

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

**TECNOLOGIAS INOVADORAS E PROCESSOS CONSOLIDADOS EM LARGA
ESCALA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS: UMA ROTA SUSTENTÁVEL PARA
DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

Rafael de Paula

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

Orientadora: Profa. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa

São Carlos - SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 13 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Profa. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa

Convidada: Dra. Samantha Christine Santos

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Denise e Fernando, por todo o apoio e incentivo prestado em todos os caminhos que decidi trilhar. À minha mãe um agradecimento especial, por ser meu maior exemplo e sempre ter sido meu porto seguro em todos os momentos difíceis até aqui, amo muito você.

Também agradeço a todos os meus familiares que de alguma forma também sempre estiveram ao meu lado. Às minhas irmãs, Leda e Alice, por serem um exemplo de pessoas e profissionais e às minhas tias Verônica e Irma por me acolherem nos primeiros meses em São Carlos.

Agradeço ao meu companheiro, Cristian, pelo apoio, compreensão e os momentos vividos juntos esses últimos anos.

Aos amigos de São Carlos, em especial Rosimeire, João e Raissa, que sem dúvidas tornaram meus anos de graduação mais leves e divertidos. Tenho muito orgulho da trajetória que cada um de nós trilhou até aqui.

Aos professores da Universidade Federal de São Carlos que contribuíram para minha formação com seus ensinamentos. Em especial, à professora Paula por aceitar me orientar nesse trabalho e sempre se dispor, com muita atenção e paciência, a me auxiliar quando foi preciso.

Aos membros que também compõem a banca, Samantha, por aceitar o convite e professor Fábio pela compreensão prestada durante a disciplina.

Ao ensino público do país, que muito tem a melhorar, mas que desde criança me educou e transformou na pessoa e profissional que sou hoje. Que essas portas nunca se fechem, e que a universidade pública seja de todos.

RESUMO

À medida que crescem e se desenvolvem os centros urbanos e a indústria, também é crescente a preocupação mundial acerca de questões climáticas associadas à elevada geração de resíduos e a utilização de fontes não renováveis de energia. Tendo em vista que, assim como em diversos outros países, o Brasil ainda mantém sistemas insustentáveis para o manejo e destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU), como os lixões a céu aberto, faz-se necessário converter esse cenário crítico. Processos *waste-to-energy* (WtE) possuem exatamente esse propósito, uma vez que possibilitam converter resíduos em novas fontes de energia, como por exemplo o Biogás. Através da digestão anaeróbia da matéria orgânica, é possível obter uma valorização destes resíduos além de se produzir bioenergia. Nesse contexto, a fim de apresentar destinos sustentáveis para RSU no Brasil, o objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento de publicações científicas na plataforma de dados da *Web of Science* que apresentem tecnologias inovadoras e processos consolidados em larga escala para produção de biogás através da digestão anaeróbia do RSU. O ano de 2020 se destacou com o maior número de publicações sobre o tema, sendo a China o país que mais publicou em número absoluto. As publicações de artigo correspondem a 75% dos resultados, sendo a área “Ciências Ambientais” a que possui o maior número. Realizando uma análise mais detalhada de alguns artigos selecionados, constatou-se que 45% tinham como objetivo um estudo de caso para apresentar um processo implementado e suas principais características. A maior parte desses estudos selecionados (34%) operacionalizava grandes volumes de resíduo e foram classificadas como larga escala, sendo que a planta com maior capacidade de produção produz 19525 m³/dia de biogás em biodigestores que juntos somam 2400 m³, sendo capaz de tratar 20000 ton de resíduos por ano. Para esses estudos em larga escala, identificou-se as principais etapas envolvidas nos processos de recepção do RSU, pré-tratamento, digestão anaeróbia, *downstream* e destinação do bio-produto.

Palavras-Chaves: Digestão anaeróbia, resíduos sólidos urbanos, biogás, waste-to-energy, usina de biogás

ABSTRACT

As urban centers and industry develop, global concern about climate issues associated with the high waste generation and use of non-renewable energy sources is also increasing. Brazil, as many other countries, still maintains unsustainable systems for the management and disposal of municipal solid waste (MSW), such as open dumps. Thus, it is extremely important to apply new improvements to overcome this scenario. Waste to energy processes have this purpose, once waste conversion to new energy resources become possible. In this process, the anaerobic digestion of organic matter gives bioenergy as product promoting the waste valorization. This work aims to perform a survey of scientific publications on the Web of Science platform with innovative technologies and large-scale consolidated process for biogas production through anaerobic digestion of MSW, in order to present sustainable destinations for MSW in Brazil. For this survey the 2020 year stood out with the largest number of publications, with China being the country that published the most. Articles publications correspond to 75% of the results, where environmental sciences have most publications. A more detailed analysis of some selected articles shows that 45% of them had a case study to present an implemented process and its main characteristics. Most of these selected studies (34%) operated large volumes of waste and were classified as large-scale. The plant with the highest production capacity produces 19525 m³/day of biogas in biodigesters that together add up to 2400 m³. Also, for these large-scale studies the main steps involved in the processes were identified, which consists of RSU reception, pre-treatment, anaerobic digestion, downstream and bioproduct destination.

Keywords: Anaerobic Digestion, Municipal solid Waste, Biogas, Waste-to-energy, Biogas Power Plant

LISTA DE SIGLAS

GEE – Gases do efeito estufa

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

WtE – *Waste to energy*

DA – Digestão anaeróbia

TDH – Tempo de retenção hidráulica

TVS – Total volatile solids

TCO – Taxa de carregamento orgânico

MWh – Megawatt hora

KWh – Quilowatt hora

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Quantidade de resíduos gerados em 2017 em alguns países	8
Tabela 2.2 - Composição física de RSU gerados por alguns países	9
Tabela 2.3 – Trabalhos que abordam questões e impactos da cadeia de suprimentos logística em processos de conversão do RSU em bioenergia.	14
Tabela 2.4 - Estudos para viabilização da produção de biogás a partir de RSU.....	25
Tabela 2.5 - Composição necessária do biometano proveniente de RSU para utilização como combustível veicular ou em equipamentos residenciais e comerciais no Brasil	37
Tabela 4.1 - Processos descritos nos trabalhos selecionados para conversão de RSU em biogás	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Contribuições para o aquecimento entre 2010 e 2019 (comparado ao período de 1850 a 1900)	5
Figura 2.2 - Emissões de CO ₂ em gigatoneladas por combustíveis de origem fóssil entre 1971 e 2009	6
Figura 2.3 - Origem da energia consumida per capita em 2019 em alguns países ao redor do mundo	7
Figura 2.4 - Rotas utilizadas para descarte ou tratamento de RSU no mundo em porcentagem	11
Figura 2.5 - Cadeia de suprimentos para conversão de resíduos em energia	13
Figura 2.6 - Principais rotas tecnológicas para processos WtE.....	18
Figura 2.7 - Diagrama do processo de incineração de RSU	19
Figura 2.8 - Diagrama do processo de pirólise de RSU	20
Figura 2.9 - Etapas da Digestão Anaeróbia.....	21
Figura 2.10 - Sistema integrado de tambor rotativo e digestão anaeróbia para tratamento de RSU.....	29
Figura 2.11 - Exemplificação das seções de um aterro sanitário com sistema para coleta de gases	31
Figura 2.12 - Tecnologias para purificação do biogás.....	32
Figura 2.13 - Container MeGa-StoRE para obtenção do metano a partir do biogás .	36
Figura 2.14 - Classificação por aplicação energética das plantas de biogás em operação no Brasil	39
Figura 3.1 - Procedimento de pesquisa das publicações	41
Figura 3.2 - Procedimento de análise das publicações selecionadas	42
Figura 4.1 - Publicações a respeito de produção de Biogás a partir de Resíduos Sólidos Urbanos desde 1992 na base de dados da Web of Science	44
Figura 4.2 - Número de publicações por país.....	45
Figura 4.3 - Porcentagem de cada tipo de publicação	46
Figura 4.4 - Quantidade de estudos por área.....	47
Figura 4.5 - Objetivo dos trabalhos selecionados.....	48

Figura 4.6 - Distribuição dos artigos selecionados de acordo com o ano da publicação	50
Figura 4.7 - Número de trabalhos que apresentam processos com operação na faixa de temperatura mesofílica e termofílica	50
Figura 4.8 - Número de publicações de acordo com cada faixa de volume de biodigestor	51
Figura 4.9 - Escala dos biodigestores dos trabalhos analisados e seu respectivo volume de biogás obtido	53
Figura 4.10 - Rendimento de biogás obtido de acordo com a temperatura e o TDH do processo.....	54
Figura 4.11 - Processo para obtenção de biometano a partir do RSU e suas variações de acordo com os trabalhos selecionados	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. QUESTÕES CLIMÁTICAS	4
2.2. GERAÇÃO E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NO MUNDO	8
2.3. QUESTÕES LOGÍSTICAS DE WTE A PARTIR RSU	12
2.3.1. DECISÕES ESTRATÉGICAS NA CONSTRUÇÃO DA CADEIA LOGÍSTICA DE PROCESSOS WtE A PARTIR DE RSU.....	14
2.3.2. DECISÕES TÁTICAS E OPERACIONAIS NA CONSTRUÇÃO DA CADEIA LOGÍSTICA DE PROCESSOS WtE A PARTIR DE RSU.....	16
2.4. BIOENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	17
2.4.1. CONVERSÃO TÉRMICA DO RSU EM BIOENERGIA.....	18
2.4.2. CONVERSÃO BIOQUÍMICA DO RSU EM BIOENERGIA.....	20
2.5. O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE RSU	21
2.5.1. HIDRÓLISE	22
2.5.2. ACIDOGÊNESE	22
2.5.3. ACETOGÊNESE	23
2.5.4. METANOGÊNESE	23
2.6. A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RSU	24
2.7. PROCESSOS DE DOWNSTREAM PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE RSU	31
2.7.1. ABSORÇÃO	32
2.7.2. ADSORÇÃO.....	33
2.7.3. SEPARAÇÃO POR MEMBRANA	34
2.7.4. SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA.....	34
2.7.5. PROCESSOS BIOLÓGICOS.....	34
2.7.6. NOVAS TECNOLOGIAS EM ASCENSÃO	35
2.8. DESTINAÇÃO DO BIOMETANO.....	36

2.9. MELHORES PRÁTICAS NO MUNDO E SITUAÇÃO DO BRASIL EM GRANDES PROJETOS PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO RSU	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1. PESQUISA DE PUBLICAÇÕES	43
4.1.1. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS ESTUDOS AO LONGO DOS ANOS	43
4.1.2. PAÍSES QUE MAIS PUBLICAM	44
4.1.3. TIPOS DE PUBLICAÇÃO	45
4.1.4. ÁREAS DE PESQUISA	46
4.2. PUBLICAÇÕES RELEVANTES.....	47
4.2.1. OBJETIVOS DOS TRABALHOS SELECIONADOS.....	47
4.2.2. DISTRIBUIÇÃO ANUAL DOS TRABALHOS RELEVANTES SELECIONADOS.....	49
4.2.3. TEMPERATURA, TDH E RENDIMENTO DE BIOGÁS.....	50
4.2.4. ESCALA DOS TRABALHOS SELECIONADOS E VOLUME DE BIOGÁS OBTIDO	51
4.2.5. PROCESSOS CONSOLIDADOS EM LARGA ESCALA	54
5. CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
6. CONCLUSÕES	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

Devido à preocupação mundial a respeito de questões climáticas e ambientais, é recorrente a discussão de pautas que dizem respeito a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e utilização de fontes não renováveis de energia, como o petróleo e o carvão. Essas ações humanas já são responsáveis pelo aquecimento de 1,09 °C da atmosfera do planeta entre 2011 e 2020 (IPCC, 2021) e a emissão de aproximadamente 46 quilotoneladas de gases do efeito estufa em 2018 (WORLD BANK, 2020). Formas de reverter esse cenário foram amplamente discutidas durante a última Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP26).

Outra preocupação, que também diz respeito a essas questões ambientais, é em relação ao volume de resíduos de sólidos urbanos (RSU) gerado pela crescente população mundial. Atualmente estima-se que a geração de RSU é de 1300 milhões de toneladas por ano, podendo atingir 2,2 bilhões de toneladas por ano até 2025. Esses resíduos, além de contribuir para emissão de GEE, podem trazer riscos à saúde pública quando não manejados corretamente (RAM ET AL, 2021). Com isso, a preocupação se dá em relação a destinação desses resíduos, uma vez que cerca de 70% são destinados a aterros sanitários e lixões a céu aberto, sendo esse cenário ainda mais recorrente nos países subdesenvolvidos, como o Brasil (NANDA ET AL, 2020).

Para resolver a questão da busca por fontes renováveis de energia, e ao mesmo tempo, os problemas relacionados à gestão do RSU, uma alternativa são os processos que visam utilizar esses resíduos como substrato para produção de bioenergia. Esses processos são os denominados *Waste to energy (WtE)*, e podem realizar essa conversão através de processos térmicos (incineração, gaseificação e pirólise) ou bioquímicos (fermentação e digestão anaeróbia).

