

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

CAIO LOBO MIGLIATI

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES PARA A PRODUÇÃO
DE BIOGÁS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

SÃO CARLOS
2021

CAIO LOBO MIGLIATI

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de Engenharia
Química da Universidade Federal de São
Carlos, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Paula Rúbia Ferreira
Rosa

SÃO CARLOS

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Caio Lobo Migliati, realizada em 16/11/2021:

Prof. Dr. Rodrigo Béttega
DEQ/UFSCar

Dra. Camila Agner D'Aquino
IEE/USP

Prof^a. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa
DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer meus pais, Eliana e Egimar, por proporcionarem desde cedo as melhores oportunidades da minha vida, sendo sempre grandes exemplos. Amo muito vocês.

À minha família que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, principalmente Márcia e Marcelo que me acolheram nos dois primeiros anos em São Carlos.

Agradeço aos meus amigos de São Carlos, que se tornaram uma família para mim e dividiram tanto os momentos difíceis como os momentos bons.

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa, sempre muito paciente, animada e um exemplo de professora e pessoa. À Dra Camila D'Aquino por aceitar fazer parte da banca examinadora e fornecer os dados necessários para realização do estudo de caso.

Sou grato aos meus amigos que sempre estiveram na minha vida e mesmo distantes continuaram sendo pessoas muito importantes e sempre serão.

Agradeço a minha namorada que esteve comigo durante os últimos momentos da faculdade, me dando forças.

RESUMO

Tendo em vista as mudanças climáticas agravadas pelo uso de combustíveis fósseis, cria-se a necessidade de soluções no sentido de reduzir seu uso de forma a auxiliar na redução de gases do efeito estufa (GEE). Aliado a este fato, resíduos alimentares são descartados em grandes quantidades causando severa poluição ambiental em muitos países. Dentre as diferentes rotas de tratamento possíveis, a digestão anaeróbia (DA) de resíduos alimentares para a produção de biogás é uma solução comprovada e eficaz de tratamento e valorização destes resíduos. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise de publicações científicas, apresentando trabalhos relevantes e detalhando os parâmetros mais importantes para a produção de biogás a partir de resíduos alimentares, compreendendo os contornos globais mais amplos de pesquisas científicas e tecnológicas em andamento. Além disso, realizou-se um estudo de caso da planta de biogás do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da USP com intuito de demonstrar a viabilidade deste processo. Para isso, foi feita uma análise detalhada de dados científicos usando o banco de dados na *Web of Science* e Google Acadêmico, e Google acadêmico (GA). Dentre os 677 estudos encontrados, nota-se uma presença grande da China realizando pesquisas e o crescente aumento do interesse no tema, relacionado principalmente a soluções para a mudança climática. Além disso, pelos estudos mais relevantes selecionados pelo GA percebe-se a predominância de sistemas mesofílicos em batelada, com a digestão anaeróbia seca em sua maioria. A planta de biogás demonstrou a viabilidade de se produzir metano em escala industrial, com conteúdo de metano entre 60-65% e cogeração de 53,57 kWh por dia de energia e um total de 152 horas em funcionamento.

Palavras-Chaves: Digestão anaeróbia, co-digestão anaeróbia, resíduos de alimentos, biogás, usina de biogás

ABSTRACT

In view of climate change aggravated by the use of fossil fuels, there is a need for solutions to reduce their use in order to help reduce greenhouse gases (GHG). Allied to this fact, food waste is discarded in large amounts causing severe environmental pollution in many countries. Among the different possible treatment routes, the anaerobic digestion (AD) of food residues for the production of biogas is a proven and effective solution for the treatment and recovery of these residues. Within this context, the objective of this work is to carry out an analysis of scientific publications, presenting relevant works and detailing the most important parameters for the production of biogas from food waste, understanding the broader global contours of ongoing scientific and technological research. In addition, a case study of the biogas plant of the Institute of Energy and Environment (IEE) at USP was carried out in order to demonstrate the feasibility of this process. For this, a detailed analysis of scientific data was performed using the database at Web of Science and Google Scholar, and Google Scholar (GA). Among the 677 studies found, there is a large presence of China conducting research and the growing interest in the subject, mainly related to solutions to climate change. Furthermore, the most relevant studies selected by the GA show the predominance of mesophilic batch systems, with mostly dry anaerobic digestion. The biogas plant demonstrated the feasibility of producing methane on an industrial scale, with methane content between 60-65% and cogeneration of 53.57 kWh per day of energy and a total of 152 hours in operation.

Keys-words: Anaerobic digestion; anaerobic co-digestion; food waste; biogas; biogas plant

LISTA DE SIGLAS

CoDA – Co-digestão anaeróbia

DA – Digestão anaeróbia

kgVS – Quilos de sólidos voláteis

kWel – Kilowatts de eletricidade

kWt – Kilowatts de energia térmica

MWh – Megawatt hora

SF – Sólidos fixos

ST – Sólidos totais

SV – Sólidos voláteis

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Concentração de CO ₂ na atmosfera de 1960 até 2020	16
Figura 2.1.2 – Aumento comparativo da temperatura média do planeta de 1850 a 2020	17
Figura 2.2.1 – Gráfico da distribuição de energia elétrica no mundo em 2020	18
Figura 2.3.1 – Etapas do processo de digestão anaeróbia	20
Figura 2.4.1 – Fluxograma da produção de biogás	25
Figura 2.6.1 – Fluxo da produção de comida até consumo.....	29
Figura 3.1.1 – Pesquisa e análise dos artigos encontrados	46
Figura 3.1.2 – Pesquisa e análise dos dados das Tabelas 2.1 e 2.2	47
Figura 3.2.1 – Dados da usina de biogás da USP.....	48
Figura 3.2.2 (a) – Foto da planta de biogás da USP - São Paulo.....	49
Figura 3.2.2 (b) – Foto da planta de biogás da USP - São Paulo.....	50
Figura 3.2.3 – Planta baixa da usina de biogás.....	51
Figura 3.2.4 – Fluxograma do processo.....	52
Figura 3.3.1 – Imagem da divisão da planta de biogás	53
Figura 3.3.2 – Entrada do processo	54
Figura 3.3.3 – Pontos de coleta de amostras.....	55
Figura 3.3.4 – Análise do biogás através de um analisador portátil	56
Figura 3.3.5 – Unidade de cogeração de energia	57
Figura 4.1.1 – Gráfico dos artigos por país pela Web of Science.....	58
Figura 4.1.2 – Artigos sobre Digestão anaeróbia de resíduos alimentares desde 1979 na base de dados Web of Science.....	59
Figura 4.1.3 – Gráfico de pizza dos tipos de publicações	60
Figura 4.1.4 – Gráfico do país/região dos estudos das Tabelas 1 e 2	62
Figura 4.1.5 – Quantidade de estudos anual desde 2009.....	63
Figura 4.1.6 – Quantidade de vezes que cada substrato foi utilizado para a co-digestão anaeróbia com resíduos alimentares	64
Figura 4.1.7 – Faixas de temperaturas, tipos de DA e modo de operação dos estudos.....	65
Figura 4.1.8 – Gráfico de rendimento de biogás de acordo com sólidos totais e temperatura.....	67

Figura 4.2.1 – Acumulado de resíduos alimentares em toneladas.....	68
Figura 4.2.2 – Gráfico das concentrações diárias de metano e gás carbônico	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos alimentares	30
Tabela 2.2 – Vantagens e dificuldades da produção anaeróbica de resíduos alimentares	35
Tabela 4.1 – Quantidade de estudos por área	61
Tabela 4.2 – Análise de sólidos a 0,75 metros de altura	69
Tabela 4.3 – Análise de sólidos a 2,25 metros de altura	69
Tabela 4.4 – Análise de sólidos a 3,75 metros de altura	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS	15
2.2 FONTES DE ENERGIA.....	18
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA	19
2.3.1 HIDRÓLISE	20
2.3.2 ACIDOGÊNESE	21
2.3.3 ACETOGÊNESE	22
2.3.4 METANOGÊNESE	23
2.4 BIOGÁS.....	24
2.5 SUBSTRATOS UTILIZADOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS	26
2.6 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS ALIMENTARES	28
2.7 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES.....	29
2.8 FATORES QUE INFLUENCIAM A DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES	39
2.8.1 TEMPERATURA	39
2.8.2 QUANTIDADE DE ESTÁGIOS.....	40
2.8.3 PH	41
2.8.4 TAMANHO DA PARTÍCULA	42
2.8.5 RAZÃO CARBONO-NITROGÊNIO E CO-DIGESTÃO.....	43
2.9 OPORTUNIDADES E DESAFIOS FUTUROS PARA A DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 ANÁLISES DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS	45
3.2 ESTUDO DE CASO: APLICABILIDADE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE ALIMENTOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	47
3.3 ETAPAS DO PROCESSO.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS	58

4.1.1 PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS REALIZADAS NA WEB OF SCIENCE.....	58
4.1.2 PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS RELEVANTES REALIZADAS NO GOOGLE ACADÊMICO.....	61
4.2 ESTUDO DE CASO	68
5 CONCLUSÃO	73
6 BIBLIOGRAFIA	74

1 INTRODUÇÃO

Como consequência do aumento da demanda global de energia e das preocupações relacionadas aos combustíveis fósseis, um dos assuntos mais discutidos atualmente é a liberação de gás carbônico para a atmosfera, que tem como consequência o aumento da temperatura média do planeta. Anualmente, tem-se a emissão de 51 bilhões de toneladas de gás carbônico, sendo que 27% são provenientes de fontes de energia dependentes de combustíveis fósseis (GATES, 2020). Este fato é reforçado pelo aumento da temperatura média da superfície da terra superior em 1,1°C, entre 2011 e 2020. Cientistas relataram que esse aumento incomum foi causado por ações humanas (IPCC, 2021). Em razão disso, os processos de bioconversão receberam recentemente uma atenção substancial à produção de energia sustentável (AZADEH ET AL, 2020).

Para a resolução desse problema, buscam-se fontes de energia limpas e renováveis para, ao mesmo tempo, manter o estilo de vida das pessoas e evitar um desastre climático e ambiental. Dentre as fontes de energia renováveis mais utilizadas temos hidrelétrica, solar, eólica e a queima de biomassa, no entanto, apenas essas não são suficientes, então, os processos de bioconversão receberam recentemente uma atenção substancial à produção de energia sustentável (AZADEH ET AL, 2020). Ou seja, a busca pela produção de biocombustíveis está em aumento constante (RITCHIE, 2021). Um exemplo de energia limpa e biocombustível é o biogás, que é obtido através da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos (JAIN, 2019). O principal componente do biogás é o metano, que possui um alto potencial energético de 55,5 MJ/kg, podendo ser utilizado como combustível alternativo (RONNEAU, 2004).

Biogás é produzido a partir da digestão anaeróbia (DA) utilizando biomassa. Este processo está crescendo pelo mundo todo colaborando com a redução da utilização de combustíveis fósseis no mundo afora e, além disso, propõe uma solução viável para outro problema, que é o descarte de resíduos.

Os resíduos de alimentos são abundantes em compostos orgânicos complexos como polissacarídeos, proteínas e lipídios (com conteúdo total de até 80%) e carbono e nitrogênio. Estima-se um total de 931 milhões de toneladas de resíduos alimentares no mundo em 2019, aumento ainda mais a quantidade de lixo acumulado no planeta

(BROWN; LI, 2013; KUMAR; SAMADDER, 2020; CIBIOGÁS, 2020; FORBES; QUESTED; O'CONNOR, 2021).

A aplicação de resíduos alimentares para a produção de biogás tem sido cada vez mais estudada, pelo fato de que é possível se ter nutrientes disponíveis para o crescimento microbiano, que são fornecidas de forma adequada (YIN ET AL, 2016). Diferentes parâmetros-chaves têm sido estudados neste processo, tais como temperatura (WU ET AL, 2015), pH (BEGUM ET AL, 2021), o tamanho ideal das partículas (YONG ET AL, 2015), tipo de reator (BEGUM ET AL, 2021), qual a relação C/N ideal (CAPSON-TOJO ET AL, 2017) e o pH (NGUYN ET AL, 2017). Alguns estudos relatam desafios e dificuldades tais como o acúmulo de ácidos voláteis, que abaixa o pH causando inibição do processo (WANG ET AL, 2012; NGUYN ET AL, 2017, PATINVOH ET AL, 2018; LEE ET AL, 2019).

É provável que uma rápida degradação e baixa razão C/N causem um baixo pH, dificultando a reação e muitas vezes inibindo-a. O substrato apresenta muita variabilidade, em termos de composição e varia suas características de acordo com a época do ano e sua geografia, por exemplo (BONG ET AL, 2018). Recentemente, para se obter uma boa composição de nutrientes e relação C/N mais equilibradas, alguns autores vem propondo uma mistura de substratos. A mistura de substratos proporciona maior produção de biogás e maior estabilidade quando comparada com a mono-digestão (LI ET AL, 2016).

Porém, ainda há uma falta de revisão crítica relacionada aos mecanismos relevantes envolvidos na produção de biogás via DA de resíduos alimentares, com uma forma mais econômica e ambientalmente sustentável, para demonstrar sua aplicabilidade em grande escala. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre as pesquisas em andamento sobre a geração de biogás a partir de resíduos alimentares, por meio da análise de publicações de pesquisa até o momento, para compreender os contornos globais mais amplos de pesquisas científicas e tecnológicas em andamento. Uma revisão abrangente avalia as condições ambientais adequadas e outras condições (pH, tamanho de partícula, relação C/N, temperatura, etc.), efeito de co-digestão anaeróbia (coDA) e pré-tratamentos, e problema de inibição do processo. Além disso, com o objetivo de observar alguns parâmetros na

prática, este trabalho apresentará uma aplicação real de produção de biogás em usina experimental de microgeração elétrica em uma Instituição de Ensino Superior.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Mudanças climáticas são as variações climáticas na temperatura, precipitação e nebulosidade em escala global. Essas mudanças ocorrem em períodos longos e já ocorreram antes, considerando que o planeta passa por ciclos. A última era do gelo ocorreu há cerca de sete mil anos e seu fim deu início a atual era climática (ECYCLE, 2015).

As mudanças climáticas afetam eventos extremos, tornando-os mais comuns, como ondas de calor, chuvas extremas, secas e ciclones tropicais (IPCC, 2021). O aquecimento global é uma consequência das mudanças climáticas, que é causado pelo aumento da emissão dos gases de efeito estufa (GEE's) (GATES, 2020).

O efeito estufa é um efeito que ocorre naturalmente no planeta. A atmosfera terrestre é constituída por gases, principalmente gás carbônico (CO₂), que não afetam a entrada de radiação solar, mas eles absorvem parte da radiação refletida do planeta terra, retendo calor (XAVIER; KERR, 2004). Esses gases são chamados de gases de efeito estufa.

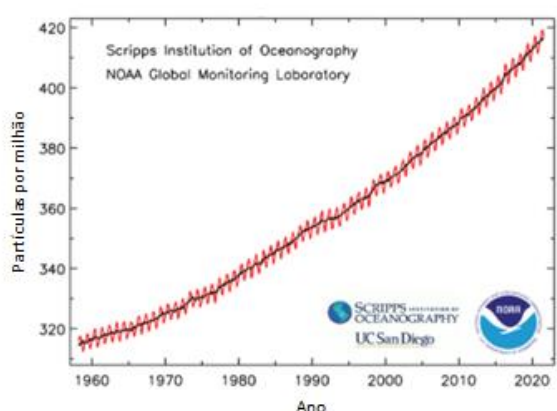
Esse efeito é imprescindível para manter a temperatura do Planeta Terra, caso ele não existisse a temperatura da terra seria inviável para muitas espécies sobreviverem (GATES, 2020). Entretanto, a concentração dos GEE's na atmosfera está aumentando em razão da ação humana. Atualmente, a concentração de CO₂, é de aproximadamente 410 partículas por milhão (ppm) (IPCC, 2021). Essas concentrações elevadas intensificam a ação do efeito estufa, aumentando a temperatura média do planeta.

Cada um dos gases emitidos pelos humanos vem de diferentes fontes e cada um dos gases tem potenciais de aquecimento diferentes. O gás carbônico tem como fonte primária a queima de combustíveis fósseis, por exemplo (EPA, 2017).

Entre os gases de efeito estufa, o que mais é emitido para a atmosfera é o CO₂, sendo aproximadamente 72% dos GEE's lançados na atmosfera (OLIVIER; PETERS, 2020)

A Figura 2.1.1 a seguir ilustra a concentração de gás carbônico na atmosfera a partir de 1960.

Figura 2.1.1 – Concentração de CO₂ na atmosfera de 1960 até 2020

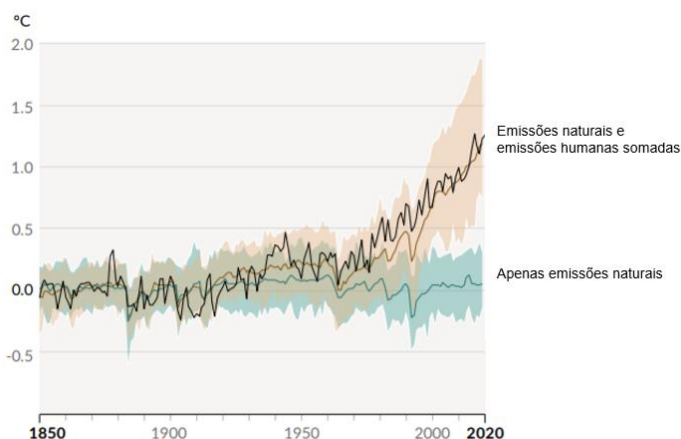


Fonte: Adaptado de NOAA (2021)

A concentração de carbono na atmosfera atingiu níveis nunca atingidos, calculando-se a quantidade de carbono na atmosfera pelo núcleo de gelos formados há 800 mil anos, conclui-se que a concentração de dióxido de carbono nunca passou das 415 ppm, considerando-se todos os ciclos que a terra já passou. Além disso, o carbono emitido continua na atmosfera por muitas gerações, entre 300 e 1000 anos.

Considerando todas as emissões de gases de efeito estufa e seu crescimento, tem-se a Figura 2.1.2 a seguir, que ilustra o aumento da temperatura média do planeta até 2020, comparando as emissões que ocorreriam naturalmente com as emissões totais (emissões humanas mais emissões naturais).

Figura 2.1.2 – Aumento comparativo da temperatura média do planeta de 1850 a 2020



Fonte: Adaptado de IPCC (2021)

O aumento da emissão de gás carbônico se deve a ação humana, vindo de diferentes lugares, sendo a produção de energia, manejo inadequado dos lixões e aterros umas das principais fontes (EPA, 2017).

A emissão de CO₂ se deve especialmente a queima de combustíveis fósseis, nos quais milhares das atividades realizadas atualmente estão relacionadas, dentre elas os transportes, dentre eles carros, aviões, caminhões, trens e ônibus, e a produção de energia elétrica, onde mundialmente a maior parte ainda depende de petróleo, carvão e gás natural (GATES, 2020).

Então, com o intuito de reduzir as emissões de GEE na atmosfera, um acordo foi assinado na COP 21, que aconteceu em Paris. O acordo foi assinado por 196 países com o intuito de limitar o aquecimento global abaixo de 2°C comparando com os níveis pré-industriais e idealmente ficar abaixo de 1,5°C. O acordo de Paris é um marco na luta contra as mudanças climáticas, porque pela primeira vez todos as nações se uniram para debater esse problema (UNFCCC, 2021). Para alcançar essa meta, os países pretendem neutralizar suas emissões de carbono até metade do século e para neutralizar as emissões de carbono, a principal atitude é a troca da matriz energética dos países para fontes renováveis de energia.

Então, em 2016, o Brasil instituiu a lei nº13.576/2017, onde se estabeleceram metas nacionais anuais para a descarbonização no setor de combustíveis para incentivar a produção e a participação de biocombustíveis na matriz energética do país. Além disso, contribuiu para o atingimento das metas assumidas pelo Brasil no acordo de Paris (Ministério de Minas e Energia, 2020).

