objetivo foi firmar o acordo de limitar o aumento da temperatura em 2°C até 2100 e o investimento de US\$ 100 bilhões por ano por países desenvolvidos para que nações em desenvolvimento possam combater as mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que promovem um desenvolvimento justo e sustentável (IBA, 2021).

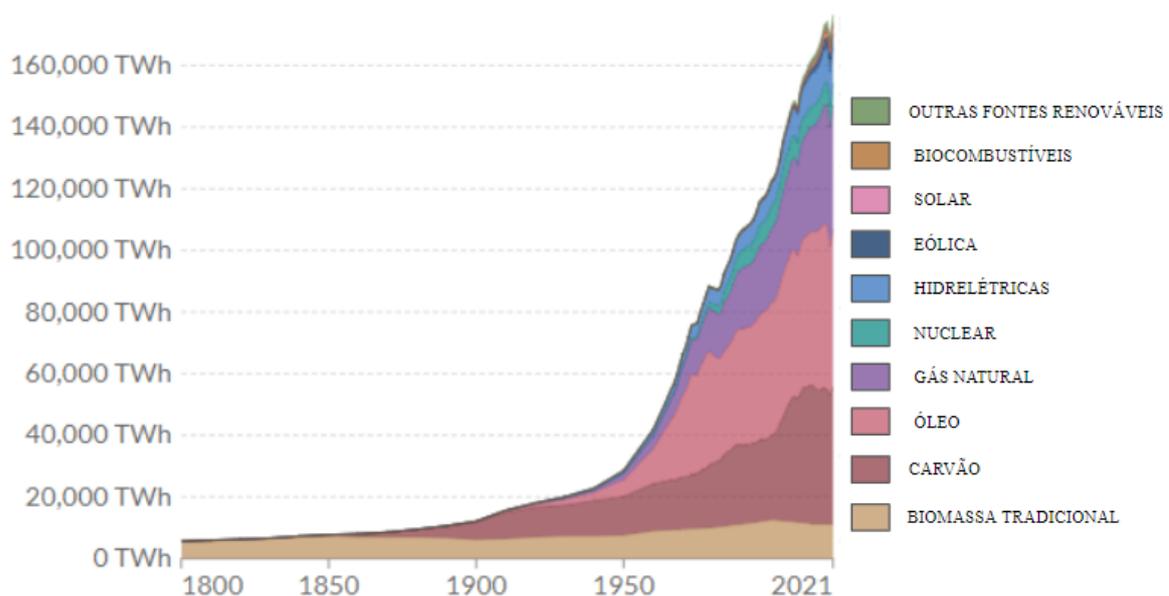
2.3 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

Em um contexto de mudanças climáticas, esforços para diminuir os GEE e de frear o aquecimento global, a matriz energética mundial torna-se estratégica. Atualmente, as fontes não renováveis de energia correspondem a aproximadamente 80% da matriz energética mundial, sendo que o Brasil apresenta uma matriz mais sustentável, onde 44,8% são fontes renováveis (IEA, 2022).

As fontes não renováveis são compostas basicamente por carvão mineral, petróleo e derivados, gás natural, enquanto as fontes renováveis compreendem em energia solar, energia eólica, hidrelétricas, entre outros.

Na Figura 2.3.1 pode-se observar o uso das fontes de energia ao longo dos anos.

Figura 2.3.1 - Fornecimento total de energia por fonte



Fonte: Adaptado de RITCHIE; ROSER; ROSADO (2022)

Na Figura 2.3.1 nota-se que até a metade do século XIX, a biomassa tradicional - a queima de combustíveis sólidos, como madeira, restos de colheita ou carvão - era a fonte dominante de energia no mundo. Porém, na revolução industrial surgiu o carvão, seguido de óleo e gás, e a partir do século XX, as hidrelétricas (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2022).

2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

2.4.1 DEFINIÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2004, apud (BRINGHENTI, 2004), resíduos sólidos são aqueles que resultam de atividades do setor industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e varrição; sua apresentação pode ser no estado físico sólido ou semi-sólido. Materiais como lodos resultantes de processos de tratamento de água ou de equipamentos utilizados para o controle da poluição e alguns líquidos que não podem ser despejados em rede pública de esgotos também são incluídos na definição de resíduos sólidos.

Estes resíduos são classificados de acordo com sua origem:

- **Lixo domiciliar:** gerado nas residências, nos escritórios e nos refeitórios e sanitários das indústrias. São restos de alimentos, papéis, plásticos, vidros, metais, dentre outros. É um tipo de resíduo menos específico e mais variado, com potencialidade de reciclagem.
- **Lixo comercial:** oriundo de estabelecimentos comerciais, composto basicamente dos mesmos resíduos que o “Lixo residencial”. É um tipo de resíduo menos específico e mais variado, com potencialidade de reciclagem.
- **Lixo industrial:** resultante dos processos industriais. São restos de materiais, lodos, subprodutos dos processos de fabricação, dentre outros. É um tipo de resíduo mais específico e menos variado, com potencialidade de reciclagem.
- **Lixo hospitalar:** gerado por hospitais, farmácias, ambulatórios médicos e clínicas veterinárias. É um tipo de resíduo mais específico e menos variado, com baixa potencialidade de reciclagem.
- **Lixo de vias públicas:** resultado da varrição de ruas, limpeza de bueiros, bocas-de-lobo, canais, terrenos baldios, etc. É composto por terra, folhas, entulhos, detritos diversos, galhos, dentre outros. Possui pouco potencial de reciclagem.
- **Entulho da construção civil:** gerado na construção e reforma de obras particulares, públicas, industriais e comerciais. É composto por restos de

demolições e sobras de materiais de construção. É um tipo de resíduo mais específico e menos variado, com potencialidade de reciclagem.

· **Outros:** proveniente de portos, aeroportos, penitenciárias além daqueles de origens diversas tais como produtos resultantes de acidentes, animais mortos, veículos abandonados, dentre outros. (LIMA, 1991; SÃO PAULO, 1998 apud PEIXOTO; CAMPOS; D'AGOSTO, 2005, p. 4

Os resíduos também são caracterizados segundo suas propriedades físicas e químicas, tal classificação leva em conta a atividade que lhe deu origem e os componentes que os constituem. Este tipo de classificação é importante também para que seja possível identificar se os resíduos têm em sua composição substâncias que possam fazer mal à saúde ou ao meio ambiente (ROVIRIEGO, 2005).

Esta classificação se separa desta forma, de acordo com Roviriego (2005, p. 17):

- a) Resíduos classe I – Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
 - resíduos classe II A – Não inertes;
 - resíduos classe II B – Inertes.

Os resíduos de classe I apresentam característica de periculosidade, por conta de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas de forma que estes apresentam riscos à saúde e ao meio ambiente. São materiais inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e patogênicos. Os resíduos de classe II A podem ter algumas propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já os resíduos de classe II B, são aqueles que, quando submetidos a contato com água destilada e deionizada à temperatura ambiente não apresentam nenhum de seus compostos solubilizados a concentrações superiores aos padrões que definem a potabilidade da água, exceto por seu aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ROVIRIEGO, 2005).

O serviço responsável por coletar esse tipo de resíduo é chamado de coleta regular, e é um dos serviços de limpeza urbana, portanto, é responsabilidade do município fornecê-lo (BRINGHENTI, 2004).

Também é possível classificar o lixo de acordo com sua composição, como aponta Jardim (1995 apud HOLZER, 2012, p. 13):

Seco: papéis, plásticos, metais, tecidos, vidros, madeiras, bituca de cigarro, isopor, lâmpadas, parafina, cerâmicas, porcelana, espumas e cortiças.

Molhado: restos de comida, bagaços de frutas e verduras, legumes, ovos.

Orgânico: cascas e bagaço de frutas, folhas secas e cascas de ovos, restos de alimentos, papéis molhados e engordurados. O material orgânico pode ser utilizado para a compostagem.

Inorgânico: produtos manufaturados como plásticos, vidros, borrachas, tecidos, metais em geral, tecidos, isopor, lâmpadas, velas, parafina, cerâmicas, porcelana, espumas, cortiças.

Rejeitos: lixo de banheiro, lenço de papel, curativos, fraldas descartáveis e absorvente higiênico.

Perigosos: lâmpadas fluorescentes, baterias de celulares, pilhas e embalagens de agrotóxicos. Os materiais perigosos devem ser devolvidos à empresa fornecedora.

É de acordo com estas classificações que se estabelece a melhor maneira de descartar cada tipo de lixo; é preciso utilizar adequadamente os métodos de descarte para evitar os problemas ambientais decorrentes do depósito de lixo. Tais problemas têm se tornado cada vez mais sério, uma vez que a quantidade de lixo produzida pela sociedade aumenta de forma progressiva ao longo do tempo, especialmente nas grandes cidades (HOLZER, 2012).

A escolha de um método adequado de descarte de lixo tem sido um desafio para os governantes por se tratar de um assunto importante e central e ter uma relação íntima com a saúde pública. O lixo que não é descartado de forma adequada acaba se tornando fonte de proliferação de animais como ratos, moscas e baratas, e portanto, fonte de doenças (MATTOS; GRANATTO, 2007). Além disso, a contaminação das águas pelo líquido produzido pelo acúmulo de lixo é mais um fator de preocupação (HOLZER, 2012).

2.4.2 GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O progresso econômico e desenvolvimento industrial aumentaram as quantidades de resíduos gerados, e para se obter o equilíbrio é preciso que estes sejam reintroduzidos no ciclo de produção. O meio ambiente vem nos dando sinais da sua incapacidade de armazenar todos os resíduos gerados e ainda a matéria prima não é inesgotável, desta forma as políticas de gerenciamento dos resíduos tornam-se fundamentais para o melhoramento da qualidade de vida da população e promover o crescimento sustentável das cidades (FRESCA, 2017).

Visto as infinitas possibilidades para o tratamento do RSU e, principalmente da fração orgânica, é de suma importância uma gestão e gerenciamento articulados de modo a se obter o máximo aproveitamento de todos os resíduos produzidos. Tendo em vista este objetivo, o Ministério do Meio Ambiente lançou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

2.4.3 PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PLANARES)

O ponto de partida para a gestão e gerenciamento adequados dos resíduos sólidos foi estabelecido no art. 9º da Lei, que expressa a ordem de prioridade de ações a ser observada (não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos), admitindo a possibilidade de adoção de tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (PNRS, 2022).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) não se confunde com a Lei, visto que representa a estratégia de longo prazo em âmbito nacional para operacionalizar as disposições legais, princípios, objetivos e diretrizes da Política. O Plano tem início com o diagnóstico da situação dos resíduos sólidos no país, seguido de uma proposição de cenários, no qual são contempladas tendências nacionais, internacionais e macroeconômicas. E, com base nas premissas consideradas em tais capítulos iniciais, são propostas as metas, diretrizes, projetos, programas e ações voltadas à consecução dos objetivos da Lei para um horizonte de 20 anos (PNRS, 2022).

Um das principais metas do PNRS é aumentar a recuperação e aproveitamento energético de biogás de RSU. Nesse sentido, foi considerado que 4% da massa total nacional será destinada para digestão anaeróbia e que grande parte dos aterros sanitários terão captação do biogás para aproveitamento energético, ou seja, até 2040, mais de 60% do biogás gerado em processos de digestão anaeróbia e nos aterros sanitários será aproveitado energeticamente, com potencial para abastecer 9,5 milhões de domicílios com eletricidade, uma vez que uma residência consome, em média, 0,293MWh/ano (PNRS, 2022).

Atualmente, os aterros controlados possuem tubos de captação de gás metano, mas o gás CH₄ são queimados em flare, sendo transformado em CO₂, uma vez que este gás possui um potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor (SILVA, 2021)

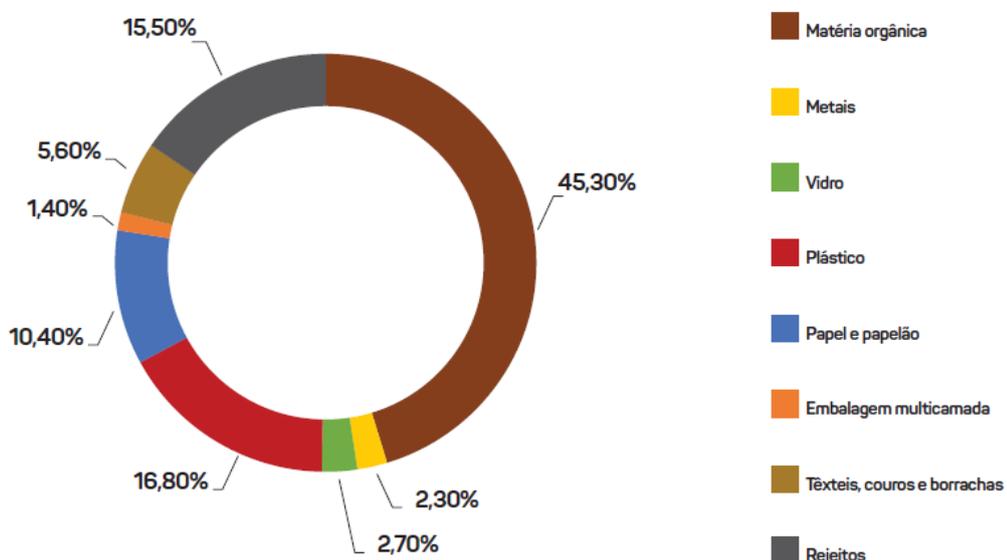
2.4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

Durante o ano de 2022, a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil alcançou um total de 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias, ou seja, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia. A região com maior geração de resíduos continua sendo a Sudeste, com cerca de 111 mil toneladas diárias (aproximadamente 50% da geração do país) e uma média de 450 kg/hab/ano, enquanto a região Centro-Oeste representa

pouco mais de 7% do total gerado, com cerca de 6 milhões de toneladas/ano, a menor dentre as regiões (ABRELPE, 2022).

Uma característica importante dos resíduos sólidos domiciliares gerados no Brasil é a composição: predominantemente de materiais orgânicos, ou seja, substâncias provenientes de animais e vegetais, diferentemente de países desenvolvidos, como Estados Unidos, em que a proporção de materiais descartáveis - como plástico, papel, papelão, vidro e metal - é maior (FRESCA, 2007). Na Figura 2.4.1 pode ser observado a composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil.

Figura 2.4.1 - Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil



Fonte: ABRELPE (2022)

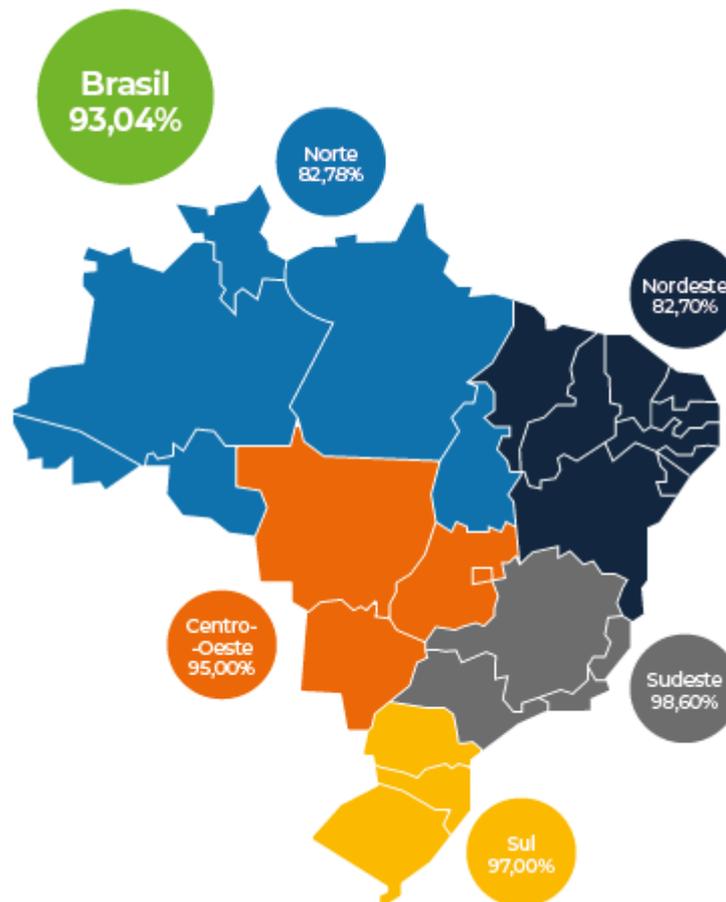
Como pode ser observado na figura 2.4.1, sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras, sendo os principais componentes dos RSU, que corresponde a 45,3%. Os resíduos recicláveis secos somam 33,6%, sendo compostos principalmente pelos plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%). Outros resíduos somam 21,1%, dentre os quais resíduos têxteis, couros e borrachas representam 5,6% e rejeitos, estes compostos principalmente por resíduos sanitários, somam 15,5% (PNRS, 2022).

Sendo o FORSU o substrato que será utilizado para DA, entender as características físicas, químicas e a composição do composto, é de suma importância para se aplicar o pré-tratamento necessário, obtendo assim, a máxima conversão ao produto desejado.