Uma das possibilidades dos processos *WtE* é justamente a obtenção de biogás a partir da digestão anaeróbia (DA) a partir de RSU. Isso ocorre uma vez que boa parte da composição desses resíduos trata-se de resíduos alimentares e de jardinagem, que são a fração orgânica, detentora de macromoléculas como

polissacarídeos, lipídios e proteínas utilizadas para o crescimento microbiano e processo de DA que produz o biogás (RAM ET AL, 2021).

Diversos estudos na literatura avaliam esse processo de DA em pequenas escalas, através de experimentos em laboratório para avaliação de questões como tamanho de partícula do RSU (BASINAS ET AL, 2021), influência do pré-tratamento de substrato (SEDIGHI ET AL, 2021) e influência da codigestão do RSU junto a outros substratos (ZOUAGHI ET AL, 2020). Também são encontrados muitos estudos que apresentam modelos matemáticos e estudos teóricos para estimar a produção de biogás em determinadas regiões (BRITO ET AL, 2021; RIBEIRO ET AL, 2021). No entanto, quando se diz respeito aos processos em grande escala para viabilizar o tratamento de grandes volumes de RSU, os desafios podem ser diferentes, e muitas vezes alguns aspectos como a questão logística da cadeia de suprimentos da planta são pouco abordados na literatura.

Os processos em larga escala implementados ao redor do mundo também possuem uma série de variações em sua cadeia no que compreende o recebimento dos resíduos, pré-tratamento, DA, purificação do biogás (*downstream*) e destinação do bioproduto. No entanto duas grandes configurações são encontradas : (1) a obtenção de biogás a partir de plantas dedicadas para realização da DA através de biodigestores, (2) e os aterros sanitários com sistema para captação de biogás. Todas essas variações no processo interferem diretamente na capacidade de processamento da planta e nos volumes obtidos de biogás e biometano.

No Brasil, a fim de demonstrar as vantagens e viabilidade desses processos para obtenção de biogás e outros bioprodutos, algumas universidades implementaram projetos pilotos que realizam o tratamento de resíduos alimentares e de jardinagem gerados no próprio campus (PERIN ET AL, 2020; D'AQUINO ET AL, 2021 e SOUSA ET AL, 2020). Também são encontrados no país outros processos em grande escala e já consolidados, que inclusive realizam a comercialização de biogás e biometano e sua utilização como combustível veicular e fonte de energia térmica e elétrica (GUERREIRO ET AL, 2021).

No entanto, a quantidade de resíduos gerada pelos municípios é elevada, chegando a 66,6 milhões de toneladas por ano (SNIS, 2021), onde 73,8% é destinada a aterros e 11,6% a lixões a céu aberto. Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é realizar uma revisão bibliográfica avaliando as tecnologias existentes ao redor do mundo para obtenção de biogás a partir do RSU, descrevendo a tendência

de pesquisa desse campo, a fim de entender quais os principais processos em larga escala e suas diferenciações.

Essa avaliação também permitirá entender quais países mais avançaram em relação a estudos sobre o tema e aplicações desses processos, e como esses estudos evoluíram ao longo dos anos. Também será possível avaliar de forma abrangente os objetivos de alguns trabalhos publicados sobre o tema nos últimos anos e alguns parâmetros desses processos, como temperatura, rendimento de biogás e volume de biodigestor.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GERAIS

Através de revisão da literatura apresentar o cenário atual do Brasil frente a geração de resíduos sólidos urbanos e a sua utilização como substrato para produção de biogás. Entender os principais aspectos e etapas envolvidas no funcionamento de plantas para produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) ao redor do mundo, identificando se essa pode ser uma rota viável e ampliável na destinação de RSU no Brasil.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Através do banco de dados da *Web of Science* entender como as pesquisas a respeito de geração de biogás a partir de RSU evoluíram nos últimos anos, bem como os países que mais publicaram a respeito do tema e quais as características desses trabalhos, como por exemplo, o tipo de publicação e as áreas de pesquisa;
- 2- Aprofundamento do processo, verificando as principais variáveis do processo em artigos selecionados por ordem de relevância pela plataforma *Web of Science*;
- 3- Dos trabalhos selecionados, realizar uma análise daqueles que possuem processos em larga escala, a fim de identificar as principais características desses processos e suas principais variações no que diz respeito a questões

logísticas, recepção do RSU, pré-tratamento, processo de digestão anaeróbia, *downstream* e destinação da bioenergia.

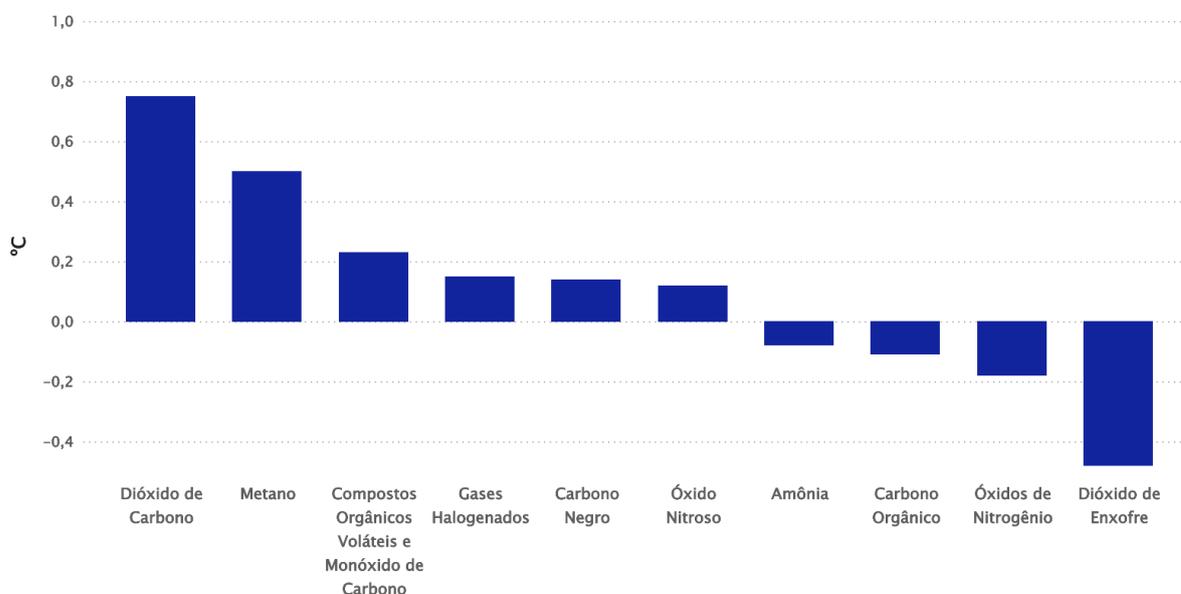
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. QUESTÕES CLIMÁTICAS

O avanço no crescimento das populações junto da intensificação das atividades industriais contribui diretamente no aumento da geração de resíduos sólidos e no consumo de energia de combustíveis fósseis, práticas que afetam no agravamento do efeito estufa e aquecimento do planeta (RAM ET AL, 2021).

O efeito estufa é um fenômeno natural, onde os gases presentes na atmosfera da Terra realizam a absorção de parte da radiação solar e com isso atuam no aquecimento da superfície terrestre. Ações humanas podem, no entanto, influenciar na emissão e concentração desses gases do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Desde 2011 essa concentração vem crescendo, atingindo, em 2019, médias anuais de 410 partes por milhão (ppm) de CO₂, 1866 partes por bilhão (ppb) para CH₄ e 332 ppb para N₂O (IPCC, 2021). A Figura 2.1 a seguir apresenta como esses e outros GEE contribuíram para o aquecimento do planeta entre 2010 e 2019.

Figura 2.1 - Contribuições para o aquecimento entre 2010 e 2019 (comparado ao período de 1850 a 1900)



Fonte: Adaptado de IPCC (2021)

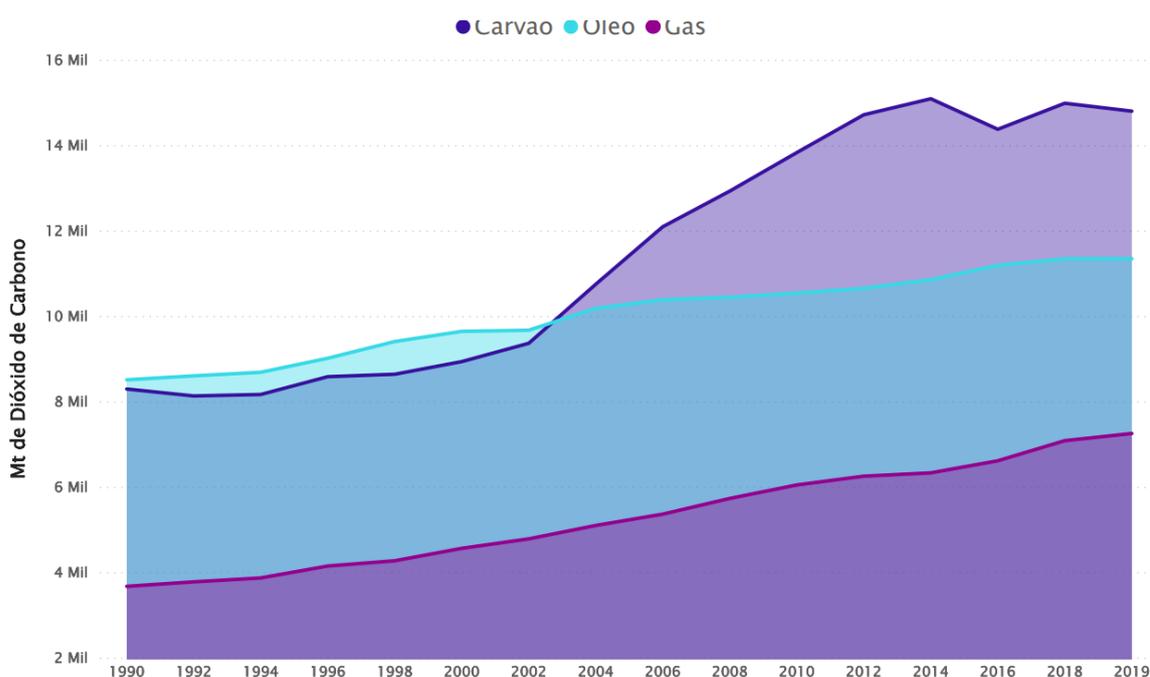
Conforme visto na Figura 2.1, a contribuição das emissões de CO₂ e CH₄ para o aquecimento global é bastante elevada, sendo esses os gases que mais contribuíram para o aquecimento do planeta entre os anos de 2010 e 2019. O Brasil também colabora para esse cenário crítico, conforme visto nos últimos dados divulgados pelo Sistema de Estimativa de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SEEG) que apontam uma emissão de 2,16 bilhões de toneladas de gás carbônico equivalente em 2020 pelo país, representando um aumento de 9,5% quando comparado a 2019. Aponta-se que o desmatamento na Amazônia foi um dos principais responsáveis por esse acréscimo (SEEG, 2021).

Também contribuindo para o cenário de emissões de GEE e as mudanças climáticas, a intensificação da geração de resíduos destinados para aterros sanitários ou lixões a céu aberto é, dentre diversas problemáticas sustentáveis, uma das ações responsáveis pela emissão de CH₄ durante a decomposição da fração orgânica desses resíduos (LIMA, 2009). Este GEE pode chegar a contribuir 20 vezes mais com o efeito estufa que o CO₂ (FIGUEIREDO, 2011). O agravamento para esse cenário é ainda maior tendo em vista que a previsão de produção de resíduos sólidos pelos

centros urbanos deve atingir 3,4 bilhões de toneladas métricas por ano até 2050 (KHAN ET AL, 2021).

O setor de energia também impacta na geração de GEE, detendo aproximadamente 70% das emissões. A geração de CO₂ na queima de combustíveis fósseis é a principal responsável por esse impacto e a Figura 2.2 a seguir apresenta como evoluiu ao longo dos anos essas emissões (HOOK ET AL, 2012).