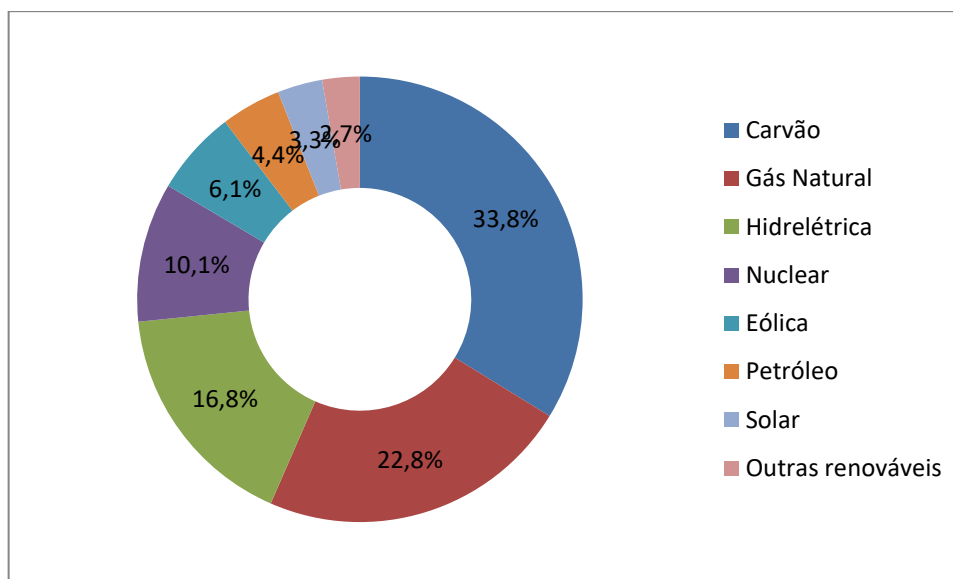
2.2 FONTES DE ENERGIA

As fontes de energia podem ser renováveis e não renováveis. Fontes não renováveis são os combustíveis fósseis, por exemplo. Esses combustíveis ficaram armazenados por longos períodos no subsolo do planeta e quando queimados ocasionam a liberação de uma quantidade de gás carbônico para a atmosfera (GEOGRAPHIC, 2021). Nem todas as energias não renováveis provêm de combustíveis fósseis, energia nuclear é um exemplo.

Fontes renováveis de energia são fontes que estão em constante regeneração, ou seja, não vão se esgotar. Como exemplo de renováveis tem-se biogás, eólica, solar, hidrelétrica e muitas outras (SIGNIFICADOS, 2021).

A Figura 2.2.1 a seguir ilustra como estavam distribuídas as fontes de energia elétrica em 2020 no mundo.

Figura 2.2.1 – Gráfico da distribuição de energia elétrica no mundo em 2020



Fonte: Adaptado de RITCHIE; ROSER, 2021

Pelo gráfico, nota-se que o mundo ainda é muito dependente de energias não renováveis. Carvão é a maior fonte de energia elétrica em 2020, seguida por gás natural. Dentre as fontes renováveis de energia, a mais utilizada é a hidrelétrica, seguida pela energia eólica. Solar atingiu 3,3% da produção de energia elétrica mundial.

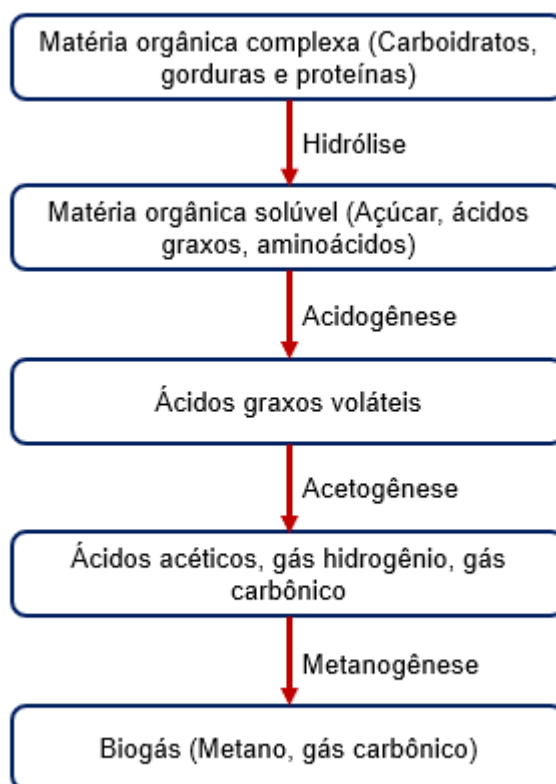
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

Digestão anaeróbia ou decomposição anaeróbia é um processo de transformação de matéria orgânica. É um processo realizado por uma mistura complexa de microrganismos simbióticos e que ocorre em um ambiente sem oxigênio, esses microrganismos são de dois reinos biológicos, as bactéria e as Archea (CHRISTY, 2013).

Para transformar as frações orgânicas em biogás, tem-se antes a estabilização da matéria orgânica em sólidos de águas residuais, redução de patógenos e odores e diminuição de sólidos totais (ST). O processo de digestão tem, também, um produto sólido, que é rico em nutrientes como amônia e nitrogênio (Christy, 2013). Esse produto, ou lodo, por ser rico em nutrientes, é utilizado como fertilizante (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015).

A produção de biogás pela degradação anaeróbia ocorre em quatro etapas, sendo eles hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (AMETA; AMETA; AMETA, 2018). A imagem a seguir na figura 2.3.1 mostra os diferentes passos para geração de biogás.

Figura 2.3.1 – Etapas do processo de digestão anaeróbia



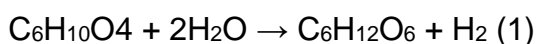
Fonte: Adaptado de Kumar e Samadder (2017)

2.3.1 HIDRÓLISE

Esse é a primeira etapa da digestão anaeróbia, é um processo que envolve a transformação de compostos como lipídeos, polissacarídeos, proteínas, gorduras, ácidos nucleicos etc. (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). A hidrólise é a despolimerização de matéria orgânica, ou seja, é a quebra desses materiais que possuem cadeias longas de carbono para cadeias menores, transformando-os em açúcares, ácidos graxos de cadeias longas e aminoácidos (MEEGODA, 2020). Microrganismos como Clostridia, Micrococci, Bacteroides, Butyrivibrio, Fusobacterium, Selenomonas, Streptococcus secretam diferentes enzimas como celulase, celobiose, xilanase, amilase, protease e lipase em ambientes anaeróbicos (CHRISTY,2013).

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 parte de hidrólise é muito importante porque as moléculas orgânicas são muito grandes para serem absorvidas diretamente, sendo necessária para a bactéria obter todo potencial de energia do material orgânico (MUTHUDINESHKUMAR ET ANAND, 2019). A seguir, a reação (1) é um exemplo de uma reação de hidrólise.



Nesse caso, transforma-se resíduo orgânico em glucose, um açúcar muito mais simples que a molécula original.

A hidrólise é um dos passos da taxa da digestão anaeróbia, por essa razão que se estudou muito métodos para acelerar essa etapa. Existem muitos métodos de pré-tratamentos para otimizar a hidrólise, principalmente quando tem que digerir resíduos lignocelulósicos. Além disso, para otimização da hidrólise trabalha-se normalmente entre 30-50°C e com pH de 5-7 (MEEGODA,2018).

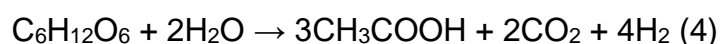
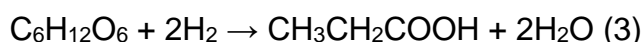
A taxa e a duração da hidrólise dependem também da composição do substrato, ou seja, da quantidade de matéria orgânica (que são materiais à base de carbono) no substrato utilizado na digestão anaeróbia. Essas fontes de carbono podem estar disponíveis para serem biodegradadas, isto é, disponíveis para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

2.3.2 ACIDOGÊNESE

Essa é a segunda fase do processo de digestão anaeróbia é um processo feito por bactérias fermentativas (MUTHUDINESHKUMAR ET ANAND, 2019). Nessa fase tem-se a transformação dos monômeros formados na fase anterior em ácidos orgânicos de cadeias curtas, como ácidos butílicos, ácidos propanoicos, ácidos acéticos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). A

transformação dos materiais orgânicos para ácidos orgânicos causa a diminuição do pH na solução, entre 4,5 – 5,5 (CHRISTY, 2013).

As reações a seguir são exemplos de reações que ocorrem durante a fase de acidogênese, que normalmente tem como principais produtos gás carbônico, hidrogênio, água e materiais orgânicos de cadeias não muito longas, sendo eles ácido acético, ácido propanoico, ácido butanoico, ácido pentanoico e etanol.



Ambas as reações mostram a degradação de glucose, vista no exemplo anterior, na reação (2) tem-se etanol e gás carbônico como produtos, na reação (3) obtém-se ácido propanoico e água e na reação (4) ácido acético, gás carbônico e hidrogênio. Como a formação de metano é facilitada pelos percursos da degradação de ácidos acético e butílico, 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).

As fases de hidrólise e acidogênese têm maiores eficiências em ambientes com maiores temperaturas, mas a acetogênese e a metanogênese podem ter sua eficiência muito reduzida ou até serem inibidas. Altas temperaturas causam um acúmulo muito alto de ácidos voláteis, prejudicando as bactérias das fases seguintes e diminuindo a taxa de metano no biogás produzido (CHRISTY, 2013).

2.3.3 ACETOGÊNESE

As bactérias presentes nessa etapa são muito sensíveis, precisando de longos períodos de adaptação, em caso de mudança de ambiente, de dosagens de matéria

orgânica e crescem devagar. Elas são estritamente anaeróbias e o pH ótimo é por volta de 6 (CHRISTY, 2013).

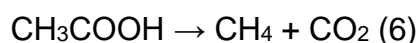
A acetogênese é um processo que degrada componentes da acidogênese que as archeas da metanogênese não são capazes de consumir. Quando se tem uma alta concentração de hidrogênio no estágio anterior da digestão anaeróbia, tem-se o acúmulo de eletrófilos, a degradação desses componentes ocorre nessa etapa (CHRISTY, 2013).

Essa fase depende de uma baixa pressão parcial de hidrogênio para acontecer, em razão disso, as bactérias que realizam a metanogênese trabalham simbioticamente com as bactérias da acetogênese. A acetogênese precisa de receptores de elétrons para ocorrer e os prótons, ou H^+ , que exercem essa função, no entanto, caso a concentração de H_2 esteja muito alta, a oxidação dos outros componentes não acontece (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015).

2.3.4 METANOGENESE

Essa é a última fase da digestão anaeróbia e ela é a reação bioquímica mais lenta dentre todas as fases. Ela produz metano e gás carbônico em condições estritamente anaeróbias (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). Os microrganismos são da classe Archea e utilizam H_2/CO_2 , acetatos, formiatos ou compostos C1 metilados como fornecedores de energia e de carbono (CHRISTY, 2013).

A seguir as equações químicas (5) e (6) mostram os possíveis caminhos para a produção do metano.



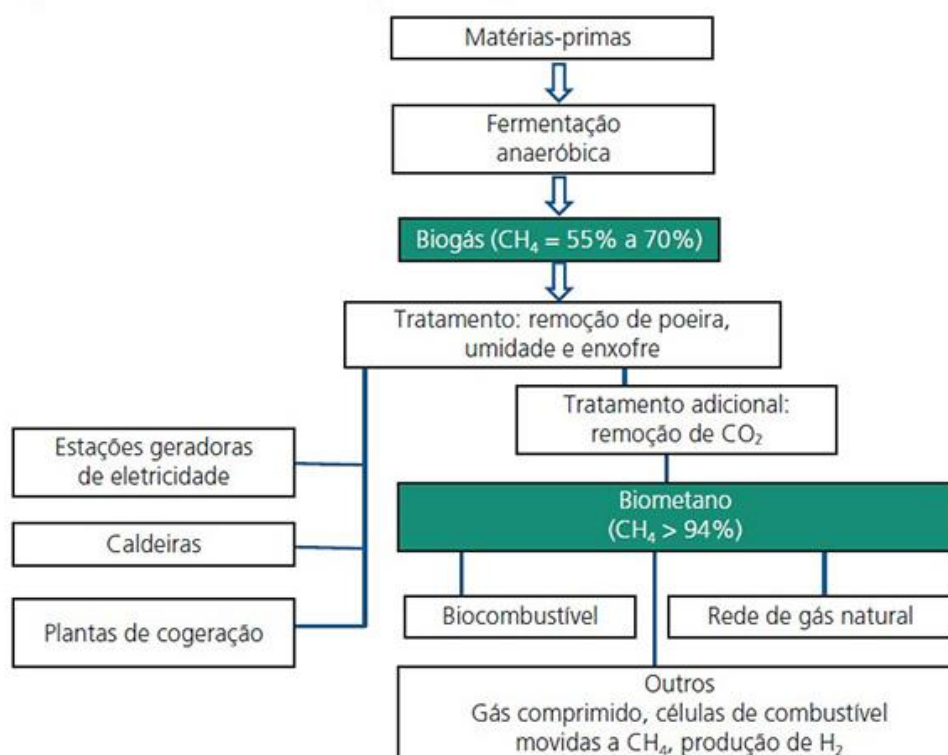
A primeira reação é a redução do dióxido de carbono hidrogenotrófica com gás hidrogênio, também chamada de metanogênese, e é a rota mais comum. A segunda reação mostra a clivagem do ácido acético gerando gás carbônico e gás metano (CHRISTY, 2013).

2.4 BIOGÁS

A descoberta do biogás ocorreu em razão de dois grandes eventos no século 17. Um homem chamado Plinius percebeu que luzes apareceram em pântanos e um homem chamado Van Helmont notou que matérias orgânicas em decomposição produziam gases inflamáveis. A partir disso, entre 1804 e 1810, Dalton, Henry e Davy mostraram que metano poderia ser produzido a partir da decomposição do estrume de vaca. Em 1884 o primeiro biogás feito pelo homem foi gerado pela fermentação de estrume, por um francês chamado Gayon. Finalmente, em 1986, esse processo foi utilizado como combustível das lâmpadas para iluminar as ruas de Exeter, na Inglaterra e a partir de então, são realizados estudos para aprimorar esse processo iniciado no século 19 (MARCHAIM; FAO, 1992).

Hoje em dia, a principal maneira de se produzir biogás é quebrando um ou mais materiais orgânicos com a ausência de oxigênio, ou seja, pela digestão anaeróbia (MILANEZ ET AL, 2018). A Figura 2.4.1 a seguir é um fluxograma que ilustra o processo de produção de biogás desde as matérias primas, passando pela fermentação, em seguida um tratamento do biogás para remoção de impurezas até sua utilização, como biocombustível, na rede de gás natural e outros.

Figura 2.4.1 – Fluxograma da produção de biogás



Fonte: Adaptado de RABONI; URBINI, 2014

O biogás é incolor e sem odor e é composto de diversos gases, sendo metano (CH₄) o principal, que representa de 50% a 75% da composição total em volume, como visto na figura acima. O segundo maior componente é o gás carbônico (CO₂), que representa de 25% a 50% do biogás, e tem-se menores quantidades de gases como vapor de água (H₂O), sulfeto de hidrogênio, conhecido como gás sulfídrico (H₂S), hidrogênio (H₂), amoníaco (NH₃) etc. O biogás é um biocombustível, ou seja, é advindo de fontes renováveis. As fontes do biogás são fontes orgânicas e normalmente são materiais considerados restos e indesejados (dejetos urbanos, podas de jardim, restos de comidas, estrume, vinhaça, etc.) (TEIXEIRA ET AL, 2012).

A molécula de metano é composta de quatro átomos de hidrogênio e um átomo de carbono, sendo considerado o hidrocarboneto mais simples. O metano é um gás em temperatura ambiente e pressão atmosférica e é encontrado em pequenas quantidades na atmosfera.

Esse biocombustível tem seu conteúdo energético diretamente ligado à porcentagem de metano em sua composição, a taxa de energia da queima do biogás

pode variar entre 5,5 e 7 kWh por metro cúbico. Por exemplo, o valor calorífico do biogás com 70% de conteúdo de CH₄ é 21,5 MJ/Nm³, enquanto o do biometano (90% CH₄) é 35,8 MJ/Nm³. O alto volume de CO₂ no biogás reduz o poder calorífico, além de não o tornar econômico (NGUYEN ET AL, 2021).

A maior parte do biogás produzido é atualmente utilizada para a geração de calor e eletricidade. A purificação do biogás para biometano só foi implementada em alguns países para combustível para transporte e injeção de rede de gás natural (Nguyen ET AL, 2021). Importante ressaltar que o biogás pode ter um papel importante no futuro, isso em razão dele poder ser utilizado para inúmeras funções, sendo algumas delas para aquecimento/geração de calor, geração de eletricidade, combustível para veículos e sua utilização em células de combustível (DAMYANOVA; BESCHKOV, 2019).

Atualmente, o Brasil possui 521 plantas de biogás, sendo a grande maioria plantas de pequeno porte e apesar dessa quantidade de plantas de produção de biogás, a parcela de biogás na matriz elétrica é muito baixa, sendo um valor de aproximadamente seis vezes menor que a hidrelétrica de Itaipu produz. Dessas 521 plantas, 439 são utilizadas para a produção de energia elétrica, representando 84%, em menor escala tem-se a produção de energia térmica com 14% das plantas, sendo 7 plantas e as 12 restantes estão divididas em produção de biometano e produção de energia mecânica (CIBIOGÁS, 2020; TEIXEIRA ET AL, 2012; ENERGIA, 2020).

2.5 SUBSTRATOS UTILIZADOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

DA pode ser dividida em três categorias de acordo com o conteúdo de sólidos totais, trabalhando normalmente entre as faixas de 5-35% (KUMAR; SAMADDER, 2020). A digestão anaeróbia é considerada úmida quando TS<10%, semi-seca quando 10%<TS<20% e seca quando TS>20% (KUMAR; SAMADDER, 2020). Existem alguns estudos que consideram a digestão anaeróbica seca com TS>15% (CHO; PARK; CHANG, 1995; DING ET AL, 2015; PANIGRAHI; SHARMA; DUBEY, 2020)

Cada um dos processos tem suas vantagens e desvantagens, o processo úmido tem uma melhor homogeneização, aumentando interação entre nutrientes e microrganismos, ajudando a evitar o acúmulo de inibidores (ácidos graxos voláteis, amônia e metais pesados), pois facilita a diluição dessas substâncias. A maior quantidade de água nesse processo causa também uma maior necessidade de energia para uma mesma quantidade de substrato (ROCAMORA, 2020). Já a digestão anaeróbia seca tem um carregamento alto de materiais orgânicos, necessidade de menos energia e espaço, por precisar de menos água e um melhor manuseio do subproduto, chamado de digestado, que sai com alta concentração de nutriente e precisa de poucos tratamentos posteriores (KUMAR; SAMADDER, 2020).

Para a decomposição anaeróbia toda a biomassa decomponível é adequada, como resíduos de agricultura (palha de trigo, palha de arroz, palha de milho, entre outros), resíduos de animais, sendo muito comum estrume de gado e resíduos de alimentos, que são o foco desse estudo (MUTHUDINESHKUMAR; ANAND, 2019).

A grande maioria dos substratos disponíveis para a digestão anaeróbia pode ser dividida entre as cinco seguintes categorias: Fração orgânica de resíduos sólidos municipais, resíduos orgânicos da indústria de alimentos, resíduos de colheitas de agricultura, estrume e águas residuais de plantas de tratamento (CARLSSON; LAGERKVIST; MORGAN-SAGASTUME, 2012). Em uma visão mais aprofundada, o controle da relação C/N do substrato melhora as características da comunidade microbiana e a atividade das principais enzimas no sistema de fermentação (CHEN ET AL, 2021).

Existem muitos artigos na literatura que demonstram a viabilidade de se produzir metano, a partir de diferentes substratos tais como estrume de gado e porco, diversos tipos de palha, como trigo, arroz e milho, podas, resíduos de águas industriais etc (MUTHUDINESHKUMAR ET ANAND, 2019). Além disso, parâmetros do processo como concentração de substrato (CHEN ET AL, 2014), pH (BEGUM ET AL, 2021), tempo de detenção (KIM; OH, 2011), tipo de reator e lama (WESTERHOLM; LIU; SCHURER, 2020), foram analisados. Por exemplo, ANDRÉ ET AL. (2019) avaliou o efeito da co-digestão de estrume de gado com grama de beira de estrada como substratos. Com isso, foi possível alcançar um rendimento de biogás de 232 L/kgVS.