2.5 SISTEMA DE COLETA RSU

Com relação à coleta convencional de RSU, em 2022 o país registrou um total de 76,1 milhões de toneladas coletadas, levando a uma cobertura de 93% (ABRELPE, 2022), porém observa-se uma alta divergência entre regiões, como pode ser observado na Figura 2.5.1.

Figura 2.5.4 - Cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões em 2022



FONTE: ABRELPE (2022)

Em 2021, o número de municípios que apresentaram alguma iniciativa de coleta seletiva foi de 4.183, representando 75,1% do total de municípios do país, quantidade ligeiramente superior àquela verificada em 2020. Importante destacar, porém, que em muitos municípios as atividades de coleta seletiva ainda não abrangem a totalidade da população, podendo ser iniciativas pontuais (ABRELPE, 2022).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT - NBR 12980, 1993) a coleta seletiva é a "coleta que remove os resíduos previamente separados pelo gerador,

tais como: papéis, latas, vidro e outros”. Segundo Vilhena (1999), “estes materiais, após um pré beneficiamento são, então, vendidos às indústrias recicladoras ou aos sucateiros”. A diferença entre elas é que a coleta convencional não exige segregação na fonte dos materiais coletados enquanto a seletiva pode requerer a separação em diversas frações (MASSUKADO, 2004).

2.6 DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A destinação final adequada do RSU contribui para a mitigação de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente pela conversão do metano em CO₂, assim como também, em outros setores, com o uso de material secundário na indústria, uso de combustível derivado de resíduos no setor energético e uso de composto na agricultura, contribuindo para a promoção de novos padrões de tecnologias limpas e de baixas emissões (PNRS, 2022).

Mesmo o CO₂ também sendo um GEE, o metano possui um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o gás carbônico, já que uma molécula de metano possui uma maior eficiência no poder de absorção dos raios infravermelhos. Estes gases impedem que a radiação escape para o espaço, aquecendo assim a superfície do planeta (UNRIC, 2023).

No Brasil, a maior parte dos RSU coletados (61%) continua sendo encaminhada para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada em 2022. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada.

A degradação dos resíduos orgânicos é uma das principais fontes de emissão de metano. Os aterros sanitários são a terceira maior fonte antropogênica mundial de metano (HUMER e LECHNER, 1999; ROSE, MAHLER e IZZO, 2012). Assim, seu tratamento ambientalmente adequado promoverá a redução de emissões de gases de efeito estufa e contribuirá para os esforços nacionais para o combate às mudanças climáticas, bem como para a adaptação aos efeitos adversos da mudança do clima, uma vez que a ocorrência de eventos adversos tende a ser agravada com a presença de lixões, e com os impactos ambientais deles decorrentes, como por exemplo a poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas por meio do chorume, bem como a proliferação de doenças e vetores. Assim, se aumenta a resiliência e a segurança em relação a eventuais eventos climáticos extremos (PNRS, 2022).

2.7 TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com Ferreira e Zanta *apud*. Massukado (2004):

O tratamento dos resíduos são ações corretivas que podem trazer como benefícios a valorização dos resíduos, ganhos ambientais com a redução do uso de recursos naturais e da poluição, geração de emprego e renda e aumento da vida útil de locais de disposição final.

Atualmente, os governos mundiais além de enfrentarem o problema de descarte seguro de resíduos, enfrentam um grande desafio relacionado à disponibilidade de terra para aterros, assim como o aumento contínuo de consumo de energia. Tecnologias de tratamento térmico, como pirólise, gaseificação e incineração podem reduzir significativamente o volume de resíduos e recuperar energia, mas, essas tecnologias não são sempre recomendáveis, uma vez que são mais adequados para carbonáceos secos, caso contrário, uma quantidade significativa de energia é perdida durante a secagem inicial do FORSU (ZHANG et al. 2018).

Os principais tratamentos aplicados ao RSU são: reciclagem, compostagem, incineração, coprocessamento e DA.

2.7.1 RECICLAGEM

A PNRS (2022) define reciclagem como o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa.

No tocante aos índices de reciclagem de alguns materiais específicos que compõem a fração seca dos RSU no Brasil, as latas de alumínio possuem o maior índice de aproveitamento em relação aos demais tipos de materiais como plástico, vidro, papel/papelão, etc (PNRS, 2022). Esse material possui índice elevado devido a fatores, tais como a demanda crescente do setor de embalagens pelo alumínio reciclado, sendo que as latas de bebidas representam quase a totalidade das embalagens de alumínio, juntamente com o curto ciclo de vida das latas, cerca de 60 dias, que torna a matéria prima disponível para um novo ciclo produtivo, com fluxo intenso durante todo o ano (ABAL e ABRALATAS). Além disso, soma-se a economia de energia e recursos naturais, visto que a reciclagem de alumínio reduz em 70% o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (CETEA, 2014).

2.7.2 COMPOSTAGEM

É o processo biológico de decomposição da matéria orgânica contida em restos de origem animal ou vegetal, esse processo tem como resultado final um produto - o composto orgânico - que pode ser aplicado ao solo para melhorar suas características, sem ocasionar riscos ao meio ambiente (CEMPRE - Lixo Municipal, 2000).

Porém, do montante total do FORSU do RSU, que compreende a maior parte, somente 127,5 toneladas são utilizadas em unidade de compostagem (PNRS), sendo que o restante da matéria orgânica foi para aterros ou lixões, o que gera um grande problema. Como alternativa à compostagem, tem-se a DA.

2.7.3 INCINERAÇÃO

O processo de incineração de RSU consiste na submissão dos resíduos a tratamento térmico em ambiente controlado no interior de instalações construídas especificamente para esse propósito. As vantagens desta tecnologia são: reduzir o volume e massa dos resíduos; tornar os resíduos inertes quimicamente; e viabilizar a recuperação de energia, metais e outros materiais (PNRS, 2022).

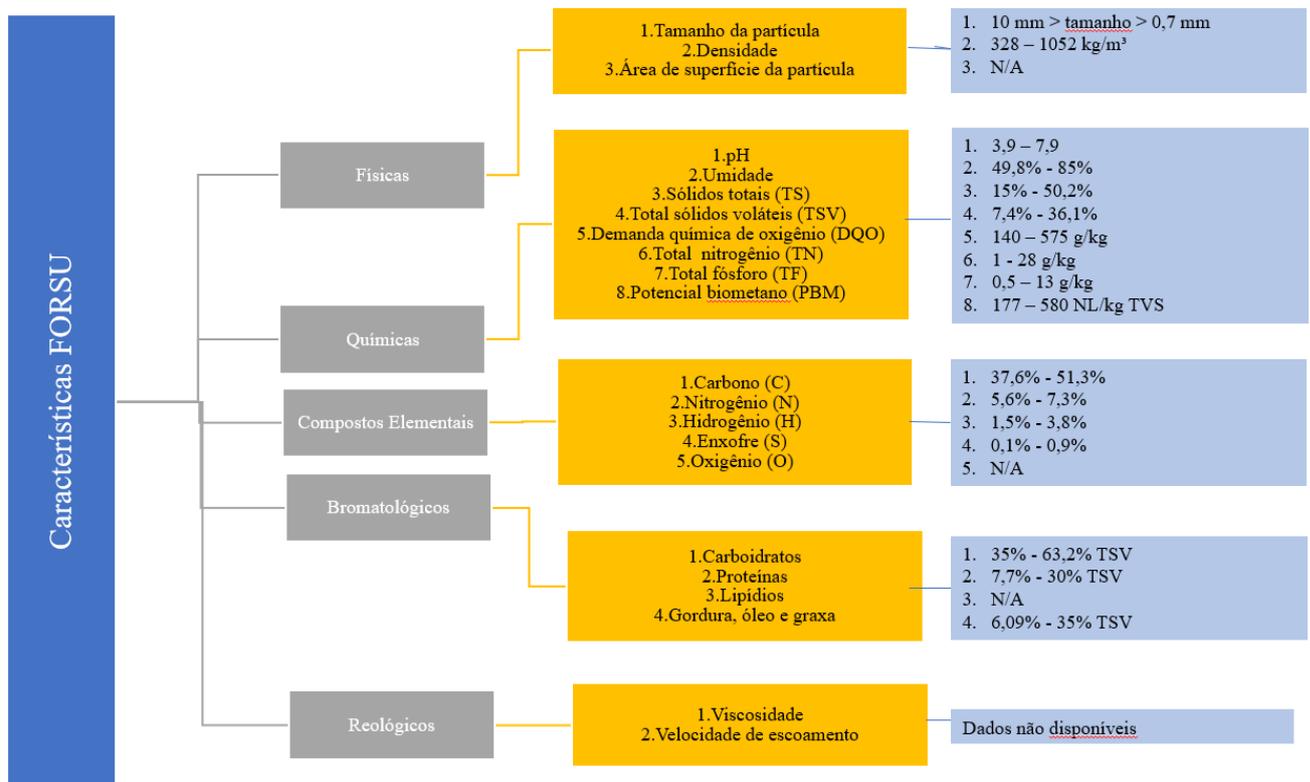
No contexto brasileiro, a incineração não é muito indicada quando comparada à DA, devido ao alto teor de água presente no RSU, o que significa um baixo poder calorífico, além da emissão dos GEE's. principalmente CO₂ (MASSUKADO, 2044).

2.8 CARACTERÍSTICAS DO FORSU

A composição do FORSU depende da região geográfica, densidade populacional, atividades econômicas, hábitos alimentares, estações do ano e sistemas de coleta, sendo que a relevância da estrutura do assentamento e das estações do ano sobre as características dos resíduos vem sendo observadas em vários estudos (SAILER et al. 2021)

Na Figura 2.8.1 pode ser observado as principais características para a máxima eficiência da DA.

Figura 2.8.5 - Caracterização geral do FORSU para o processo de DA



Fonte: Adaptado de ZAMRI (2020)

Quando olha-se para as características físicas, tem-se o tamanho da partícula, densidade e área de superfície da partícula, que são parâmetros extremamente importantes para a DA, visto que, se o tamanho da partícula for muito pequeno, haverá redução do pH (ZAMRI et al., 2020).

O pH precisa ser controlado para que seja assegurada a atividade das bactérias. Uma premissa para a DA é a alta umidade já que o meio não possui oxigênio. Além de que, a umidade é importante para determinação do potencial de biometano (PBM), sólidos totais (TS) e total de sólidos voláteis (TSV)

Como pode ser observado na Figura 2.9.1, o FORSU possui uma grande quantidade de carbono, nitrogênio, fósforo, potássio e outros elementos (ZAMRI et al., 2020). A proporção entre carbono e nitrogênio (C/N) é um parâmetro importante que mede o potencial do substrato para a recuperação de energia.

Devido a esta característica, o FORSU se mostra atrativo para produção de energia.

2.9 VALORIZAÇÃO DO FORSU A PARTIR DA DIGESTÃO ANAEROBIA

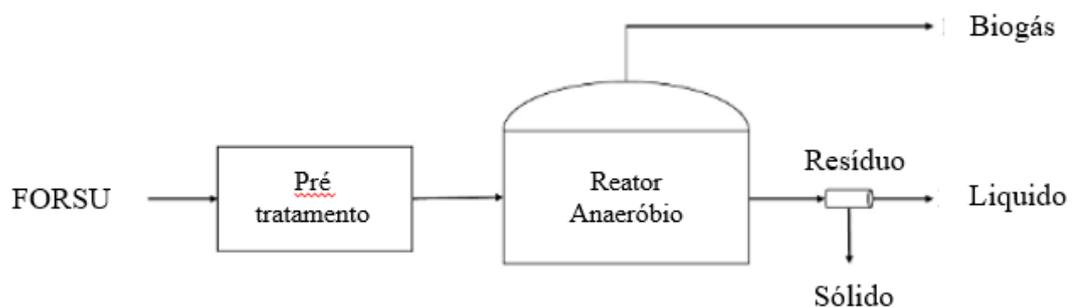
A DA se mostra cada vez mais viável para a valorização da matéria orgânica presente nos RSU, uma vez que a destinação adequada deste tipo de resíduo reduziria o uso de terras, que hoje são destinados para aterros e lixões, se for gerido de forma eficiente, tornar-se-ia uma forma eficiente de disposição final (TYAGI et al., 2018)

No processo de digestão anaeróbia ocorre a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando, além do composto orgânico, o biogás. O gás gerado em tais processos podem ser aproveitado para a geração de calor, energia ou combustível veicular. A Política Nacional de Biocombustíveis (RENOVABIO), instituída pela Lei nº 13.576/2017, ressalta o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional (PNRS, 2022).

A Biogás e a ABRELPE estimam que, em 2018, o Brasil captou 4,2 bilhões de Nm³ de biogás. Porém, apenas 9% deste potencial foi utilizado para geração de eletricidade (751 GWh) e menos de 2% produziu 35 milhões de Nm³ de biometano. Porém, se toda a matéria orgânica gerada em 2018 tivesse sido destinada para recuperação de biometano, o potencial do país poderia abastecer 49 milhões de residências.

Para a degradação de biomassa florestal, resíduos agrícolas, plásticos e pneus, a gaseificação e a pirólise são os tratamentos mais utilizados (KUMAR, A.; SAMADDER, S.R., 2017). Incineração pode ser usada para a recuperação de energia em forma de calor e energia, porém não é possível recuperar alguns tipos de nutrientes, como o fósforo e nitrogênio (MOHAMMADI, A., 2019). Durante a incineração, o nitrogênio pode ser perdido para a atmosfera em forma de N₂, enquanto o fósforo, o qual fica retido nas cinzas, não é reciclado (MOHAMMADI, A., 2019). Como alternativa, a digestão anaeróbia passou a ser utilizada de forma a se obter uma recuperação energética em forma de biogás e a recuperação do resíduo da digestão como fertilizante para o solo (DI MARIA et al. 2018). Na Figura 1.1 pode-se observar um simples diagrama do processo de DA.

Figura 2.9.1 - Diagrama esquemático da digestão anaeróbia



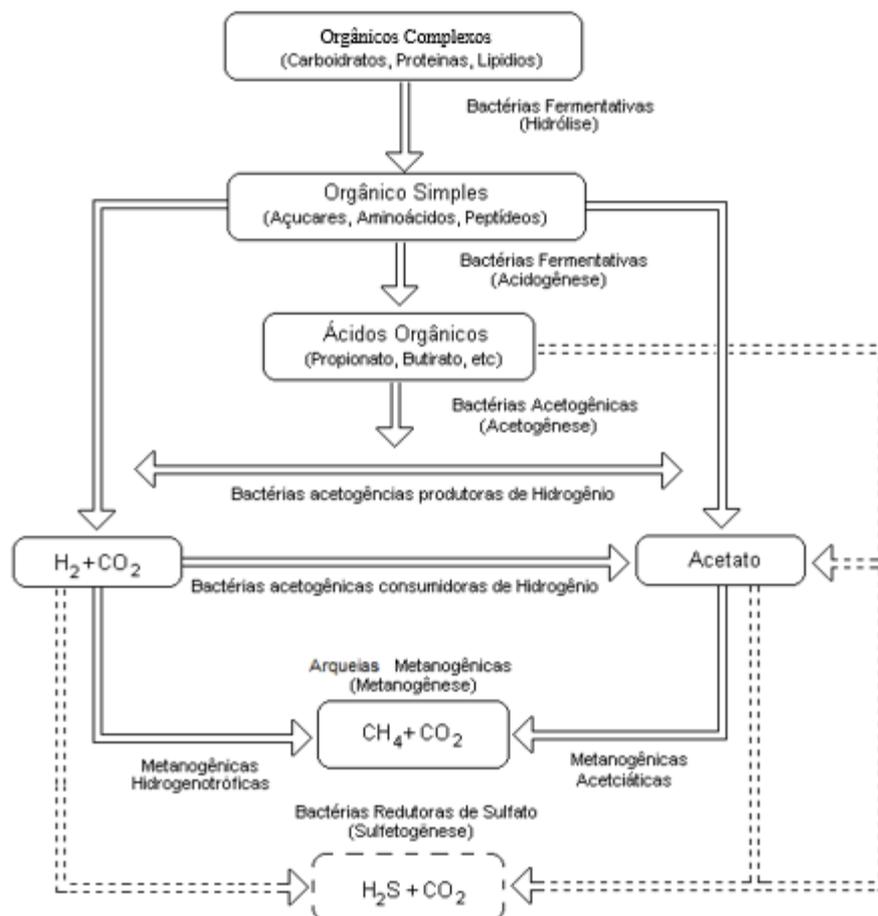
Fonte: Adaptado de LOGAN (2018)

O FORSU é um substrato ideal para a digestão anaeróbia devido ao seu alto teor de água, que são essências para a ação das bactérias, biodegradabilidade, alta concentração de carbono e nitrogênio e alto potencial de produção de metano (Lu et al., 2021).

2.10 ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE FORSU

A digestão anaeróbica é um processo microbiano complexo que envolve uma série de reações metabólicas para a quebra de matéria orgânica em biogás e fertilizante orgânico (KUMAR, 2020). O processo é dividido em 4 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese e pode ser observado na Figura 2.10.1.

Figura 2.10.1 - Etapas do processo de digestão anaeróbia



Fonte: adaptado de CHERNICHARO (1997)

2.8.1 HIDRÓLISE

Etapa na qual a matéria orgânica complexa insolúvel, tal como proteínas, lipídios e carboidratos, é solubilizada e convertida em substâncias menos complexas, formando respectivamente, aminoácidos, ácidos graxos e açúcares solúveis, através da ação de exo-enzimas de bactérias hidrolíticas fermentativas (DIAS, 2014).