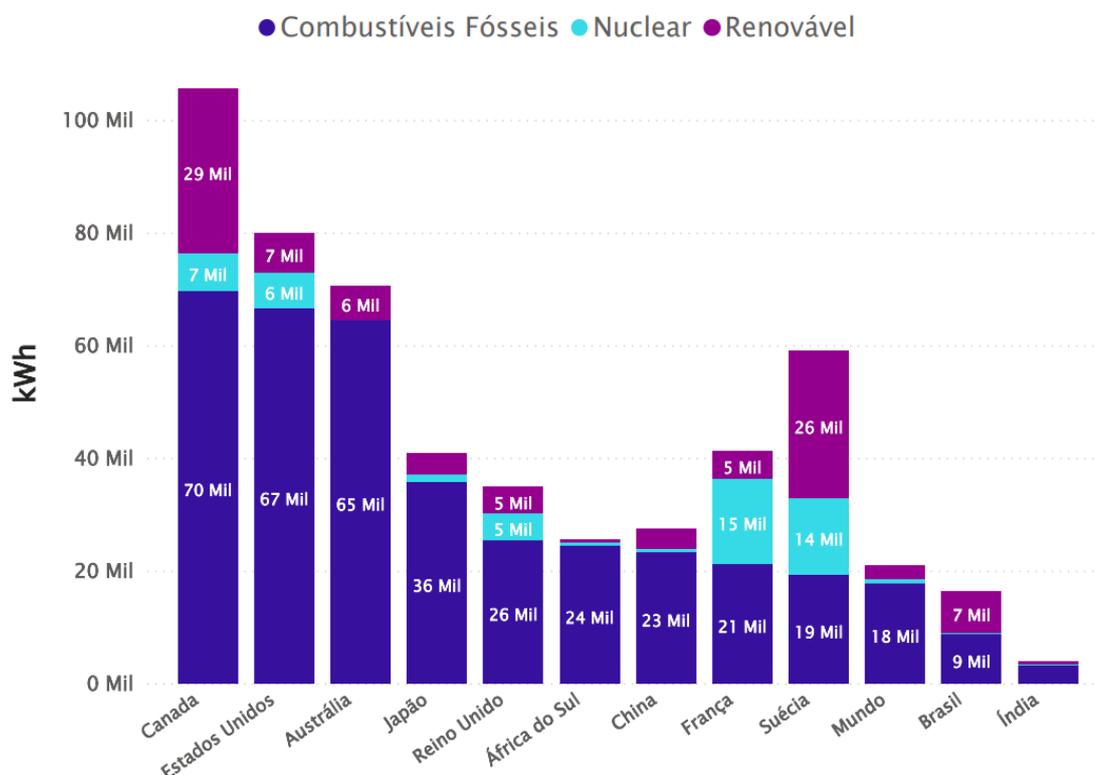
Figura 2.2 - Emissões de CO₂ em gigatoneladas por combustíveis de origem fóssil entre 1971 e 2009



Fonte: Adaptado de IEA, 2022

Além disso, as fontes de origem dos combustíveis fósseis, como o petróleo, são fisicamente e economicamente limitadas, tendendo a se esgotar. Faz-se então urgentemente necessário a busca por outras fontes limpas de energia, pois assim como mostra a Figura 2.3, as de origem fóssil são ainda as mais utilizadas.

Figura 2.3 - Origem da energia consumida per capita em 2019 em alguns países ao redor do mundo



Fonte: Adaptado de Our World in Data (2019)

É notável a preocupação a respeito dessas questões ao redor do mundo, como visto durante a 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP26), ocorrida em novembro de 2021, onde mais de 100 países levantaram intenções de reduzir emissão de GEE até 2030 visando manter o acordo de limitar o aquecimento global em 1,5 °C até 2100. Durante a conferência também foi acordado, de forma inédita, um compromisso para a redução na utilização de combustíveis fósseis, sobretudo do carvão (ONU, 2021). Esses acordos reforçam a importância da implementação e do uso de formas de energia que sejam limpas e renováveis.

Nesse sentido, para combater os problemas abordados nesta seção, diversos países encontram soluções através de processos denominados *Waste to Energy* (*WtE*) que permitem, simultaneamente, reduzir seus volumes de resíduos e os transformar em energia renovável (RAM EL AL, 2021).

2.2. GERAÇÃO E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NO MUNDO

Mesmo com a criação de leis e políticas pública, como no Brasil a Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/10) que anteriormente previa eliminar rotas inseguras de descarte de resíduos há uma década (em 2014), observa-se que ainda uma parcela significativa de resíduos é destinada a lixões a céu aberto (BRASIL, 2010). Esse cenário demonstra que o país possui estratégias ineficazes para uma boa gestão de resíduos e implementação dos 4Rs: redução, reutilização, reciclagem e repensar (4Rs) (KHAN ET AL, 2021; ALFAIA ET AL, 2017).

A gestão inadequada dos RSU é um agravante no que diz respeito ao aquecimento do planeta. Estima-se que os resíduos alimentares que constituem o RSU, por exemplo, são responsáveis pela emissão de 3,3 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente. Além disso, a presença de metano e dióxido de carbono nos gases de aterro sanitário também podem contribuir na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (NANDA ET AL, 2020).

A população mundial deve exceder a casa dos 10 bilhões em 2057, e junto disso também deve avançar a quantidade de lixo gerada pelos municípios, que atualmente é de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas por ano, o que resulta em aproximadamente 0,745 kg de resíduo gerado por pessoa por dia. De todo esse montante, cerca de 33% não possui o gerenciamento adequado (KHAN ET AL, 2021).

A Tabela 2.1 a seguir apresenta a quantidade de resíduos gerada por alguns países no ano de 2017.

Tabela 2.1 - Quantidade de resíduos gerados em 2017 em alguns países

País	Resíduos Gerados (milhões de toneladas métricas por ano)	Resíduos Gerados (toneladas métricas por ano) per capita
China	220,4	0,16
India	168,4	0,12
Estados Unidos	258	0,78
Indonésia	65,2	0,24
Brasil	79,89	0,37

Rússia	60	0,41
Japão	43,98	0,35
Alemanha	51,05	0,61
Reino Unido	31,75	0,47
África do Sul	18,46	0,32
Canadá	25,1	0,66
Arábia Saudita	16,13	0,46
Austrália	13,35	0,52

Fonte: Adaptado de RAM ET AL, 2021

Grande parcela dos resíduos gerados corresponde ao Resíduo Sólido Urbano (RSU). O RSU é, em sua maior parte, constituído de resíduos de alimentação, de jardinagem, papel, papelão, plástico, borracha, metal, vidro, eletrônico, materiais inertes e resíduos variados; sendo este último a parte mais heterogênea que corresponde a, por exemplo, resíduos biomédicos, de higiene pessoal, farmacêuticos, dentre outros. A fração orgânica é composta pelos resíduos de alimentação e jardinagem (NANDA ET AL, 2020).

No entanto, a composição do RSU pode variar de acordo com a localidade em que é gerado, a depender de fatores como estilo de vida, tamanho da população, desenvolvimento tecnológico, dentre outros. A Tabela 2.2 a seguir apresenta a composição física desses resíduos em alguns países.

Tabela 2.2 - Composição física de RSU gerados por alguns países

País	Material Orgânico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Papel e papelão (%)	Plástico (%)	Borracha e couro (%)	Madeira (%)	Jardinagem (%)	Outro (%)
Brasil	51,4	2,4	2,9	13,1	13,5	N/A	N/A	N/A	16,7
Canadá	24	6	13	47	3	N/A	N/A	N/A	8
Paquistão	30	6	4	13	9	2	2	14	20

Zimbábue	36	5	6	27	23	N/A	N/A	N/A	3
Egito	56	4	2	10	13	N/A	N/A	N/A	15
China	61,2	2,1	1,1	9,6	9,8	1,3	1,8	N/A	13,1
Estados Unidos	14,9	4,4	9	26,6	12,9	9,5	6,2	13,3	3,2
Estônia	36,7	8,3	2,6	17,5	18,6	N/A	0,4	N/A	15,9
Israel	34	3	3	24	18	N/A	N/A	2	16
Reino Unido	16,7	2,2	3,5	18,9	20,2	N/A	7,6	2,7	28,2
México	52,4	5,9	3,4	13,8	10,9	N/A	N/A	N/A	12,1
Portugal	36,49	6,73	1,85	13,64	10,72	N/A	0,93	1,94	27,68
Sérvia	37,62	5,44	1,38	13,57	12,73	0,4	N/A	12,1	16,72

Fonte: Dados coletados de WORLD BANK, 2018

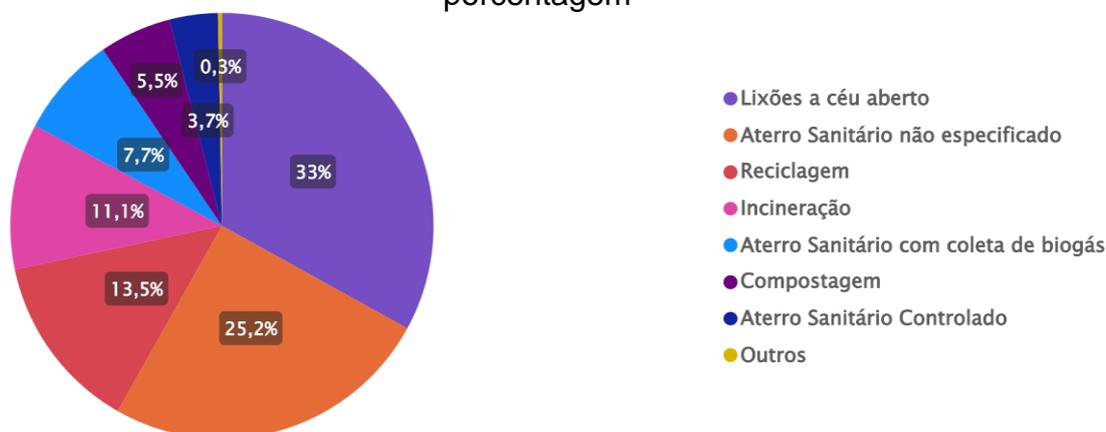
Assim como a composição, a gestão do RSU também varia nas diferentes regiões do mundo. Estima-se que cerca de 70% é destinado a lixões a céu aberto ou aterros, 19% reciclado e apenas 11% utilizado em processos para recuperação energética. A gestão desses resíduos pode ainda ser dividida em alguns estágios:

- 1) Geração: acontece nas casas, escritórios, comércios, instituições e escolas. Nos países desenvolvidos o RSU possui uma elevada fração de plásticos e papel. Já nos países em desenvolvimento possui uma elevada fração de matéria orgânica (NANDA ET AL, 2020).
- 2) Coleta e transferência: Nos países desenvolvidos a segregação e separação do lixo acontece satisfatoriamente já na fonte de origem, e os veículos apropriados do município coletam esses resíduos diretamente nas casas e áreas designadas. Nos países de terceiro mundo e em desenvolvimento esse processo pode ser ineficiente ou até mesmo não ocorrer, colaborando para o desenvolvimento de lixões a céu aberto (NANDA ET AL, 2020).

3) Eliminação, processamento e tratamento: Nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, aterros sanitários são a forma mais comum de destinação do RSU, e para reduzir seu volume, a incineração é realizada possibilitando geração de calor e energia. No entanto, em locais onde predominam grupos de baixa renda, acontece o despejo a céu aberto dos resíduos. Como alternativa sustentável para todos os cenários, ocorre a implementação de processos *WtE* em alguns países (NANDA ET AL, 2020).

A Figura 2.4 a seguir apresenta as principais rotas para descarte e tratamento de RSU ao redor do mundo.

Figura 2.4 - Rotas utilizadas para descarte ou tratamento de RSU no mundo em porcentagem



Fonte: Adaptado de WORLD BANK, 2018

Em relação ao Brasil, no último levantamento publicado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), foi estimado que a massa de resíduos coletada nas regiões urbanas é de 66,6 milhões de toneladas por ano, sendo que 65,3 milhões de toneladas foram destinadas para disposição final em solo sendo: 73,8% aterro sanitário, 11,6% aterro controlado e 14,6% lixão a céu aberto (SNIS, 2021).

Apesar de muitas das ações necessárias para reverter esse cenário serem conhecidas e amplamente divulgadas, o Brasil ainda precisa avançar em diversos aspectos. Faz-se necessário a eliminação dos lixões a céu-aberto, a ampliação efetiva de programas de reciclagem e novos investimentos em tecnologias para o tratamento

de resíduos orgânicos. Esses investimentos inclusive fazem parte da lista de recomendação da PNRS, que cita a recuperação de energia através dos resíduos (bioenergia) como uma das melhores alternativas a se seguir (SOUSA ET AL, 2021; BRASIL, 2020).

No entanto, quando se diz respeito a valorização energética e recuperação bioenergética de resíduos, esses processos só podem ocorrer de forma efetiva se existir uma cadeia adequada para a sua coleta, pré-tratamento e valorização; sendo que a logística envolvida na etapa de coleta é a que mais impacta os custos de todo processo (CAMPOS ET AL, 2021).

2.3. QUESTÕES LOGÍSTICAS DE WTE A PARTIR RSU

O problema ambiental dos RSU, desafios relacionados com os resíduos e o fornecimento de energia sustentável estão sendo minimizados através de uma variedade de abordagens, como os processos *WtE*, que visam a obtenção de bioenergia a partir das fontes mais diversas de resíduo, inclusive os RSU.