2.6 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS ALIMENTARES

Resíduos alimentares incluem resíduos de alimentos de cozinhas, restaurantes, cantinas, domicílios e incluem resíduos de frutas e vegetais. De acordo com os diferentes hábitos alimentares, a composição desses resíduos irá variar, com arroz, vegetais, carne, ovos e outros componentes principais (ZHANG ET AL, 2014). Esses resíduos apresentam uma alta quantidade de sólidos se comparados com os substratos tradicionais da indústria de produção de biogás. Os resíduos de alimentos possuem em média 27,59% de sólidos totais e 25,91% de sólidos voláteis (SV), já o estrume de gado possui 16,3% de ST e 13,2% de SV. D'Aquino, Santos e Sauer (2021) utilizam uma amostra de resíduos alimentares com 29,5% de ST e 28,9% de SV. Além dessa maior quantidade de sólidos, os resíduos alimentares costumam ter alta concentração de lipídeos que em teoria sua hidrólise resulta no dobro de metano por quilos de sólidos voláteis que carboidratos e proteínas (BONG ET AL, 2018).

Os resíduos alimentares possuem baixa relação C/N e baixo pH, normalmente abaixo de 5,5. Essa baixa relação C/N e baixo pH podem acelerar a acidificação do sistema, mas por possuírem alto conteúdo de proteína, eles liberam amoníacos, que podem inibir os ácidos acumulados. Além disso, os resíduos de alimentos se degradam muito rapidamente, o que pode causar um acúmulo de ácidos graxos voláteis. Esse substrato tem um alto coeficiente de variabilidade, dependendo do continente, da fonte de coleta e também da estação (BONG ET AL, 2018).

Outro fator importante é o alto teor de umidade, sendo que estes resíduos são substrato orgânico facilmente biodegradável. Sem quaisquer medidas eficazes de tratamento, o descarte de resíduos alimentares tem causado severa poluição ambiental em muitos países (ZHANG ET AL, 2014).

Xu et al. (2018) mostra como são obtidos os resíduos alimentares, sendo o primeiro proveniente da produção de comida. Entre 7,5-17,5% da produção de alimentos se torna resíduo, sendo por causa de técnicas pouco efetivas de coleta, infraestrutura precária de transporte etc. Em seguida, entre 0,5-3,8% dos alimentos processados e embalados se tornam resíduos. Depois, entre 2,0-3,4% dos alimentos para distribuição e de marketing se tornam resíduos e por último, entre 1,2-25,6% dos alimentos destinados ao consumo são desperdiçados, sendo eles pré e pós cozinhar, alimentos vencidos ou indesejados e alimentos das embalagens (Fig. 2.6.1).

Figura 2.6.1 – Fluxo da produção de comida até consumo



Fonte: Adaptado de Xu et al. 2018

2.7 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES

O foco desse estudo é compreender o estado da arte da digestão anaeróbia de resíduos alimentares. Os resíduos de alimentos podem ser de diferentes composições, isso porque depende muito do que ele é composto. Em razão dessa alta variação da composição, algumas características variam bastante quando os resíduos alimentares são usados na digestão anaeróbia. Por exemplo, o parâmetro mais importante é a razão C/N. Nos resíduos alimentares fica por volta de 11,4 até 18,2 (ZHANG ET AL, 2019; CAPSON-TOJO ET AL, 2017; WANG ET AL, 2012). No entanto, na literatura, a relação C/N entre 10 e 45 é ótima para bactérias da hidrólise/acidogênese e entre 20 e 30 para bactérias da metanogênese (D'Aquino; Santos; Sauer, 2021). O tamanho de partícula que também é importante, foi estudado com um mínimo de 0,3mm nos experimentos analisados. Além disso, esses resíduos podem ser ricos de lipídios ou carboidratos ou proteínas, dependendo do alimento (YONG ET AL, 2015).

Como pode ser qualquer alimento que é biodegradável, o tamanho das partículas possui tamanhos diferentes, como alguma folha de vegetal ou grãos de arroz. É necessária uma padronização de tamanhos para que se obtenha uma mistura mais homogênea (YONG ET AL, 2015).

Os estudos analisados nas Tabelas 2.1 e 2.2 focam na utilização de resíduos alimentares, que ainda são pouco explorados. Alguns trabalham utilizando uma combinação de substratos, como estrume de gado e suíno e resíduos da agricultura como palha de trigo, palha de arroz e palha de milho (LI; CHEN; LI, 2009; YONG ET AL, 2015).

Tabela 2.1 – Estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos alimentares

Autores	Objetivos	Substrato	Modo de operação	Temperatura (°C)	Porcentagem de Sólidos Totais	Rendimento máximo de metano (L/kgVS)
Li; Chen e Li (2009)	Investigar a performance da co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e estrume de gado em um sistema de dois estágios	Resíduos alimentares e estrume de gado	Semi-contínuo	35±2	-	-
Kim e Oh (2011)	Analisar diferentes misturas de resíduos sólidos orgânicos em processo contínuo	Resíduos de alimentos, resíduos de papel e estrume de gado	Contínuo	35±1	30; 40; 50	-
Wang et al. (2012)	Estudar os efeitos de misturar restos de comida com grãos de destilaria	Resíduos de alimentos e grãos de destilaria	Batelada	Mesofílica	20	160
Brown e Li (2013)	Determinar a razão ótima alimentação/efluente (F/E) e restos de comida/podas para produção de biogás	Podas de jardim e resíduos de alimentos	Batelada	36±1	-	715
Dai et al. (2013)	Comparar a performance e a estabilidade da co-digestão de lodo desidratado e restos de alimentos com suas respectivas mono digestões	Lodo desidratado e restos de alimentos	Semi-contínuo	35±1	7; 10,7; 12,9; 15,2; 17,4	-
Shen et al. (2013)	Investigar a produção de bio-metano e a estabilidade da coDA de resíduos de cozinha e resíduos de frutas e vegetais	Resíduos de cozinha e resíduos de frutas e vegetais	Batelada	35	-	546
Zhang et al. (2013)	Avaliar a performance da co-digestão de resíduos alimentares e estrume de gado e identificar os parâmetros chave para a produção de biogás	Resíduos alimentares e estrume de gado	Batelada e semi-contínuo	35±1	3,2	388
Chen et al. (2014)	Investigar o efeito da porcentagem de ST na coDA de resíduos alimentares e resíduos verdes	Resíduos alimentares e resíduos verdes	Batelada	37±1	5; 10; 15; 20; 25	272
Wu et al. (2015)	Estudar a diminuição de temperatura durante o processo para a digestão anaeróbia de resíduos alimentares.	Resíduos alimentares oleosos	Semi-contínuo	Mesofílica e termofílica	7,6	450
Yong et al. (2015)	Investigar a co-digestão de resíduos alimentares com palha, analisando a razão entre os substratos e o tamanho da partícula de palha	Resíduos de alimentos e palha	Batelada	35	-	392

Autores	Objetivos	Substrato	Modo de operação	Temperatura (°C)	Porcentagem de Sólidos Totais	Rendimento máximo de metano (L/kgVS)
Li et al. (2016)	Avaliar a co-digestão de resíduos de tomate com estrume de gado leiteiro e palha de milho	Resíduos de tomate, estrume de gado e palha de milho	Batelada	35	20	279
Capson-Tojo et al. (2017)	Analisar a influencia da carga orgânica inicial e dos sólidos totais iniciais na DA seca de restos de comida e sua coDA com papelão	Resíduos de alimentos e papelão	Batelada	35	20; 30	464
Nguyen et al. (2017)	Examinar a performance de DA mesofílica e termofílica, avaliar a produção de biogás, explicar a relação da taxa de carregamento de sólidos a produção de energia sustentável	Resíduos de comida Sul Coreana	Semi-contínuo	38 e 55	22	730
Paudel et al. (2017)	Estudar o processo contínuo em um tanque de mistura contínua para produzir metano e hidrogênio.	Resíduos alimentares e água marrom	Contínuo	37	05/out	728
Arelli et al. (2018)	Entender a eficiência da DA seca de restos de comida crus e pré-tratados em comparação com DA úmida e fazer o mesmo com a co-digestão anaeróbica com estrume de gado	Resíduos de alimentos e estrume de gado	Batelada	37±2	25; 30	430
Patinvoh et al. (2018)	Investigar a coDA seca de resíduos cítricos, penas de galinha, palha de trigo e estrume coberto de palha	Resíduos cítricos, penas de galinha, palha de trigo e estrume coberto de palha	Batelada e contínuo	37±1	20; 21; 32	238
Lee et al. (2019)	Análise da performance da DA à seco de restos de comida, podas e resíduos de lodo ativado variando a razão S/I, fontes de alcalinidade, razão da mistura de substratos e aclimação do inóculo	Resíduos de alimentos, podas e resíduos de lodo ativado	Batelada e semi-contínuo	35	20	225
Zhang et al. (2019)	Investigar os efeitos de WAS como inóculo depois de cultura anaeróbica em períodos diferentes de DA seca	Esterco de porco, palha de milho e resíduos de pepino	Batelada	35±1	20	210
Bedoic et al. (2020)	Estudo em escala laboratorial da co-digestão anaeróbica com pré-tratamento e posterior digestão anaeróbica de resíduos alimentares e lodo de águas residuais tratado	Resíduos de alimentos, lodo de águas residuais tratado, carne e farinha de osso	Batelada	40,5	5	-
Funmi et al. (2020)	Avaliar a utilização de digestores anaeróbicos em maior escala para mitigação das mudanças climáticas	Resíduos de alimentos e podas	Batelada	Mesofílica	11; 22; 26	-
Mu et al. (2020)	Analisar a co-digestão de lodo de esgoto, resíduos de alimentos e podas em sistema semi-contínuo	Lodo de esgoto, resíduos alimentares e podas	Semi-contínuo	37		

Autores	Objetivos	Substrato	Modo de operação	Temperatura (°C)	Porcentagem de Sólidos Totais	Rendimento máximo de metano (L/kgVS)
Panigrahi; Sharma; Dubey (2020)	Otimizar razão F/M baseada na produção de metano, prever a produção de metano e parâmetros bio cinéticos usando três modelos diferentes e investigar a aplicabilidade de pre tratamento no campo	Podas de jardim e resíduos de alimentos	Batelada	30	15	431
Perin et al. (2020)	Comparar a performance da digestão anaeróbia de resíduos alimentares e da coDA de resíduos alimentares e podas de jardim	Resíduos alimentares e podas	Batelada	36	9; 26%	-
Westerholm; Liu; Schurer (2020)	Rastrear e analisar desempenho do processo de plantas HST em escala industrial usando resíduos de alimentos para produção de biogás, a fim de identificar desafios e perspectivas para HST	Resíduos de alimentos	Contínuo	39; 42; 54 e começando em 52 diminuindo até 38	-	-
Begum et al. (2021)	Avaliar a performance de um CSTR auto-alimentado em escala piloto de uma digestão sólida anaeróbica de restos de comida rica em ácido acético e papelão	Resíduos de alimentos moídos e papelão	Batelada	37±0,1	19; 21; 23; 24	740
Ding et al. (2021)	Aprimorar a capacidade do tratamento e a estabilidade do processo por meio de uma digestão anaeróbia de dois estágios de restos de comida combinando acidogênese de estado sólido e metanogênese/recirculação do lixiviado	Resíduos de alimentos e Lixiviado	Semi-contínuo	37±1	16	393
Li et al. (2021)	Avaliar os impactos do aumento de sólidos totais na performance da digestão anaeróbica e avaliar viabilidade econômica e ambiental	Estrume de gado leiteiro e resíduos de pepino	Batelada	35±1	6 a 25	230

Fonte: Adaptado de Li; Chen; Li, 2009; Kim; Oh, 2011; Wang et al, 2012; Brown; Li, 2013; Dai et al, 2013; Shen et al, 2013; Zhang et al, 2013; Chen et al, 2014; Wu et al, 2015; Yong et al, 2015; Li et al, 2016; Capson-Tojo, 2017; Nguyen et al, 2017; Paudel et al, 2017; Arelli et al, 2018; Patinvoh et al, 2018; Lee et al, 2019; Zhang et al, 2019; Bedoic et al, 2020; Funmi et al, 2020; Mu et al, 2020; Panigrahi; Sharma;Dubey, 2020; Perin et al, 2020; Westerholme; Liu; Schurer, 2020; Begum et al, 2021; Ding et al, 2021; Li et al, 2021.

Nota-se que os estudos da Tabela 1 em sua maioria utilizam a batelada como modo de operação, independente do substrato usado. Entretanto, alguns estudos utilizam outros modos de operação, como contínuo (PATINVOH ET AL., 2018 e KIM E OH, 2011). Os estudos de Ding et al. (2021) e Lee et al. (2019) utilizam modos semi-contínuos. As faixas de temperaturas em digestões anaeróbias costumam ficar entre 35 e 37°C, apenas alguns poucos estudos avaliados utilizaram faixas maiores de temperatura (NGUYEN ET AL, 2017; BEDOIC ET AL, 2020; WESTERHOLME, LIU e SCHURER, 2020). A quantidade de sólidos varia desde 3,2% até 50%, mostrando uma ampla faixa aplicada nos estudos. Li et al (2021), por exemplo, comparou o rendimento entre os diferentes tipos de digestão anaeróbia (úmida e seca), com variações de sólidos totais iniciando em 6% até 25%. O rendimento máximo de metano variou entre 120 e 730 L/kgVS dependendo do substrato e condições operacionais dos reatores.

Brown e Li (2013) obtiveram o segundo maior rendimento de metano, com um rendimento de 715 L/kgVS, a partir de um processo em batelada em temperaturas mesofílicas (36°C) utilizando a co-digestão anaeróbia seca com podas de jardim. Nguyen et al (2017) obtiveram um rendimento um pouco maior, de 730 L/kgVS, utilizando modo de produção semi-contínuo de resíduos alimentares de comidas sul-coreanas em temperaturas termofílicas (55°C), também em digestão anaeróbia seca com 22% de ST.

Alguns estudos apresentam similaridades como Begum et al (2021) e Capson-Tojo et al (2017), ambos estudos utilizam restos de comida e papelão na digestão e obtiveram rendimentos de 120 L/kgVS e 464 L/kgVS respectivamente.

De uma maneira geral, a maioria dos estudos teve maior frequência com temperaturas próximas de 35°C, reatores batelada e porcentagem de sólidos totais na faixa de 20%. Para este caso, o maior rendimento de metano foi de 715 L/kgVS a partir de resíduos alimentares e podas de jardim (BROWN; LI, 2013).

Importante ressaltar que mesmo utilizando mesmos substratos, a quantidade de biogás produzida é diferente, Begum et al, 2021, na qual obtém-se um máximo de 120 L/kgVS utilizando-se restos de comida e papelão. Já Capson-Tojo et al (2017) obtém 464 L/kgVS utilizando o mesmo substrato, podendo observar que outros fatores

que influenciaram os resultados finais, como a proporção dos materiais, taxa de carregamento orgânico e diferença da razão substrato por inóculo. Sabendo disso pode se afirmar que cada um dos processos tem suas particularidades e principais fatores que influenciam o rendimento de metano.

A seguir a Tabela 2.2 mostra as principais vantagens de cada um dos processos de digestão anaeróbia de resíduos de alimentos e seus principais problemas.

Tabela 2.2 – Vantagens e dificuldades da produção anaeróbica de resíduos alimentares

Autores	Vantagens	Problemas e Dificuldades
Li; Chen e Li (2009)	Aumento do rendimento de biogás com a adição de resíduos de alimentos e aumento do rendimento de biogás com o aumento da taxa de carregamento de orgânicos. Dois estágios apresentam boa estabilidade pela alta capacidade de amortecer variações de pH	Estrume de gado possui mais componentes difíceis de degradar, como celulose e lignina, necessitando de maior tempo para a hidrólise.
Kim e Oh (2011)	Melhor desempenho com HRT diminuindo até 40d aumenta produção de biogás e TS 40% também para coDA de restos de comida e resíduos de papel.	Aumento muito grande na taxa de estrume de gado (60%) diminui muito o desempenho em razão do acúmulo de amônia
Wang et al. (2012)	Co-digestão apresenta maior produção de biogás, é mais estável e apresenta melhor razão C/N	DA de resíduos de alimentos apresenta alto acúmulo de ácidos graxos voláteis
Brown e Li (2013)	DA seca aceita mais impurezas como vidro plástico etc	Quando combinar dois substratos diferentes deve-se se atentar a seleção desses substratos para melhor eficiência
Dai et al. (2013)	Co-digestão aumenta a estabilidade e o rendimento de biogás no processo	Mono-digestão de lodo desidratado tem acúmulo de ácidos graxos voláteis. Mono-digestão de resíduos alimentares tem acúmulo de íons de sódio, interferindo no metabolismo das bactérias
Shen et al. (2013)	Dois estágios performam melhor que apenas um estágio com altas taxas de carregamento de orgânicos. Altas concentrações de ácido propiônico não inibiram o processo em dois estágios	Baixas taxas de carregamento de orgânicos desfavorece o processo em duas etapas
Zhang et al. (2013)	A coDA aumenta a taxa de metano e pode ter uma maior taxa de carregamento de orgânicos	A taxa de carregamento atinge um ponto ótimo e quando passa dele tem-se uma grande redução da taxa de produção de metano
Chen et al. (2014)	Aumento da porcentagem de sólidos voláteis (15% e 20%) aumenta a produção de metano	Taxa de carregamento com 25% de sólidos totais causou inibição no processo
Wu et al. (2015)	Reciclo melhora o pH da primeira etapa, favorecendo a hidrólise. Degradação maior dos lipídios ocorre em um sistema de uma etapa. Reciclo favorece a quebra de ácidos graxos de cadeias longas na segunda etapa.	Baixo pH na primeira fase do sistema de recirculo causou uma hidrólise precária. Reciclo favorece o acúmulo de ácidos na primeira etapa.
Yong et al. (2015)	Aumentando a proporção de mistura para até 5:1 (restos alimentares: palha) aumenta-se a produção de metano. Diminuir o tamanho da partícula melhora o rendimento de metano até 0,6mm	A partir de 6:1 até 8:1 tem-se a diminuição na produção de metano. Reduzindo as partículas de 0,6mm até 0,3mm diminuiu o rendimento de metano.
Li et al. (2016)	Esterco muito rico em nitrogênio. Co-digestão do tomate reduz inibidores	DA do tomate sozinho causa inibição por ácidos graxos, porque não é balanceado em nutrientes (C/N).
Capson-Tojo et al. (2017)	Adição de papelão faz o acúmulo de ácidos graxos voláteis serem menos intensos e diminui a diferença com o aumento de carregamentos	Aumento do carregamento de orgânicos causa maior acúmulo de ácidos graxos voláteis e menores rendimentos de metano

Autores	Vantagens	Problemas e Dificuldades
Nguyen et al. (2017)	Aumentando a taxa de carregamento de sólidos aumenta-se a proporção de metano no biogás. Sistema termofílico aumenta o rendimento de metano. Porcentagem de metano no sistema mesofílico é maior	Alta concentração de ácidos graxos voláteis em ambos os reatores
Paudel et al. (2017)	Produção de metano favorecida com a adição de água marrom.	Aumento do tempo de retenção hidráulico desfavorece a produção de hidrogênio, adição de água marrom não contribui significativamente para a produção de hidrogênio.
Arelli et al. (2018)	Utilização de resíduos de alimentos crus, cozidos e estrume facilitam a estabilização do reator. Mistura de resíduos de alimentos crus e cozidos melhora a razão C/N, assim como o pré-tratamento.	Sem pré-tratamento a qualidade do biogás é menor, com menor proporção de metano.
Patinvoh et al. (2018)	Ajuste da razão C/N por conta da coDA e ajuste da acidez dos resíduos de limão	Instabilidade causada pelo alto carregamento de orgânicos, porque causou acúmulo de ácidos graxos voláteis. Resíduos cítricos e penas de galinha tem menor produção de metano quando são digeridas sozinhas
Lee et al. (2019)	Em estado sólido resíduo de lodo ativado requer menor reator, menores perdas de energia parasitárias e fluxo secundário menos rico em nutrientes. Mistura de restos de comida com podas tem melhor razão C/N	Apenas resíduos de lodo ativado em estado sólido tem muito acúmulo de ácidos graxos voláteis e amônia
Zhang et al. (2019)	Cultivo anaeróbico do WAS aumenta a performance do processo	Dificuldade de transferência de massa pode fazer a digestão ocorrer de maneira desigual
Bedoic et al. (2020)	Os co-substratos aceleram a taxa de reação de resíduos alimentares	Lodo de águas residuais tratado diminui o rendimento de metano, assim como carne e farinha de osso.
Funmi et al. (2020)	Digestão anaeróbica a seco tem um carregamento de material orgânico maior, menos digestato no fim do processo, menor necessidade de energia.	Digestão anaeróbica a seco tem maior tempo de retenção, mistura incompleta e maior acúmulo de inibidores
Mu et al. (2020)	Resíduos alimentares possibilitam a digestão anaeróbia de podas e lodo de esgoto, por conta da razão C/N	Lodo de esgoto possui muita proteína, pode causar acúmulo de amônia. Os nutrientes de cada substrato variam bastante, causando desbalanceamento e podia não ter os requerimentos necessários para crescimento de microrganismos.
Panigrahi; Sharma; Dubey (2020)	DA seca tem alta capacidade de carga orgânica, alta tolerância para cargas inorgânicas, maior produção volumétrica de metano e nenhuma chance de estratificação encontrada em materiais flutuantes.	DA seca tem um alto tempo de início, em razão das fibras de celulose ficar protegidas pelas ligninas na hidrólise. Razão comida/massa (F/M) pode afetar e até inibir a DA. Dificuldade de achar e manter razão ótima de C/N.
Perin et al. (2020)	Adição de podas de jardim aumenta a porcentagem de metano no biogás e a taxa específica de metano.	Resíduos alimentares fazem o pH ficar baixo (foi necessária a correção de pH). Aumento do carregamento de orgânicos desestabiliza o processo.
Westerholm; Liu; Schurer (2020)	Na tecnologia plug flow precisa de menos espaço, menos água (consequentemente menos energia pra esquentar) e diminui necessidade de pré-tratamento	Nos CSTRs alto conteúdo de sólidos totais (>15%) impede bombeamento e mistura