As reações de hidrólise acontecem em duas partes, na primeira parte as bactérias cobrem as superfícies das partículas dos sólidos orgânicos e essas bactérias liberam enzimas e produzem monômeros que podem ser usados por elas mesmas ou por outras bactérias. A segunda parte é a degradação das partículas a uma velocidade constante (CHRISTY, 2013).

A taxa e a duração da hidrólise dependem também da composição do substrato, ou seja, da quantidade de matéria orgânica (que são materiais à base de carbono) no substrato utilizado na digestão anaeróbia. Essas fontes de carbono podem estar disponíveis para serem biodegradáveis, isto é, disponíveis para atividades enzimáticas, como as enzimas e podem não estar disponíveis, como lignina e queratina (CARLSSON; LAGERKVIST; MORGAN-SAGASTUME, 2012).

2.8.2 ACIDOGÊNESE

Etapa na qual as bactérias fermentativas acidogênicas utilizam os componentes orgânicos solúveis, incluindo os produtos da hidrólise, metabolizando-os e convertendo-os em ácidos orgânicos, álcoois, gás hidrogênio (H₂) e gás carbônico (CO₂), que são posteriormente excretados para fora da célula (DIAS, 2014).

Como a formação de metano é facilitada pelos percursos da degradação de ácidos acético e butírico, a proporção de ácidos graxos voláteis é importante no estágio da acidogênese (CHRISTY, 2013).

A concentração de hidrogênio formado nesse estágio afeta diretamente o produto final. Caso essa concentração se torne muito elevada, a quantidade de compostos reduzidos formada diminui, sendo que esses são os caminhos mais efetivos para a formação do gás metano (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015).

2.8.3 ACIDOGÊNESE

Nesta etapa os produtos do metabolismo das bactérias fermentativas acidogênicas são convertidos em ácido acético, gás hidrogênio e dióxido de carbono através da ação de bactérias

acetogênicas produtoras de hidrogênio e de bactérias homoacetogênicas. A fermentação acidogênica tem um papel importante na conversão de matéria orgânica em energia, na forma de metano, pois o acetato é o principal precursor de metano, portanto, para que a produção de energia venha a ser economicamente viável, a conversão de substrato a acetato deve ser rápida. Caso essa conversão não ocorra, haverá acúmulo dos produtos da hidrólise e da fermentação ácida no reator, não ocorrendo metanogênese (DIAS, 2004).

2.8.4 METANOGENESE

Esta etapa é caracterizada pela ação de arqueas metanogênicas acetoclásticas, que formam metano e material celular a partir do ácido acético, e arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que transformam hidrogênio e dióxido de carbono em gás metano. Aproximadamente 70% da produção de metano é proveniente da redução de acetato e 30% da redução de hidrogênio e gás carbônico (DIAS, 2004).

2.10 TÉCNICAS DE PRÉ-TRATAMENTO PARA O FORSU

O pré-tratamento do substrato antes da DA geralmente aumenta a taxa de decomposição da fração orgânica que resulta em maior rendimento de biocombustíveis e produtos finais mais estabilizados. Estudos vem mostrando que as principais técnicas de pré-tratamento que existem atualmente são: químico, físico, biológico e combinado (ABRAHAM et al., 2019).

Na Tabela 2.10.1 é possível identificar os principais tratamentos, assim como os componentes utilizados e os principais parâmetros para obtenção da máxima eficiência no processo. Devido à alta parcela composta por resíduos alimentares nos FORSU, foram consideradas algumas técnicas de pré-tratamento destes resíduos.

Tabela 1 - Principais métodos e parâmetros do pré-tratamento de resíduos orgânicos

Tipo	Método	Substrato	Mecanismo	Condições do pré-tratamento	Efeitos do pré-tratamento	Vantagens	Desvantagens	Referência
Químico	Ácido	Resíduos Alimentares	Quebra das ligações de Van der Waals, hidrogênio e covalente que estão unidas na biomassa	Ácido: HCl 3M; Temperatura: 25°C; Tempo: 30 min Ácido: H ₂ SO ₄ 98% (m/m) com o resíduo alimentar até atingir pH de 1; Temperatura: 20°C; Tempo: 24 horas	5-130% de aumento na produção do metano 62,8% de aumento na produção de H ₂	- Aumento na produção do biogás; - Alta estabilidade térmica; - Solubilização efetiva da celulose, hemicelulose e lignina.	- Processo de alto custo; - Alta complexidade; - Formação de inibidores da DA.	KIM et al. 2013 ORTIGUEIRA et al. 2019
	Alcalino	Resíduos Alimentares	Mudança do pH do substrato, aumentando a degradação de compostos complexos	Composto utilizado: 1% CaO m/m; Temperatura: 4°C; Pressão: ambiente; Tempo: 24 horas.	8% de aumento na produção de H ₂	- Aumento na produção do biogás; - CaO é mais barato que outros métodos de pré-tratamento alcalino	- Formação de íons de Na ⁺ durante o processo de pré-tratamento	LINYI et al. 2020; ELGARAHY et al. 2023
	Líquido iônico	Restos de fruta e palma	Ajuda na separação da celulose e lignina	Composto utilizado: 3 g de FORSU e 97g de 1 etil-3-mettilimidazon acetato Temperatura: 160°C ; Tempo: 4 horas. Método: Aquecido e agitado em banho de óleo	Aumento da produção de metano em 33% (frutas)	- Redução dos efeitos colaterais dos compostos que causam inibição da DA	- Altos custos relacionados à altas temperaturas do processo	MEHREZ et al. 2022; ELGARAHY et al. 2023

	Organosolv	Casca de batata	Solubilização da lignina e celulose	Composto utilizado: 50% etanol em água (v/v), 1% m/m H ₂ SO ₄ (baseado no substrato) e proporção 1:10 (m/m - fração sólido/líquido); Temperatura: 120°C ; Pressão: alta pressão Tempo: 1 hora Método: reator de alta pressão (SS304)	Aumento de 60% da produção de metano	- Alta qualidade da lignina produzida	- A remoção do solvente é necessária antes da fermentação	SOLTANINEJAD et al. 2021
	Ozonização	Resíduos Alimentares	Solubilização da lignina e celulose	0,168-1,008gO ₃ /L por 10-60 min	Aumento de 52% da produção de metano	- Não possui resíduos oxidantes na fração orgânica; - Não aumenta a concentração de sais no reator	- Alta demanda de energia; - Grande quantidade de água utilizada	ARIUNBAATAR et al. 2014
Físico	Água quente líquida	Casca de arroz	Aumento da digestão enzimática removendo a hemicelulose e lignina	Temperatura: 170°-230°C; Pressão: 2-5 Mpa; Tempo: 10 min	-	- Baixa formação de inibidores; - Não ocorre a adição de produtos químicos; - Extração de hemicelulose maior quando comparado a explosão a vapor	- Baixa remoção de lignina; - Recuperação da parte seca; - Afeta o rendimento líquido da produção de biogás	NAIK et al. 2021; STANLEY et al. 2022
	Extrusão	Resíduos Alimentares	Redução dos tamanhos das partículas de FORSU	Triturador comercial	tamanho das partículas <= 30mm	30% no aumento da produção de metano	- Energia para o uso do equipamento	PARRA-OROBIO et al. 2021

	Ultrassônico	Resíduos Alimentares	Redução dos tamanhos das partículas de FORSU	Range de potência: 20-100 W Tempo: 15, 30, 45 min	Redução de 45 min na DA	- Seguro e ambientalmente correto	Alta quantidade de energia requerida que pode ser tornar inviável em escala industrial	ELGARAHY et al. 2023; MENON et al. 2016
	Microondas	Resíduos Alimentares com lama de águas residuárias	Aumento da solubilização de biopolímeros	200W e 400W por 15 min à 20°C	aumento da produção de H ₂ em 62,8%	- Aumento da taxa da fermentação e degradação	- Pode ocorrer a produção de compostos fenólicos, que afetam a DA	ORTIGUEIR A et al. 2019; GULSEN AKBAY et al, 2021
	Térmico	Resíduos Alimentares	Quebra ou decomposição da estrutura rígida do substrato	Temperatura: 120°C ; Tempo: 30 min Método: autoclave	Aumento da produção de metano em 77%	- Aumenta a disponibilidade das substâncias orgânicas solúveis	- Custos alto de operação; - Mudanças físicas e químicas nos compostos; - Altas temperaturas podem causar inibição na produção de hidrogênio.	NARAN et al., 2016
Biológico	Fungos	Resíduos Alimentares	Quebra de moléculas complexas de carboidratos em	100 rpm Temperatura: 60°C; Tempo: 24 horas	Aumento da produção de metano em 34%	- Seguro e ambientalmente correto	- Alto custo de produção; - Pré-tratamento muito demorado.	ELGARAHY et al. 2023; WEI, WANG, 2016
	Enzimático	Resíduos Alimentares	monômeros e proteínas em aminoácidos	400U/g de alpha-amilase;pH = 6;Temperatura = 50°CTempo = 24 horas	-	- Seguro e ambientalmente correto; - Livre de inibidores e substâncias tóxicas		ZHANG et al. 2021
Combinado	Termo - químico	Resíduos Alimentares	-	0,4M NaOH Temperatura: 120°C ; Tempo: 30 min Método: autoclave	Aumento da produção de metano em 33%	- Evita as desvantagens dos métodos individuais	- Difícil otimização de dois métodos diferentes	NARAN et al., 2016

Bioquímico	Resíduos Alimentares	-	10M HCl pH =2 Temperatura: 120°C ; Tempo: 24 horas (1 bar) Método: autoclave Pré-tratamento térmico de 30,60 e 120 min; Temperatura: 120°C; 0,1% (v/v) nível de enzima	Aumento da produção de metano em 24%	MA et al. 2011
					KIM et al. 2005

Na tabela, observa-se os principais efeitos que cada pré-tratamento tem sobre a produção de algum biocombustível. Olhando para o tratamento químico, método ácido, foram apresentados a utilização de 2 ácidos mais comumente usados, HCl e H₂SO₄, sendo que a principal vantagem é a solubilização efetiva da hemicelulose e celulose, e a desvantagem é que, dependendo da concentração de ácido que será utilizada, haverá formação de inibidores. O pH tem que ser observado, visto que este é um dos parâmetros que afetam diretamente a DA. Normalmente, para retornar à um pH ideal, é utilizado a adição de alguma base.

O pré-tratamento físico normalmente ocorre em paralelo com algum outro tipo de pré tratamento, uma vez que, uma das suas principais vantagens é a diminuição do tamanho da partícula, aumento área de interface com o substrato. Como é demandado o uso de equipamentos, utilização de água quente ou vapor, ocorre um alto consumo de energia elétrica.

O tratamento biológico é o mais favorável quando se trata de meio ambiente, além de ser extremamente efetivo no rompimento da hemicelulose não ocorre a produção de inibidores, porém é extremamente caro e demanda muito tempo de repouso. Na Tabela 2.10.1 pode-se observar o pré-tratamento com enzimas e fungos.

De uma forma resumida, todos os pré-tratamento possui prós e contras, portanto, é preciso uma análise físico-química do substrato, para se ter a melhor escolha de pré-tratamento, conseqüentemente obtendo uma maior eficiência da DA e uma maior taxa na produção de biocombustível.

2.10.1 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO

Os tratamentos existentes dentro do tratamento químico são: ácido, alcalino, líquido iônico, solventes orgânicos (organosolv) e ozonização. O processo de pré-tratamento químico é conhecido pela sua facilidade em decompor a matéria orgânica e é um dos métodos mais utilizados, principalmente por trazer resultados relevantes e um custo atrativo (SOLOWSKI et al. 2020).

2.10.1.2 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - SOLVENTE ÁCIDOS

Neste tipo de pré-tratamento, o solvente é responsável pela quebra de materiais complexos, fazendo com que ocorra a diminuição do nível de energia e que ocorra o aumento da taxa de reação da hidrólise (CHONG et al., 2021).

Pode ser usado ácidos fortes ou fracos, sendo que os mais comuns são ácidos clorídricos (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) e também ácido cítrico (C₆H₈O₆). O pré-tratamento com ácido sulfúrico precisa ser extremamente controlado, uma vez que pode ocorrer a formação de hidroxila furfural, responsável pela formação de compostos que podem ocasionar a inibição dos microrganismos do meio (CHONG et al. 2021).

Segundo ENRICJEASA (2023), HCl e H₂SO₄ são os ácidos mais utilizados no pré-tratamento de RA, sendo que a concentração destes nos experimentos revisados H₂SO₄ variou entre 0,1-1 M, enquanto a de HCl foi 3M. A variação de pH foi entre 1-4, sendo que a pH abaixo dos citados, são evitados para evitar a formação de compostos tóxicos para o meio (ELGARAHY et al., 2023).

ORTIGUEIRA (2019) reportou que utilizou ácido sulfúrico para o pré-tratamento de resíduos alimentares (RA). Foi adicionado H₂SO₄ (98% m/m) ao substrato até se obter o pH = 1,0, a amostra foi incubada por 24 horas em uma temperatura de 24°C. O resultado foi a aceleração da produção de H₂ em 62,8%.

ZHANG (2021), utilizou HCl para realizar o pré-tratamento, o objetivo também foi adicionar ácido até alcançar o pH = 1,0, sendo que a amostra ficou nestes parâmetros por 24 horas. O resultado deste experimento foi o aumento da produção de butanol.

2.10.1.2 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - SOLVENTES ALCALINOS

O tratamento alcalino tem como principal objetivo fazer a mudança do pH do substrato. Este tipo de pré-tratamento, tem como principal característica a quebra de moléculas complexas em monômeros simples, sendo NaOH e KOH as bases mais usadas (LINYI et al., 2020).

Um dos maiores desafios deste pré-tratamento é encontrar a concentração ideal de solvente usado, uma vez que concentrações excessivas de Na⁺ e K⁺ pode inibir o crescimento de microrganismos no meio. De acordo com ELGARAHY (2023), a grande maioria dos experimentos já realizados, consistem em usar NaOH com pH entre 8-12 em diferentes exposições de tempo de temperatura.

Shetty et al (2017) realizou diversos experimentos, utilizando arroz branco como substrato, variando a concentração de NaOH, tempo e temperatura, contudo as condições que retornaram a maior taxa de produção de metano, foi a 1% NaOH (m/v) em repouso por 3 horas à temperatura ambiente. Este experimento retornou uma taxa de produção 34% maior comparada com a qual o substrato não havia sido tratado.

LINYI (2020) realizou experimentos com 3 diferentes compostos alcalinos, KOH, NaOH e CaO usando 60g de RA. As concentrações testadas foram de 1%, 2% e 3% (m/m), sendo que todas as amostras ficaram nestas condições por 24 horas à temperatura de 4°C. A amostra que obteve a maior taxa de obtenção de metano foi a de 1% de CaO.

2.10.1.3 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - LÍQUIDO IÔNICO

O pré-tratamento foi uma proposta que surgiu inicialmente como uma proposta ao uso de solventes ácidos, o maior ganho deste pré-tratamento é poder realizar a operação de pré-tratamento em altas temperaturas usando água com sais como meio solvente (CHONG et al., 2021). O líquido iônico auxilia a dissociação da celulose da hemicelulose, sendo que isto ocorre pela diferença do ponto de fusão (ELGARAHY et al., 2023).

Os líquidos iônicos são capazes de aumentar a digestibilidade enzimática e o rendimento do biocombustível, utilizando produtos químicos com baixa toxicidade (ALLISON et al. 2016). O maior ponto de atenção deste pré-tratamento é a quantidade de energia requerida.

Mehrez (2022) utilizou frutas e resíduos de palmeira para identificar o potencial deste pré tratamento. Em um frasco adicionou-se 3 g do substrato e 97g de acetato 1-etil-3-metillimidazolio, usado como líquido iônico, obtendo uma proporção 3% (m/m), então o frasco foi colocada em um banho de óleo, onde a temperatura era de 160°C por 4 horas.

2.10.1.4 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - ORGANOSOLV

Organosolv é uma forma abreviada de ser dizer solvente orgânicos, os quais podem ser: etanol, metanol, etilenoglicol, acetona, álcool tetraidro furfurílico, entre outros. O processo é responsável por solubilizar a lignina e a hemicelulose do substrato. É válido ressaltar que é necessário um catalisador para este processo, que pode ser tanto um ácido, como uma base (ZHAO, 2009).

Utilizando a casca de batata como substrato, foi adicionado etanol como solvente, 50% de etanol em água (v/v), como catalizador foi adicionado H₂SO₄ (1% m/m) e proporção de 1:10 sólido/líquido, durante 1 hora esta solução foi mantida em um reator à 120°C. Quando usada na DA, o substrato aumentou a taxa de produção do metano em 60% (SOLTANINEJAD et al. 2021).

2.10.1.4 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO - OZONIZAÇÃO

A ozonólise é um pré-tratamento na qual onde o O₃ é utilizado. O ozônio reage preferencialmente com a lignina, sendo assim, ocorre a destruição e deslignificação da biomassa (TRAVAINI et al., 2015).