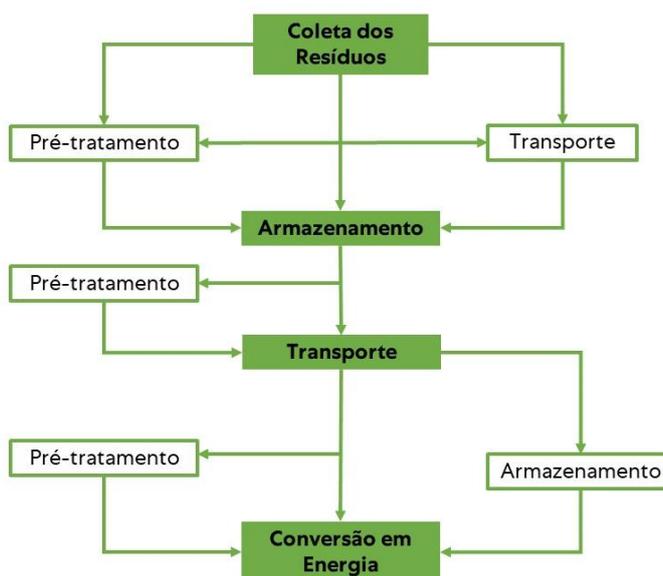
Especificamente em relação aos processos *WtE* a partir de RSU, alguns países como o Japão dominam muito bem esses processos, e nestes locais pode chegar a 70% a quantidade de resíduo destinado para esse fim (BARUA ET AL, 2021). Espera-se no futuro que a energia obtida a partir dos resíduos cubra 10% do total da demanda global por eletricidade (RAM ET AL, 2021).

Para que esses processos de recuperação energética dos RSU aconteça de forma eficiente, se faz necessário que a etapa de coleta, processamento, e redistribuição sejam cuidadosamente projetados (BOTTANI ET AL, 2019). Por esse motivo, construir a rede logística de uma planta de bioenergia é um processo complexo e que envolve a tomada de decisões junto as partes interessadas (*stakeholders*) (GALVEZ ET AL, 2015).

Devido a essa complexidade, o custo das operações logísticas nos processos *WtE* são bastante elevados, sendo muitas vezes um dos gargalos mais críticos do processo. (IAKOVOU ET AL, 2010). A fim de evitar que o projeto se torne insustentável se faz necessário, desde o início do projeto de uma planta, a utilização de ferramentas e métodos para suportar as decisões logísticas a serem tomadas (GALVEZ ET AL, 2015).

Essa cadeia de suprimentos logística para a valorização e gerenciamento de RSU, bem como a produção de energia, pode ser resumida em quatro grandes etapas: coleta dos resíduos, armazenamento, transporte e geração de energia. A Figura 2.5 a seguir apresenta como essas etapas podem se conectar na cadeia (IAKOVOU ET AL, 2010).

Figura 2.5 - Cadeia de suprimentos para conversão de resíduos em energia



Fonte: Adaptado de IAKOVOU ET AL, 2010

Iakovou et al. (2010) aborda o fato de que encontramos na literatura diversas publicações de trabalhos científicos relacionados a primeira e última etapa do processo, ou seja, a coleta dos resíduos e sua conversão em energia. Por outro lado, existem poucos trabalhos que trazem em detalhes a projeção da cadeia de suprimentos para esse processo, tema que também é de grande importância visto que essas cadeias se mal projetadas, além de ineficientes, podem ser bastante prejudiciais ao meio ambiente.

A Tabela 2.3 a seguir apresenta alguns desses trabalhos, que terão alguns de seus aspectos discutidos ao longo desta seção.

Tabela 2.3 – Trabalhos que abordam questões e impactos da cadeia de suprimentos logística em processos de conversão do RSU em bioenergia.

Objetivo	Bioenergia	Ferramentas empregada na análise	Autor
Criar um modelo de roteirização para uma cadeia de logística reversa de resíduos alimentares	Não determina	Modelo desenvolvido em Microsoft Excel™	Bottani et al. (2018)
Propor uma ferramenta para apoiar a tomada de decisão no planejamento de produção de plantas de bioenergia	Não determina	G/S e simulações no MatLab	Ayoub et. Al (2016)
Propor uma ferramenta que permite analisar tamanho da planta, localização e rotas	Biogás	Modelos matemáticos	Hu et. Al (2017)

Fonte: Acervo pessoal

A construção dessa rede logística de RSU envolve uma série de processos e ações que acontecem dentro de uma hierarquia complexa de tomadas de decisão, que podem ser organizados dentro de dois grandes grupos: as decisões estratégicas e as táticas.

2.3.1. DECISÕES ESTRATÉGICAS NA CONSTRUÇÃO DA CADEIA LOGÍSTICA DE PROCESSOS WtE A PARTIR DE RSU

Esse primeiro grupo de decisões são aquelas que envolvem todos os interessados em investir e desenvolver uma planta *WtE* a partir de RSU. Como primeira ação, se faz necessário entender os assuntos regulatórios impostos no local onde se pretende realizar a instalação da planta, bem como possíveis programas governamentais que possibilitem corte de impostos, isenções e subsídios. Também é necessário garantir que a planta terá abastecimento ininterrupto de RSU, e isso pode ser acordado através de contratos que firmam a disponibilização desses resíduos por longos períodos (IAKOVOU ET AL, 2010).

A segunda ação desse grupo de decisões diz respeito à caracterização e configuração da rede dessa cadeia de suprimentos. As decisões tomadas nessa etapa irão afetar diretamente o fluxo de resíduos de toda a cadeia e os custos envolvidos

nesse processo. Os tópicos seguintes devem ser considerados e definidos nessa etapa:

- 1) Fonte de abastecimento;
- 2) Localização da planta;
- 3) Capacidade de produção da planta;
- 4) Localização das instalações de armazenamento;
- 5) Tempo e condições (como temperatura) do armazenamento;
- 6) Projeto da rede da cadeia de suprimentos;
- 7) Garantia de sustentabilidade.

(IAKOVOU ET AL, 2010).

Para auxiliar nessas definições, alguns autores apresentam ferramentas de apoio que utilizaram em seus trabalhos. Para definição da fonte de abastecimento e localização da planta, uma das ferramentas utilizadas são os Sistemas de Informações Geográficas (do inglês *Geographic information system*, ou *GIS*). No trabalho de Voivontas et al (2000), por exemplo, o autor utiliza o GIS para determinar a dispersão geográfica do potencial de biomassa disponível em uma região para geração de bioenergia (VOIVONTAS ET AL, 2001).

Abordagens analíticas podem ser utilizadas para determinar a capacidade de produção da planta. Como exemplo, o trabalho de Ribeiro et al (2021) utiliza de algoritmos elaborados no Scilab® para determinar o potencial de produção de biogás e geração de energia elétrica em plantas que utilizam RSU como substrato em processos utilizando biodigestores e aterro sanitário (RIBEIRO ET AL, 2021).

Em relação às instalações de armazenamento, alguns autores apresentam estudos de caso em que decidem alocar centros de distribuição (CD) de resíduos em locais diferentes daqueles onde a planta se encontra. Isso acontece para que nessas centrais de armazenamento ocorra um pré-tratamento dos resíduos visando uma redução de volume e melhor eficiência na geração de energia. No entanto, esses sistemas resultam em custos mais altos de logística, visto que essa matéria prima deverá ser transportada novamente quando for destinada da central de armazenamento para a planta. Para apoiar qual a melhor localização dessas centrais de armazenamento, os autores utilizam de abordagens matemáticas como *Mixed*

Integer Linear Programming (MILP) e Mixed Integer Programming (MIP) (SUN ET AL, 2020).

Para a projeção da rede da cadeia de suprimentos, são utilizados alguns modelos de otimização. Bottani et al (2018, 2019) apresenta em dois de seus trabalhos uma ferramenta matemática desenvolvida no Microsoft ExcelTM onde descreve quais as melhores rotas e localizações para um sistema de recuperação de resíduos alimentares em uma região no norte da Itália (BOTTANI ET AL 2018; BOTTANI ET AL 2019).

Por fim, é crucial garantir que as operações logísticas sejam sustentáveis. Para isso, alguns autores sugerem a realização de análises para medir o quanto essas operações podem impactar em questões como emissões de CO₂ e uso de energia. Hamelinck et al. (2005) realiza justamente isso em seu trabalho, ao propor uma planilha que permite analisar de forma técnico-econômica uma série de fatores, como custos de transporte e emissões de CO₂, em uma rede logística para abastecimento de biomassa. Roni et al. (2017) realizam algo semelhante em seu trabalho, ao propor um *MILP* para determinação de uma cadeia de suprimentos que visa produzir etanol celulósico, onde o *MILP* otimiza as emissões de CO₂ relacionados a malha de transportes dessa cadeia.

2.3.2. DECISÕES TÁTICAS E OPERACIONAIS NA CONSTRUÇÃO DA CADEIA LOGÍSTICA DE PROCESSOS WtE A PARTIR DE RSU

Na construção dessas cadeias de suprimentos, as decisões táticas são as que são tomadas pensando em médio prazo, e as operacionais são as decisões tomadas no dia a dia da operação. Os seguintes tópicos devem ser considerados e definidos nessa etapa:

- 1) Planejamento de produção;
- 2) Gerenciamento e controle de estoque;
- 3) Gestão das frotas e agendamento dos veículos.

(IAKOVOU ET AL, 2010).

O desafio no primeiro tópico, planejamento de produção, está em determinar os níveis de produção, estoque e força de trabalho de acordo com a demanda de

energia requerida pela planta em médio prazo. O trabalho de Ayoub propõe um sistema para apoiar o planejamento de produção de bioenergia de uma planta. Esse sistema conta a utilização de base de dados de *GIS* e algoritmos executados no *MatLab* para suportar as tomadas de decisão (AYOUB ET AL, 2006).

São encontrados na literatura poucos trabalhos a respeito do gerenciamento e controle de estoque (IAKOVOU ET AL, 2010). No trabalho de Li et al (2020), o autor menciona a utilização de um sistema de pesagem do RSU coletado no próprio veículo, a fim de garantir que a planta seja abastecida com a quantidade necessária (LI ET AL, 2020).

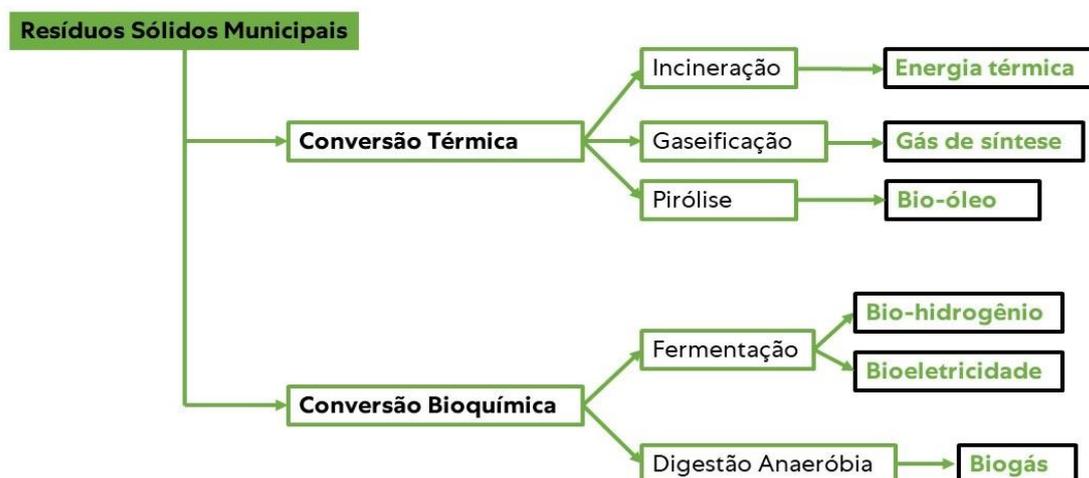
Em relação a gestão das frotas, Li et al (2020) também menciona a utilização de um sistema inteligente com GPS que permite uma gestão e otimização em tempo real das frotas. No entanto não é detalhado como o funcionamento desse sistema (LI ET AL, 2020).

As decisões estratégicas, táticas e operacionais bem definidas resultaram em uma cadeia logística estruturada e que consegue suportar um processo para obtenção de bioenergia a partir de RSU. Esses processos terão diferentes particularidades a depender da rota tecnológica *WtE* escolhida.

2.4. BIOENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os processos para obtenção de bioenergia a partir do RSU nada mais são que etapas de tratamento desses resíduos que visam obter energia na forma de calor, eletricidade ou combustíveis para transporte. A Figura 2.6 apresenta as possíveis rotas tecnológicas relacionadas a esse tratamento (RAM ET AL, 2021).

Figura 2.6 - Principais rotas tecnológicas para processos WtE



Fonte: Adaptado de RAM ET AL, 2021

Conforme observado na Figura 2.6, as principais rotas para obtenção de energia a partir do RSU são o desdobramento da conversão térmica e bioquímica.