Autores	Vantagens	Problemas e Dificuldades
Begum et al. (2021)	Digestão do papelão facilitada quando co-digerido	Baixo pH dos restos de comida em razão do ácido ($\text{pH} < 4$), dificuldade da taxa de carregamento de orgânicos acima de 4 g VS/Ld, acima de 40% de papelão alta diminuição da taxa de biogás
Ding et al. (2021)	Em dois estágios consegue se trabalhar com diferentes pHs, otimizando o processo	Limitação em processos industriais em razão da dificuldade da transferência de massa, que diminui a eficiência do processo, o tempo de retenção tem que ser três vezes maior que de estado líquido e como FW tem uma degradação rápida resulta em um acúmulo de ácidos graxos voláteis.
Li et al. (2021)	Aumento de TS de 20 até 22% aumenta biogás, porque aumenta a quantidade de orgânicos.	Aumento de TS de 22% para 25% causou diminuição de biogás em razão de substâncias inibidoras. Esse aumento pode causar aumento de difusão e acúmulo de açúcares, inibindo adsorção de enzimas

Fonte: Adaptado de Li; Chen; Li, 2009; Kim; Oh, 2011; Wang et al, 2012; Brown; Li, 2013; Dai et al, 2013; Shen et al, 2013; Zhang et al, 2013; Chen et al, 2014; Wu et al, 2015; Yong et al, 2015; Li et al, 2016; Capson-Tojo, 2017; Nguyen et al, 2017; Paudel et al, 2017; Arelli et al, 2018; Patinvoh et al, 2018; Lee et al, 2019; Zhang et al, 2019; Bedoic et al, 2020; Funmi et al, 2020; Mu et al, 2020; Panigrahi; Sharma;Dubey, 2020; Perin et al, 2020; Westerholme; Liu; Schurer, 2020; Begum et al, 2021; Ding et al, 2021; Li et al, 2021.

É possível observar que diversos fatores influenciam o rendimento e criam dificuldades nos processos de DA a partir de resíduos de alimentos. Observa-se que o maior desafio é a inibição por acúmulo de ácidos, que abaixam o pH. Begum et al. (2021) tem dificuldades com altas taxas de carregamento (acima de 4 VS/Ld), o que causou instabilidade no processo. Os processos de DA de resíduos alimentares secos apresentaram dificuldades de homogeneização e transferência de massa, como demonstrou o artigo de Westerholm; Liu e Schurer (2020). Nesse caso, nota-se a dificuldade de bombeamento e mistura com conteúdo de sólidos totais acima de 15%. Alguns substratos não têm sucesso na mono-digestão anaeróbia, como acontece no estudo de Li et al (2016) onde a mono-digestão de resíduos de tomate é inibida pelo acúmulo de ácidos graxos e a mono-digestão de esterco é inibida pelo acúmulo de amônia. Quando estes autores utilizam co-digestão, houve uma presença de acúmulo desses inibidores. Begum et al (2021) e Capson-Tojo et al (2017) mostram também a inviabilidade da mono-digestão anaeróbia do papelão sozinho, em razão do tempo necessário para que se inicie e que aconteça a digestão completa, então utilizam a adição do papelão aos restos de comida.

Muitos trabalhos apresentaram uma eficiência maior quando os resíduos alimentares são utilizados como co-substratos para ajustar a relação C/N (ZHANG ET AL, 2019; LI ET AL, 2021). Observa-se no estudo de Lee et al (2019) que o lodo seco, apesar de suas vantagens de precisar de menor quantidade de energia por estar em um reator menor, ele sozinho tem muito acúmulo de ácidos graxos e amônia, então utilizou-se resíduos alimentares como co-substrato para ajustar a digestão e evitar os acúmulos. Então, a DA de resíduos alimentares e podas atingiu uma produção um pouco maior que 125 L/kgVS, no entanto foi possível aumentar a produção de biogás em quase 100 L/kgVS utilizando o lodo na mistura de resíduos alimentares e podas.

Outro parâmetro é o pré-tratamento físico, que é útil na digestão anaeróbia, como no caso de Yong et al (2015). Nesse caso, a palha quando reduzida de tamanho até 0,6 mm aumentou a quantidade de metano final, no entanto, caso ela diminua-se mais chegando até 0,3 mm, o rendimento de metano diminuía. Algo que ocorria por conta da velocidade muito alta da digestão, causando acúmulo de ácidos.

2.8 FATORES QUE INFLUENCIAM A DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES

A DA a partir de resíduos alimentares é um processo complexo que deve simultaneamente digerir todos os substratos orgânicos (por exemplo, carboidratos e proteínas) em um sistema de estágio único (ZHANG ET AL. 2014). Existem muitos fatores que influenciam a eficiência deste processo como a quantidade de carbono, temperatura, a razão carbono-nitrogênio (C/N), quantidade de estágios, tamanho da partícula e pH. Existem quatro etapas na digestão anaeróbia, como dito anteriormente, e para cada uma das etapas existem parâmetros ótimos desses fatores (KUMAR; SAMADDER, 2020). Portanto, é extremamente importante manter os parâmetros importantes dentro da faixa apropriada para operação de longo prazo da DA. Estas chaves parâmetros são discutidos na seção seguinte.

2.8.1 TEMPERATURA

A temperatura é considerada um dos principais parâmetros que afetam o desempenho dos reatores anaeróbicos, principalmente a metanogênese. Existem três categorias de temperatura que os reatores trabalham, começando pela psicrófila, que é a de menor temperatura, trabalhando por volta de 20°C, em seguida a mesófila, por volta de 35°C e, por fim, a termófila, a temperaturas próximas de 55°C. A DA de resíduos alimentares ocorre normalmente em temperaturas mesofílicas ou termofílicas (KUMAR; SAMADDER, 2020). Reatores que trabalham em temperaturas maiores podem ser de volumes menores, isso ocorre em razão da maior temperatura diminuir o tempo de residência dos resíduos orgânicos no reator, diminuindo a necessidade de espaço (KARTHIKEYAN, 2013).

A DA em temperaturas mesofílicas costuma ser mais estável que termofílicas, por serem menos propensas ao acúmulo de ácidos graxos voláteis. Além disso, teriam um menor custo e investimento iniciais menores devido ao fato de ser necessário uma quantidade menor de energia para se obter a mesma porcentagem de metano no biogás (KUMAR; SAMADDER, 2020).

Em ambientes termofílicos, no entanto, a taxa de reação é mais alta, podendo ser possível aplicar maiores taxas de carregamento orgânico e consequente aumento

na taxa de produção de biogás. Outra vantagem de se trabalhar em maiores faixas de temperatura é a de destruição de patógenos, a 53°C a atividade de vários patógenos reduz em 90% em menos de uma hora, já em condições mesofílicas podem demorar alguns dias (MEEGODA, 2018).

Westerholm, Liu e Schurer (2020) (Tabela 2.1) analisam resíduos alimentares em quatro ambientes diferentes de temperatura, sendo eles 39°C, 42°C, 54°C e um deles iniciando em 52°C e abaixando para 38°C. Nesse caso, os estudos com temperaturas de 42°C e o estudo com redução da temperatura foram os que apresentaram a maior taxa de metano específica, de 600L/kgVS. Mesmo o experimento com redução de temperatura apresentando uma alta taxa de metano, o processo sofreu instabilidade durante a fase termofílica, causada pelo acúmulo excessivo de ácidos graxos voláteis e razão propionato/acetato.

O estudo de Nguyen et al (2017) faz uma comparação entre sistemas mesofílicos e termofílicos, trabalhando em 38°C e 55°C. O estudo teve como resultado um rendimento maior de metano no sistema termofílico, contudo, no sistema mesofílico a porcentagem de metano no biogás foi maior.

2.8.2 QUANTIDADE DE ESTÁGIOS

Em um processo de digestão anaeróbia a partir de resíduos de alimentos podemos ter um estágio ou mais estágios, normalmente mono-estágio. Em um estágio todos os quatro passos da digestão ocorrem no mesmo reator, que causa um problema de pH baixo em razão da acidogênese, afetando a produção de metano. A digestão anaeróbia é realizada normalmente em batelada de um estágio (MUTHUDINESHKUMAR ET ANAND, 2019) ou contínuo (Kim; Oh, 2011)

No processo de dois estágios serve ocorre a hidrólise e acidogênese dos resíduos alimentares para voláteis ácidos graxos e subsequente conversão dos ácidos graxos voláteis em biogás por bactérias funcionais específicas no segundo estágio. Com isso, é possível esse problema de pH baixo por causa do acúmulo de ácidos, nesse caso, as fases de hidrólise, acidogênese e acetogênese ocorrem em um primeiro reator e o produto desse reator é transferido para um segundo, onde ocorre a metanogênese (MUTHUDINESHKUMAR ET ANAND, 2019). Para otimização da

produção de biogás, Ding et al (2021) utiliza dois estágios, utilizando essa técnica para trabalhar com dois pH diferentes e obter um rendimento de biogás de 393 L/kgVS. No entanto o processo apresenta dificuldades de transferência de massa de um reator para o outro e conseqüentemente diminui a eficiência do processo. Esse é um dos motivos da maior parte das digestões anaeróbias com alto teor de sólidos acontecerem em um estágio.

Li, Chen e Li (2009) demonstram a importância de dois estágios em razão da sua alta capacidade de amortecimento em alterações de pH. Isso acontece devido a acidogênese acontecer separadamente da metanogênese, que possuem diferentes faixas ótimas de pH. Wu et al. (2015) realizam experimentos utilizando dois estágios com reciclo e demonstram que esse reciclo favorece a quebra dos ácidos na segunda etapa e, além disso, tem um aumento do pH no primeiro estágio, obtendo um rendimento na faixa de 440 L/kgVS.

2.8.3 pH

A estabilidade no processo de digestão anaeróbia é indicada pelo pH, sendo necessária uma monitoração constante dele para que não se tenha problemas durante o processo. O pH ótimo para uma digestão mais eficiente é por volta de 7, podendo variar de 6,5-8,5 na literatura (KUMAR; SAMADDER, 2020).

Fatores como acúmulo de amônia ou acúmulos de ácidos graxos voláteis podem alterar o pH da mistura. Quando se tem o acúmulo de ácidos graxos voláteis, o meio pode chegar a pH mais baixos, entre 4-5,5, quando isso acontece, tem-se a inibição da metanogênese. O acúmulo de amônia é semelhante, caso o pH do processo passe de 8,5 a metanogênese é inibida, parando a produção de metano (KUMAR; SAMADDER, 2020).

Podem-se utilizar dois ou mais estágios para estabilizar as digestões anaeróbias a fim de estabilizar o pH. De acordo com a Tabela 2 é possível notar que inúmeros estudos utilizam a mistura de substratos para estabilização do pH. Além disso, o pH varia muito dependendo do tipo de substrato utilizado para realizar a digestão.

No estudo de Begum et al (2021), a alimentação dos resíduos alimentares apresentava um $\text{pH} < 4,0$, um pH não favorável. No entanto, o processo de DA entre restos de comida e papelão torna-se factível em estabilidade utilizando-se frequentes micro-alimentações de orgânicos, conseguindo, então, um rendimento máximo de metano de 120 L/kgVS. Brown e Li (2013) apresentou alto resultado em rendimento de metano, um dos maiores dentre os estudos, obtendo 715 L/kgVS a partir de resíduos de alimentos com podas de jardim. Mesmo com o acúmulo de ácidos graxos voláteis (resultando em queda do pH) foi possível obter ótimos resultados de metano.

2.8.4 TAMANHO DA PARTÍCULA

Um pré-tratamento muito comum para o processo de DA é o da redução do tamanho das partículas, em razão do aumento da superfície de contato entre matéria orgânica e microrganismos (ROCAMORA, 2020). A redução de tamanho das partículas melhora a homogeneização da mistura e facilita o manuseio durante a mistura e o bombeamento (KUMAR; SAMADDER, 2020).

A hidrólise é beneficiada pela redução do tamanho das partículas, melhorando a cinética, acelerando a reação (ROCAMORA, 2020). Contudo, pode causar efeitos adversos quando o estágio da hidrólise é demasiadamente acelerado, pelo fato dele acelerar muito a produção dos ácidos graxos e da amônia, desestabilizando o biodigestor (KUMAR; SAMADDER, 2020).

A redução do tamanho da partícula em DA é pouco estudada. Alguns estudos demonstram a diminuição da taxa de metano de acordo com a redução da partícula em tamanhos muito pequenos (YONG ET AL, 2015), enquanto outros não mostram resultados significantes, apesar de melhorar a cinética (ROCAMORA, 2020).

Nota-se a alteração no tamanho das partículas em diversos trabalhos. Begum et al. (2021), por exemplo, utiliza restos de comida como substrato que foram moídos de granulometrias despadronizadas até formada uma lama. No estudo de Lee et al. (2019) os restos de comida são cortados utilizando-se uma tesoura e em seguida passa por uma peneira de 3mm assim como ele faz com as podas de jardim, para melhor homogeneização.

Yong et al. (2015) mostra o cuidado que deve se ter ao reduzir o tamanho de partículas. Reduzindo-se as partículas até 0,6mm foi possível obter o maior rendimento de metano de 310 L/kgVS, no entanto, ao continuar a redução até 0,3mm houve uma redução no rendimento de metano de 50 L/kgVS, em razão da diminuição do pH.

2.8.5 RAZÃO CARBONO-NITROGÊNIO E CO-DIGESTÃO

Carbono é a fonte de energia necessária para os microrganismos e o nitrogênio é a fonte de nutrientes (KUMAR; SAMADDER, 2020). O nitrogênio é derivado de proteínas e serve para o crescimento desses microrganismos (ROCAMORA, 2020). De acordo com muitas literaturas, a razão C/N é um parâmetro fundamental para a eficiência do processo e deve ser mantida entre 20-30 para otimização do processo, no entanto, existem outras faixas em que é possível a obtenção de biogás (KUMAR; SAMADDER, 2020).

O excesso de nitrogênio, ou seja, uma razão C/N baixa pode afetar a taxa de metano e causar a falha do processo da digestão. Isso ocorre porque a alta quantidade de nitrogênio pode causar o acúmulo de amônia no biodigestor, resultando em níveis tóxicos para os microrganismos (KUMAR; SAMADDER, 2020). Alguns trabalhos relatam a dificuldade de digerir alguns substratos na mono-digestão anaeróbia ou demandam muito tempo para que a digestão ocorra, como acontece na mono-digestão anaeróbia de papelão (CAPSON-TOJO ET AL, 2017).

Uma maneira de manter a estabilidade do processo, mantendo a razão C/N em estado ótimo é utilizando a co-digestão de materiais orgânicos. Materiais como papelão, palha, folhas secas têm sido utilizada juntamente com resíduos alimentares (ROCAMORA, 2020). Begum et al. (2021) relatam que para evitar o acúmulo de ácidos causado pela alta concentração de carbono nos restos de comida, adiciona-se papelão à mistura. Dessa maneira se obteve um aumento de estabilidade, no entanto obteve-se um menor rendimento de biogás, tendo uma redução de 470 L/kgVS.

Na DA de resíduos de restos de tomate, ocorre a inibição quando processo ocorre com um único substrato. Porém, sendo possível em co-digestões, com os co-

substratos estrume de gado e palha de milho, em razão do acúmulo de inibidores pelo desbalanceamento da razão C/N (LI ET AL, 2016).

Patinvoh et al (2018) as quantidades de penas de galinhas foram mantidas constantes com objetivo de manter a razão C/N constante entre 12 e 21. Eles obtiveram sucesso e mantiveram a relação C/N entre 19 e 21, para isso misturaram resíduos cítricos (relação C/N de 55,5), palha de trigo (relação C/N de 69) e estrume com palha (relação C/N de 19). Com isso, obtiveram uma relação C/N dentro da faixa indicada na literatura entre 10 e 30.

De acordo com a Tabela 1 os substratos mais utilizados para a co-digestão com resíduos alimentares são estrume de gado e podas. Interessante ressaltar que o Brasil é um país conhecido por ser forte na agropecuária, estando entre os maiores produtores de carne bovina do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (RITCHIE; ROSER, 2021). Isso mostra a oportunidade que o Brasil tem para aumento da sua produção de biogás a partir do uso de co-substratos. Já é possível notar pela quantidade de plantas de biogás utilizando estrume que se tem no país, representando 80% em quantidade, mas em termos de biogás produzido representa apenas 12%. Ou seja, futuros estudos podem ajudar a trazer maiores rendimentos de biogás utilizando-se a coDA dos restos de comida com o estrume de gado disponível no país (considerando suas diferenças geográficas).

2.9 OPORTUNIDADES E DESAFIOS FUTUROS PARA A DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES

É possível notar que muitos estudos relatam instabilidade no processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares. A otimização desse processo é essencial para o futuro de redução de GEE resultando em uma maior independência mundial da queima de gás natural, que atualmente é fonte de aproximadamente 23% de toda matriz elétrica mundial (ROCAMORA, 2020).

A DA de resíduos de alimentos apresenta alguns problemas comuns relacionados ao seu processo, como um alto acúmulo de inibidores, como ácidos graxos voláteis e amônia e, além disso, a variação entre os substratos apresenta dificuldades também, tudo isso dificulta a estabilidade do processo. Porém, o

desequilíbrio do processo pode ser superado por meio da co-digestão de resíduos alimentares com outros resíduos de biomassa, como por exemplo, estrume de gado e podas, que são os mais comuns. Essas misturas resultam em uma relação C/N e outros elementos mais adequados para a DA. Pré-tratamentos também são muito efetivos na digestão anaeróbia de resíduos de alimentos, criando uma padronização que melhoram a eficiência dos processos (KUMAR; SAMADDER, 2020).

No entanto, quando se encontra o ponto ótimo de desempenho e superam esses desafios, a digestão anaeróbia dos resíduos de alimentos apresenta altos rendimentos de metano no seu processo além de ser muito utilizada na coDA, possibilitando a utilização de outros substratos, que na mono-digestão não seriam utilizados, agregando valor a vários tipos de resíduos, que seriam desperdiçados.