Baseado em diversos experimentos, Ariunbaatar (2014) sugere que o pré-tratamento, que tinha como substrato o RA, seja conduzido com pouco ozônio, uma vez que o excesso pode fazer com que ocorra a perda de açúcares fermentáveis. Em seus estudos, quando utilizado este pré tratamento, uma variação de 0,168 - 1,008gO₃, em intervalos de tempo de 10-60 min, foi testada.

2.10.2 PRÉ-TRATAMENTO FÍSICO

Os pré tratamentos físicos são compostos por moagem, extrusão, microondas e radiação ultrassônica, entre outros, sendo que normalmente são categorizadas em tratamentos mecânicos e térmicos (GALLEGO - GARCIA, et al. 2022). Estes métodos são conhecidos por diminuir a tamanho do substrato e são criticados por demandar uma grande quantidade de energia (MANKAR et al., 2021).

2.10.2.1 ÁGUA QUENTE LIQUIDA

Neste pré-tratamento, ocorre a remoção de compostos complexos, fazendo com que a celulose se torne mais disponível à celulase, que é responsável pela hidrólise enzimática da celulose, ou seja, este pré-tratamento aumenta a digestibilidade enzimática (KUMAR et.al 2020). É necessário que água seja aquecida a temperaturas superiores à 200°C, portanto é possível que ocorra a formação de compostos indesejáveis, como, fenólicos e derivados de furano (ABRAHAM et al., 2019).

Normalmente, os parâmetros para este tratamento são: temperaturas entre 170 -230 °C, pressão entre 2 - 5 MPa, em um intervalo de tempo de 10 minutos (NAIK et al. 2021).

De acordo com RAJPUT et al. (2018), em um pré-tratamento onde se usou palha de trigo como substrato, a temperatura ideal observada foi 180°C, o qual resultou em um aumento de 53% na taxa de produção de metano.

2.10.2.2 EXTRUSÃO

No método de extrusão, o material é colocado em uma extrusora, enquanto esta passa pelo equipamento, ocorre vários tipos de tratamentos, como o aquecimento, mistura, e uma repentina queda de pressão, sendo que com esta queda de pressão, ocorre liberação de água intracelular do substrato, a melhora da DA (ZHENG et al., 2014). Segundo Pilarski (2016), a taxa de produção de metano, após a extrusão, tendo como substrato a palha de milho, aumento em 35%.

2.10.2.3 ULTRASSÔNICO

No método de tratamento ultrassônico, ondas sonoras são utilizadas para solubilizar a matéria orgânica em formas mais simples (PARRA-OROBIO et al. 2021). Este é considerado um pré-tratamento físico atraente com um alto potencial para o processamento de resíduos lignocelulósicos e materiais residuais, tanto sozinho, quanto em combinação com outros métodos novos e convencionais, pode aumentar a eficiência do pré-tratamento e promover o processo de intensificação durante a conversão de biomassa (GALLEGO-GARCIA et al. 2022).

A maioria dos pré-tratamento ultra sônicos são conduzidos a uma frequência abaixo de 50Hz para uma maior eficiência, o que gera um alto consumo de energia, tornando o método não atrativo quando se olha de uma perspectiva industrial (GALLEGO-GARCIA et al. 2022).

Menon et al (2016) utilizou o método para avaliar a eficiência em resíduos alimentares. Foi usada uma frequência de 20-100W, em tempo variando em 15, 30 e 45 min, no final do experimento, quando usou-se a solução DA, observou-se uma redução de 45 minutos no processo.

2.10.2.4 MICROONDAS

Durante o pré-tratamento de microondas, a energia é direcionada diretamente à biomassa para permitir seu rápido aquecimento com um gradiente térmico mínimo, sendo assim, o tempo e energia gasta no pré-tratamento são menores (ABRAHAM et al.).

ORTIGUEIRA et al (2019) reportou que, em seus experimentos, tendo RA e águas residuárias como substrato, a produção de H₂ aumentou em 62,8%. Já Jackowiak et al.(2011) usou grama substrato, e observou nenhum aumento da taxa de produção de biogás, porém o tempo da DA foi menor.

2.10.2.4 TÉRMICO

Neste tipo de pré-tratamento, a temperatura é o parâmetro chave que irá acelerar a solubilização do carbono em monômeros (CHONG et al., 2021). O calor é responsável pela quebra ou decomposição das estruturas rígidas dos RA (RAZAGHI et al., 2016). Um amplo range de temperaturas pode melhorar a biodisponibilidade de substâncias orgânicas solúveis (ELGARAHY et al., 2023).

As temperaturas usadas na literatura vieram entre 50°C - 220 °C, durante um tempo que variou de 5-48 min (ELGARAHY et al., 2023), porém este processo pode alterar as estrutura físicas e químicas de moléculas (CHONG et al.).

NARAN et al 2016 realizou um experimento no qual utilizou RA como substrato. A amostra foi colocada durante 30 minuto à temperatura de 120°C em uma autoclave, segundo o estudo, o aumento da produção de metano foi de 77%.

2.10.3 PRÉ-TRATAMENTO BIOLÓGICO

Esta técnica de pré-tratamento envolve a utilização de enzimas, como *protease*, *amylase*, *Viscozyme*, *Flavourzyme*, *S. cerevisiae KA4*, e *Palatase*, e fungos, como *Aspergillus awamori*, *Aspergillus oryzae*, e *Monascus* (ELGARAHY et al., 2023). Ele é considerado ambientalmente correto uma vez que não prejudica e nem impacta o meio ambiente.

O objetivo central deste pré-tratamento por enzimas é a degradação de proteínas e carboidratos em aminoácidos e mono-acucares, enquanto os fungos são responsáveis pela quebra dos compostos complexos (ELGARAHY et al., 2023).

ZHANG et al. (2021) observou que o tratamento enzimático pode aumentar a produção de butanol de 0,1 g/L para 1,5 g/L, utilizando a alpha amilase como enzima. O experimento foi mantido por 24 horas em uma temperatura de 50°C.

WEI e WANG (2013) realizaram experimento com fungos, e foi reportado que a produção de metano aumentou em 34%. As condições do pré-tratamento podem ser visualizadas na Tabela 2.10.1.

A maior desvantagem do pré-tratamento biológico é o custo relacionado as enzimas e fungos necessários para o processo (ABRAHAM, 2020) .

2.10.4 PRÉ-TRATAMENTO COMBINADO

Este tipo de pré-tratamento consiste em utilizar 2 ou mais técnicas citadas acima no substrato. O maior desafio desta técnica é otimizar a combinação dos diferentes métodos de pré-tratamento (ELGARAHY et al., 2023).

Atualmente, este método já é amplamente utilizado, principalmente quando falamos da pré-tratamento físico, já que, como mencionado, para uma maior ação dos microorganismos, é necessária uma superfície de contato, uma vez que, por mais que tenha desvantagens, é possível explorar mais as partes positivas de cada método.

Na Tabela 2.10.1 pode-se observar alguns parâmetros onde este método foi utilizado como pré-tratamento, tais como, termoquímico, que utiliza a temperatura e um composto químico, e bioquímico, que utilizou enzima e tratamento térmico.

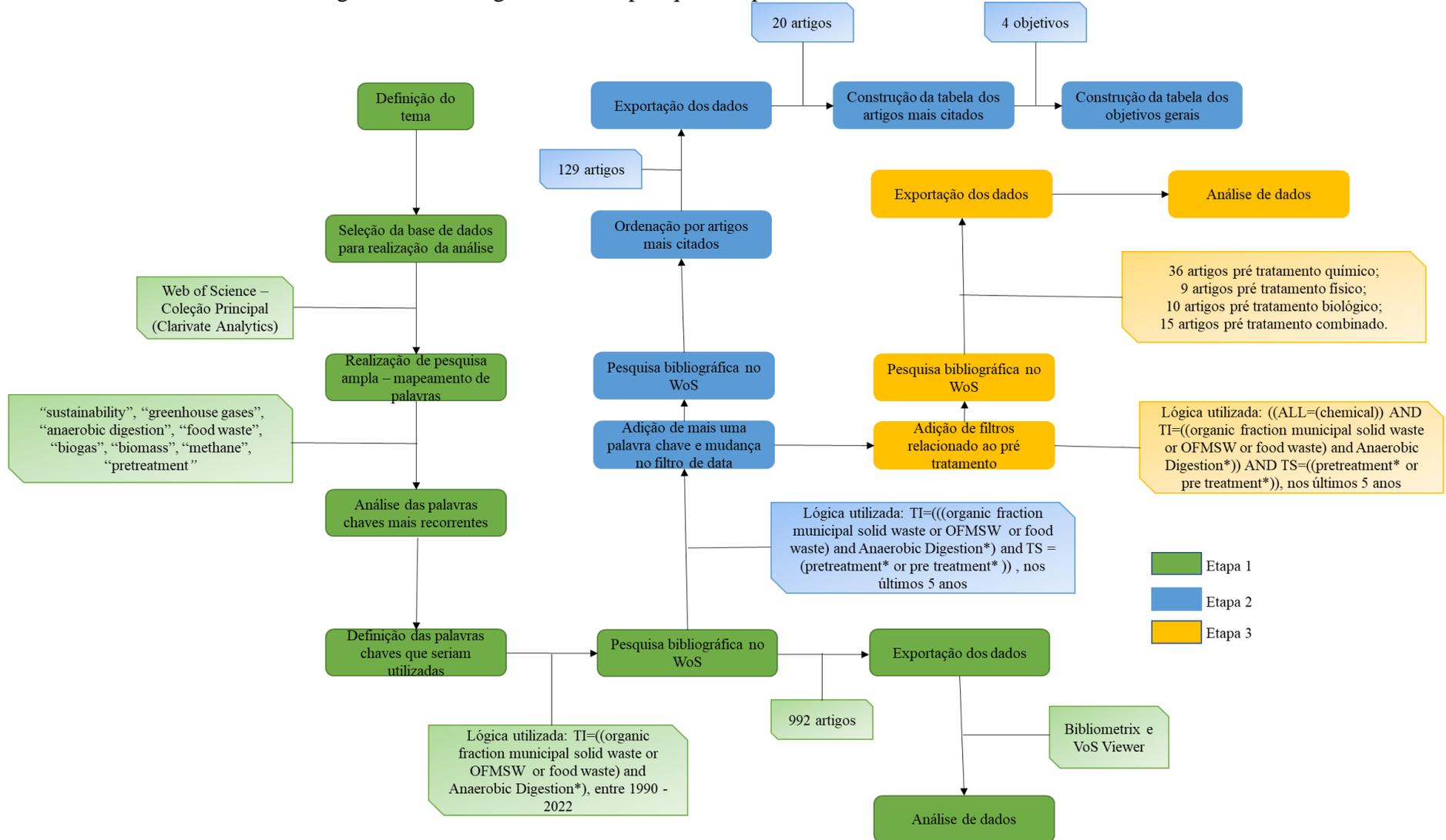
Dependendo do método de pré-tratamento escolhido, uma porção específica da energia extra obtida com o pré-tratamento será consumido na forma de energia limpa (eletricidade) durante o pré-tratamento. Vários fatores desempenham um papel crucial na futura aplicação de FORSU/RA como substrato principal para a DA. Esses fatores incluem as características do substrato, disponibilidade da matéria-prima, seleção de um método de pré-tratamento adequado para esse tipo de matéria-prima, recuperação de energia e aplicação uma combinação de diferentes métodos de pré-tratamento para maximizar a recuperação de energia enquanto modera o custo de processos e energia requisitos (HASHEMI et al., 2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para elucidar progressos e avanços científicos relacionados à etapa de pré-tratamentos mais promissores e eficientes para a DA a partir do FORSU, foi realizada a análise bibliométrica. Esta análise é uma ferramenta na qual utiliza-se dados quantitativos e estatísticos para mensurar a tendência das pesquisas nos campos específicos, sendo que esta vem sendo largamente utilizada para comparar a produção científica (Ren et al. 2018).

O levantamento foi realizado a partir da base de Thomson Reuters ISI Web of Knowledge (Web of Science), sendo que a maneira como este foi realizado, pode ser observada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma das etapas que compõem a análise bibliométrica realizada



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

3.1 ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICA

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa mais ampla, sendo esta foi apresentada na Figura 3.1, com a cor verde. O objetivo inicial era entender quais as palavras eram mais utilizadas, visando uma maior assertividade para a base de dados que seria analisada. Palavras como: “*sustainability*”, “*greenhouse gases*”, “*anaerobic digestion*”, “*food waste*”, “*biogas*”, “*biomass*”, “*methane*”, “*pretreatment*”, foram uma das analisadas.

Com as palavras chaves já definidas, realizou-se uma busca avançada no WoS. Com o título do artigo contendo as palavras chaves ((*organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste*) and Anaerobic Digestion*). Para este momento, o filtro com as palavras “pre-treatment” ou “pretreatment “, não foi utilizado, uma vez que esta palavra reduzia a quantidade de artigos em aproximadamente 88%.

O intervalo de tempo utilizado foi de 01/01/1990 - 31/12/2022, sendo que nenhum outro filtro, como: tipos de documentos, editoras, idioma, entre outros. Nesta etapa foram obtidos um total de 992 artigos. Os softwares utilizados foram Bibliometrix e VoSviewer (AMPESE et al., 2022), que avaliaram a evolução das publicações ao longo do período, clusters de palavras chaves e jornais, países, top 10 autores que mais possuíam publicações e citações, autores mais produtivos e área de pesquisa.

3.2 ANÁLISES DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICA MAIS CITADAS

Com o intuito de afunilar ainda mais o tema e aprofundar os estudos, o filtro topic (TS), TS = (pretreatment* or pre treatment*) foi aplicado, sendo que TS fazia referência aos tópicos que foram abordados no artigo. Ou seja, obrigatoriamente, o WoS retornaria títulos que possuíam “(*organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste*) and Anaerobic Digestion)” no título e algum tópico de “pretreatment”. O filtro de data utilizado foi de 5 anos atrás (2019-2023), o qual retornou um total de 129 artigos. Estes artigos foram ordenados pelos mais citados, sendo que os primeiros 20 artigos foram apresentados na Tabela 2. As citações é um dos indicadores mais importante no campo de pesquisa, uma vez que mostra os tópicos e autores mais influentes, estudados e produtivos (AMPESE, et al. 2021).

Além disso, foram identificados os principais aspectos abordados neste tema com o objetivo de estudo dos artigos analisado, sendo que estes foram divididos em 4 grupos: A, B, C e D.

- A – Avaliação dos principais fatores que impactaram a DA;
- B – Pré-tratamentos para uma maior eficiência na obtenção de biocombustíveis;
- C – Avaliação da DA a partir de diferentes parâmetros de operação;
- D – Estudo de reações cinéticas da DA.

3.3 ANÁLISES DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICA POR TIPOS DE PRÉ TRATAMENTO

Por fim, para entender as perspectivas e quais os tipos de pré tratamentos que vinham sendo utilizados, utilizou-se o filtro TI=((organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste) and Anaerobic Digestion*) and TS = ((pretreatment* or pre treatment* and chemical)), sendo que a palavra “*chemical*” foi substituída por “*physical*”, “*biological*” e “combined”. Em todas as buscas, o filtro “de nos últimos 5 anos”, estava sendo aplicado.

- 1º busca – ((ALL=(chemical)) AND TI=((organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste) and Anaerobic Digestion*)) AND TS=((pretreatment* or pre treatment*)), retornando 36 artigos;
- 2º busca - ((ALL=(physical)) AND TI=((organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste) and Anaerobic Digestion*)) AND TS=((pretreatment* or pre treatment*)), retornando 9 artigos;
- 3º busca - ((ALL=(biological)) AND TI=((organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste) and Anaerobic Digestion*)) AND TS=((pretreatment* or pre treatment*)), retornando 10 artigos;
- 4º busca - ((ALL=(combined)) AND TI=((organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste) and Anaerobic Digestion*)) AND TS=((pretreatment* or pre treatment*)), retornando 15 artigos;

4 RESULTADOS

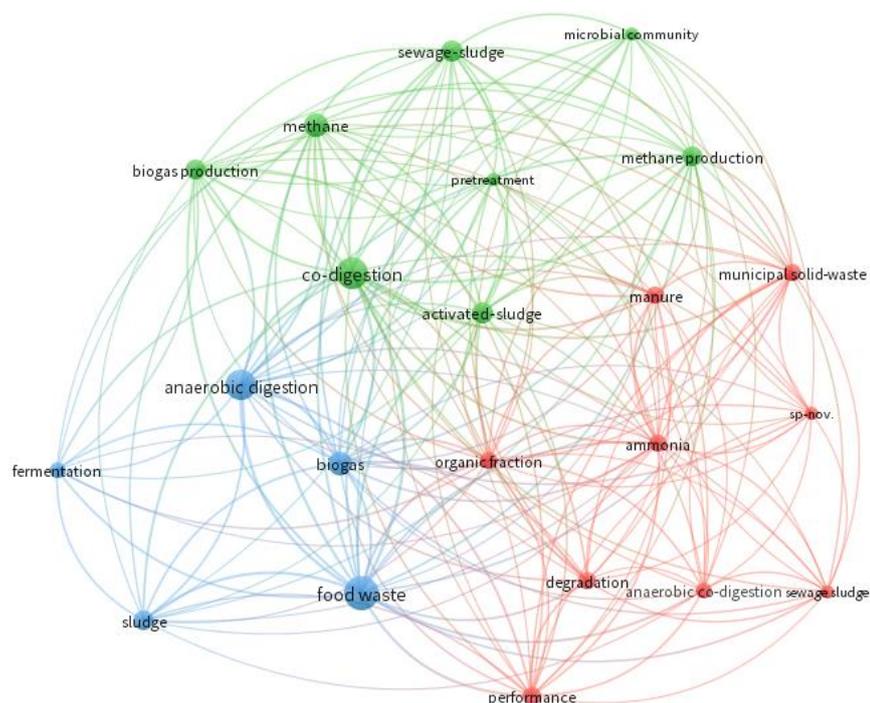
4.1 ANÁLISE GERAL DOS ARTIGOS

4.1.1 ESTUDO DAS PALAVRAS CHAVES: ANÁLISE QUANTITATIVA E FREQUÊNCIA

Para um melhor entendimento do desenvolvimento de pesquisa relacionadas ao substrato escolhido, na Figura 4.1.1 observou-se o cluster com as 22 principais palavras mais citadas deste estudo. Estas palavras chaves foram correspondentes ao período entre 1990 e 2022.