2.4.1. CONVERSÃO TÉRMICA DO RSU EM BIOENERGIA

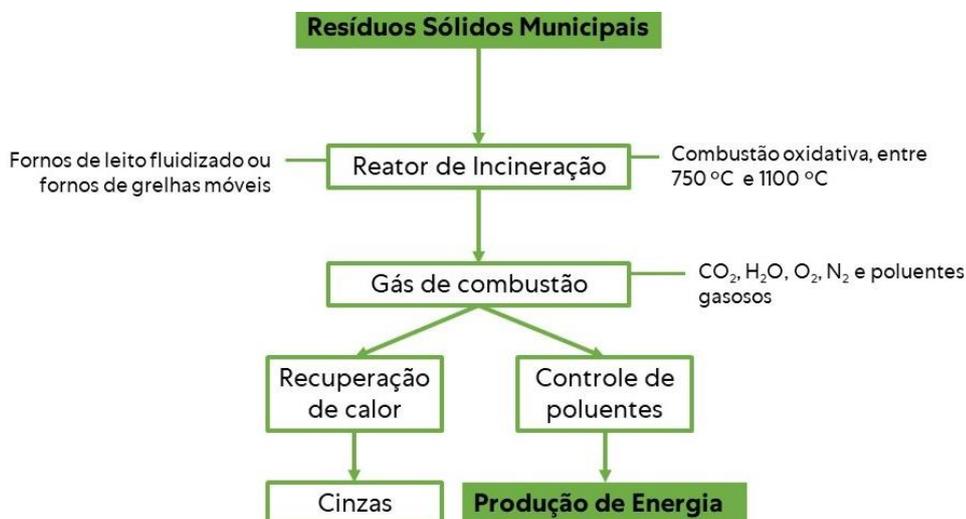
O tratamento térmico do RSU acontece através de processos que ocorrem em elevadas temperaturas. Esses processos podem ser a incineração, gaseificação ou a pirólise, onde ao final destes, o RSU terá sido convertido em combustível ou energia térmica (RAM ET AL, 2021).

O principal entrave desses processos são os relacionados aos custos de operação e manutenção, que podem ser elevados. Além disso, algumas dessas rotas podem ser altamente poluentes, o que torna o processo menos sustentável quando comparado a outras rotas *WtE* (CAMPOS ET AL, 2021).

A incineração, ilustrada na Figura 2.7, é a rota *WtE* mais utilizado ao redor do mundo. Para esse processo podem ser utilizados dois tipos de equipamento, os fornos de leito fluidizado ou fornos de grelhas móveis, que implicam diferentes técnicas de utilização, operação e fluxo de ar. Um dos grandes desafios enfrentados na incineração diz respeito as cinzas resultantes do processo, que podem conter metais pesados. Assim, cientistas vem trabalhando em novas tecnologias para controle da

poluição do ar e remoção dos metais pesados nas cinzas resultantes do processo (RAM ET AL, 2021).

Figura 2.7 - Diagrama do processo de incineração de RSU



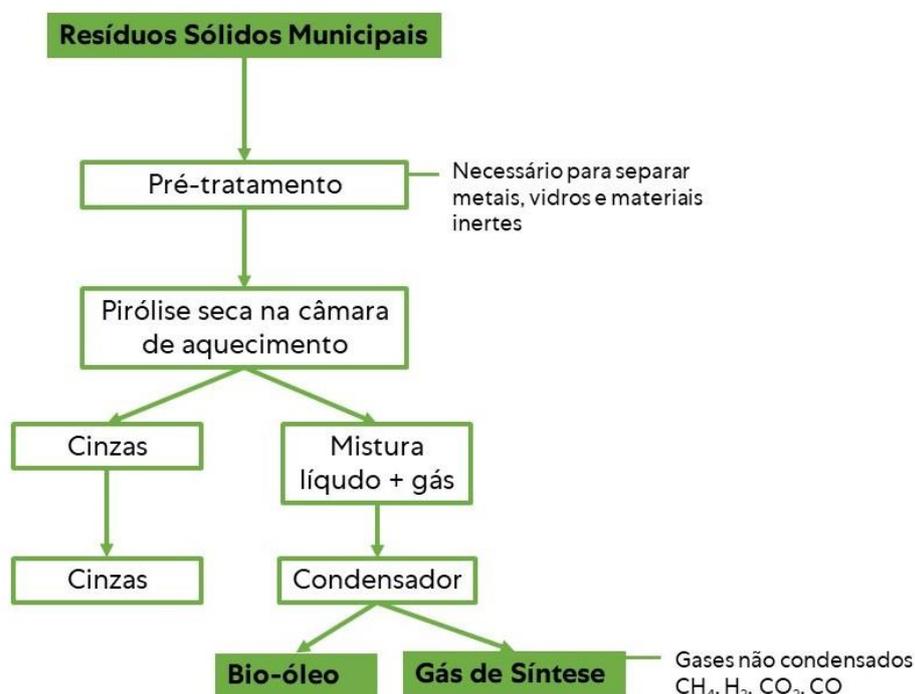
Fonte: Adaptado de RAM ET AL, 2021

Já a gaseificação consiste em um processo para produção de gás de síntese através da reação em temperaturas que variam de 550 °C a 1000 °C entre o carbono presente no RSU com ar, oxigênio (O₂), vapor e CO₂. O gás de síntese obtido, após etapa de purificação, é utilizado na forma de calor, eletricidade, ou vapor que pode ser usado puro ou alimentado em rede. As plantas *WtE* de gaseificação do RSU se mostram bastante eficientes para geração de energia, como visto em uma planta comercial operante no Japão, onde as conversões de carbono obtidas foram altas (acima de 91,7%), ao mesmo passo que a concentração de poluentes, como as dioxinas, ficaram abaixo do máximo permitido (TANIGAKI, 2021; RAM ET AL, 2021).

Por fim, a pirólise é um processo considerado inovador para destinação de RSU e possui uma grande vantagem comparada a incineração, uma vez que é bem menor a quantidade de poluentes emitida, como o SO₂ e N₂. A pirólise acontece na câmara de aquecimento iniciando em aproximadamente 300 °C, onde todo o O₂ presente é consumido, e após o aquecimento a temperatura sobe para 800 °C (RAM ET AL, 2021). O óleo obtido no processo pode ser destinado para uso como combustível de

motores e turbinas para aquecimento e geração de energia (BARUA ET AL, 2021). A Figura 2.8 a seguir resume o método.

Figura 2.8 - Diagrama do processo de pirólise de RSU



Fonte: Adaptado de RAM ET AL, 2021 e ISLAM ET AL, 2010

2.4.2. CONVERSÃO BIOQUÍMICA DO RSU EM BIOENERGIA

Processos *WtE* que envolvam a digestão da biomassa de RSU a partir de microrganismos e suas enzimas são os que correspondem à conversão bioquímica. Através dessas técnicas é possível obter hidrogênio, biogás, etanol e outros produtos de valor agregado.

Para produção de bio-hidrogênio a partir do RSU, existem algumas possíveis rotas: a fermentação escura (FE), fotofermentação, gaseificação e célula de eletrólise microbiana. A fotofermentação necessita de luz para ocorrer, e a produção de H_2 acontece com a ação de bactérias fotossintéticas que utilizam como substrato açúcares simples e ácidos graxos voláteis (AGV) presentes nos resíduos. Já na FE, o hidrogênio é produzido na ausência de oxigênio e de luz, em um processo onde a atividade da enzima hidrogenase gera prótons H^+ , que por sua vez agem como

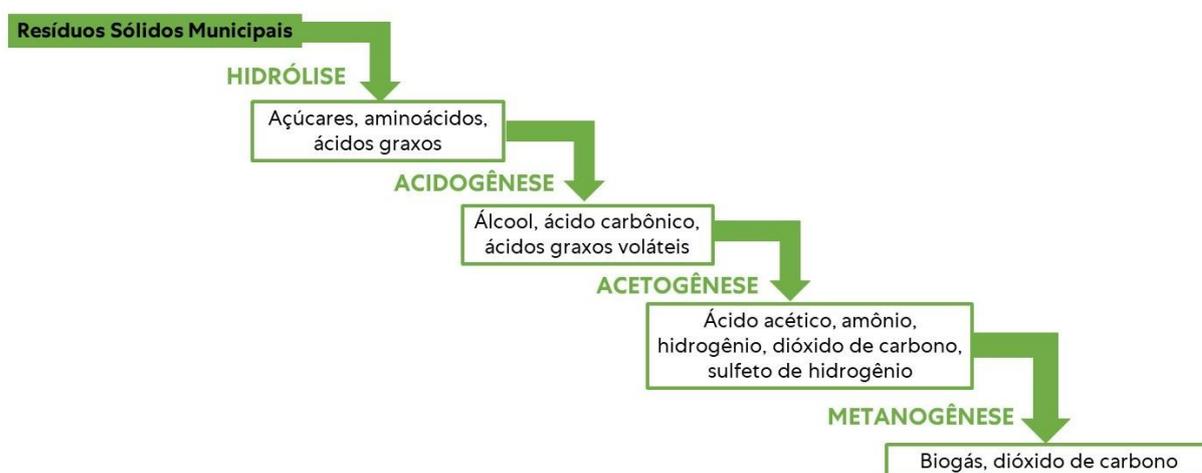
aceptores de elétrons produzidos durante a oxidação dos compostos orgânicos, dando origem ao H₂ molecular. A FE faz parte do processo de digestão anaeróbia (DA) do RSU, sendo um subproduto da primeira conversão acidogênica de matéria orgânica em ácidos (RAM ET AL, 2021; BARUA ET AL, 2021).

A digestão anaeróbia do RSU é uma das práticas mais comuns de conversão bioquímica de resíduos em energia. Devido ao fato de ser um processo que resulta em uma bioenergia de alto valor agregado, como o biogás, diversos países passaram a tomá-lo como alternativa sustentável para destinação de RSU. Ao mesmo tempo, ela vem sendo amplamente estudada e aprimorada por diversos pesquisadores, empresas e governos ao longo dos últimos anos. As etapas que compõem a AD são: hidrólise, acidogênese, acetogênese e a metanogênese (BARUA ET AL, 2021).

2.5. O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE RSU

A DA, também conhecida como biometanação, é um processo que acontece na ausência de oxigênio, onde microorganismos convertem materiais biodegradáveis em biogás. A Figura 2.9 apresenta as etapas que compõem a DA, sendo que essas etapas acontecem simultaneamente, uma vez que os produtos gerados na degradação devido a ação de um grupo de microorganismos servem de substrato para outros microorganismos (RAM ET AL, 2021).

Figura 2.9 - Etapas da Digestão Anaeróbia



Fonte: Adaptado de BARUA ET AL, 2021

2.5.1. HIDRÓLISE

A DA se dá início com a hidrólise dos carboidratos, lipídios e proteínas presentes na biomassa através dos microrganismos hidrolíticos. Esses microrganismos são fungos e bactérias, que através da liberação de suas enzimas convertem os carboidratos em açúcares (ação de celulases, hemicelulases, pectinases e amilases), os lipídios em ácidos graxos (ação das lipases) e as proteínas em aminoácidos (ação das proteases) (VOGELI ET AL, 2014; RAM ET AL, 2021).

Dentre as etapas da DA, essa é a que ocorre mais lentamente, e pode ser dividida em duas etapas. Na primeira, colônias de bactérias hidrolíticas cobrem a superfície da biomassa e liberam as enzimas para a produção dos monômeros (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos). Já na segunda etapa, a superfície da biomassa passa a ser degradada pelas bactérias. (CHRISTY ET AL, 2013).

2.5.2. ACIDOGÊNESE

Nessa segunda etapa, os monômeros resultantes da hidrólise são utilizados para produção de AGV através das ações de bactérias conhecidas como acidogênicas ou fermentativas. Os principais AGV produzidos são ácido butírico, propiônico, acético e láctico (RAM ET AL, 2021).

Essa etapa é responsável pela formação de precursores do metano que vão corresponder a cerca de 70% desse constituinte no biogás resultante de todo processo, e por isso determina o rendimento desse composto no produto final. A reação a seguir exemplifica uma das reações que acontecem, onde a glicose é convertida em ácido acético (BARUA ET AL, 2021).



A acidogênese é favorecida quando acontece em altas temperaturas, no entanto, uma elevada taxa de produção dos AGV pode afetar negativamente as etapas seguintes da DA (a acetogênese e metanogênese), uma vez que as bactérias que irão converter os AGV nessas etapas podem ficar sobrecarregadas, aumentando o pH do meio e inibindo o processo (CHRISTY ET AL, 2013).

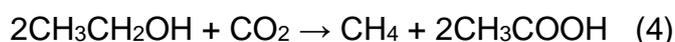
2.5.3. ACETOGÊNESE

Na acetogênese ocorre a ação dos microrganismos acetogênicos, que irão realizar a conversão dos AGV formados na etapa anterior em acetato. Devido a ação de algumas bactérias oxidantes de acetato, na acetogênese também é formado H₂ e CO₂ (RAM ET AL, 2021).

Devido ao acúmulo de eletrófilos que podem resultar da etapa de acidogênese e que não podem ser complementarmente degradados na metanogênese, a ação das bactérias da acetogênese é essencial para a etapa seguinte, uma vez que esses eletrófilos são degradados em acetato H₂ e CO₂ (CHRISTY ET AL, 2013).