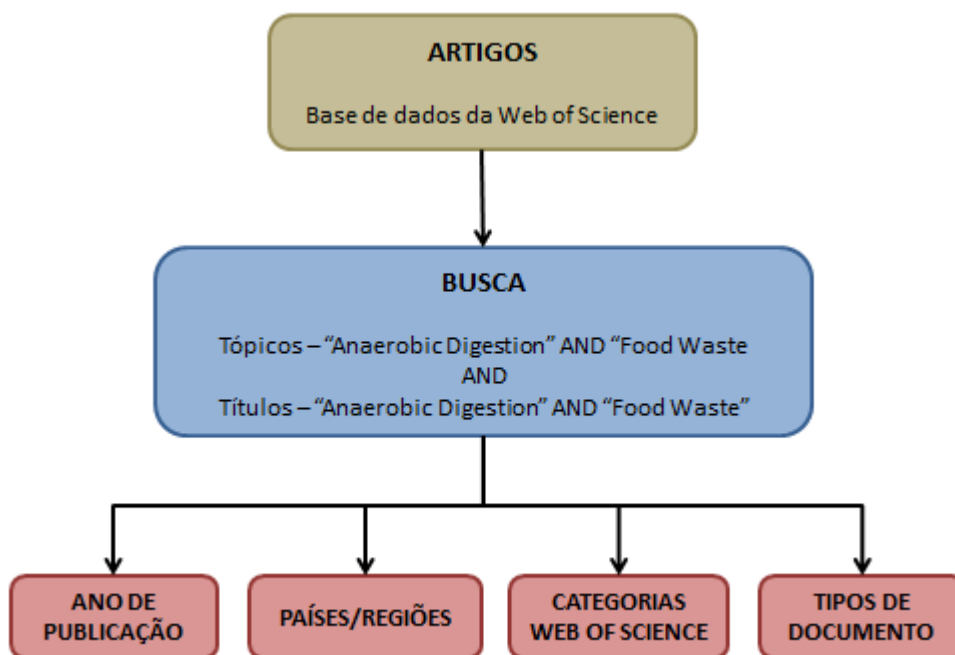
Novos processos poderiam ser desenvolvido para integrar as instalações de resíduos de alimentos com uma biorrefinaria para produzir produtos de alto valor a partir do desperdício de alimentos, com um subsequente Processo de DA que trata os resíduos orgânicos líquidos ou sólidos e fornece processo de calor e energia para a biorrefinaria. Esta abordagem pode aumentar os lucros globais da valorização dos resíduos alimentares, com impactos ambientais reduzidos (XU ET AL, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ANÁLISES DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

Uma análise detalhada foi realizada com dados científicos disponíveis encontrados na literatura sobre resíduos alimentares. Utilizando a base de dados do Thomson Reuters ISI Web of Knowledge (Web of Science), palavras-chaves “anaerobic digestion”, “anaerobic co-digestion” e “food waste” foram pesquisadas por tópico e títulos, a partir do ano de 1979. A partir dessa pesquisa foi feita uma análise baseada em “Ano de publicação”, “Países/Regiões”, “Categorias Web of Science” e “Tipos de documento”. A Figura 3.1.1 a seguir apresenta como foi feita a pesquisa e a análise dos dados encontrados na Web of Science.

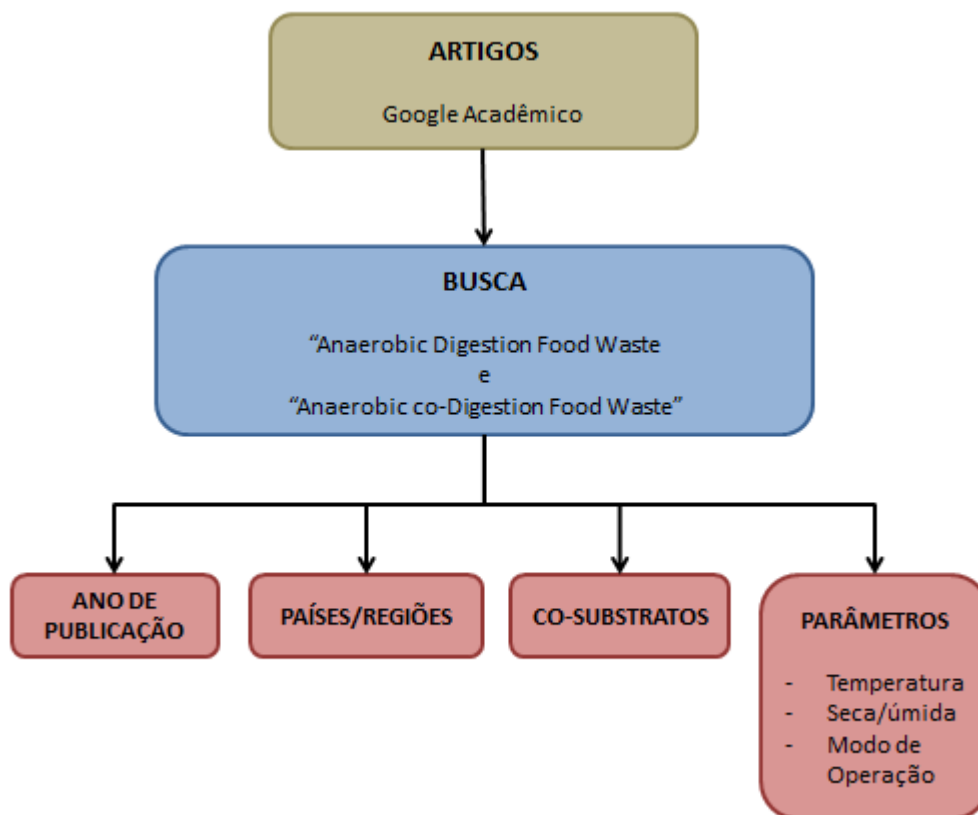
Figura 3.1.1 – Pesquisa e análise dos artigos encontrados



Fonte: acervo pessoal

A partir da Web of Science foi possível encontrar mais de 647 artigos. A fim de apresentar e aprofundar os trabalhos mais relevantes foram selecionados 25 artigos (Tabela 2.1) na qual foram selecionados por relevância no Google acadêmico. De maneira similar, as pesquisas foram realizadas pesquisando por “anaerobic digestion food waste” e “anaerobic co-digestion food waste”. A Figura 3.1.2 a seguir mostra como foi feita a pesquisa e as análises relevantes feita pelo google acadêmico.

Figura 3.1.2 – Pesquisa e análise dos dados dos artigos mais relevantes



Fonte: acervo pessoal

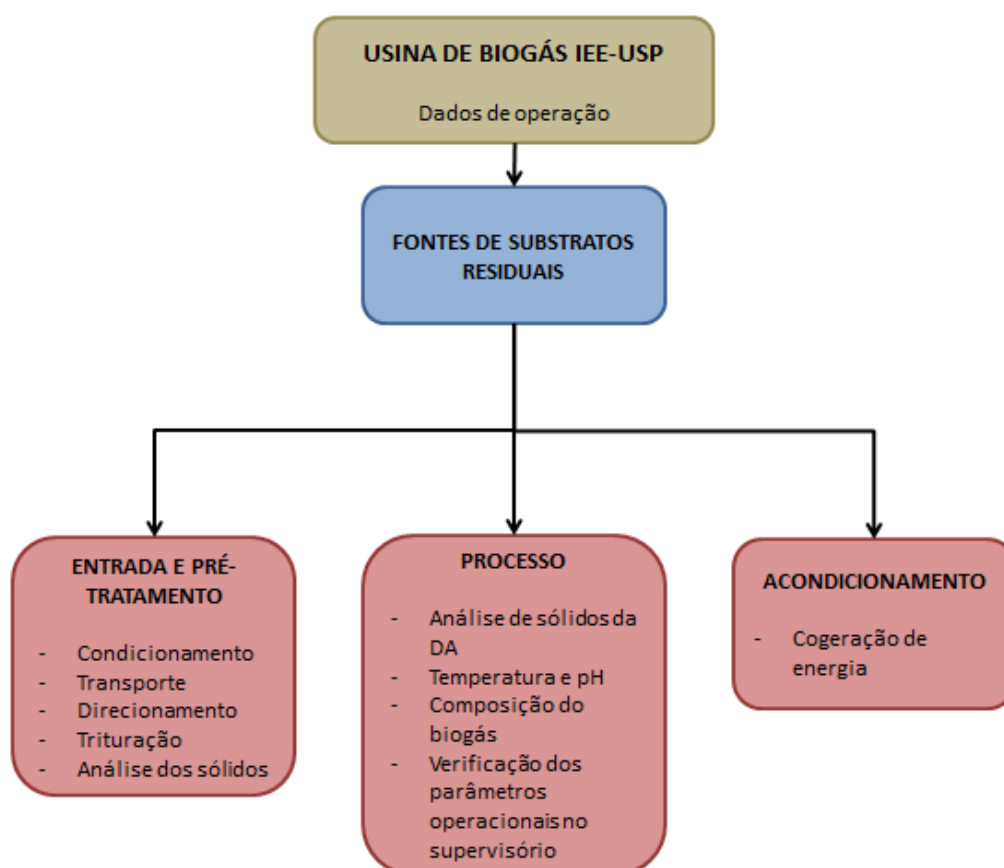
3.2 ESTUDO DE CASO: APLICABILIDADE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE ALIMENTOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA

Realizou-se um estudo de caso de uma Planta de Biogás localizada no Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), a qual representa a concretização de parte do exposto pela Tese de Doutorado (D´AQUINO, 2018) e do recentemente artigo científico publicado na Revista Energy (D´AQUINO ET AL, 2021), ambos liderados pela Pesquisadora Dra. Camila Agner D´Aquino, orientada pelo Prof. Dr. Ildo Luis Sauer no Centro de Análise, Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos (CPLEN). Além disso, em virtude da Chamada Aneel 01/2016, intitulado “PROJETO PRIORITÁRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTRATÉGICO DE P&D: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MINIGERAÇÃO EM INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE EDUCAÇÃO SUPERIOR” foi aprovado, no IEE/IUSP, o Projeto de P&D: “Avaliação integrada de geração distribuída, gerenciamento da

demanda, monitoramento, qualidade e desempenho da rede, visando otimização de investimentos e regulação tarifária, em rede subterrânea”, coordenado pelo Prof. Ildo Luis Sauer.

A escolha deste estudo de caso foi proveniente do acordo de cooperação acadêmica, realizada entre a UFSCar/DEQ/Profa. Paula e USP/IEE/CPLEN/Prof. Ildo, assinado em Agosto de 2021. Até a escrita deste trabalho, a Usina encontra-se em operação. A análise foi feita com base nos dados coletados durante o funcionamento da Usina, pelos técnicos, operadores, estudantes, mestrandos e doutorandos que trabalham nela. Atualmente os dados de acompanhamento referem-se às quantidades das coletas de resíduos, se os mesmos são provenientes da Cidade Universitária (USP) ou se são externos ao campus, incluindo a porcentagem de sólidos totais durante o processo, as medições da composição do biogás e a cogeração de energias elétrica e térmica (Figura 3.2.1).

Figura 3.2.1 – Dados da usina de biogás da USP



Fonte: acervo pessoal

No campus da USP, antes da pandemia, passavam por volta de 120 mil pessoas por dia e cerca de 50 mil carros por dia e o campus possui 20 pontos para alimentação entre lanchonetes, restaurantes, etc. A planta trabalha com resíduos de alimentos e com podas como co-substrato, pois esses são os principais resíduos da cidade universitária. A seguir as Figuras 3.2.2 (a) e (b) mostram a planta de biogás.

Figura 3.2.2 – Foto da planta de biogás da USP - São Paulo

(a)



Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

(b)

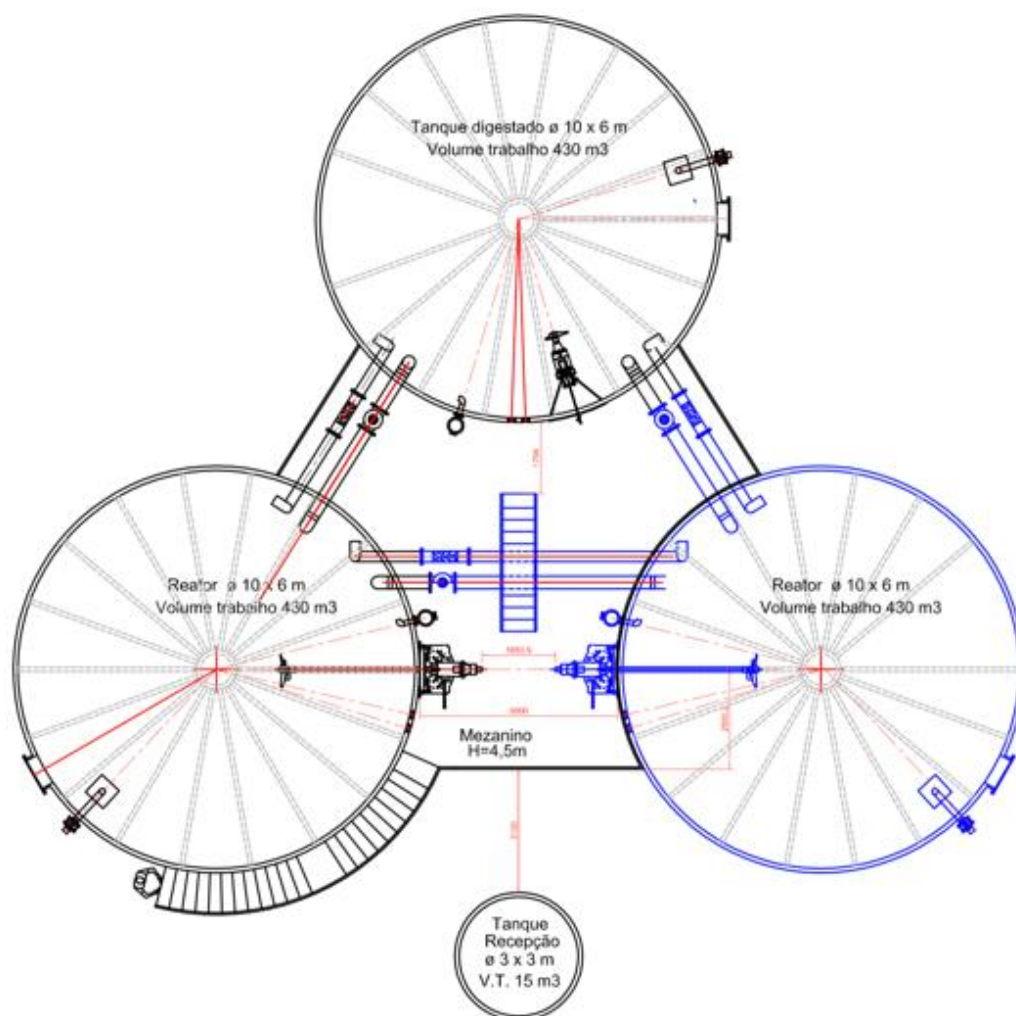


Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

A unidade tem como objetivo mostrar a viabilidade técnica e econômica do biogás como fonte de energia de valor agregado, além de produzir o biogás e tratar os resíduos orgânicos do campus. A usina funcionará em conjunto com uma usina solar fotovoltaica para analisar a para compreender o papel do biogás como uma fonte despachável que pode rapidamente ser acionada na ausência de energia solar, que é intermitente.

A planta de biogás foi construída pela empresa ER-BR energias renováveis com sede no Paraná, em Londrina, em conjunto com a USP. Na planta, existem dois biorreatores de 420 m³ e um tanque digestado, que é onde se armazena o efluente estabilizado, também com um volume de 420 m³ (Fig. 3.2.3).

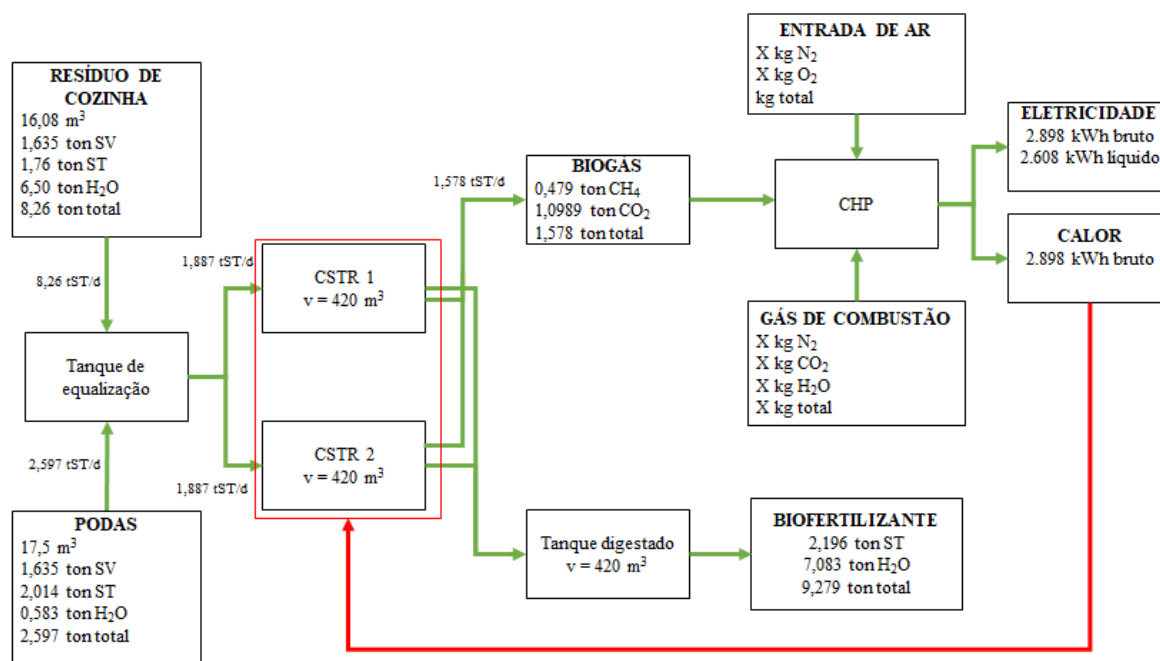
Figura 3.2.3 – Planta baixa da usina de biogás



Fonte: D'Aquino, 2018

Previamente a construção da planta, realizou-se um fluxograma (Fig. 3.2.4). Nele foi considerada uma entrada de substrato de 10 toneladas diárias e por conseguinte um tempo de retenção hidráulica de 20 dias.

Figura 3.2.4 – Fluxograma do processo



Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

Para a produção de energia, a planta consiste de um motorgerador de 75 kWel (kWt), que gera energia elétrica e também energia térmica, na qual é utilizada para aquecer os próprios reatores. Além disso, a planta tem seis unidades operacionais, sendo a primeira a recepção e o prepare, na qual se selecionam os substratos e realizam-se os pré-tratamentos. A seguir, a área de equalização, onde podem acontecer adições de algum reagente e têm-se as misturas dos substratos, a parte de biodigestão, que é a parte principal, na qual estão os reatores. Tais reatores podem trabalhar em série, em paralelo ou de maneira independente. Em seguida, tem-se a unidade de pós-tratamento efluente, para tratamento do digestato, a unidade de pós-tratamento de gás, para remoção de vapor de água e H₂S e, finalmente, a unidade de uso energético.

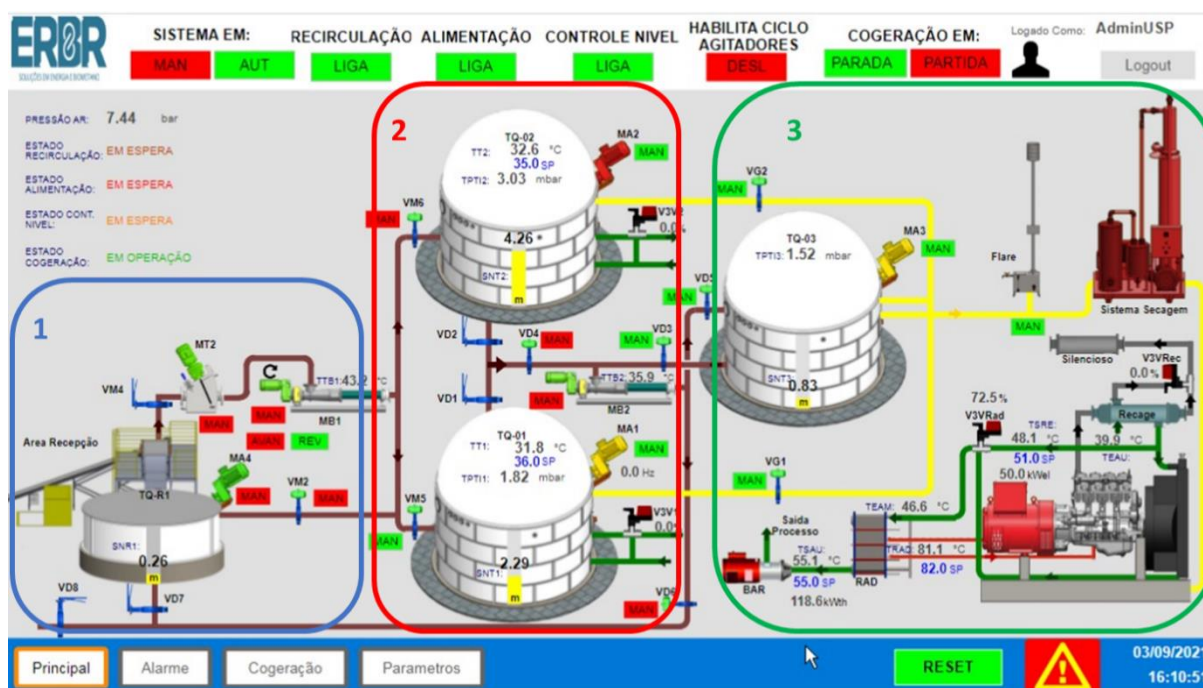
As análises foram feitas com base nos dados coletados durante 142 dias do funcionamento da usina, pelos operadores da usina e pelos estudantes, mestrandos e doutorandos que trabalham nela. Atualmente os dados de acompanhamento são: quantidade das coletas de resíduos; resíduos da cidade universitária ou se são

externos a ela, a porcentagem de sólidos totais durante o processo, medições da composição do biogás e a cogeração de energias elétrica e térmica.