As palavras mais utilizadas foram: resíduos alimentares (“*food waste*”), o qual obteve-se 28 ocorrências, seguida de digestão anaeróbia (“*anaerobic digestion*”) e biogás (“*biogas*”). As cores do gráfico mostraram o cluster ao qual cada item pertence, sendo que as linhas entre eles, representam as conexões.

Figura 4.6 - Cluster das palavras chaves mais utilizadas



Fonte: Acervo pessoal (2023)

As cores da Figura 4.1.1 determinaram quais palavras se relacionam mais entre si. Por exemplo, “anaerobic digestion”, “biogas”, “food waste”, “fermentation”, “sludge”, foram palavras utilizadas e que, segundo os artigos, possuíam uma maior conexão entre si. Já o tamanho

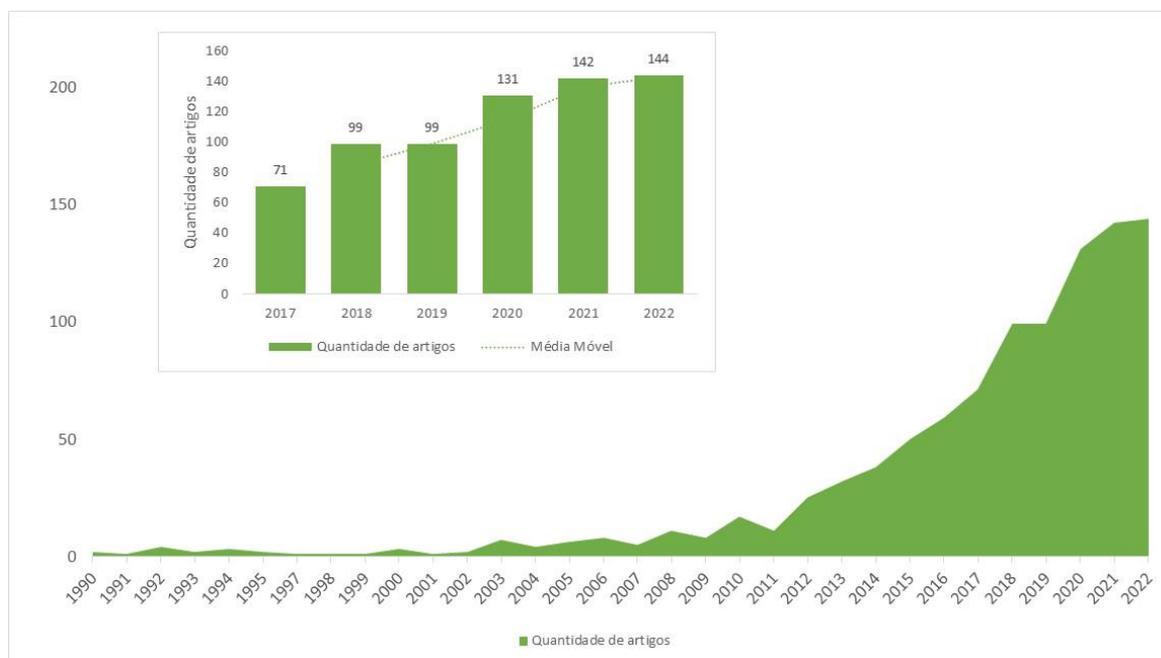
do círculo, determinava quais palavras foram usadas mais vezes. As linhas entre as palavras, representavam as correlações entre elas (VAN ECK; WALTAMN, 2023).

4.1.2 EVOLUÇÃO DAS PUBLICAÇÕES

A figura 4.1.2 (a) mostrou a evolução das publicações entre os anos de 1990 até 2022. Sendo que, 888 foram artigos de pesquisa, 86 foram anais de eventos e 50 foram artigos de revisão, totalizando 992 estudos sobre a valorização de Forsu e resíduos alimentares a partir da DA, como pode ser observado na Figura 4.1.2 (b). Entre 1990-2000 teve-se um total de 20 artigos e 2010-2022, 902.

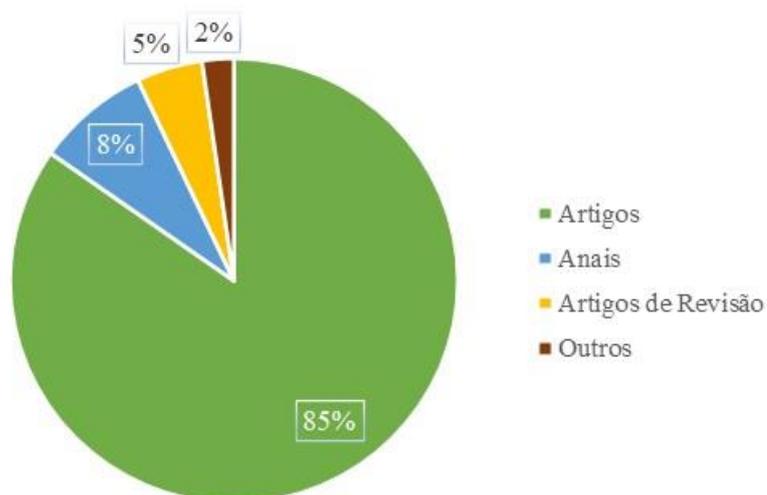
Notou-se que a partir de 2011, o aumento das pesquisas relacionadas ao tema cresceu de forma exponencial. Este fato pode ser explicado, uma vez que existe uma tendência global para se obter fontes sustentáveis de energia, assim como reduzir os GEE's e resíduos que vêm sendo produzidos, assim como maximizar a eficiência dos processos já existentes.

Figura 4.7 (a) - Evolução das publicações ao longo dos anos com os filtros iniciais (organic fraction municipal solid waste or OFMSW or food waste) and Anaerobic Digestion*)



Fonte: Acervo pessoal (2023)

Figura 4.8 (b) - Quantidade de artigos por categoria

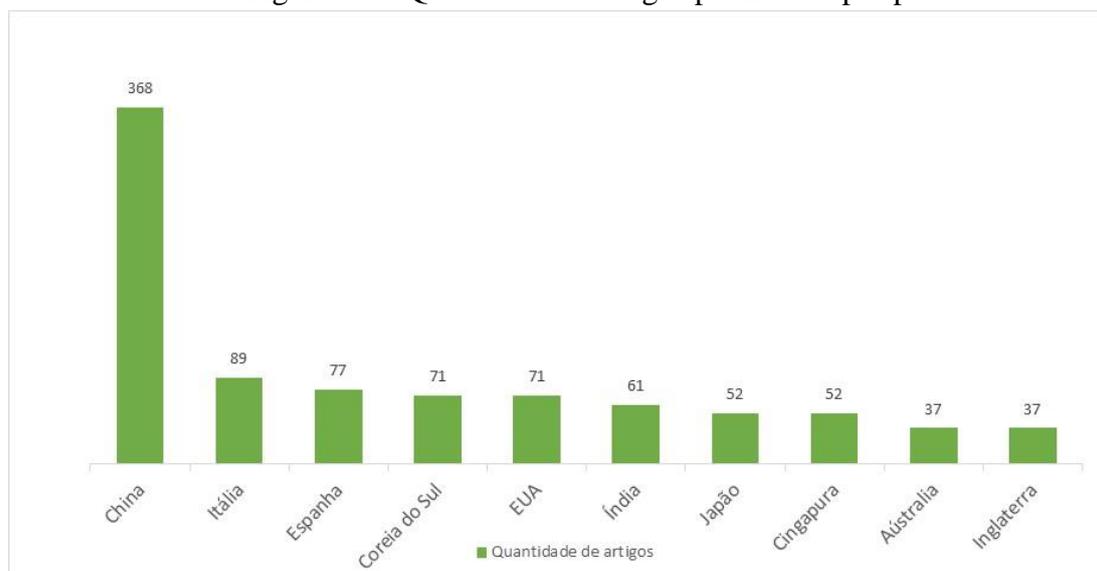


Fonte: Acervo pessoal (2023)

4.1.3 ESTUDO DO PAÍSES E AUTORES QUE MAIS PUBLICARAM

Segundo OBILEKE (2020), os países que mais estimularam e incentivaram a pesquisa acadêmica relacionada ao tema, foram países que possuíam uma alta emissão de GEE's e que a matriz energética é extremamente dependente de fontes fósseis de combustíveis. Na Figura 4.1.2 observou-se que a China foi o que mais tem publicações sobre o tema, e o Brasil ocupa a 23ª posição.

Figura 4.9 - Quantidade de artigos publicados por países



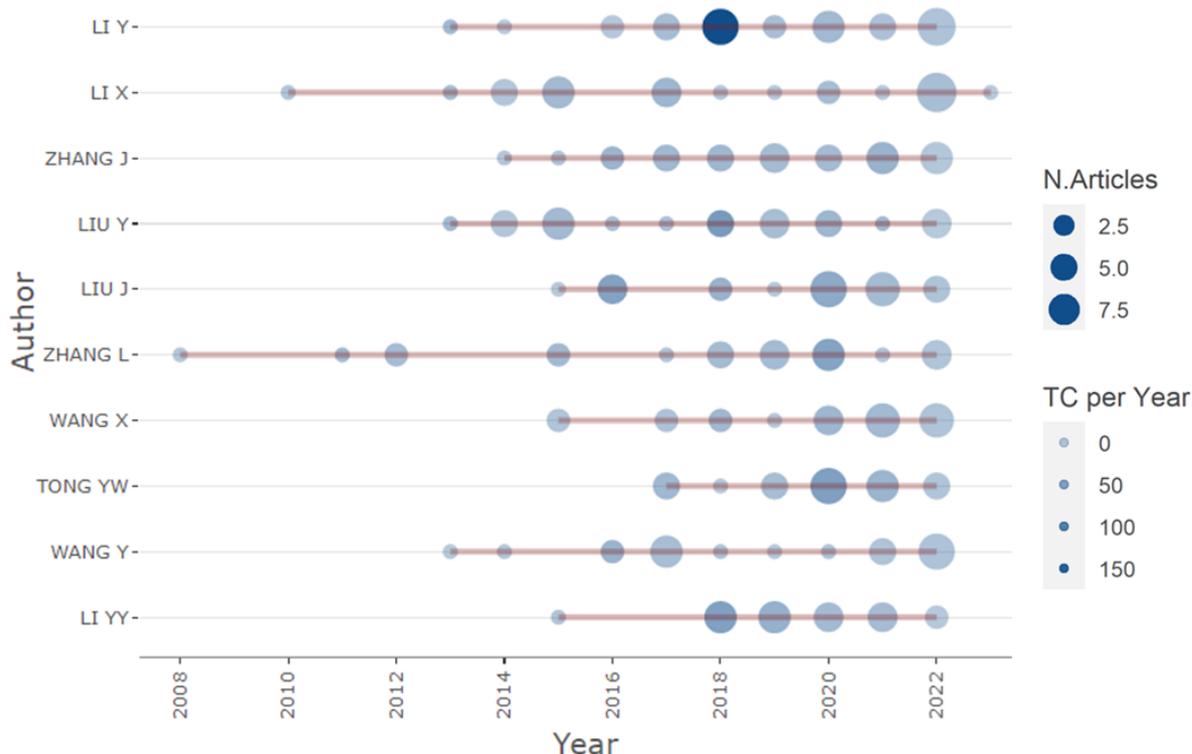
Fonte: Acervo pessoal (2023)

Um dos motivos que fez com que a China estivesse em primeiro lugar, quando se tratou de biocombustível produzido a partir de FORSU foi que em 2019, o país começou a construção de 16 cidades pilotos que possuem como lema “cidades zero-lixo”, ou seja, é promovido continuamente na cidade a conscientização e a redução do consumo de resíduos sólidos, além de que, no mesmo ano, começou a coleta seletiva em Shangai (CHEN, et al. 2019). Relacionado com o país que mais publica, os autores mais citados também foram asiáticos, e paralelamente, observando a Figura 4.1.3, notou-se que desde 2018 estes autores vêm publicando mais artigos e, conseqüentemente, sendo mais citados.

Li Y foi o autor que mais publicou, sendo que aproximadamente 3% dos artigos, foram referentes a esse autor, seguido por Tong, com 2,4%, e Zhang L, com 2,3%.

No gráfico, o tamanho dos círculos, indicou a quantidade de artigos publicados, quanto maior o círculo, mais artigos publicados no respectivo período, enquanto a cor do círculo mostrou quantas vezes por ano o artigo foi citado.

Figura 4.10 - Autores que mais publicaram e foram mais citados



Fonte: Acervo pessoal (2023)

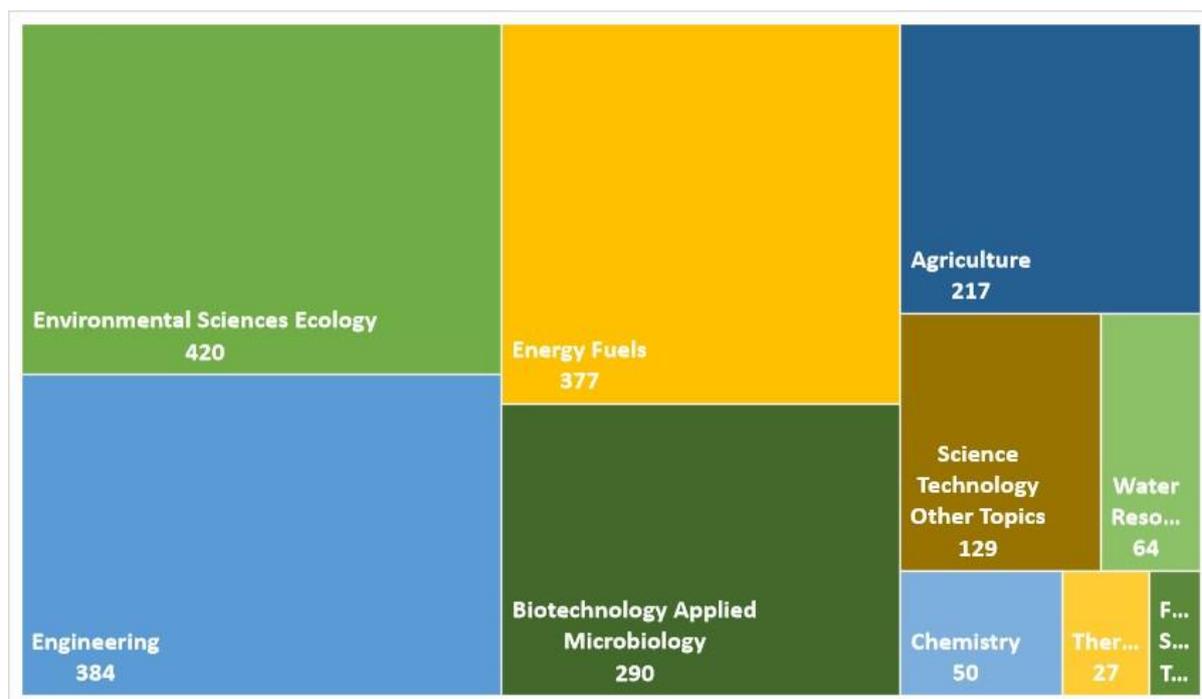
4.1.4 ÁREAS DE PESQUISA E JORNAL

A evolução nas pesquisas relacionadas ao tema, mostrou que ocorreu um aumento progressivo sobre o tema da DA, principalmente relacionado a biocombustíveis que podem ser produzidos a partir de resíduos (YAOYANG; BOEING. 2013).

As áreas de pesquisas são uma ferramenta importante para determinar os gargalos que ainda existem em relação aos temas (AMPASE et al. 2021). Na Figura 4.1.5 (a) observou-se que as áreas com mais publicações sobre o tema foram a de Ecologia e Ciências Ambientais (“Environmental Sciences Ecology”), que corresponde a 42%, seguido de Engenharia, Combustíveis Energéticos e Microbiologia Aplicada à Biotecnologia. É válido ressaltar que o mesmo artigo pode estar relacionado a mais de um tema, uma vez que, quando se olhou para a DA e substratos que podem ser utilizados, temas da engenharia, estiveram muito relacionados a biorreatores e parâmetros operacionais, e microbiológicos, possuíam uma forte correlação.