2.5.4. METANOGÊNESE

Na última etapa da DA ocorre a formação de CH₄ e CO₂ através da ação de microrganismos metanogênicos, que utilizam como substrato o ácido acético e hidrogênio formados nas etapas anteriores. Esses microrganismos anaeróbios pertencem ao domínio Archaea ao filo dos eucariotas (RAM ET AL, 2021). As reações apresentadas abaixo representam a formação do CH₄ durante a metanogênese:



Os microrganismos envolvidos na metanogênese podem ainda ser divididos em cinco grupos (RAM ET AL, 2021)

- 1) Os que utilizam H₂ e CO₂ como substrato: *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, e *Methanogenium*;
- 2) Os que utilizam acetato como substrato, por exemplo: *Methanosaeta*;
- 3) Os que utilizam H₂, CO₂ e compostos metílicos como substrato: *Methanosarcina*;
- 4) Os que utilizam compostos metílicos como substrato, por exemplo: *Metahnolobus* e *Methanococcus*.

Quanto maior o teor de CH₄ no biogás resultante da DA, maior é seu valor energético (VOGELI ET AL, 2014).

2.6. A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RSU

O biogás é uma forma limpa e renovável de energia que pode tranquilamente substituir as fontes convencionais e não renováveis, como as de origem fóssil. Ele é produzido a partir da DA de compostos orgânicos e os seus principais constituintes são: CH₄ (55 - 65%), CO₂ (35 - 45%), nitrogênio (0 - 3%), sulfeto de nitrogênio (0 - 1%), hidrogênio (0 - 1%), oxigênio (0 - 2%) e amônia (0 - 1%) (BALAT ET AL, 2009). A composição varia diretamente de acordo com a composição da matéria prima utilizada, processos de pré-tratamento, configuração do sistema de DA, traços de metais e composição microbiana (POUDEL ET AL, 2021).

A Tabela 2.4 a seguir apresenta alguns trabalhos recentes da literatura com processos que visam a obtenção de biogás a partir de RSU.

Tabela 2.4 - Estudos para viabilização da produção de biogás a partir de RSU

Objetivo	País / Região	Dimensão	Escala dos Reatores (m ³)	Parâmetros Operacionais	Rendimento máximo de biogás	Volume de biogás máximo gerado	Finalidade/sugestão de uso do bioproduto	Autor
Monitorar um digestor anaeróbio que recebe resíduos alimentares para produção de biogás e realizar cálculos de performance a partir de balanços de massa e energia	Reino Unido	Larga escala	900	42 °C; TCO = 2,7 kgTVS/m ³ dia; TDH = 80 dias	0,642 m ³ /kgTVS	1919 m ³ /dia	Cogeração de energia (405 kWh/ton energia elétrica)	Banks et al. (2010)
Monitorar o primeiro digestor de "garagem" industrial para obtenção de biogás	China / Heilongjiang Province	Larga escala	1300 (2 reatores garagem de 400 m ³ cada e um tanque de percolação de 600 m ³)	37 °C; RT = 35 d	0,411 m ³ /kg TVS	8000 m ³ /dia	-	Qian et al. (2016)
Apresentar resultados do monitoramento da qualidade do biogás produzido em um aterro, sugerindo um destino de recuperação energética para esse biogás que atualmente é descartado	México / Cidade do México	Estudo estimativo	Aterro sanitário	-	-	21792 m ³ /dia	Conversão em energia elétrica	Villanueva-Estrada et al. (2018)
Apresentar estratégias para recuperação energética através de uma planta que recebe resíduos gerados no município do Rio de Janeiro	Brasil / Rio de Janeiro	Larga escala	252	TDH: 25 DIAS	-	2,39 m ³ /dia	Cogeração de energia	Ferreira et al. (2019)
A fim de agregar outros tipos de resíduos em uma planta na Espanha que utiliza RSU para obtenção de biogás, o estudo realiza a caracterização e análise de custo de pré-tratamento de novos resíduos provenientes de indústrias que poderiam ser utilizados no processo	Espanha / Granollers	Larga escala	-	-	-	11712 m ³ /dia	Cogeração de energia	Abad et al. (2019)

Melhorar a eficiência da obtenção de biometano realizando pré-tratamento de resíduos de jardinagem	Índia / Kharagpur	Bancada	0,001	30° C	0,431 m ³ /kg TVS	-	-	Panigrahi et al. (2019)
A fim de aprimorar os rendimentos da DA valorizando a fração orgânica do RSU, o trabalho apresenta diversos testes utilizando diferentes tipos e frações de lodo de esgoto misturado ao RSU como substrato para o processo	Índia	Bancada	0,0025	35 °C	0,967 m ³ /kg VS	0,00013 m ³ /dia	-	Ahmed et al. (2020)
Avaliar os impactos de um pré-tratamento do substrato utilizando um aparato de vórtice para a produção de biogás	Rússia	Bancada	0,0002	57 °C; TDH: 34 dias	-	2e-6 m ³ /dia	-	Katraeva et al. (2020)
Implementar um sistema de digestão anaeróbia de dois estágios para produção de biogás a partir de resíduos alimentares.	China / Shandong province	Larga escala	3100	37 °C; TCO: 3,2 kg TVS/m ³ dia; TDH: 15 dias	0,0448 m ³ /kg TVS	10843 m ³ /dia	Fertilizante, cogeração e injeção na rede de gás natural	Li et al. (2020)
Estudar as diferenças de processos de DA de RSU em um e dois estágios, visando melhores rendimentos para produção de biogás e biometano	Tailândia	Bancada	0,001	35 °C; TCO: 9-43 kg TVS/m ³ dia; TDH: 45 dias	0,287 m ³ /kg TVS	-	-	Markphan et al. (2020)
Avaliar a influência da presença de resíduos lignocelulósicos na digestão anaeróbia de resíduos alimentares para produção de biogás	Brasil / Paraná	Piloto	0,4	36 °C; TCO: 0,24-0,54 kg TVS/m ³ dia; TDH: 40 dias	0,47 m ³ /kg TVS	0,086 m ³ /dia	-	Perin et al. (2020)
Utilizar resíduos gerados na UFPE como substrato para obtenção de biodiesel, biogás e outros produtos de valor agregado a partir de processos <i>WtE</i> .	Brasil / Recife	Piloto	9,6	Mesofílico; TCO: 0,2 kg TVS/m ³ dia; TDH: 45 dias	0,176 m ³ /kg TVS	2.0 m ³ /dia	-	Sousa et al. (2020)
Demonstrar o processo e parâmetros de uma planta semi-comercial para produção de biometano a partir de resíduos	Índia / Telangana	Larga escala	3 reatores de 45 m ³ cada	Temperatura ambiente; TCO: 6,2 kg TVS/m ³ ; TDH: 14,5 dias	0,61 m ³ /kg TVS	-	Conversão em energia elétrica, (total da planta de 178 kWh/dia)	T.A.S et al. (2020)

Avaliar a influência de mistura com diferentes substratos na produção de biogás	Argélia	Bancada	0,0005 e 0,03	40°C; TDH: 50 dias	0,125 m³/kg TVS	-	-	Zouaghi et al. (2020)
Avaliar condições mesofílicas e termofílicas em digestores industriais PFR	Finlândia e Suécia	Larga escala	340, 671, 632, 650 e 2250	39 - 54 °C; TCO: 5.5-8.3 kg TVS/m³ dia; TDH: 48-66 dias	0.4–0.6 m³/kg TVS	-	Injeção na rede de gás natural e combustível veicular	Westerholm et al. (2020)
Avaliação (laboratório e teórica) do potencial dos resíduos produzidos no campus da USP para produção de eletricidade através do biogás	Brasil / São Paulo	Bancada / estudo estimativo	-	-	0,534 m³/Kg TS	-	Cogeração de energia, 12202 kWh/dia (estimativa)	D'Aquino et al. (2021)
Obtenção de biogás utilizando partículas finas de resíduo sólido urbano como substrato	República Tcheca	Bancada / Piloto	0,015 e 0,3	40 °C; TCO: 5.46 kg TVS/m³ dia; TDH: 50 dias	0,0911 m³/kg TVS	-	-	Basinas et al. (2021)
Estimar teoricamente o potencial do biogás de aterro sanitário e de reatores para digestão de resíduos na geração de energia elétrica	Brasil / Minas Gerais	Estudo estimativo	Aterro sanitário	-	-	-	Conversão em energia elétrica, (estimativa de 10684 MWh/dia)	Brito et al. (2021)
Avaliar o desempenho e parâmetros de um reator PFR semi-contínuo para produção de biogás em condições mesofílicas	Itália / Lombardy	Piloto	0,16	38 °C; TCO: 6.2 kg TV/m³ dia; TDH: 26 dias	0,067 m³/kg TVS	-	Cogeração de energia	Chinellato et al. (2021)
Apresentar uma abordagem técnico-econômico para aprimorar um experimento de laboratório	Nigéria	Estudo estimativo	-	-	-	-	-	Funmi et al. (2021)
Propor uma rota de tratamento para os resíduos orgânicos da universidade visando a produção de biogás	Brasil / Rio Grande do Sul	Piloto	0,2	30 °C; TDH: 30 e 60 dias.	0,22 m³/kg TVS	-	-	Granzotto et al. (2021)
Analisar a eficiência de produção de biogás e biometano de três aterros sanitários brasileiros que possuem sistemas implementados para esse fim	Brasil	Larga escala	Aterro sanitário	-	-	480 m³/dia	Combustível veicular, venda e injeção na rede de gás natural	Guerrero et al. (2021)

Apresentar estudo teórico/hipotético para determinar a quantidade de biogás que pode ser produzido a partir dos resíduos do processamento de carne na Austrália.	Austrália	Estudo estimativo	-	-	-	-	Cogeração de energia (1,2.10 ¹¹ kWh/dia)	Mofijur et al. (2021)
Coletar dados por dois anos de uma planta industrial a fim de monitorar parâmetros como rendimento de biogás e biometano	Itália / Calábria	Larga escala	2400	40 °C; TCO: 10,1 kg TVS/m ³ ; TDH: 22 dias	0,191 m ³ /kg TVS	19525 m ³ /dia	Injeção na rede de gás natural	Pera et al. (2021)
Estimar o potencial de geração de energia elétrica do RSU coletado em algumas regiões, a partir de digestores anaeróbios e aterros sanitários	Brasil / São Paulo e Minas Gerais	Estudo estimativo	-	-	-	-	Conversão em energia elétrica (melhor estimativa 2406 MWh/dia)	Ribeiro et al. (2021)
Investigar o potencial para produção de biogás de substratos após pré-tratamentos físicos e químicos	Iran / Mashhad	Bancada	0,001	35 °C; TDH: 54 dias	0,697 m ³ /kgTVS	-	-	Sedighi et al. (2021)
Estudo de caso para apresentar os detalhes operacionais de uma planta na Índia que produz biogás a partir de RSU	Índia / North Goa	Larga escala	1500	Termofílica; TCO: 3,63 kg TVS/m ³ ; TDH: 15 dias.	0,535 m ³ /kg TVS	10725 m ³ /dia	Conversão em energia elétrica (0,435 MWh/dia) e composto orgânico	Tyagi et al.(2021)
Estudar uma unidade móvel para produção de biogás a partir de resíduos alimentares, apresentando seus parâmetros de operação e uma simulação para processamento de volumes maiores	Singapura	Piloto	1	35°C; TCO: 5,4 kg TVS/m ³ dia; TDH: 17,5 dias.	0,05 m ³ /kg TVS (metano)	-	Cogeração de energia (175,93 kWh/dia térmica e 163,9 kWh/dia elétrica)	Zhang et al. (2021)
Avaliar os efeitos de diferentes substratos na produção de biogás	Brasil / Londrina	Piloto	0,5	36 °C; TCO: 0-0.6 kg TVS/m ³ dia; TDH: 40 dias	-	0,102 m ³ /dia	-	Borth et al. (2022)

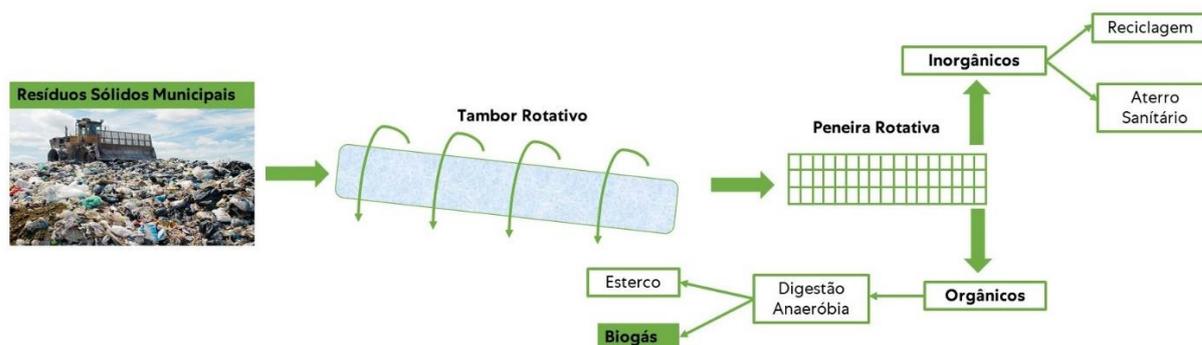
Fonte: Acervo Pessoal

Existem vários trabalhos na literatura que demonstram a produção de biogás. Alguns trabalhos foram feitos em escala laboratorial (ZOUAGHI ET AL, 2020; SEDGIHI ET AL, 2021; PANIGRAHI ET AL, 2019), outros em escala piloto (ZHANG ET AL, 2021; SOUSA ET AL, 2020; PERIN ET AL, 2020). Porém, observa-se também os processos em larga escala, ou seja, em reatores de grandes volumes (WESTERHOLM ET AL, 2020; T.A.S. ET AL, 2020; BANKS ET AL, 2010). Essas plantas são exemplos ao redor do mundo de alternativas sustentáveis para a destinação de RSU e evidenciam a existência de processos que possuem capacidade de receber resíduos gerados em municípios e posteriormente realizar sua conversão em biogás (TYAGI ET AL, 2021; GUERREIRO ET AL, 2021; PERA ET AL 2021).