3.3 ETAPAS DO PROCESSO

Com a finalidade de facilitar o entendimento, o processo é separado em três etapas, composto pela entrada (alimentação), processo (biodigestão) e saída (energia e digestato). A Figura 3.3.1 apresenta um supervisório, ou seja, software para o controle e aquisição de dados da Planta de biogás no IEE/USP.

Figura 3.3.1 – Imagem do supervisório da Planta de biogás em operação no IEE na USP



1 – ENTRADA (Alimentação)

2 – PROCESSO (Biodigestão)

3 – SAÍDA (Energia, Digestato)

Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

Primeiramente, na entrada, analisam-se os parâmetros principais como quantidade de carbono e nitrogênio, quantidade de sólidos totais e sólidos voláteis, ou seja, caracterização do substrato. Também são controlados o volume, a massa e a carga orgânica. Nessa primeira parte monitoram-se as correias transportadoras, o triturador, o agitador, o triturador de linha, a bomba e a caixa de lavagem. A Figura 3.3.2 mostra a entrada do processo.

Figura 3.3.2 – Entrada do processo



Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

Em seguida, inicia-se o processo da biodigestão, nessa etapa analisa-se principalmente o nível, a quantidade de sólidos, a temperatura, o pH e a qualidade do biogás. O tanque tem seis metros de altura e trabalha com matéria prima entre 4,5 e 5,3 metros, que representam um volume de 350 a 420 m³. As amostras coletadas são retiradas em três pontos diferentes no reator, o primeiro fica a 0,75m de altura, o segundo a 2,25m e o terceiro a 3,75m. A seguir, na Figura 3.3.3, uma foto dos pontos de coleta.

Figura 3.3.3 – Pontos de coleta de amostras



Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

A pressão nos biodigestores fica no mínimo 0,5 bar e no máximo quatro bar. Atualmente os biorreatores trabalham em temperaturas mesofílicas (37°C) e as porcentagens de metano, carbono e oxigênio são analisadas uma vez ao dia, utilizando um cromatógrafo gasoso portátil (Fig 3.3.4).

Figura 3.3.4 – Análise do biogás através de um analisador portátil



Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

Os parâmetros essenciais dessa parte do processo são pH, temperatura, caracterização da mistura, alcalinidade, relação entre formação de ácidos voláteis e alcalinidade, nitrogênio amoniacal, viscosidade e tempo de retenção hidráulica. Nessa parte monitoram-se as membranas (para vazamentos de gás), válvulas de alívio de pressão, válvulas, agitadores, flare, bomba e pontos de coleta de amostra.

Finalmente, tem-se o processo de saída onde se analisam as produções de energia, tanto elétrica quanto térmica, e o tanque digestado. A Figura 3.3.5 mostra a unidade de cogeração de energia.

Figura 3.3.5 – Unidade de cogeração de energia



Fonte: obtido com a equipe do CPLEN- Centro de Análise e Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos Instituto de Energia e Ambiente- USP

Na etapa de co-geração de energia, monitora-se o sistema de secagem, o motor, a água do sistema, o radiador e as válvulas. Os parâmetros principais controlados são as potências elétrica e térmica, horas de operação, o tempo de retenção, a energia gerada e a temperatura da água no sistema. Já o tanque de digestato é monitorado nível e pressão do tanque, qualidade do biogás, tem-se coletas de amostras e acompanhamento do esvaziamento do tanque feito por caminhões. Os principais parâmetros como pH, eficiência do processo (qual foi a remoção de matéria orgânica), análises de nutrientes e presença de contaminantes. Nessa parte final, os equipamentos monitorados são membranas, flare, bomba, agitador e pontos de coleta de amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

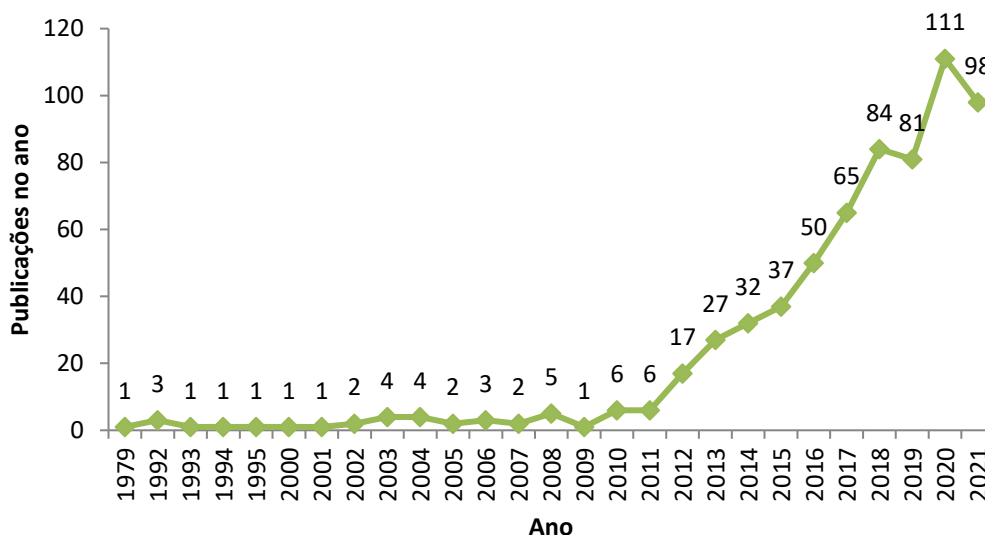
4.1 ANÁLISES DAS PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

4.1.1 PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS REALIZADAS NA WEB OF SCIENCE

Na primeira etapa do trabalho, uma análise de publicações científicas foi feita na plataforma Web of Science, a partir das palavras chaves como DA, coDA e resíduos alimentares. Artigos de pesquisa e de revisão foram obtidos entre o ano de 1979 e 2021.

Ficou evidenciado que o biogás pode ser uma boa substituição ao gás natural para a produção de energia no futuro, tanto elétrica quanto térmica e para isso é necessário entender como melhorar a eficiência do processo de produção de biogás e aumentar a quantidade de produção para que se consiga realizar essa substituição. Para isso, cientistas já perceberam a importância da DA de resíduos alimentares, que está sendo cada vez mais estudada (Figura 4.1.1). Em setembro de 2021 a pesquisa retornou um total de 98 trabalhos.

Figura 4.1.1 – Artigos sobre Digestão anaeróbia de resíduos alimentares desde 1979 na base de dados Web of Science



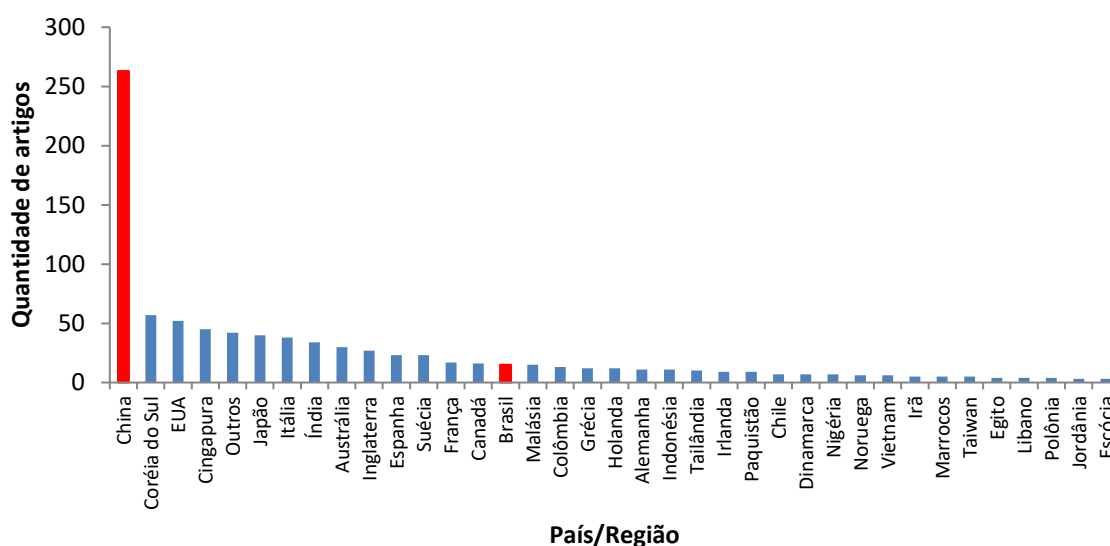
Fonte: Acervo pessoal

Percebe-se que até 2009 tinham alguns poucos estudos e muitos anos com nenhum estudo focado na DA de resíduos alimentares, então se vê um aumento muito grande a partir do ano de 2010, sendo que até outubro de 2021, quando foi realizada

a análise desses dados, o total de 2021 já superou o total dos anos de 2018 e 2019, significando que ainda tem-se uma tendência de alta na quantidade de estudos sobre a digestão anaeróbia de resíduos alimentares. Pode-se afirmar então que as pesquisas nessa área são muito recentes, explicando o porquê ainda os resíduos alimentares não são muito utilizados para a produção de biogás.

Foi realizada uma análise dos estudos por país e comparando o Brasil com o geral nota-se uma participação modesta, com apenas 15 estudos dentre todos os 647 encontrados na base de dados, representando aproximadamente 2%. A Figura 4.1.2 a seguir mostra os estudos por país na base de dados da Web of Science.

Figura 4.1.2 – Gráfico dos artigos por país pela Web of Science

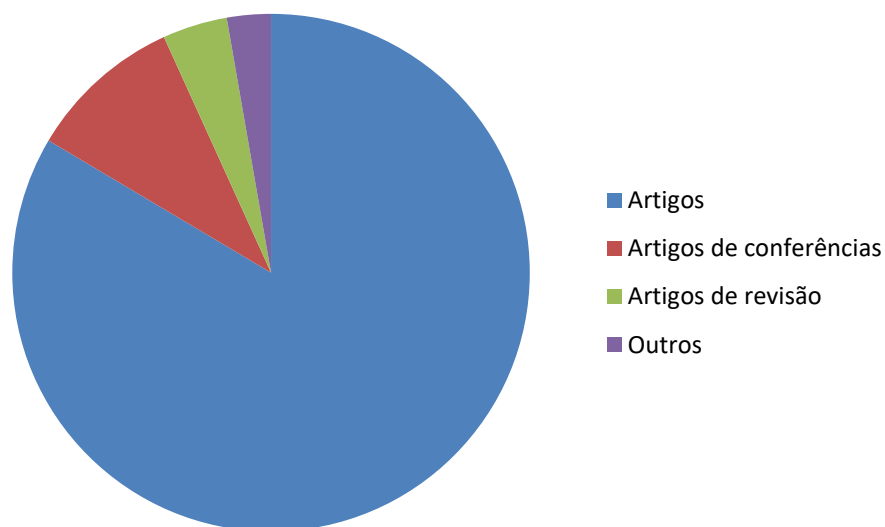


Fonte: Acervo pessoal

O país com maior número de publicações é a China, disparadamente, somente nesse país foram realizados 263 estudos, que representam aproximadamente 41% do total. O segundo colocado é a Coreia do Sul, com quase cinco vezes menos estudos que a China, representando quase 9% do total dos estudos analisados desde 1979.

A base de dados de Web of Science separa as publicações do site em diversos tipos: (1) artigos de pesquisa, (2) artigos de conferências, (3) artigos de revisão e muitos outros. De acordo com a Figura 4.1.3 é possível notar que são menos relevantes, representando um total de 3,3% das publicações.

Figura 4.1.3 – Gráfico dos tipos de publicações



Fonte: acervo pessoal

Majoritariamente as publicações são de artigos de pesquisa, isso se dá principalmente em razão da produção de biogás como visto nesse estudo algo muito recente, então ainda tem-se muitos artigos de pesquisa e poucos de revisão. Os artigos representam um total de 89,3% das publicações e os artigos de revisão representam 4,3%.

A próxima análise é sobre a área de estudos que foram publicados, a Tabela 4.1 a seguir mostra quantos estudos se tem por área.

Tabela 4.1 – Quantidade de estudos por área

Área da matéria	Quantidade	Porcentagem
Ciências Ambientais	271	41,9%
Combustíveis Energéticos	249	38,5%
Microbiologia Aplicada à Biotecnologia	192	29,7%
Engenharia Ambiental	177	27,4%
Engenharia Agrícola	140	21,6%
Outros	97	15,0%
Engenharia Química	83	12,8%
Tecnologia de Ciência Sustentável Verde	69	10,7%
Recursos Hídricos	44	6,8%
Química Multidisciplinar	18	2,8%
Termodinâmica	17	2,6%
Química Física	15	2,3%
Eletroquímica	14	2,2%
Ciências Multidisciplinares	11	1,7%

Fonte: acervo pessoal

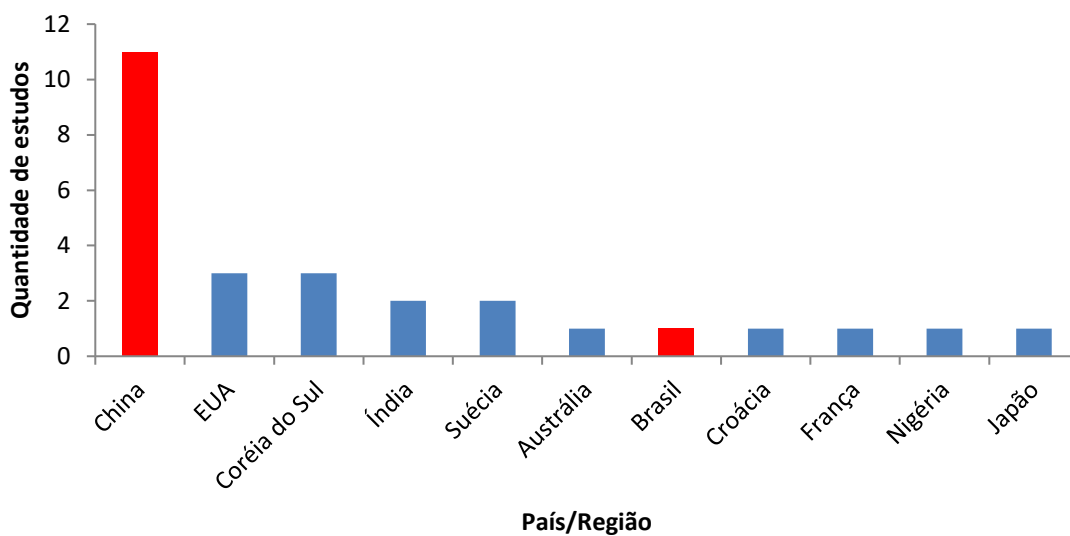
É possível perceber a alta quantidade de estudos que focam na área ambiental e na área de combustíveis. Faz sentido, já que a crescente quantidade de estudos com os anos aconteceu pela necessidade de substituição de combustíveis fósseis para combustíveis renováveis. É importante ressaltar a área de engenharia agrícola nas publicações, visto que muitos substratos e co-substratos são originados da agropecuária, como estume de gado, outros tipos de estume e vários tipos de palhas, como palha de trigo, palha de arroz e palha de milho (Tabela 2.1).

4.1.2 PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS RELEVANTES REALIZADAS NO GOOGLE ACADÊMICO

Na segunda etapa do trabalho, foram escolhidos 27 artigos (apresentados na Tabela 1), que foram considerados os mais relevantes no Google acadêmico. A distribuição das pesquisas, baseadas nas áreas científicas, da produção de biogás, a partir de resíduos alimentares, é mostrada na Figura 4.1.4. Dos 27 estudos analisados, apenas quatro deles foram realizados em países em desenvolvimento, representando 14,8%. A China sozinha representa 28,3% dos estudos sobre digestão

anaeróbia de resíduos alimentares, sendo que apenas um estudo foi realizado no Brasil. Este mesmo fato foi verificado utilizando a Web of Science (Fig. 4.1.2), mostrando que a China é pioneira nos estudos relacionados a DA de resíduos alimentares.

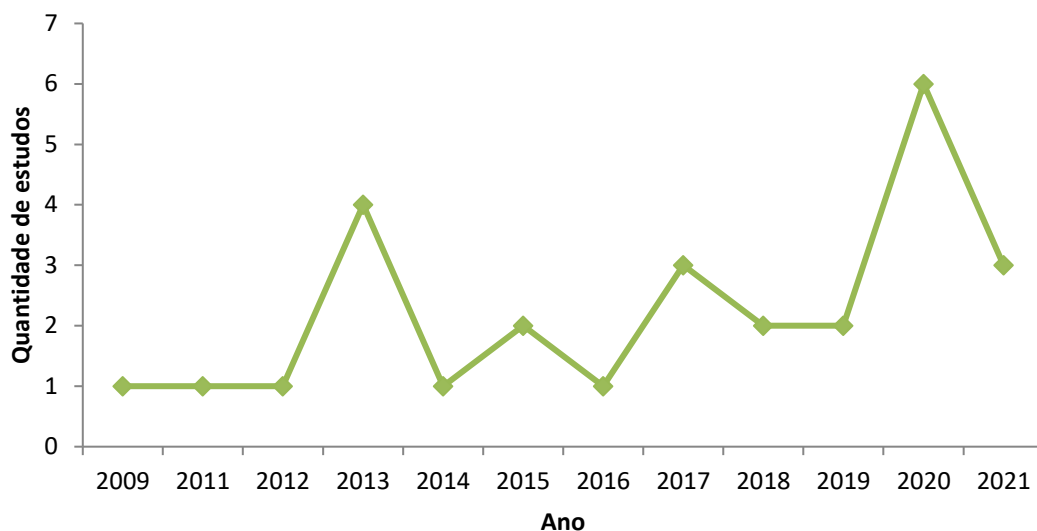
Figura 4.1.4 – Distribuição das pesquisas da produção de biogás a partir de resíduos alimentares



Fonte: acervo pessoal

Estes estudos foram realizados entre os anos de 2009 a 2021, sendo publicações mais recentes e relevantes. A seguir um gráfico da quantidade de estudos por ano a partir de 2009 para os artigos mais relevantes, na Figura 4.1.5.