O jornal “*Bioresource Technology*” possuía 18,8% dos artigos publicados, seguido do jornal “*Waste Management*”, com 7,7%, e “*Journal of Cleaner Production*”, com 3,5%. Os outros jornais foram observados na Figura 4.1.5 (b). Dos 30 artigos publicados por Li YY, 12 deles foram no jornal “*Bioresource Technology*”, enquanto dos 24 artigos do Tong, 8 foram no mesmo jornal.

Figura 4.11 (a) - Top 10 áreas de pesquisa áreas de pesquisa das publicações



Fonte: Acervo pessoal (2023)

Figura 4.125 (b) - Top 10 jornais com mais artigos



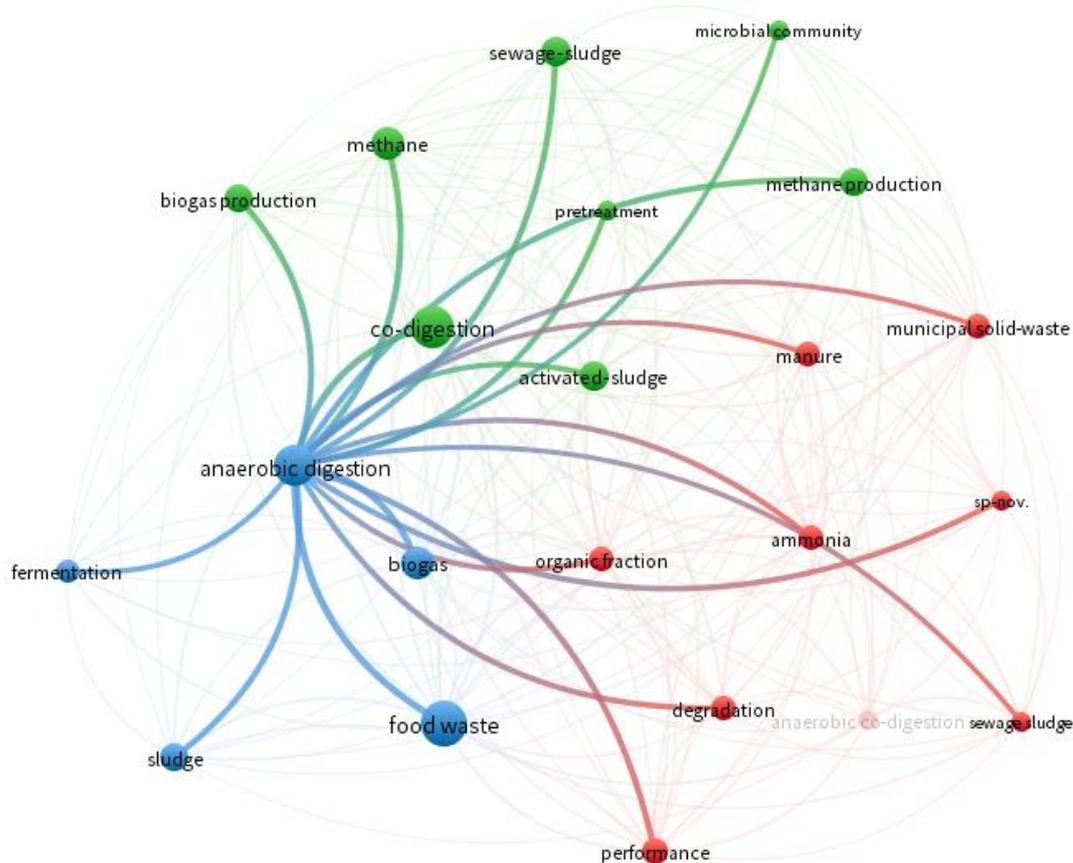
Fonte: Acervo pessoal (2023)

4.2 ARTIGOS MAIS CITADOS NOS ÚLTIMOS 5 ANOS

Nesta etapa das análises foi adicionada a palavra “*pretreatment*”, uma vez que agora o objetivo seria entender quais seriam os artigos mais citados quando se tratava deste tema.

Na Figura 4.2.1 notou-se a correlação direta entre a DA, pré-tratamento e FORSU (“*organic fraction*”).

Figura 4.2.1 - Correlação entre DA, FORSU e pré tratamentos



Fonte: Acervo pessoal (2023)

Quando se trata de uma perspectiva ambiental, tecnologias relacionadas à DA vem sendo amplamente utilizadas para determinar o impacto e benefícios associados a resíduos sólidos (MAYER et al. 2021 ; TUA et al. 2021). Sendo assim, é necessário a otimização dos pré-tratamentos, fração de inóculo:substrato, parâmetros de equipamentos utilizados, para se obter a máxima eficiência na produção de biogás (ROCAMORA et al. 2020).

Na segunda etapa do trabalho, os top 20 artigos que possuíam o pré-tratamento como um tópico do texto foram selecionados, sendo que estes artigos podem ser consultados na Tabela 4.2.

Tabela 2 - 20 artigos mais citados da literatura de 2019 - 2023

Nome do artigo	Citações	Referências do artigo	Ano	Jornal Publicado	Objetivo	Autores
A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste	120	131	2019	Renewable Energy	Avaliar características físicas, químicas e composição do FORSU. Assim como, parametros para a DA e técnicas de pré-tratamento	Panigrahi, S; Dubey, BK
Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review	111	124	2020	Energy	Avaliar características físicas, químicas e composição do FORSU. Assim como, parametros para a DA e técnicas de pré-tratamento	Kumar, A; Samadder, SR
A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste	106	226	2021	Renewable & Sustainable Energy Reviews	Revisão da DA a partir do FORSU, explorando os meios de aumentar a velocidade da hidrólise, aumentando a produção de biogás	Zamri, M.F.M.A. et al.
Bio-hydrogen and bio-methane production from food waste in a two-stage anaerobic digestion process with digestate recirculation	87	39	2019	Renewable Energy	Avaliar a produção de biogás a partir de um sistema faseado de temperatura em dois estágios	Algapani, D.E. et al.
Anaerobic co-digestion of food waste with pretreated yard waste: A comparative study of methane production, kinetic modeling and energy balance	71	45	2020	Journal of Cleaner Production	Estudo das reações cinéticas para ser obter a maior quantidade possível de metano e de pré-tratamentos	Panigrahi, S. et al.

Biochar enhanced thermophilic anaerobic digestion of food waste: Focusing on biochar particle size, microbial community analysis and pilot-scale application	70	77	2020	Energy Conversion and Management	Avaliar a quantidade máxima de bio carvão que seria adicionada ao meio para a máxima eficiência da DA	Zhang, L. et al.
Anaerobic digestion of food waste for bio-energy production in China and Southeast Asia: A review	68	207	2020	Renewable & Sustainable Energy Reviews	Principais fatores para utilizar os resíduos alimentares na DA.	Negri, C. et al.
Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production	58	61	2020	Science of the Total Environment	Avaliar como diferentes resíduos impactam na DA	Mu, L. et al.
Hydrothermal carbonization coupled with anaerobic digestion for the valorization of the organic fraction of municipal solid waste	54	49	2020	Bioresource Technology	Avaliar a eficiência do processo quando utilizado a carbonização hidrotermal do FORSU	Lucian, M. et al.
Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production	54	37	2020	Bioresource Technology	Avaliar efeitos sinérgicos na co-digestão de RA e lodo em condições mesófilas e termofílicas.	Gu, J. et al.
Synergistic effect and biodegradation kinetics of sewage sludge and food waste mesophilic anaerobic co-digestion and the underlying stimulation mechanisms	50	58	2019	Fuel	Avaliar o efeito sinérgico e a cinética da degradação durante a DA	Pan, Y. et al.
Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste	41	31	2020	Renewable Energy	Avaliar como diferentes parâmetros podem impactar a DA	Kainthola, J. et al.

Enhanced hydrolysis of lignocellulose in corn cob by using food waste pretreatment to improve anaerobic digestion performance	41	53	2020	Journal of Environmental Management	Melhorar a hidrólise e a DA usando técnicas de pré-tratamento	Zou, H.J. et al.
Downstream augmentation of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion for integrated biogas and hydrochar production from the organic fraction of municipal solid waste: A circular economy concept	35	58	2020	Science of the Total Environment	Avaliar como o pré-tratamento com microondas melhoram a produção de biogás	Sharma, H.B. et al.
Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review	30	130	2021	Environmental Chemistry Letters	Revisar as etapas da DA, fatores que influenciam o processo e RA como principal substrato para aumentar o rendimento do biogás	Chew, K.R. et al.
Energy generation from anaerobic co-digestion of food waste, cow dung and piggery dung	30	53	2020	Bioresource Technology	Avaliar a DA a partir de diferentes resíduos	Oladejo, O.S. et al.
Advanced methanogenic performance and fouling mechanism investigation of a high-solid anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the co-digestion of food waste and sewage sludge	29	46	2020	Water Reserach	Investigar a fração de inóculo a ser usada na DA para uma maior eficiência do processo	Cheng, H. et al.
Improving fermentative methane production of glycerol trioleate and food waste pretreated with ozone through two-stage dark hydrogen fermentation and anaerobic digestion	29	47	2020	Energy Conversion and Management	Avaliar a efetividade de pré-tratamento de ozônio com diferentes substratos	Yue, L.C. et al.

Bioelectrochemical enhancement of methane production in anaerobic digestion of food waste	29	46	2019	International Journal of Hydrogen Energy	Otimizar a eletrolise e a DA utilizando o método de Taguchi	Choi, J.M.; Lee, C.Y.
Enzymatic pre-hydrolysis of organic fraction of municipal solid waste to enhance anaerobic digestion	28	51	2019	Biomass & Bioenergy	Verificar o impacto do pré-tratamento enzimático no FORSU para produção de biogás	Mlaik, N. et al.

O artigo mais citado possuía 120 citações, sendo que este é uma revisão dos parâmetros para aumentar a eficiência da DA. Ele conta com 131 referências citadas dentro do seu texto, e seu país de referência é a Índia. O segundo possuía 11 citações e o terceiro 106. Os três primeiros foram artigos de revisão, isso se explica pelo fato de neste tipo de artigo, é comum, o que se tem do tema estudado.

Destes 20 artigos mais citados, 3 foram publicados na revista “Renewable Energy”, sendo que o principal objetivo desta revista é promover e disseminar os conhecimentos sobre as tecnologias de energia renovável.

Os 3 artigos mais citados, foram publicados no jornal “Bioresource Technology”, porém quando se analisa a Tabela 3, os objetivos não estavam diretamente ligados ao pré-tratamento, e sim com os objetivos A e C.

Os trabalhos selecionados possuíam diferentes objetivos, porém o intuito final de todos os experimentos era a máxima eficiência da produção de algum tipo de biocombustível. A fim de demonstrar este objetivo específico, construiu-se a Tabela 4.2.2, que foram divididos em 4 segmentos.

Tabela 3 - Compilado dos objetivos específicos dos 20 trabalhos mais citados

Objetivos	Objetivos	Quantidade	Autores
A	Avaliar quais os principais fatores impactam a DA, assim como estudar meios para aumentar a eficiência	9	Zhang, L. et al. Negri, C. et al. Mu, L. et al. Pan, Y. et al. Kainthola, J. et al. Chew, K.R. et al. Oladejo, O.S. et al. Cheng, H. et al. Choi, J.M.; Lee, C.Y.
B	Analisar e verificar pré-tratamento para uma maior eficiência na obtenção de biocombustíveis	7	Panigrahi, S.; Dubey, B.K. Kumar, A; Samadder, SRZamri, M.F.M.A. et al. Zou, H.J. et al. Sharma, H.B. et al. Yue, L.C. et al. Mlaik, N. et al.
C	Avaliar a DA utilizando diferentes parâmetros de operação	3	Algapani, D.E. et al. Lucian, M. et al. Gu, J. et al.
D	Estudo de reações cinéticas	1	Panigrahi, S. et al.

Notou-se que o principal objetivo, em aproximadamente 45% dos trabalhos selecionados, era a avaliação os fatores que influenciam a DA, assim como meios para aumentar sua eficiência.

Já o objetivo B, compreendeu em estudos as técnicas de pré-tratamento, mas com o objetivo final também de melhorar o processo da DA.

4.3 APRESENTAÇÃO DOS PRÉ TRATAMENTOS MAIS UTILIZADOS

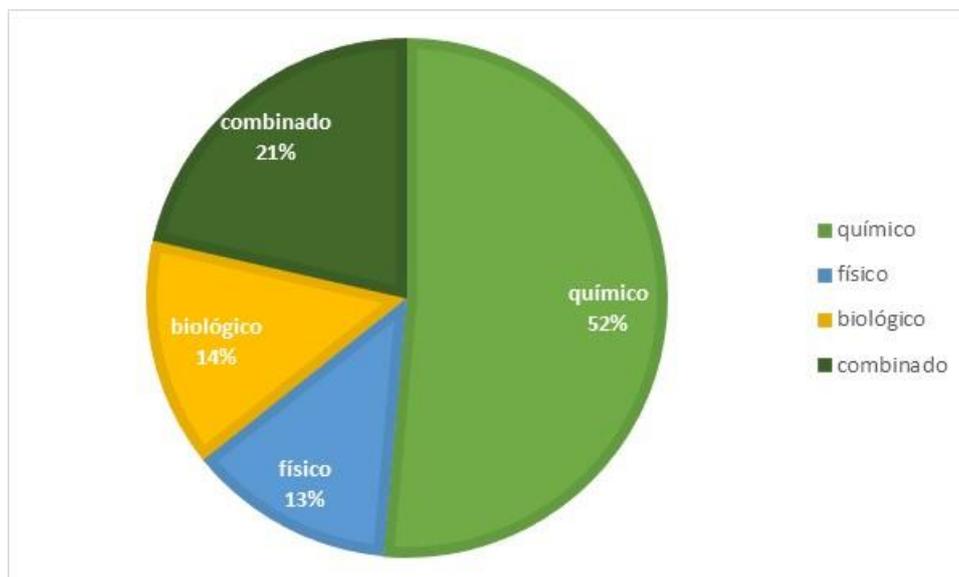
A fim de realizar o mapeamento e compreender quais os pré-tratamentos mais utilizados e quais foram os mais estudados, método a método de pré-tratamento foi testado nos filtros de busca do WoS para a busca de uma correlação.

A Figura 4.3.1 (a) retratou os pré-tratamentos mais publicados nos últimos 5 anos (2019-2023). Quando foi selecionado o pré-tratamento químico, 36 artigos possuíam este campo em seu corpo, combinado, 15 artigos, biológico 10 e físico 9.

O pré-tratamento físico quebra o substrato em partículas menores, sendo assim, é recomendado que, independentemente do tipo de pré-tratamento escolhido, sempre ocorra um pré-tratamento físico antes, para que os microrganismos presentes no meio, possam obter uma maior área de contato superfície do substrato. A DA ocorre melhor em partículas menores, uma vez que a área de superfície para o ataque das bactérias facilita o processo digestivo (IZUMI et al. 2010).

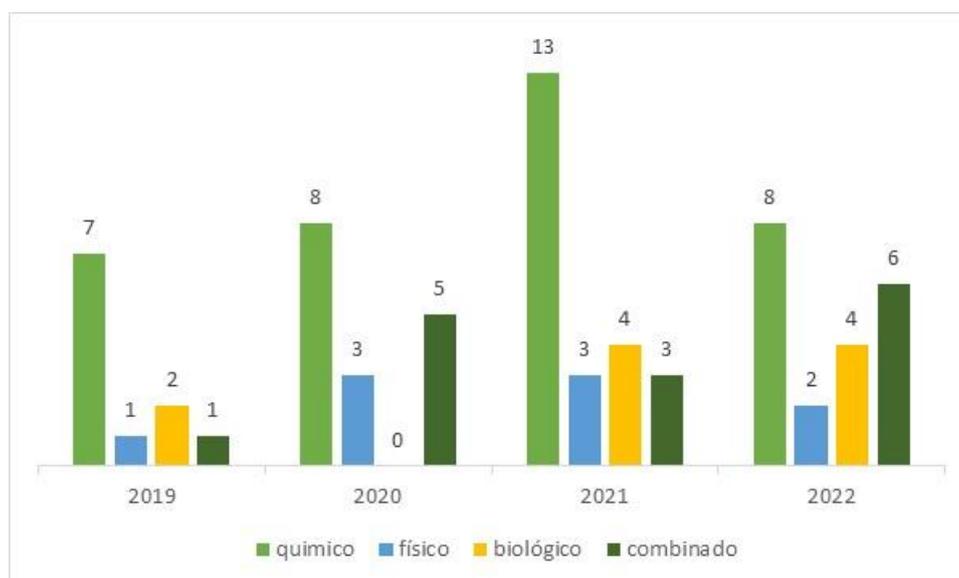
Na Figura 4.3.2 notou-se a tendência de publicação ao longo dos anos, em 2019, 11 artigos foram publicados com os filtros utilizados, sendo estes 7 sobre pré-tratamento químico. Os anos de 2021 e 2020 foram os que mais tiveram publicações, com maior destaque principalmente para os pré-tratamentos químicos.