Algumas das variáveis foram estudadas, como a taxa de carregamento orgânico (TCO) possui uma ampla faixa de estudo, variando de 0,24 até 43 Kg/TVS m³ dia. O mesmo também é observado para o tempo de retenção hidráulica (TDH) que variou entre 15 a 80 dias. A maioria dos estudos foi realizado a temperatura mesofílica (ZHANG ET AL, 2021; PERIN ET AL, 2020; QIAN ET AL, 2016), porém alguns trabalhos foram realizados em temperaturas termofilias (TYAGI ET AL, 2021).

É comum a etapa de um pré-tratamento dos resíduos para separação da fase orgânica, visto que somente essa será utilizada no processo de DA. A literatura apresenta alguns processos físicos que permitem essa separação através de equipamentos como extrusoras, peneiras rotativas, tambores rotativos e trituradores (DEHKORDI ET AL, 2019). A Figura 2.10 a seguir apresenta um exemplo de como esses sistemas são alocados no processo.

Figura 2.10 - Sistema integrado de tambor rotativo e digestão anaeróbia para tratamento de RSU



Fonte: Adaptado de CALRECYCLE, 2010

Após esse pré-tratamento, os resíduos são encaminhados para os biodigestores, que propiciam um ambiente favorável para realização da DA no que diz respeito a parâmetros como temperatura e pH.

A temperatura é um fator que irá afetar significativamente o crescimento dos microrganismos, e conseqüentemente a formação de biogás, e para que a DA seja favorecida é indicada a operação em temperaturas mesofílicas (30 a 40 °C) e termofílicas (50 a 60 °C) (RAM ET AL, 2021).

O pH do sistema deve se manter entre 6 e 8,5, e em caso de grandes variações, o rendimento de metano fica extremamente comprometido. Como exemplificado no tópico 1.4.2, o acúmulo de AGV pode ser prejudicial para o processo e pode acontecer devido a algum processo inibitório (KOUGIAS ET AL, 2018).

Além de afetar a concentração de AGV no sistema, se algumas substâncias tóxicas e produtos metabólicos intermediários excederem um limite, eles podem afetar o rendimento de biogás e deteriorar todo o sistema. Um desses compostos é a amônia que, por exemplo, quando em concentrações entre 1,7 e 14 g/L pode reduzir em 50% a produção de metano. Além da amônia, outros compostos que podem ser prejudiciais são os Ácidos Graxos de Cadeia Longa (AGCL), e a presença de alguns biossurfactantes específicos que podem criar zonas mortas no biodigestor diminuindo seu volume útil devido a formação de espuma (KOUGIAS ET AL, 2018).

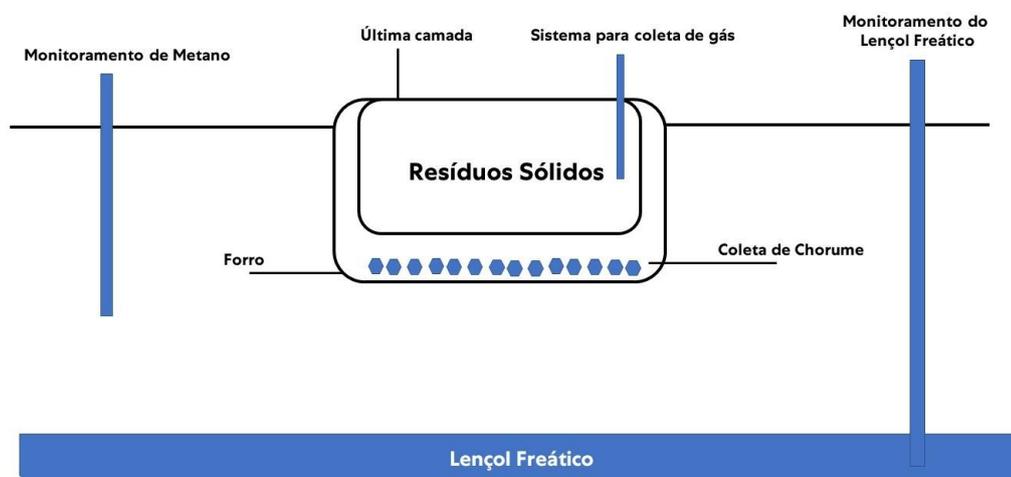
A depender da fração de sólidos presente na fração orgânica destinada para DA, o processo pode ser classificado em fermentação seca (15 a 35% de sólidos) ou úmida (teor de sólidos de até 10%). A configuração do biodigestor e o rendimento de metano vão depender da diferenciação desses dois processos (KOUGIAS ET AL, 2018).

Em linhas gerais, os biodigestores são grandes reservatórios onde a biomassa fica armazenada por um período, que pode variar de 15 a 30 dias a depender da complexidade do resíduo orgânico utilizado (RAM ET AL, 2021). O biodigestor armazena o biogás em uma parte livre, também denominada de gasômetro, que é canalizada para posterior captura e utilização do biogás (ARAUJO, 2017).

Além das plantas que recebem RSU, a Tabela 2.4 também apresenta alguns trabalhos onde o biogás é obtido de aterros sanitários através de sistemas de captação direta. Nesse caso, o biogás é gerado a partir da digestão anaeróbia dos resíduos, que uma vez cobertos, permanecem em um ambiente com uma redução significativa de O₂ (FIGUEIREDO, 2011). A prática é benéfica, uma vez que os gases

que seriam emitidos na atmosfera, uma vez capturados, são utilizados para produção de energia e como combustível veicular.

Figura 2.11 - Exemplificação das seções de um aterro sanitário com sistema para coleta de gases



Fonte: Adaptado de MAJDINASAB ET AL, 2017

Para utilizar o biogás em larga escala, como combustível veicular e em redes de distribuição, ele deve ser convertido em biometano, ou seja, passar por um processo de purificação onde serão removidos alguns componentes, como o CO_2 , a fim de aumentar a concentração de CH_4 de acordo com as purezas requeridas (POUDEL ET AL, 2021).

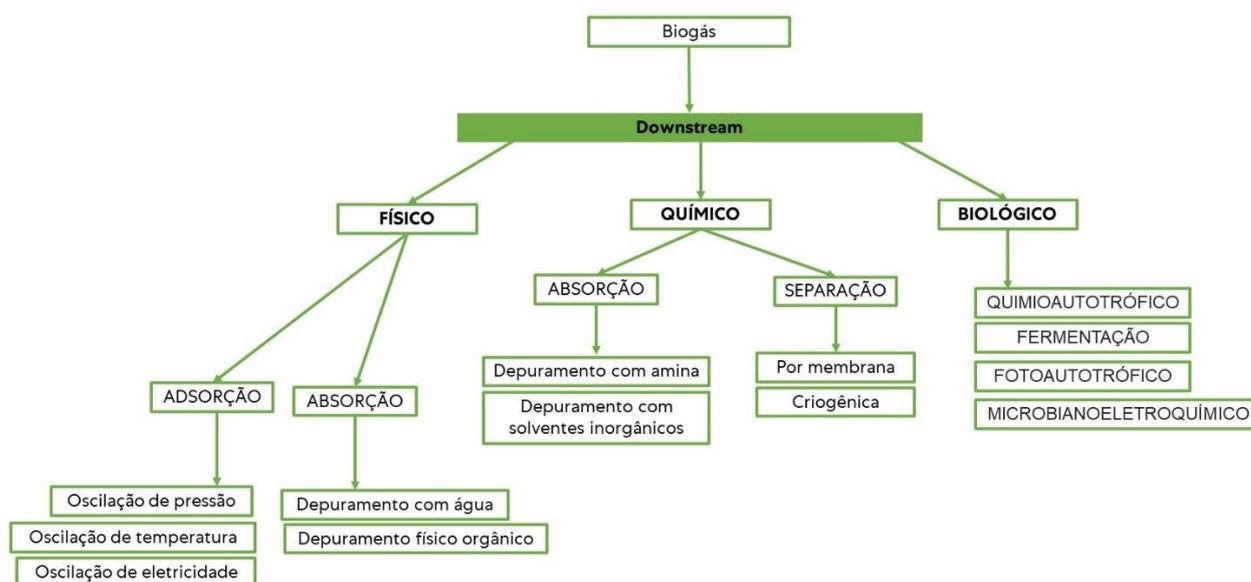
2.7. PROCESSOS DE DOWNSTREAM PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE RSU

As tecnologias físico-químicas para purificação do biogás são as mais convencionais, e utilizam de propriedades físicas e químicas dos gases que devem ser removidos. Essas tecnologias podem ser divididas em três grandes grupos: absorção (que pode ser física ou química), adsorção e separação (que pode ocorrer através de membranas ou de forma criogênica) (POUDEL, 2021).

A Figura 2.12 a seguir classifica as tecnologias para purificação de biogás em processos físicos, químicos e biológicos.

No entanto, conforme será apresentado nos tópicos seguintes, os processos para conversão de biogás em biometano não se limitam a apenas esses apresentados pela Figura 2.12.

Figura 2.12 - Tecnologias para purificação do biogás



Fonte: Adaptado de KHAN ET AL, 2017 e ZAMRI ET AL, 2020

2.7.1. ABSORÇÃO

Esse processo ocorre devido às diferentes solubilidades dos constituintes do gás em um solvente líquido. Durante a operação, o gás é injetado em contrafluxo com o solvente em uma coluna previamente empacotada, para aumentar a área de contato entre o gás e o líquido. O que diferencia os processos de absorção são os tipos de absorventes utilizados nas colunas (KHAN ET AL, 2017).

A utilização de água é um exemplo clássico de absorção física. Nesse caso, é possível realizar a separação de CO₂, visto que sua solubilidade em água é maior que a do CH₄. Assim, a água sai da coluna saturada de CO₂, e o gás com uma maior concentração de CH₄ (POUDEL ET AL, 2021).

A utilização de compostos orgânicos segue o mesmo princípio de absorção com a utilização da água. Nesse caso, podem ser usados solventes orgânicos como metanol, éter de polietileno glicol e metilpirrolidona (KHAN ET AL, 2017).

Na absorção química, ocorre uma reação química reversível entre o solvente e o gás. As aminas mais utilizadas são dietanolamina, etanolamina, e metildietanolamina em um processo em que o biogás é alimentado no absorvedor em contrafluxo com o solvente, ocorrendo uma reação exotérmica em que o CO_2 é absorvido. O biometano gasoso é então eliminado pelo topo da coluna, e o líquido retirado pelo fundo é levado para um *stripper* onde ocorre a eliminação do CO_2 e regeneração da amina (KHAN ET AL, 2017).

Para remoção de compostos como o H_2S , por exemplo, a água também pode ser utilizada. No entanto, alguns trabalhos demonstram que adicionar alguns compostos inorgânicos podem melhorar o processo, diminuindo a quantidade de água necessária e a energia despendida no processo para o bombeamento da mesma. Como exemplo, utilizando uma solução diluída de hidróxido de sódio, ele reage com H_2S , dando origem ao Na_2S ou NaHS que precipita e pode ser separado (RYCKEBOSCH, 2011).

2.7.2. ADSORÇÃO

A adsorção é um processo em que ocorre, devido a forças de van der Waals, a transferência de um soluto presente no gás para a superfície de um material adsorvente. A adsorção devido à oscilação de pressão consistem em injetar o biogás bruto e comprimido em uma coluna contendo adsorventes que comumente são sílica em gel, zeólitas ou carbono ativado. Devido ao seu tamanho o CO_2 fica retido no adsorvente, enquanto o CH_4 não. Assim, o gás rico em CH_4 deixa o sistema, e após o processo, a pressão do sistema é aliviada a fim de eliminar os compostos que ficaram retidos. É importante atentar-se que antes desse processo todo o H_2S deve ser previamente removido do gás, pois sua presença é tóxica para o sistema e sua adsorção irreversível. A remoção do H_2S usualmente ocorre através da sua adsorção em carbono ativado (KHAN ET AL, 2017).