Figura 4.1.5 – Quantidade de estudos anual desde 2009



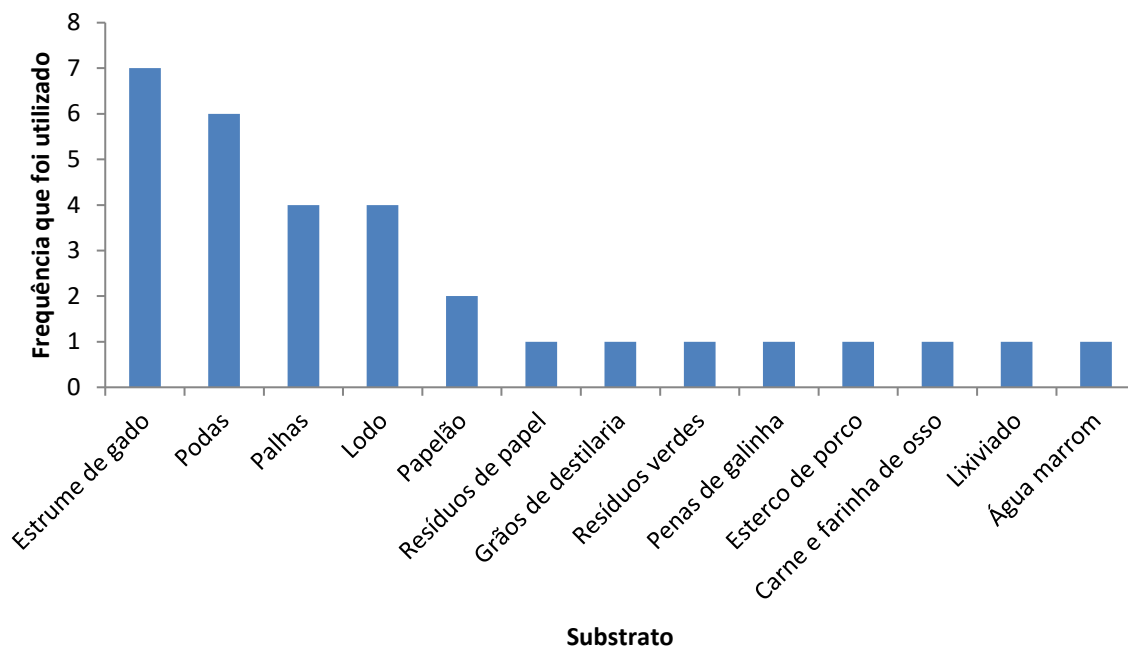
Fonte: acervo pessoal

Observa-se que nos anos de 2020, 2013, 2017 e 2021 respectivamente, foram os que mais apresentaram estudos relacionados à DA de resíduos alimentares. Observa-se que para as diferentes pesquisas no web of science (com 27 artigos) e Google Scholar (647 artigos) o ano de 2020 foi o que mais foi estudado a DA destes resíduos. Importante ressaltar que os estudos de 2021 são recentes e ainda podem aumentar. Além disso, nota-se que os anos dos estudos da das Tabelas 1 e 2 coincidem com a época que o assunto começou a ser cada vez mais estudado, que foi a partir de 2010, como foi notado pela Figura 4.1.1.

Dos estudos relevantes, dois trabalhos utilizaram apenas a mono digestão de resíduos alimentares para a produção de biogás. Para estes trabalhos a faixa de ST foi de 7,6% (WU ET AL, 2015) e 22% (NGUYEN ET AL, 2017), sendo que Nguyen et al. (2017) obteve um rendimento máximo de metano de 730 L/ksVS.

A DA de resíduos alimentares com frequência é realizada com outra fonte de substrato, melhorando assim a eficiência do processo devido ao equilíbrio de nutrientes. Dos 27 trabalhos, 92,6% utilizaram a mistura de substratos. O gráfico da Figura 4.1.6 mostra a quantidade que cada um dos substratos foi utilizado para a co-digestão anaeróbia com resíduos alimentares.

Figura 4.1.6 – Frequência que cada substrato foi utilizado para a co-digestão anaeróbia com resíduos alimentares



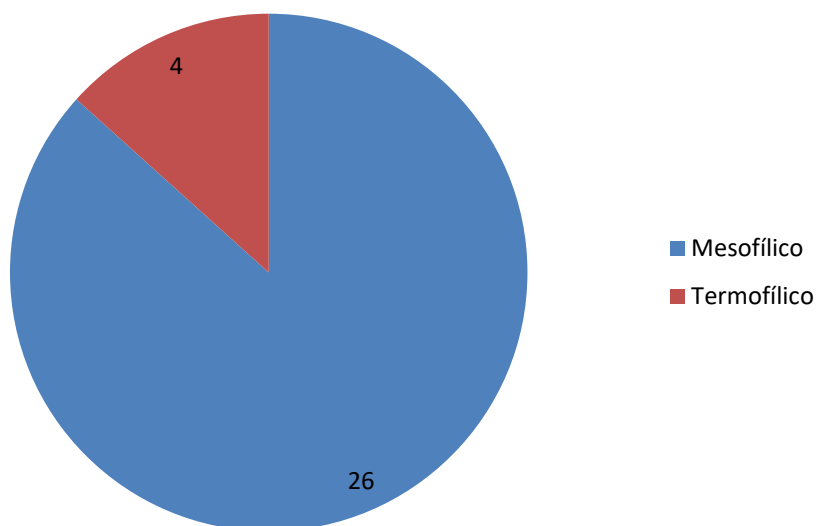
Fonte: acervo pessoal

Nota-se a predominância do estrume de gado e das podas, que são substratos disponíveis o ano todo e, além disso, apresentam alta quantidade. Como dito anteriormente, o Brasil é um país muito forte na área agropecuária, em razão disso tem uma alta disponibilidade de estrume de gado (RITCHIE; ROSER, 2021), o que poderia justificar a utilização deste processo para melhorar a eficiência do processo de produção de biogás a partir do uso desse co-substrato.

Os parâmetros são importantes fatores para tornar o processo o mais eficiente possível. As condições de temperatura (Fig. 4.1.7 a); tipo de DA (Fig. 4.1.7 b) e modo de operação (Fig. 4.1.7 c) são apresentadas a baixo.

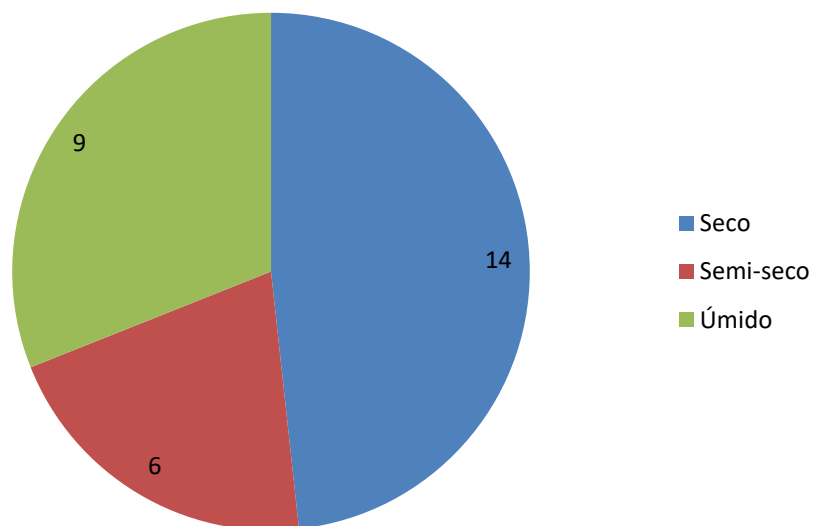
Figura 4.1.7 – Faixas de temperaturas, tipos de DA e modo de operação dos estudos

(a)

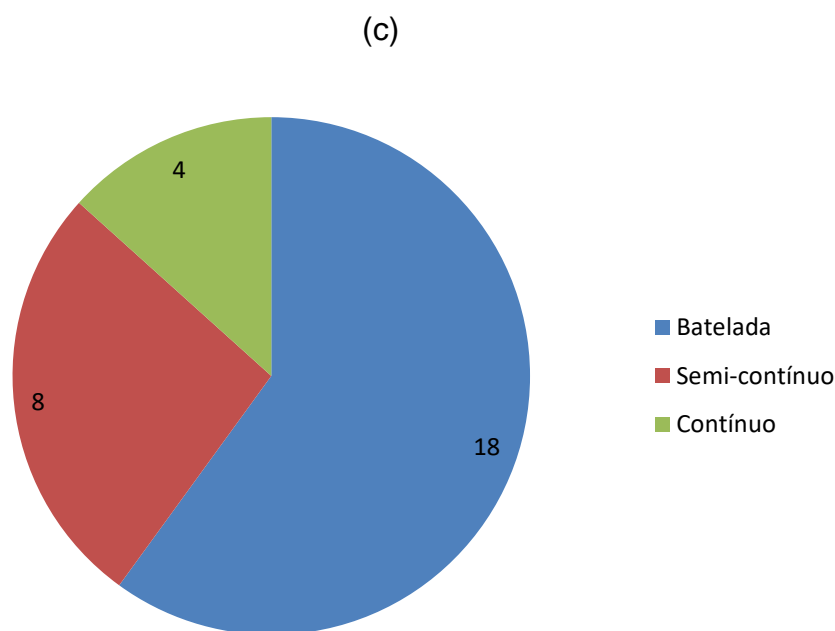


Fonte: acervo pessoal

(b)



Fonte: acervo pessoal



Fonte: acervo pessoal

Observa-se a predominância de estudos em temperaturas mesofílicas, com temperaturas girando em torno de 35 a 37°C. Dentre os 27 estudos, 26 deles usaram essa faixa de temperatura, representando 96% dos estudos. A escolha desta faixa de temperatura se dá pela facilidade de estabilizar processos em razão do menor acúmulo de ácidos graxos voláteis e amônia, e pelo menor custo de aquecimento e manutenção da temperatura. Contudo, dependendo da combinação de substratos, é possível e pode ser indicada a utilização de temperaturas termofílicas, pelo maior rendimento de metano e menor tempo de retenção, ou seja, se obtém o biogás de maneira mais rápida e com maior qualidade (NGUYEN ET AL, 2017). Interessante notar a falta de estudos em condições psicrófilas, que servem para atender regiões aonde a temperatura exterior é tão baixa, que pode tornar custoso manter a temperatura acima dos 30°C, contudo não são comuns para a digestão anaeróbia de resíduos alimentares. É provável que isso seja devido a dificuldade dos microrganismos serem ativos nesta faixa de temperatura.

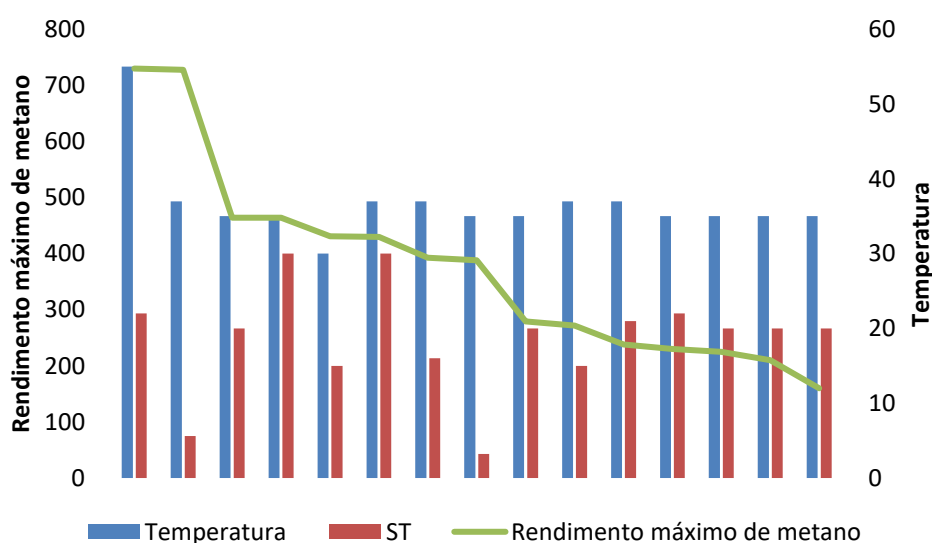
A literatura menciona que a frequência de utilização de sistemas em batelada é mais comum para digestão anaeróbia, sendo que dos 27 estudos, 18 utilizam o modo de produção em batelada (em escalas laboratorial e piloto), representando 66,7%. Em menor quantidade tem-se o modo contínuo de operação onde apenas três estudos utilizaram. O tempo de residência em bateladas costuma ser maior, com isso,

grande parte da alta quantidade de SV em resíduos alimentares é utilizada para produção de biogás, o que representa uma maior eficiência. Em razão disso a produção em batelada é mais utilizada.

A digestão anaeróbia seca foi a mais usada nos trabalhos, representando aproximadamente 52%. O estudo de Panigrahi et al. (2020) mostra que a digestão anaeróbia a seco tem um capacidade maior para carregamento de orgânicos, maior tolerância para cargas inorgânicas, porque sua proporção não é tão alta na mistura e não tem chance de estratificação em materiais flutuantes, além de ser mais barato, como dito anteriormente, em razão do tamanho reduzido do reator e menor necessidade de energia para aquecimento.

A seguir, na Figura 4.1.8 um gráfico consolidando os resultados de biogás de acordo com os dados da Tabela 2.1, que são temperatura e sólidos totais.

Figura 4.1.8 – Gráfico de rendimento de biogás de acordo com sólidos totais e temperatura



Fonte: acervo pessoal

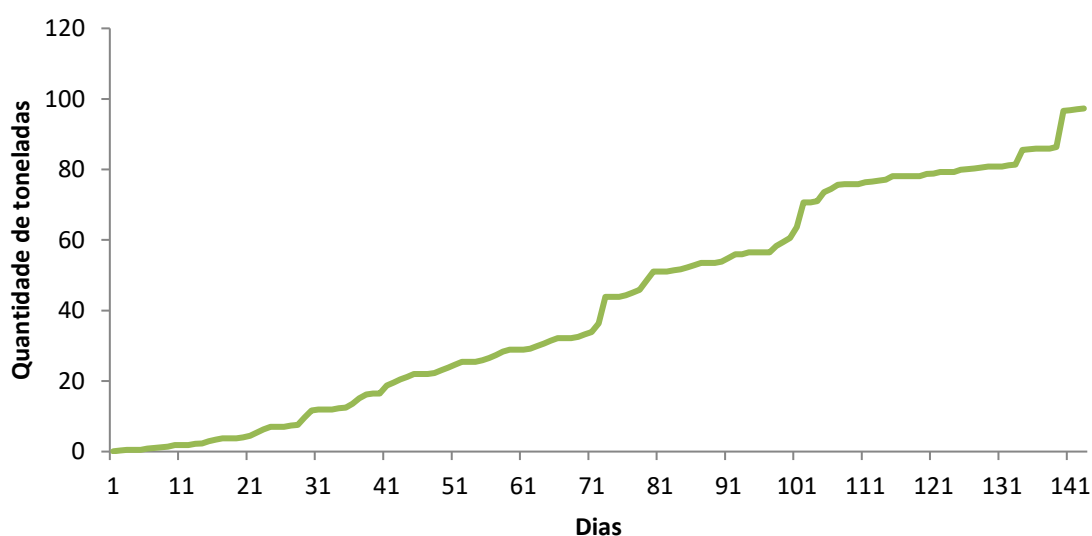
O gráfico 4.1.8 mostra o rendimento de metano em alguns experimentos publicados. Cada um desses estudos utilizou uma temperatura e uma porcentagem de sólidos totais diferentes. As temperaturas mesofílicas são as mais frequentes, assim como a digestão anaeróbia à seco, que foi mais utilizada.

Nota-se que o maior rendimento foi utilizando-se temperaturas termofílicas com sólidos totais na faixa de 20%, ou seja, DA seca. Além disso, pode se perceber que experimentos em condições similares resultam em diferentes rendimentos finais de metano e analisando apenas temperatura e quantidade de ST não se observa nenhum padrão ou tendência na produção de metano. Pode-se confirmar isso comparando alguns dos resultados do gráfico, onde em um com TS perto de 30% tem-se um resultado parecido com outro de menos de 5% de TS. Isso apenas ressalta o quanto as características diversas de resíduos alimentares afetam a produtividade dos processos de DA desses resíduos.

4.2 ESTUDO DE CASO

A coleta de resíduos teve início em doze de maio de 2021, inicialmente coletando apenas do restaurante universitário da USP. Entretanto, como a circulação na USP está menor devido à situação da pandemia, iniciou-se coleta de resíduos exteriores a cidade universitária. A Figura 4.2.1 a seguir representa o acumulado total das coletas de resíduos alimentares, em toneladas, desde o início até o dia primeiro de outubro de 2021.

Figura 4.2.1 – Acumulado de resíduos alimentares em toneladas



Fonte: acervo pessoal

É possível observar um crescimento constante com três saltos, que representam coletas de mais de dez toneladas em um período de dois dias, sendo um em 22 e 23 de julho, outro em 20 e 21 de agosto e mais um em apenas um dia, em 28 de setembro. Devido à menor circulação de pessoas na cidade universitária, a maior parte das coletas foi feita externamente, sendo 74,2% em junho, 83,9% em julho, 83,1% em agosto e 72,2% em setembro. Apenas no mês de maio a maior parte da carga orgânica foi coletada na cidade universitária, representando 71,9%. Do acumulado total de 97,06 toneladas usadas até agora 74,64 toneladas foram coletadas exteriormente, sendo 76,9% do total.

O processo atualmente trabalha com digestão anaeróbia úmida e as amostras são retiradas para análise de quantidade de sólidos totais e voláteis que são realizadas em três pontos, sendo elas 0,75 metros, 2,25 metros e 3,75 metros (Fig. 3.3.3). A quantidade de sólidos fixos (SF) é dada pela diferença entre sólidos totais e voláteis. As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 a seguir mostram os resultados das análises realizadas, cada uma em uma altura diferente.

Tabela 4.2 – Análise de sólidos a 0,75 metros de altura

PONTO 1 (0,75m)				
DIA	ST (%)	SV (%)	SF (%)	SV/ST (%)
30	2,02%	1,23%	0,79%	61%
34	1,68%	0,96%	0,72%	57%
41	1,82%	1,07%	0,75%	59%
83	2,22%	1,34%	0,88%	60%
97	1,71%	0,96%	0,74%	56%
107	2,06%	1,19%	0,87%	58%
114	3,53%	2,29%	1,25%	64%
120	3,30%	2,40%	0,90%	74%
128	1,79%	1,00%	0,80%	56%
142	1,91%	1,19%	0,72%	62%

Fonte: Adaptado da equipe CPLEN

Tabela 4.3 – Análise de sólidos a 2,25 metros de altura

PONTO 2 (2,25m)				
DIA	ST (%)	SV (%)	SF (%)	SV/ST (%)
30	1,67%	0,95%	0,72%	57%
34	1,62%	0,92%	0,70%	57%
41	1,23%	0,74%	0,49%	60%
83	2,31%	1,46%	0,84%	63%
97	1,71%	0,97%	0,74%	57%
107	1,74%	0,98%	0,76%	56%
114	1,60%	0,86%	0,74%	54%
120	1,86%	1,05%	0,81%	56%
128	1,77%	0,99%	0,78%	56%
142	2,17%	1,34%	0,83%	62%

Fonte: Adaptado da equipe CPLEN

Tabela 4.4 – Análise de sólidos a 3,75 metros de altura

PONTO 3 (3,75m)				
DIA	ST (%)	SV (%)	SF (%)	SV/ST (%)
30	1,59%	0,91%	0,67%	58%
34	1,58%	0,92%	0,67%	58%
41	1,64%	0,93%	0,71%	57%
83	2,18%	1,33%	0,86%	61%
97	1,75%	1,00%	0,75%	57%
107	1,60%	0,89%	0,71%	55%
114	1,84%	1,00%	0,84%	54%
120	1,98%	1,13%	0,85%	57%
128	1,78%	0,99%	0,79%	55%
142	1,69%	1,00%	0,69%	59%

Fonte: Adaptado da equipe CPLEN

A baixa concentração de sólidos totais vistas é causada por alguns motivos. Inicialmente, para comissionamento da planta, utiliza-se água para testes de estanqueidade, ou seja, verificar a existência ou não de pontos de pontos de vazamentos nos tanques e tubulações. Essa água foi utilizada para se aumentar o volume inicial do tanque quando o inoculo foi adicionado, para chegar às alturas dos agitadores. Além do mais, o inoculo recebido chegou com porcentagem baixa de

sólidos por ser originário de uma ETE (estação de tratamento de efluentes), atuando com efluente de esgoto sanitário. Por último, os substratos de resíduos de alimentos adicionados no reator variam dentro da faixa de ST de 17-26%, não sendo muito alta para aumentar rapidamente a porcentagem total de sólidos no biorreator, apesar de não ser adicionada mais nenhuma quantidade de água.

Trabalhar com baixas porcentagens de sólidos totais na digestão anaeróbia de resíduos de alimentos é interessante pelo fato desse substrato ter uma biodegradabilidade alta e rápida, no entanto, pode causar um acúmulo de ácidos voláteis nos processos, dificultando e muitas vezes inibindo a metanogênese. Quando se trabalha com baixas porcentagens de ST tem-se uma diluição das substâncias inibidoras.

A faixa de sólidos totais variou de 1,23% até 3,53%. Foi possível observar que as amostras de pontos mais profundos (0,75 m) tiveram maior porcentagem de sólidos, mostrando que para diferentes pontos de amostragem houve uma diferença de características, mostrando uma variabilidade de ST e SV de acordo com o dia que a análise foi realizada.