Figura 4.3.1 (a) - Tipos de pré-tratamento mais utilizados



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Figura 4.3.1 (b) - Tipos de pré-tratamento mais utilizados nos últimos 5 anos



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

O ano de pico, mesmo quando se olhou um pré-tratamento específico, continua sendo 2021, que vai bem em linha quando olhamos as publicações gerais nos últimos 5 anos.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível observar que é crescente a busca por técnicas e efetividade para aumentar o processo da DA utilizando diferentes substratos. Isso se dá principalmente pela tendência mundial pela busca de fontes alternativas de energia, em substituição às fontes não renováveis.

Palavras chaves mais genéricas foram utilizadas para mapear, nos artigos que vinham sendo mais relevantes nos últimos tempos, as palavras chaves que eram mais utilizadas. Assim, foi possível mapear as palavras, além de como elas possuíam uma correlação entre si. Palavras como “anaerobic digestion”, “food waste”, “fermentation”, foram as que mais apareceram.

Por meio da análise de 992 artigos, publicados na base de dados Web of Science, tem-se que os anos de 2021 e 2022 foram os anos que mais tiveram publicações relacionados ao tema, sendo a China responsável por 37% das publicações, seguida de Itália, com 9% e Espanha, com 8%. O autor com mais representatividade foi considerando citações e quantidade de artigos publicados foi Li YY, com 30 artigos publicados.

Os jornais que mais publicaram foram “Bioresource technology” e “Waste Management”, sendo que corresponderam a 18,8% e 7,7% do total dos artigos publicados, respectivamente. As áreas de pesquisa com mais artigos publicaram foram de Ecologia e Ciências Ambientais (“Environmental Sciences Ecology”), que corresponde a 420 artigos, seguido de Engenharia, com representativa de 384, Combustíveis Energéticos (377) e Microbiologia Aplicada à Biotecnologia (290). Lembrando que um mesmo artigo, pode estar dentro de mais de 1 tema.

Entre os artigos mais citados o objetivo de maior impacto foi avaliar os principais fatores que impactam a DA e como aumentar a eficiência do processo, com 9 artigos. Os tipos de pré-tratamento, ficou em segundo, porém é importante ressaltar que o pré-tratamento é uma das maneiras que se tem para aumentar a conversão do substrato em biocombustível. O artigo mais citado possui 120 citações, sendo que foi publicado na “Renewable Energy”, no ano de 2019

Os tratamentos que mais tiveram artigos publicados foi o tratamento químico, com 36 artigos sobre o tema nos últimos 5 anos. O pré-tratamento físico e biológico corresponderam a 13% e 14%, respectivamente. É válido ressaltar que é de suma importância um pré-tratamento físico, independente do pré-tratamento escolhido.

Portanto, concluiu-se que a DA pode ser utilizada como uma fonte alternativa de energia, desde à um melhor direcionamento dos resíduos que são produzidos, assim como seu produto final. Ainda existem diversos gargalos a serem resolvidos, porém, pensando em uma escala piloto de pré-tratamento e, conseqüentemente, de DA este estudo realizado mostraria os principais métodos e parâmetros que poderiam ser utilizados, para uma maior eficiência na conversão do substrato.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, A.; MATHEW, A. K.; PARK, H.; CHOI, O.; SINDHU, R.; ARAMESWARAN, B.; PANDEY, A.; PARK, J. H.; SANG, B. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 301, p. 122725, 2020. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122725. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852419319546>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ABRALATAS - Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio. 2020. Disponível em: <<https://www.abralatas.org.br/>>. Acesso em: abr. 2021.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. *Abrelpe.org*, dez. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama>. Acesso em: 22 dez. 2022.

ACHINAS,S; EUVERINK, G. J.W. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resour Effic Technol* 2016;2:143–7. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.08.001>. Acesso em: 22 dez. 2022.

ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A.. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. 2015. Disponível em: https://www.scirp.org/html/7-7301031_55061.htm#ref22. Acesso em: 11 set. 2021.

Allison, B.J.; Cádiz, J.C.;Karuna, N.; Jeoh, T., Simmons, C.W., 2016. The Effect of Ionic Liquid Pretreatment on the Bioconversion of Tomato Processing Waste to Fermentable Sugars and Biogas. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 179, 1227–1247. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2061-4>. Acesso em: 22 dez. 2022.

ALGAPANI, D. E.; QIAO, W.; RICCI, M.; BIANCHI, D.; M. WANDERA, S.; ADANI, F.; DONG, R.. Bio-hydrogen and bio-methane production from food waste in a two-stage anaerobic digestion process with digestate recirculation. *Renewable Energy*, [S. l.], v. 130, p. 1108–1115, 2019. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.079. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118310292>. Acesso em: 31 jan. 2023.

AMPESE, L. C.; SGANZERLA, W. G.; DI DOMENICO ZIERO, H.; MUDHOO, A.; MARTINS, G.; FORSTER-CARNEIRO, T.. Research progress, trends, and updates on anaerobic digestion technology: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 331, p. 130004, 2022. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965262104172X>. Acesso em: 03 fev. 2023.

Angelidaki, I.; BatstoneI, D.J. *Anaerobic digestion: process. Solid Waste Technology & Management*; 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470666883.ch37>. Acesso em: 22 dez. 2022.

Ariunbaatar, J., Panico, A., Frunzo, L., Esposito, G., Lens, P.N.L., Pirozzi, F., 2014. Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods. *J. Environ. Manage.* 146, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.042>

DE ARAÚJO, G. C.; BUENO, M. P.; SOUSA, A. A.; MENDONÇA, P. S.M..CONGRESSO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO, 2006, São Paulo. SUSTENTABILIDADE EMPRESARIAL: Conceito e Indicadores [...]. [S. l.: s. n.], 2006

ARAÚJO, C.V.; RAMALHO, T.; STEFANELLI, C.M.M. Sustentabilidade aplicada à gastronomia. In: SEMINÁRIO DA ANPTUR, 10., 2013, Caxias do Sul. Anais Eletrônicos [...]. Caxias do Sul: ANPTUR, 2013. Disponível em: [https://www.anptur.org.br/anais/anais/files/10/\[113\]x_anptur_2013.pdf](https://www.anptur.org.br/anais/anais/files/10/[113]x_anptur_2013.pdf). Acesso em: 05 fev. 2023.

Boonsawang, P.; Rerngnarong, A.; Tongurai, C.; Chaiprapat, S. Effect of nitrogen and phosphorus on the performance of acidogenic and methanogenic reactors for treatment of biodiesel wastewater. *J Sci Technol* 2014;36:643–9. Disponível em: Effect of nitrogen and phosphorus on the performance of acidogenic and methanogenic reactors for treatment of biodiesel wastewater – DOAJ. Acesso em: 22 dez. 2022.

BRINGHENTI, J. Coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos: aspectos operacionais e da participação da população. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2004. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-07122009-091508/pt-br.php>. Acesso em: 05 fev. 2023.

Campuzano, R.; González-Martínez, S. Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: a review. *Waste Manag* 2016;54: 3–12. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016>. Acesso em: 06 fev. 2023.

CARLSSON, M.; LAGERKVIST, A.; MORGAN-SAGASTUME, F.. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. Luleá: Elsevier Ltd, 2012.

CARVALHO, M. M.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Mecanismos de precificação de carbono no Brasil : custos econômicos e potenciais de abatimento. In: Prêmio BNDES pelo Clima. Rio de Janeiro : Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2022. p. [118]-181. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22625>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

CAVALCANTI, C.. Sustentabilidade: mantra ou escolha moral? uma abordagem ecológico-econômica. *Estudos Avançados*, [S. l.], v. 26, n. 74, p. 35–50, 2012. ISSN: 0103-4014. DOI: 10.1590/S0103-40142012000100004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100004&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 6 mar. 2023.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. Taxas de reciclagem. 2020. Disponível em: <<https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>>. Acesso em: 12 fev 2023.

CETEA - Centro de Tecnologia de Embalagem. A contribuição da reciclagem para o perfil ambiental da lata de alumínio para bebidas no Brasil. 2014.

CHENG, H.; LI, Y.; GUO, G.; ZHANG, T.; QIN, Y.; HAO, T.; LI, Y.. Advanced methanogenic performance and fouling mechanism investigation of a high-solid anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the co-digestion of food waste and sewage sludge. *Water Research*, [S. l.], v. 187, p. 116436, 2020. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116436. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135420309714>. Acesso em: 13 fev. 2023.

CHERNICHARO, C.A.L. de. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. v.5.

Chew, K.R., Leong, H.Y., Khoo, K.S. et al. Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review. *Environ Chem Lett* 19, 2921–2939 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01220-z>

CHOI, J.; LEE, C.. Bioelectrochemical enhancement of methane production in anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 2081–2090, 2019. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.153. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319918327289>. Acesso em: 07 fev. 2023.

CHONG, J. W. R.; YEW, G. Y.; KHOO, K. S.; HO, S.; SHOW, P. L.. Recent advances on food waste pretreatment technology via microalgae for source of polyhydroxyalkanoates. *Journal of Environmental Management*, [S. l.], v. 293, p. 112782, 2021. ISSN: 03014797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112782. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721008446>. Acesso em: 08 fev. 2023.

CHRISTY, P. Merlin; GOPINATH, L.R.; DIVYA, D.. A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. Tamil Nadu: Elsevier Ltd, 2013.

DAMASCENO, C. Etanol de segunda geração: nova possibilidade de combustível renovável. Disponível em: . Acesso em: 03 nov. 2014.

DIAS, Pâmela Castilho. **Análise de Viabilização da utilização de biogás gerado na digestão anaeróbia de levedura residual de cervejaria para geração de energia**. 2014. 90 f. TCC (Graduanda em Engenharia Ambiental)- USP, São Carlos, 2014.

DI MARIA, F.; SISANI, F.; LASAGNI, M.; BORGES, M.S.; GONZALES, T.H Replacement of energy crops with bio-waste in existing anaerobic digestion plants: An energetic and environmental analysis, *Energy*, Volume 152, 2018, Pages 202-213, ISSN 0360-5442, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.147>. Acesso em: 05 fev. 2023.

ELGARAHY, A. M.; ELOFFY, M. G.; ALENGEBAWY, A.; EL-SHERIF, D. M.; GABALLAH, M. S.; ELWAKEEL, K. Z.; EL-QELISH, M.. Sustainable management of food waste; pre-treatment strategies, techno-economic assessment, bibliometric analysis, and potential utilizations: A systematic review. *Environmental Research*, [S. l.], v. 225, p. 115558, 2023. ISSN: 00139351. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115558. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001393512300350X>. Acesso em: 05 fev. 2023..

Energy Statistics Data Browser – Data Tools. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

EPA, United States Environmental Agency. Global Greenhouse Gas Emissions Data. [ca 2017]. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. Acesso em: 03 jan. 2023.

Fontes Lima, D.M.; Moreira, W.K.; Zaiat, M. Comparison of the use of sucrose and glucose as a substrate for hydrogen production in an upflow anaerobic fixed-bed reactor. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38:15074–83. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.003>. Acesso em: 03 jan. 2023.

FRÉSCA, Fábio Rogério Carvalho. Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física. 2007. Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. DOI: 10.11606/D.18.2007.tde-09042008-111912. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-09042008-111912/>. Acesso em: 6 jan. 2023

GALLEGO-GARCÍA, M.; MORENO, A. D.; MANZANARES, P.; NEGRO, M. J.; DUQUE, A.. Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 369, p. 128397, 2023. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128397. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852422017308>. Acesso em: 03 jan. 2023.

GU, Juan; LIU, Rui; CHENG, Yi; STANISAVLJEVIC, Nemanja; LI, Lei; DJATKOV, Djordje; PENG, Xuya; WANG, Xiaoming. Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 301, p. 122765, 2020. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122765. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420300341>. Acesso em: 04 jan. 2023.

Gulsen Akbay, H.E., Dizge, N., Kumbur, H., 2021. Enhancing biogas production of anaerobic co-digestion of industrial waste and municipal sewage sludge with mechanical, chemical, thermal, and hybrid pretreatment. *Bioresour. Technol.* 340, 125688. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125688>

HASHEMI, Seyedbehnam; JOSEPH, Prajin; MIALON, Antoine; MOE, Størker; LAMB, Jacob J.; LIEN, Kristian M. Enzymatic pretreatment of steam-exploded birch wood for increased biogas production and lignin degradation. *Bioresource Technology Reports*, [S. l.], v. 16, p. 100874, 2021. ISSN: 2589014X. DOI: 10.1016/j.biteb.2021.100874. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589014X21002528>. Acesso em: 6 mar. 2023.

HOLZER, G. S. A. Lixo: coleta seletiva e reciclagem. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2012. Disponível em: <repositorio.roca.utfpr.edu.br>. Acesso em: 05 fev. 2023.

HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. *Waste Management & Research*, v.17, p 443-452, 1999.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: <<https://iba.org/>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

IZUMI, K.; OKISHIO, Y.; NAGAO, N.; NIWA, C.; YAMAMOTO, S.; TODA, T. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Volume 64, Issue 7, 2010, Pages 601-608, ISSN 0964-8305. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.06.013>. Acesso em: 05 fev. 2023.

JACKOWIAK, D.; BASSARD, D.; PAUSS, A.; RIBEIRO, T. Optimisation of a microwave pretreatment of wheat straw for methane production. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 102, n. 12, p. 6750–6756, 2011. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.107. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852411004664>. Acesso em: 10 jan. 2023.

Jain, S.; Jain, S.; Wolf, I.T.; Lee, J.; Tong, Y.W. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:142–54. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091>. Acesso em: 06 fev. 2023.

KAINTHOLA, Jyoti; KALAMDHAD, Ajay S.; GOUD, Vaibhav V. Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste. *Renewable Energy*, [S. l.], v. 149, p. 1352–1359, 2020. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.124. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119316222>. Acesso em: 15 fev. 2023.

Kaza, S.; Yao, L.C.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. **A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**, 2018. ISBN: 9781464813290. Disponível em: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>. Acesso em: 17 jan. 2023.

Kim, H.J., Choi, Y.G., Kim, D.Y., Kim, D.H., Chung, T.H., 2005. Effect of pretreatment on acid fermentation of organic solid waste. *Water Sci. Technol.* 52, 153–160. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0511>

Kim, S., Choi, K., Kim, 1713 J.O., Chung, J., 2013. Biological hydrogen production by anaerobic digestion of food waste and sewage sludge treated using various pretreatment technologies. *Biodegradation* 24, 753–764. <https://doi.org/10.1007/s10532-013-9623-8>

KUMAR, A.; SAMADDER, S.R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste, *Waste Management*, Volume 69, 2017, Pages 407-422, ISSN 0956-053X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>. Acesso em: 01 fev. 2023.

KUMAR, Pankaj; KUMAR, Vinod; KUMAR, Sachin; SINGH, Jogendra; KUMAR, Piyush. Bioethanol production from sesame (*Sesamum indicum* L.) plant residue by combined physical, microbial and chemical pretreatments. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 297, p. 122484, 2020. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122484. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852419317146>. Acesso em: 6 mar. 2023.

LI, W.; JIANG, Z.; ZHANG, X.; LI, L.; SUN, Y. Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5 °C to 2.0 °C global warming levels. *Science Bulletin*. Volume 63. Issue 4, 2018, Pages 228-234, ISSN 2095-9273, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.12.021>. Acesso em: 01 fev. 2023.

Linyi, C., Yujie, Q., Buqing, C., Chenglong, W., Shaohong, Z., Renglu, C., Shaohua, Y., Lan, Y., Zhiju, L., 2020. Enhancing degradation and biogas production during anaerobic digestion of food waste using alkali pretreatment. *Environ. Res.* 188, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109743>

LOGAN, M.; VISVANATHAN, C. Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. *Waste Management & Research*. v. 37, p. 27–39, Out. 2018. <https://doi.org/10.1177/0734242X18816793>

López, V.M.; De la Cruz, F.B.; Barlaz, M.A. Chemical composition and methane potential of commercial food wastes. *Waste Manag* 2016;56:477–90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.024>. Acesso em: 01 fev. 2023.

LU, J.; XU, S. Post-treatment of food waste digestate towards land application: A review. *Journal of Cleaner Production*. v. 303, p. 127033, Abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127033>

LUCIAN, Michela; VOLPE, Maurizio; MERZARI, Fabio; WÜST, Dominik; KRUSE, Andrea; ANDREOTTOLA, Gianni; FIORI, Luca. Hydrothermal carbonization coupled with anaerobic digestion for the valorization of the organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 314, p. 123734, 2020. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123734. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420310063>. Acesso em: 17 fev. 2023.

Ma, J., Duong, T.H., Smits, M., Verstraete, W., Carballa, M., 2011. Enhanced biomethanation of kitchen waste by different pre-treatments. *Bioresour. Technol.* 102, 592–599.

MANKAR, Akshay R.; PANDEY, Ashish; MODAK, Arindam; PANT, K. K. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 334, p. 125235, 2021. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125235. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852421005745>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MASSUKADO, L. M. Sistema de apoio a decisão: avaliação de cenários da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos domiciliares. [Dissertação de Mestrado]. Programa de pós graduação em engenharia urbana. Universidade Federal de São Carlos, 2004.

MATTOS, N. S. de; GRANATO, S. F. Lixo: problema nosso de cada dia: Cidadania, reciclagem e uso sustentável. São Paulo: Saraiva, 2007

Mehrez, I., Chandrasekhar, K., Kim, W., Kim, S.-H., Kumar, G., 2022. Comparison of alkali and ionic liquid pretreatment methods on the biochemical methane potential of date palm waste biomass. *Bioresour. Technol.* 360, 127505. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127505>

Menon, A., Ren, F., Wang, J.Y., 1887 Giannis, A., 2016. Effect of pretreatment techniques on food waste solubilization and biogas production during thermophilic batch anaerobic digestion. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 18, 222–230. <https://doi.org/10.1007/s10163-1890-015-0395-6>

MLAIK, Najwa; KHOUFI, Sonia; HAMZA, Manel; MASMOUDI, Mohamed Ali; SAYADI, Sami. Enzymatic pre-hydrolysis of organic fraction of municipal solid waste to enhance anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, [S. l.], v. 127, p. 105286, 2019. ISSN: 09619534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105286. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953419302351>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MOHAMMADI, A.; SANDBERG, M.; VENKATESH, G.; ESKANDARI, S.; DALGAARD, T.; JOSEPH, GRANSTROM, K. Environmental performance of end-of-life handling alternatives for paper-and-pulp-mill sludge: Using digestate as a source of energy or for biochar production, *Energy*, Volume 182, 2019, Pages 594-605, ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.065>. Acesso em: 01 fev. 2023.

Motte, J-C.; Trably, E.; Escudi´e, R. Hamelin, J.; Steyer, J-P.; Bernet, N.. Total solids content: a key parameter of metabolic pathways in dry anaerobic digestion. *Biotechnol Biofuels* 2013;6:164. Disponível em: Total solids content: a key parameter of metabolic pathways in dry anaerobic digestion | *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts* | Full Text (biomedcentral.com). Acesso em: 01 fev. 2023.

MU, Lan; ZHANG, Lei; ZHU, Kongyun; MA, Jiao; IFRAN, Muhammad; LI, Aimin. Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production. *Science of The Total Environment*, [S. l.], v. 704, p. 135429, 2020. ISSN: 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135429. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719354221>. Acesso em: 20 fev. 2023.

NAIK, Gopal P.; POONIA, Anil K.; CHAUDHARI, Parmesh K. Pretreatment of lignocellulosic agricultural waste for delignification, rapid hydrolysis, and enhanced biogas production: A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, [S. l.], v. 98, n. 10, p. 100147, 2021. ISSN: 00194522. DOI: 10.1016/j.jics.2021.100147. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0019452221001473>. Acesso em: 20 fev. 2023.

Naran, E., Toor, U.A., Kim, D.J., 2016b. Effect of pretreatment and anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge on stabilization and methane production. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 113, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.011>

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro Do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. *Estudos Avançados*, [S. l.], v. 26, n. 74, p. 51–64, 2012. ISSN: 0103-4014. DOI: 10.1590/S0103-40142012000100005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100005&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 6 mar. 2023.

NEGRI, Camilla; RICCI, Marina; ZILIO, Massimo; D'IMPORZANO, Giuliana; QIAO, Wei; DONG, Renjie; ADANI, Fabrizio. Anaerobic digestion of food waste for bio-energy production in China and Southeast Asia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 133, p. 110138, 2020. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110138. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032120304299>. Acesso em: 20 fev. 2023.

Neves, L.;Gonçalo, E.; Oliveira, R.; Alves, M.M. Influência da composição sobre o potencial de biomethanation de resíduos de restaurantes em temperaturas mesófilas. *Waste Manag* 2008;28:965–72.

NOAA National Centers for Environmental information. Climate at a Glance: Global Time Series, jan. 2023. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. Acesso em: 05 fev. 2023.

OLADEJO, Oladipupo S. et al. Energy generation from anaerobic co-digestion of food waste, cow dung and piggy dung. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 313, p. 123694, 2020. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123694. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420309664>. Acesso em: 28 fev. 2023.

Ortigueira, J., Martins, L., Pacheco, M., Silva, C., Moura, P., 2019. Improving the non-sterile food waste bioconversion to hydrogen by microwave pretreatment and bioaugmentation with *Clostridium butyricum*. *Waste Manag*. 88, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.021>

PAN, Yang; ZHI, Zhongxiang; ZHEN, Guangyin; LU, Xueqin; BAKONYI, Péter; LI, Yu-You; ZHAO, Youcai; RAJESH BANU, J. Synergistic effect and biodegradation kinetics of sewage sludge and food waste mesophilic anaerobic co-digestion and the underlying stimulation mechanisms. *Fuel*, [S. l.], v. 253, p. 40–49, 2019. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.084. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236119306398>. Acesso em: 28 fev. 2023.

PANIGRAHI, S.; DUBEY, B.K. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, Volume 143, 2019, Pages 779-797, ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>. Acesso em: 15 jan. 2023.

PANIGRAHI, Sagarika; SHARMA, Hari Bhakta; DUBEY, Brajesh K. Anaerobic co-digestion of food waste with pretreated yard waste: A comparative study of methane production, kinetic modeling and energy balance. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 243, p. 118480, 2020. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118480. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619333505>. Acesso em: 28 fev. 2023.

Paritosh, K.; Kushwaha, S.K.; Yadav, M.; Pareek, N.; Chawade, A.; Vivekanand, V. Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient

recycling. *BioMed Res Int* 2017;2017:2370927. Disponível em: Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling (hindawi.com). Acesso em: 15 jan. 2023.

Parra-Orobio, B.A., Girón-Bol, L.M., Gómez-Muñoz, D.F., Marmolejo-Rebellón, L.F., Torres-Lozada, P., 2021. Thermal pre-treatment as a tool for energy recovery from food waste through anaerobic digestion. Effect on kinetic and physicochemical characteristics of the substrate. *Environ. Technol. Innov.* 21, 101262. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101262>

PAUDEL, S. R.; BANJARA, S. P.; CHOI, O.; PARK, K.; MO KIM, Y.; LEE, J. W. **Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges.** *Bioresource Technology*, Volume 245, Part A, 2017, Pages 1194-1205, ISSN: 0960-8524. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.182>. Acesso em: 05 jan. 2023.

PEIXOTO, K.; CAMPOS, V. B. G.; D'AGOSTO, M. A. A coleta seletiva e a redução dos resíduos sólidos. In: VIII Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente (CBDMA), Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <[aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/pubs/\(7\)coletaresiduossolidos.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/pubs/(7)coletaresiduossolidos.pdf)>. Acesso em: 05 fev. 2023

Pilarski, K., Pilarska, A.A., Witaszek, K., Dworecki, Z., Zelazinski, T., Ekielski, A., Makowska, A., Michniewicz, J., 2016. The impact of extrusion on the bioags and biomethane yield of plant substrates. *Ecol. Eng.* 17, 264–272.

PREETHI; BANU J, Rajesh; VARJANI, Sunita; et al. Breakthrough in hydrolysis of waste biomass by physico-chemical pretreatment processes for efficient anaerobic digestion. *Chemosphere*, v. 294, p. 133617, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653522001060>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. Disponível em: <<https://www.feevale.br/institucional/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

RAJPUT, Asad Ayub; ZESHAN; HASSAN, Muhammad. Enhancing biogas production through co-digestion and thermal pretreatment of wheat straw and sunflower meal. *Renewable Energy*, [S. l.], v. 168, p. 1–10, 2021. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.149. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148120319133>. Acesso em: 28 fev. 2023.

Raposo, F.; De la Rubia, M.A.; Fernández-Cegrí, V.; Borja, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 16, Issue 1, 2012, Pages 861-877, ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>. Acesso em: 05 fev. 2023.

RAZAGHI, Ali; KARTHIKEYAN, O. P.; HAO, H. T. Nguyen; HEIMANN, Kirsten. Hydrolysis treatments of fruit and vegetable waste for production of biofuel precursors. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 217, p. 100–103, 2016. ISSN: 09608524. DOI:

10.1016/j.biortech.2016.03.041. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852416303273>. Acesso em: 28 fev. 2023.

REN, Y.; YOU, M.; WU, C.; WANG, Q.; GAO, M.; HUANG, Q.; LIU, Y. A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies. *Bioresource Technology*. v. 247, p. 1069-1076, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109>

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. Energy mix. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-mix>. Acesso em: 05 fev. 2023.

ROSE, Juliana Lundgren; MAHLER, Cláudio Fernando; IZZO, Ronaldo Luis Dos Santos. Comparison of the methane oxidation rate in four media. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 803–812, 2012. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06832012000300011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000300011&lng=en&tlng=en. Acesso em: 28 fev. 2023.

ROVIRIEGO, L. F. V. Proposta de uma metodologia para a avaliação de sistemas de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-17022006-194345/en.php>. Acesso em: 05 fev. 2023.

SAILER, G.; EICHERMULLER, J.; POESSCH, J.; PACZKOWSKI, S.; PELZ, S.; OESCHSNER, H.; MULLER, J. Characterization of the separately collected organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) from rural and urban districts for a one-year period in Germany, *Waste Management*, Volume 131, 2021, Pages 471-482, ISSN 0956-053X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.004>. Acesso em: 05 fev. 2023.

SARTORI, Simone; LATRÔNICO, Fernanda; CAMPOS, Lucila M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. *Ambiente & Sociedade*, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 01–22, 2014. ISSN: 1809-4422. DOI: 10.1590/S1414-753X2014000100002. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2014000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 6 mar. 2023.

Schirmer, W.N.; Juca, J.F.T.; Schuler, A.R.P.; Holanda, S.; Jesus, L.L. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) landfill: evaluation in refuse of different ages. *Braz J Chem Eng* 2014;31:373–84. Disponível em: [http://refhub.elsevier.com/S1364-0321\(20\)30921-7/sref65](http://refhub.elsevier.com/S1364-0321(20)30921-7/sref65). Acesso em: 22 dez. 2022.

SILVA, Gardênia Azevedo. Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através de teste BMP. 2012. 128f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Paraíba. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação- REASE* *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*. São Paulo, v.8.n.06. jun. 2022. ISSN - 2675 – 3375 1354 da Paraíba. Disponível em: Acesso em: 01 de abril de 2023.

Shah, A.V.; Srivastava, V.K.; Mohanty, S.S.; Varjani, S. Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 9, Issue 4, 2021, 105717, ISSN 2213-3437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105717>. Acesso em: 22 dez. 2022.

Shah, Y.T. Chemical energy from natural and synthetic gas. CRC Press; 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315302355>. Acesso em: 22 dez. 2022.

SHARMA, Hari Bhakta; PANIGRAHI, Sagarika; SARMAH, Ajit K.; DUBEY, Brajesh K. Downstream augmentation of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion for integrated biogas and hydrochar production from the organic fraction of municipal solid waste: A circular economy concept. *Science of The Total Environment*, [S. l.], v. 706, p. 135907, 2020. ISSN: 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135907. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719359029>. Acesso em: 10 mar. 2023.

SHETTY, Deepa J.; KSHIRSAGAR, Pranav; TAPADIA-MAHESHWARI, Sneha; LANJEKAR, Vikram; SINGH, Sanjay K.; DHAKEPHALKAR, Prashant K. Alkali pretreatment at ambient temperature: A promising method to enhance biomethanation of rice straw. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 226, p. 80–88, 2017. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852416316546>. Acesso em: 28 fev. 2023.

SOŁOWSKI, Gawęł; KONKOL, Izabela; CENIAN, Adam. Production of hydrogen and methane from lignocellulose waste by fermentation. A review of chemical pretreatment for enhancing the efficiency of the digestion process. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 267, p. 121721, 2020. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121721. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620317686>. Acesso em: 28 fev. 2023.

SOLTANINEJAD, Ali; JAZINI, Mohammadhadi; KARIMI, Keikhosro. Sustainable bioconversion of potato peel wastes into ethanol and biogas using organosolv pretreatment. *Chemosphere*, [S. l.], v. 291, p. 133003, 2022. ISSN: 00456535. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653521034755>. Acesso em: 28 fev. 2023.

STANLEY, Jason THAMIZHAKARAN ; THANARASU, Amudha; SENTHIL KUMAR, P.; PERIYASAMY, Karthik; RAGHUNANDHAKUMAR, Subramanian; PERIYARAMAN, Premkumar; DEVARAJ, Kubendran; DHANASEKARAN, Anuradha; SUBRAMANIAN, Sivanesan. Potential pre-treatment of lignocellulosic biomass for the enhancement of biomethane production through anaerobic digestion- A review. *Fuel*, [S. l.], v. 318, p. 123593, 2022. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123593. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236122004586>. Acesso em: 28 fev. 2023.

TRAVAINI, Rodolfo; BARRADO, Enrique; BOLADO, Silvia. Sugarcane bagasse ozonolysis pretreatment – Hydrolysates fermentation by brewer’s yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Biotechnology*, [S. l.], v. 208, p. S118, 2015. ISSN: 01681656. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2015.06.373. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168165615006197>. Acesso em: 28 fev. 2023.

TYAGI, Vinay Kumar; FDEZ-GÜELFO, L. A.; ZHOU, Yan; ÁLVAREZ-GALLEGO, C. J.; GARCIA, L. I. Romero; NG, Wun Jern. Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 93, p. 380–399, 2018. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.051. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118303976>. Acesso em: 9 mar. 2023.

UNRIC. Alterações climáticas: emissões de metano são 80 vezes mais responsáveis que o CO₂. Disponível em: <https://unric.org/pt/alteracoes-climaticas-emissoes-de-metano-sao-80-vezes-mais-responsaveis-que-o-co2/>. Acesso em: 05 jan. 2023.

U.S. Climate Science Special Report. Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp. Disponível em: <https://science2017.globalchange.gov/chapter/executive-summary/#fig-3>. Acesso em: 05 jan. 2023.

VALORGAS, 2010. Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe. MTT Agrifood Research Finland (Maa Ja Elintarviketalouden Tutkimuskeskus). VALORGAS Project. Finland. (last consult, 31-01- 2015)

Wei, J., Wang, J., 2013. Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste. Waste Manag. 33, 813–819. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.013>

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing 2021**. Washington, DC. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>>. Acesso em 31 out. 2022.

World Resources Institute. **6 Takeaways from the 2022 IPCC Climate Change Mitigation Report**. World Resources Institute, abr.2022. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/ipcc-report-2022-mitigation-climate-change>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

WU, B. CFD simulation of mixing for high-solids anaerobic digestion. Biotechnol Bioeng 2012;109:2116–26.

XAVIER, Maria Emília Rehder; KERR, Américo Sansigolo. A ANÁLISE DO EFEITO ESTUFA EM TEXTOS PARADIDÁTICOS E PERIÓDICOS JORNALÍSTICOS. São Paulo: Instituto de Física - Usp, 2004.

YAOYANG, Xu; BOEING, Wiebke J. Mapping biofuel field: A bibliometric evaluation of research output. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 28, p. 82–91, 2013. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.027. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113004723>. Acesso em: 28 fev. 2023.

YUE, Liangchen; CHENG, Jun; HUA, Junjie; DONG, Haiquan; ZHOU, Junhu; LI, Yu-You. Improving fermentative methane production of glycerol trioleate and food waste pretreated with ozone through two-stage dark hydrogen fermentation and anaerobic digestion. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 203, p. 112225, 2020. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112225. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890419312312>. Acesso em: 28 fev. 2023.

ZAMRI, M.F.M.A.; HASMADY, S.; AKHIAR, A.; IDERIS, F.; SHAMSUDDIN, A.H., MOFIJUR, M.; RIZWANUL, F.; MAHLIA, T.M.I. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 137, p. 110637, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110637>

Zhang, J., Li, G., Borrion, A., 2021. Life cycle assessment of electricity generation from sugarcane bagasse hydrochar produced by microwave assisted hydrothermal carbonization. *J. Clean. Prod.* 291, 125980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125980>

ZHANG, Le; LIM, Ee Yang; LOH, Kai-Chee; OK, Yong Sik; LEE, Jonathan T. E.; SHEN, Ye; WANG, Chi-Hwa; DAI, Yanjun; TONG, Yen Wah. Biochar enhanced thermophilic anaerobic digestion of food waste: Focusing on biochar particle size, microbial community analysis and pilot-scale application. *Energy Conversion and Management*, [S. l.], v. 209, p. 112654, 2020. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112654. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890420301928>. Acesso em: 28 fev. 2023.

ZHANG, Kun; REN, Nan-Qi; WANG, Ai-Jie. Enhanced biohydrogen production from corn stover hydrolyzate by pretreatment of two typical seed sludges. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S. l.], v. 39, n. 27, p. 14653–14662, 2014. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.07.083. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319914020825>. Acesso em: 6 mar. 2023.

ZHANG J., KAN X., SHEN Y., LOH KC., WANG CH., DAI Y., TONG YW. A hybrid biological and thermal waste-to-energy system with heat energy recovery and utilization for solid organic waste treatment, *Energy*, Volume 152, 2018, Pages 214-222, ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.143>. Acesso em: 05 jan. 2023.

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y., 2014. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Prog. Energy Combust. Sci* 42, 35–53.

ZOU, Huijing et al. Enhanced hydrolysis of lignocellulose in corn cob by using food waste pretreatment to improve anaerobic digestion performance. *Journal of Environmental Management*, [S. l.], v. 254, p. 109830, 2020. ISSN: 03014797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109830. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479719315488>. Acesso em: 28 fev. 2023.