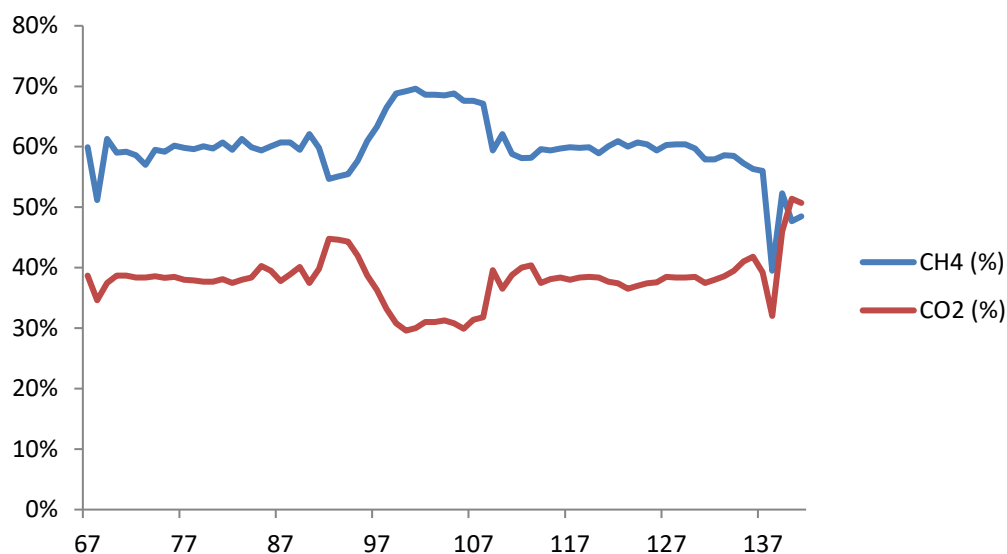
Outro fato a ser considerado seria a variabilidade do substrato, o que dificulta a padronização do que irá entrar no reator. Atualmente, os substratos são apenas separados das impurezas e em seguida triturados para padronizar o tamanho das partículas em 50 mm, facilitando a transferência de massa.

Desde seu comissionamento a planta trabalhou 152 horas, aproximadamente 1,08 horas por dia, e foram adicionadas em média 0,7 toneladas de substrato por dia. Com isso, foram produzidos em média 53,57 kWh por dia de energia elétrica. Em comparação, no mês de setembro a planta ficou abaixo da média na produção de energia, produzindo apenas 38,67 kWh por dia. A produção de energia pode ter sido inferior devido a diversos motivos. Primeiramente, o mês de setembro teve uma média de dosagem de substrato menor que os meses anteriores, por volta de 0,4 toneladas. Segundo, a qualidade dos substratos pode ter sido inferior devido a épocas diferentes.

Outra medida que afeta diretamente a quantidade de energia produzida é a porcentagem de metano no biogás, que representa normalmente valores por volta de 50-75% do total. Nguyen et al. (2017) teve altos rendimentos de metano e sua proporção de metano no biogás teve resultados de 65% e 60,02%. Brown e Li (2013)

alcançaram valores entre 65-67% de porcentagem de metano no biogás. A seguir, na Figura 4.2.2, tem-se um gráfico das concentrações de metano e gás carbônico desde 17 de julho até 30 de setembro.

Figura 4.2.2 – Gráfico das concentrações diárias de metano e gás carbônico



Fonte: acervo pessoal

Observa-se que em sua maioria o gráfico se mantém dentro de uma faixa de 50-70% de gás metano no biogás, então pode se considerar que está trabalhando em um estado estacionário (Brown; Li, 2013). Pequenas oscilações de metano no biogás foram verificadas.

No dia 80 de operação nota-se uma baixa na porcentagem de metano no biogás, atingindo 54,7%, diminuindo da média de 60% que o processo estava trabalhando anteriormente. Passando do dia 102 de operação para o dia 104 nota-se também uma grande diminuição, de quase 8%. A semelhança entre essas duas baixas é que antes dessas diminuições houve adições muito grandes de substratos e o que acontece é que os resíduos alimentares são muito fáceis de hidrolisar e digerir, isso causa um acúmulo de ácidos graxos voláteis. Brown e Li (2013) compara a coDA de podas e resíduos alimentares com a mono-digestão de podas e o tempo que se demora para chegar no pico de produção de metano, que coincide com a maior porcentagem, é maior quando se adiciona os resíduos alimentares, exatamente pelo motivo de acúmulo de ácidos graxos voláteis. Além disso, essa instabilidade

momentânea pode ser causada pela diferença de substratos e suas características, isso se deve pela diferença dos lugares de recolhimento dos substratos, porque eles podem ser recolhidos tanto internamente na USP como externamente. Como apresentado anteriormente, as características dos resíduos alimentares podem mudar de acordo com a geografia, a estação que foi produzida e a fonte de sua coleta.

Chen et al (2014) tem um resultado de 79,7% de metano no biogás em uma digestão anaeróbia de resíduos alimentares, aproximadamente 10% a mais do que a usina obteve, ambas em um ambiente mesofílico (37°C). Diferente da usina (que trabalha com ST de no máximo 3,53%) apresentou uma porcentagem de sólidos totais em 15%. Nesse estudo, quando se tem a adição de resíduos verdes, com uma porcentagem de 40% de resíduos de alimentos e 60% dos resíduos verdes tem-se a diminuição do conteúdo de metano para 70%. No entanto, com essa mesma proporção de mistura se obtém uma produção ótima de metano, em outras palavras, uma maior quantidade de litros de metano por quilos de sólidos voláteis. A usina, diferente de Chen et al. (2014) trabalha com a mono-digestão de resíduos alimentares, o que pode causar a menor porcentagem de metano no biogás.

É evidente a partir do estudo de caso apresentado que para levar a pesquisa a nível em grande escala é necessária especialização multidisciplinar, para a otimização de fatores operacionais que regem o desempenho de qualquer sistema biológico. Além disso, fatores de logística, separação e segregação, inclusive de uma questão política na sociedade, até mesmo legislativa, poderiam ser considerados, devido a importância da valorização destes resíduos. Com isso, indústrias e empresas de logística de tratamento de resíduos poderiam se desenvolver nestes aspectos, negligenciando a valorização dos resíduos orgânicos. Portanto, é necessário por parte dos órgãos federais mecanismos de estrutura abrindo caminho para pesquisa colaborativa entre diferentes disciplinas de pesquisa e diferentes organizações incluindo parceiros industriais. Os decisores políticos em todo o mundo também precisam incentivar na forma de subsídios para comercializar a produção de biogás.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a viabilidade de produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos alimentares. A partir da análise dos artigos na base

de dado da Web of Science foi possível observar o crescente aumento do número de trabalhos nesta área, mostrando a predominância da China. Uma análise mais profunda dos artigos mais relevantes realizada no Google Acadêmico mostrou que a coDA à seco, temperatura mesofílica e operação em batelada foram as mais estudadas nos últimos anos. Além disso, foi verificado que a melhor condição para a produção de biogás de 730 L/kgVS foi em um sistema termofílico, apesar de maior instabilidade, em um sistema batelada, com ST de 20% e utilizando a mono-digestão anaeróbia de resíduos de comida sul coreana, mostrando que existem lacunas a serem preenchidas com a DA de resíduos de alimentos e ainda não se sabe quais os parâmetros ideais para se trabalhar. A planta de biogás do IEE demonstrou o potencial da produção de biogás a partir de resíduos alimentares, em grande escala, alcançando um conteúdo de aproximadamente 69% de metano no biogás com uma co-geração de 53,57 kWh diários trabalhando apenas 1,08 horas por dia.

Assim como nos artigos apresentados, a usina da USP apresentou variabilidade nos resíduos alimentares obtidos confirmando a necessidade de padronização para a utilização desses substratos e como a alimentação dos biodigestores é de baixa vazão a planta não apresentou problemas de acúmulos de ácidos e baixos pH, no entanto, baseando-se nos estudos apresentados a necessidade de um controle de pH é necessário caso haja um aumento da entrada de substratos.

Conclui-se então que restam padronizações de temperaturas, modos de operação, ST, tipos de DA e tamanho de partícula para o processo com o intuito de se obter melhores rendimentos de metano. Além disso, pode-se afirmar que é sim um método que agrega valor aos resíduos alimentares que atualmente são descartados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEKUNLE, Kayode Feyisetan; OKOLIE, Jude Awele. **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.

AMETA, Suresh C.; AMETA, Rakshit; AMETA, Garima. **Sonochemistry: an emerging green technology**. [S.l.]: Aap, 2018.

ARELLI, Vijayalakshmi; BEGUM, Sameena; ANUPOJU, Gangagni Rao; KURUTI, Kranti; S., Shailaja. **Dry anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pre treatment on methane yield and quality of biomanure.** Hyderabad: Elsevier Ltd, 2018.

BEDOIC, Robert; SPEHAR, Ana; PULJKO, Josip; CUCEK, Lidija; COSIC, Boris; PUKSEC, Tomislav; DUIC, Neven. **Opportunities and challenges: Experimental and kinetic analysis of anaerobic co-digestion of food waste and rendering industry streams for biogas production.** Zagreb: Elsevier Ltd, 2020.

BEGUM, Sameena; DAS, Tanmoy; ANUPOJU, Gangagni Rao; ESHTIAGHI, Nicky. **Solid-state anaerobic co-digestion of food waste and cardboard in a pilot-scale auto-fed continuous stirred tank reactor system.** Melbourne: Elsevier Ltd, 2021.

BONG, Cassandra Phun Chien; LIM, Li Yee; LEE, Chew Tin; KLEMES, Jiri Jaromir; HO, Chin Siong; HO, Wai Shin. **The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion e A review.** Johor Bahru: Elsevier Ltd, 2018.

BROWN, Dan; LI, Yebo. **Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production.** Wooster: Elsevier Ltd, 2013.

BUIS, Alan. **He Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide.** 2019. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>. Acesso em: 15 set. 2021.

CAPSON-TOJO, Gabriel; ROUEZ, Maxime; CREST, Marion; TRABLY, Eric; STEYER, Jean-Philippe; BERNET, Nicolas; DELGENÈS, Jean-Philippe; ESCUDIÉ, Renaud. **Kinetic study of dry anaerobic co-digestion of food waste and cardboard for methane production.** Narbonne: Elsevier Ltd, 2017.

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

CHEN, Yuexi; ZHANG, Xuemeng; CHEN, Yinguang. **Propionic acid-rich fermentation (PARF) production from organic wastes: A review**. Shanghai: Elsevier Ltd, 2021.

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.

CIBIOGÁS. **Nota Técnica: N° 002/2010 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, Abril de 2020.

CURY, Maria Eduarda. **Níveis de CO₂ na atmosfera aumentaram de forma nunca vista antes**. 2019. Disponível em: <https://exame.com/ciencia/niveis-de-co2-na-atmosfera-aumentaram-de-forma-nunca-vista-antes/>. Acesso em: 15 set. 2021.

DAMYANOVA, Sonia; BESCHKOV, Venko. **Biogas as a Source of Energy and Chemicals**. 2019. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/biorefinery-concepts-energy-and-products/biogas-as-a-source-of-energy-and-chemicals>. Acesso em: 11 set. 2021.

D'AQUINO, Camila Agner. **Geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP**. 2018. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

D'AQUINO, Camila A.; SANTOS, Samantha C.; SAUER, Ildo L.. **Biogas as an alternative source of decentralized bioelectricity for large waste producers: An assessment framework at the University of Sao~ Paulo**. São Paulo: Elsevier Ltd, 2021.

DING, Lingkan; CHEN, Yan; XU, Yongping; HU, Bo. **Improving treatment capacity and process stability via a two-stage anaerobic digestion of food waste combining solid-state acidogenesis and leachate methanogenesis/recirculation**. St. Paul: Elsevier Ltd, 2021.

ECCAPLAN. **Brasil descarta mais de 30 milhões de toneladas de alimentos**. Disponível em: <https://souresiduozero.com.br/2020/01/brasil-descarta-mais-de-30-milhoes-de-toneladas-de-alimentos/>. Acesso em: 11 out. 2021.

ECYCLE. **O que são mudanças climáticas?** 2015. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/mudancas-climaticas/>. Acesso em: 11 set. 2021.

EIA (comp.). **Natural gas explained.** 2020. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>. Acesso em: 11 set. 2021.

ENERGIA, Ministério de Minas e **RenovaBio.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 15 set. 2021.

ENERGIA, Trinity. **Itaipu chega a 50 milhões de MWh na sexta e bate recorde de produção.** 2020. Disponível em: <https://www.trinityenergia.com.br/2020/09/01/itaipu-chega-a-50-milhoes-de-mwh-na-sexta-e-bate-recorde-de-producao/>. Acesso em: 11 set. 2021.

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: 11 set. 2021.

FORBES, Hamish; QUESTED, Tom; O'CONNOR, Clementine. **FOOD WASTE INDEX REPORT 2021.** Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021.

FUNMI, Aransiola Elizabeth; SULEIMAN, Momodu Abiodun; DEBORAH, Okunade Inioluwa; DORCAS, Adepoju Tofunmi. **Biogas production as energy source and strategy for managing waste and climate change.** Obafemi Awolowo: J.-P. Delgenes, 2020.

GATES, Bill. **Como evitar um desastre climático: As soluções que temos e as inovações necessárias.** [S.I.]: Companhia das Letras, 2020. 320 p.

GEOGRAPHIC, National (comp.). **Non-renewable energy.** 2021. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/non-renewable-energy/>. Acesso em: 11 set. 2021.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T.

Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press.

JAIN, Dr Sarika. **Global Potencial of Biogas**. London: World Biogas Association, 2019.

KIM, Dong-Hoon; OH, Sae-Eun. **Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solid wastes under mesophilic conditions**. Daejeon: Elsevier Ltd, 2011.

Kumar A, Samadder SR. **A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste**. Waste Manag 2017;69: 407e22

LEE, Eunyoung; BITTENCOURT, Paula; CASIMIR, Lensey; JIMENEZ, Eduardo; WANG, Meng; ZHANG, Qiong; ERGAS, Sarina J.. **Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge**. Tampa: Elsevier Ltd, 2019.

LI, Yangyang; LI, Yu; ZHANG, Difang; LI, Guoxue; LU, Jiabin; LI, Shuyan. **Solid state anaerobic co-digestion of tomato residues with dairy manure and corn stover for biogas production**. Beijing: Elsevier Ltd, 2016.

LI, Yangyang; QI, Chuanren; ZHANG, Yiran; LI, Yanming; WANG, Yanqin; LI, Guoxue; LUO, Wenhai. **Anaerobic digestion of agricultural wastes from liquid to solid state: Performance and environ-economic comparison**. Beijing: Elsevier Ltd, 2021.

MARCHAIM, Uri; FAO. **Chapter three: Short historical background on anaerobic digestion**. Qiryat Shemona: Fao Agricultural Services Bulletin, 1992.

MILANEZ, Artur Yabe; GUIMARÃES, Diego Duque; MAIA, Guilherme Batista da Silva; SOUZA, Jose Antonio Pereira de; LEMOS, Mario Luiz Freitas. **Biogás: a próxima fronteira da energia renovável**. 2018. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogas>. Acesso em: 11 set. 2021.

MILLER, Randy. **What is Organic Waste and How Should it be Handled?** Disponível em: <https://millerrecycling.com/organic-waste-and-how-to-handle-it/>. Acesso em: 11 out. 2021.

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.** Dalian: Elsevier Ltd, 2020.

MUTHUDINESHKUMAR, R.; ANAND, R.. **Anaerobic digestion of various feedstocks for second-generation biofuel production.** Tiruchirappalli: Elsevier Ltd, 2019.

NGUYEN, Dinh Duc; YEOP, Jeong Seong; CHOI, Jaehoon; KIM, Sungsu; CHANG, Soon Woong; JEON, Byong-Hun; GUO, Wenshan; NGO, Huu Hao. **A new approach for concurrently improving performance of South Korean food waste valorization and renewable energy recovery via dry anaerobic digestion under mesophilic and thermophilic conditions.** Ho Chi Minh City: Elsevier Ltd, 2017.

NOAA. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.** 2021. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acesso em: 15 set. 2021.

OLIVIER, J.G.J.; PETERS, J.A.H.W.. **TRENDS IN GLOBAL CO₂ AND TOTAL GREENHOUSE GAS EMISSIONS.** The Hague: Pbl Netherlands Environmental Assessment Agency, 2020.

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.** West Bengal: Elsevier Ltd, 2020.

PATINVOH, Regina J.; LUNDIN, Magnus; TAHERZADEH, Mohammad J.; HORVÁTH, Ilona Sárvári. **Dry Anaerobic Co-Digestion of Citrus Wastes with Keratin and Lignocellulosic Wastes: Batch And Continuous Processes.** Boras: Springer, 2018.

PAUDEL, Sachin; KANG, Youngjun; YOO, Yeong-Seok; SEO, Gyu Tae. **Effect of volumetric organic loading rate (OLR) on H₂ and CH₄ production by two-stage**

anaerobic co-digestion of food waste and brown water. Changwon: Elsevier Ltd, 2017.

PERIN, Jessica Klarosk Helenas; BORTH, Priscila Liane Biesdorf; TORRECILHAS, Arthur Ribeiro; CUNHA, Lucas Santana da; KURODA, Emília Kiyomi; FERNANDES, Fernando. **Optimization of methane production parameters during anaerobic co-digestion of food waste and garden waste.** Londrina: Elsevier Ltd, 2020.

RITCHIE, Hannah. **Energy Mix.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-mix>. Acesso em: 11 set. 2021.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **Electricity Mix.** 2021. Disponível em: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>. Acesso em: 19 set. 2021.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **Agricultural Production:** crop production across the world. Crop production across the world. Disponível em: <https://ourworldindata.org/agricultural-production>. Acesso em: 30 set. 2021.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **Meat and Dairy Production:** meat production. Meat production. Disponível em: <https://ourworldindata.org/meat-production?country=>. Acesso em: 30 set. 2021.

RONNEAU, C.. **Energie:** pollution de l'air et developpement durable. Louvain-La-Neuve: Presses Universitaires de Louvain, 2004.

SIGNIFICADOS (comp.). **Significado de Energia renovável.** 2021. Disponível em: <https://www.significados.com.br/energia-renovavel/>. Acesso em: 11 set. 2021.

TEIXEIRA, Cintia Cavalcanti de Melo. **ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO MUNICÍPIO DE IPOJUCA/PE, ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS.** Bento Gonçalves, Rs: Abepro, 2012.

UCAR. **Methane.** 2021. Disponível em: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/methane>. Acesso em: 11 set. 2021.

UNFCCC (comp.). **The Paris Agreement.** 2021. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 12 set. 2021.

WANG, Li-Hong; WANG, Qunhui; CAI, Weiwei; SUN, Xiaohong. **Influence of mixing proportion on the solid-state anaerobic co-digestion of distiller's grains and food waste**. Beijing: Elsevier Ltd, 2012.

WESTERHOLM, M.; LIU, T.; SCHNÜRER, A.. **Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology**. Uppsala: Elsevier Ltd, 2020.

WU, Li-Jie; KOBAYASHI, Takuro; LI, Yu-You; XU, Kai-Qin. **Comparison of single-stage and temperature-phased two-stage anaerobic digestion of oily food waste**. Sendai: Elsevier Ltd, 2015.

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.

XU, Fuqing; LI, Yangyang; GE, Xumeng; YANG, Liangcheng; LI, Yebo. **Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities**. Wooster: Elsevier Ltd, 2018.

YAN, Zhiying; SONG, Zilin; LI, Dong; YUAN, Yuexiang; LIU, Xiaofeng; ZHENG, Tao. **The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw**. Chengdu: Elsevier Ltd, 2015.

Yin, Y., Liu, Y.-J., Meng, S.-J., Kiran, E.Uçkun., Liu, Y., 2016b. **Enzymatic pretreatment of activated sludge, food waste and their mixture for enhanced bioenergy recovery and waste volume reduction via anaerobic digestion**. Appl. Energy 179, 1131–1137

YONG, Zihan; DONG, Yulin; ZHANG, Xu; TAN, Tianwei. **Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production**. Beijing: Elsevier Ltd, 2015.

ZHANG, Cunsheng; XIAO, Gang; PENG, Liyu; SU, Haijia; TAN, Tianwei. **The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure**. Beijing: Elsevier Ltd, 2013.

ZHANG, Jiaying; LUO, Wenhai; LUO, Wenhai; LI, Guoxue; LIU, Yifei; GONG, Xiaoyan. **Anaerobic cultivation of waste activated sludge to inoculate solid state anaerobic co-digestion of agricultural wastes: Effects of different cultivated periods.** Beijing: Elsevier Ltd, 2019.