Na adsorção devido a oscilação de temperatura, o processo acontece a pressão constante e requer energia térmica para regenerar os adsorventes, que usualmente são microesferas de carbono criogel ou xerogel. Na adsorção devido a oscilação de eletricidade, a regeneração ocorre devido ao calor gerado quando ocorre a passagem de eletricidade no adsorvente, e o carbono ativado vem sendo estudado como um semicondutor para esse fim (KHAN ET AL, 2017).

2.7.3. SEPARAÇÃO POR MEMBRANA

A separação por membrana trata-se do processo onde a separação dos gases acontece por meio de uma membrana seletiva. A eficiência nesse caso está diretamente conectada com a pressão aplicada e com tipo de membrana aplicada que pode ser, por exemplo, de acetato de celulose, silicone e borrachas (POUDEL ET AL, 2021).

Existem dois modelos que explicam seu funcionamento. No primeiro, chamado de solução-difusão, devido a diferença de concentração o permeado se dissolve no material da membrana e em seguida se difunde através dela. No segundo, conhecido como modelo de fluxo nos poros, o permeado é separado da membrana através da aplicação de pressão nos pequenos poros (KHAN ET AL, 2017).

2.7.4. SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA

A separação criogênica é uma nova alternativa para separação dos gases que acontece devido às diferentes temperaturas de condensação dos compostos. As condições de operação do processo são mais críticas, visto que ele é realizado a baixas temperaturas (- 170 °C) e altas pressões (80 bar). Nessa situação é possível realizar a separação do CH₄ do CO₂, visto que o ponto de ebulição, a 1 atm, é de - 161,5 °C para o CH₄ e -78,2 °C para o CO₂ (KHAN ET AL, 2017).

Oxigênio, siloxanos, nitrogênio e outros gases também podem ser separados utilizando essa técnica. No entanto, a grande desvantagem desse processo está na necessidade de diversos equipamentos como turbinas e trocadores de calor, o que eleva os custos demasiadamente (KHAN ET AL, 2017).

2.7.5. PROCESSOS BIOLÓGICOS

Alguns dos processos biológicos para purificação do biogás são os quimioautróficos, fotoautróficos e a fermentação. O quimioautrótico utiliza o processo exergônico de bactérias homoacetogênicas para converter H₂ e CO₂ em CH₄. O fotoautrótico utiliza de organismos catalíticos fototróficos para realizar a conversão de CO₂ em CH₄ em foto biorreatores que podem ser abertos ou fechados. O CO₂ também pode ser convertido em CH₄ a partir de múltiplos estágios do processo fermentativo,

onde os microrganismos acetogênicos realizam a assimilação do CO₂ (ZAMRI ET AL, 2020).

2.7.6. NOVAS TECNOLOGIAS EM ASCENSÃO

A busca por novos processos e tecnologias visando a obtenção de biometano é crescente. Diversos trabalhos na literatura apresentam esses novos processos e como seu funcionamento pode auxiliar a evolução das plantas *WtE* visando redução de custos e de energia.

A tecnologia *Power-to-Gas (PtG)* é um exemplo disso. Esse processo passou a ser utilizado em alguns países da Europa, e consiste em obter metano a partir da reação do hidrogênio com o gás carbônico presente no biogás:



O hidrogênio utilizado é obtido a partir da eletrólise da água, que por sua vez acontece utilizando o excesso de energia que esses países produzem em turbinas eólicas em algumas épocas do ano (POUDEL ET AL, 2021). Algumas publicações reportam que cerca de 26% da energia eólica desses países fica temporariamente excedente (KHAN ET AL, 2017).

Outros processos que também passaram a ser estudados e aplicados são os de metanação catalítica, que ocorrem em altas pressões (aproximadamente 100 bar) e temperaturas (200 a 550° C) na presença de um catalisador metálico que realiza a conversão de CO₂ em metano. Os reatores utilizados para viabilizar essa conversão são predominantemente reatores de leito fixo e fluidizado. Como exemplo de aplicação, temos o projeto *MeGa-StoRE* (Figura 2.13) que consiste em um container com uma unidade para remoção de enxofre, módulos eletrolisadores e um reator de metanação. O hidrogênio produzido pelos eletrolisadores é injetado no reator de metanação onde acontece a conversão do CO₂ em CH₄ utilizando níquel como catalisador (GAIKWAD ET AL, 2020).

Figura 2.13 - Container MeGa-StoRE para obtenção do metano a partir do biogás



Fonte: GAIKWAD ET AL, 2020

2.8. DESTINAÇÃO DO BIOMETANO

A Tabela 2.4 destaca algumas possibilidades de utilização do biometano obtido a partir do RSU, dentre elas a cogeração de energia, a utilização como combustível veicular, venda direta e a injeção na rede de gás natural.

A cogeração de energia é um processo em que é possível realizar, de forma combinada, a produção de energia elétrica e térmica a partir de uma mesma fonte combustível. O processo é amplamente utilizado devido a sua eficiência e fornecimento de energia com baixos impactos ambientais (BRIZI ET AL, 2014).

Nos processos de cogeração a partir do RSU, usualmente o biometano é destinado para unidades de cogeração, também denominadas de CHP. Nessas unidades, o calor obtido costuma ser utilizado para aquecer os biodigestores, trazendo eficiência energética para o processo (TYAGI ET AL, 2021).

Para utilização como combustível veicular, injeção na rede de gás natural, e venda direta o biometano deve atender as legislações locais no que diz respeito a composição do gás. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) determina através da resolução número 685 de 2017 quais esses requisitos que o biometano proveniente de aterro sanitário e estações de

tratamento de esgoto deve atender. A Tabela 2.5 a seguir resume algumas dessas condições.

Tabela 2.5 - Composição necessária do biometano proveniente de aterro sanitário e estações de tratamento de esgoto para utilização como combustível veicular ou em equipamentos residenciais e comerciais no Brasil

Característica	Unidade	Condição	Região do País		
			Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul
Poder Calorífico	kJ/m ³	Mínimo necessário	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000	35.000 a 43.000
Metano	% mol.	Mínimo necessário	90	90	90
Oxigênio	% mol.	Máximo permitido	0,8	0,8	0,8
CO ₂	% mol.	Máximo permitido	3	3	3
CO ₂ + O ₂ + N ₂	% mol	Máximo permitido	10	10	10
Enxofre	mg/m ³	Máximo permitido	70	70	70
Gás Sulfídrico	mg/m ³	Máximo permitido	10	10	10
Siloxanos	mgSi/m ³	Máximo permitido	0,3	0,3	0,3
Clorados	mg (Cl/m ³)	Máximo permitido	5	5	5
Fluorados	mg (F/m ³)	Máximo permitido	5	5	5

Fonte: Adaptado de ANP, 2017

2.9. MELHORES PRÁTICAS NO MUNDO E SITUAÇÃO DO BRASIL EM GRANDES PROJETOS PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO RSU

Os países que mais avançaram em capacidade de processamento de resíduos para obtenção de biogás através de plantas *WtE*, são aqueles onde acontecem com constância incentivos e projetos liderados pelo governo e parcerias público-privadas. Como exemplo disso, temos a China, onde operam pelo menos 46 projetos de processos que visam a obtenção de biogás a partir de resíduos, ao passo que o governo possui expectativas de construção de 242 unidades para esse fim (CLERQ ET AL, 2017).

Outra característica dos países que estão avançando com essa temática, como China e Coreia do Sul, é a ampla construção e incentivo do governo em projetos piloto, que visam garantir que as melhores práticas estão sendo utilizadas e mitigar os erros para que eles não sejam replicados (CLERQ ET AL, 2017).

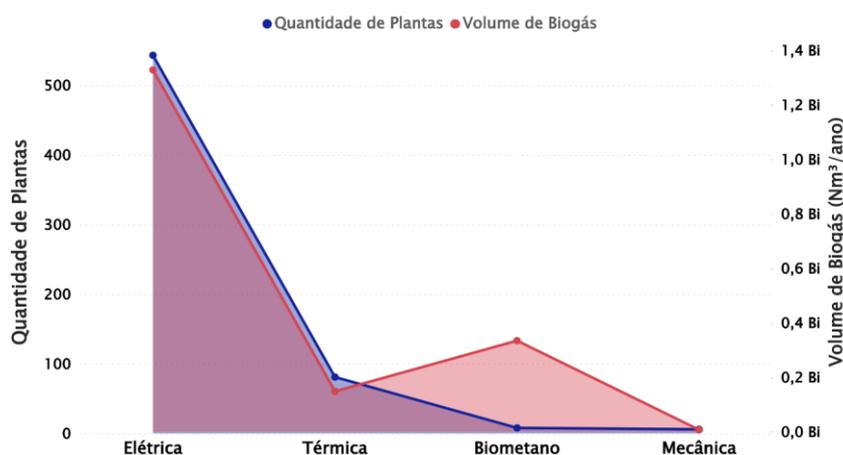
Também se destaca como melhor prática desses países a criação de plataformas para fornecimento de informações e suporte técnico para os desenvolvedores de projetos dessas plantas. Como exemplo de países que implementaram essas ferramentas temos os Estados Unidos e o Reino Unido, que atualmente operam pelo menos 44 e 30 projetos de biogás respectivamente (CLERQ ET AL, 2017).

Em relação ao Brasil, o país ainda possui muito o que avançar no que diz respeito à implementação e operações de plantas *WtE* para produção de biogás a partir do RSU, visto que apenas uma pequena parcela desse resíduo gerados no país são destinados para esse fim (ALFAIA ET AL 2017).

O interesse nesse mercado por aqui é crescente, visto que o país possui uma grande disponibilidade de resíduos de biomassa, um plano nacional que apoia essas iniciativas (BRASIL, 2010) e o aumento de preço da energia para combustíveis como o GNV e o GLP (CLERC ET AL, 2017).

Atualmente o país possui aproximadamente 638 plantas para produção de biogás visando a produção de energia, das quais 57 (9%) utilizam como substrato RSU ou resíduos de estação de tratamento de esgoto (ETE). O volume de biogás produzido por essas plantas é de 1.342.221.982 Nm³/ano. A Figura 2.14 apresenta as aplicações energéticas para as quais todo o biogás produzido no país é destinado (CIBIOGÁS, 2021).

Figura 2.14 - Classificação por aplicação energética das plantas de biogás em operação no Brasil



Fonte: Dados coletados de CIBIOGÁS, 2021

Conforme apresenta a Figura 2.14, a grande maioria das plantas existentes no país visa a produção de energia elétrica (85%) e apenas uma pequena parcela (1%) é voltada para a produção de biometano. Isso reflete o fato de que entre os anos de 2006 e 2008 foram instalados no país muitos biodigestores de pequeno porte no setor agrícola (suinocultura), visando a autoprodução de energia pelas fazendas a fim da redução de custos com a compra de eletricidade, combustíveis ou Gás liquefeito de petróleo (GLP) (MARIANI, 2018).

Das plantas voltadas para a produção de biometano, as que utilizam como substrato RSU estão localizadas em São Pedro da Aldeia (RJ), Foz do Iguaçu (PR), Fortaleza (CE), Soropédica (RJ) e São Paulo (SP) (CIBIOGÁS, 2021).

Alguns projetos experimentais também foram implementados ou estão em andamento no país. Em sua maioria, esses projetos são fruto de parceria público-privada entre universidades e empresas, como o caso da planta de biogás localizada no Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP) (D'AQUINO, 2018). Outros exemplos também estão presentes na Tabela 2.4, sendo eles a planta piloto construída na Universidade Estadual de Londrina (UEL) e os processos piloto de valorização de RSU implementados na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (PERIN ET AL, 2020; SOUSA ET AL, 2020).

No que diz respeito ao ambiente regulatório, publicações de algumas leis no país visam fomentar a utilização de biometano obtido a partir do RSU, estabelecendo

porcentagens mínimas de utilização desses gases de origem renovável na matriz de abastecimento de concessionárias. Como exemplo, temos o Rio de Janeiro com a Lei nº 6.361/2012 que determina que até 10% do volume de gás distribuído por essas empresas devem ser origem renovável (MARIANI, 2018).

As unidades de São Pedro da Aldeia, Soropédica e Fortaleza são conhecidas como GNR Dois Arcos (GDA), Gás Verde (GV) e GNR Fortaleza (GF) respectivamente. Essas unidades realizam o aproveitamento do biometano a partir do biogás produzido em aterro sanitário, e possuem capacidade de processamento de 762 (GDA), 10.000 (GV) e 5.000 (GF) toneladas de RSU, sendo responsáveis também pela maior produção energética de biogás no país. (GUERREIRO ET AL, 2021; MARIANI, 2018).

A literatura ainda reporta que as principais dificuldades encontradas no Brasil para produção de biogás a partir do RSU e seu aproveitamento energético estão relacionadas a gestão de coleta e tratamento do RSU, definição de políticas e programas por parte do governo e questões econômicas (MARIANI, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de apresentar possíveis rotas e oportunidades sustentáveis para a destinação dos resíduos de centros urbanos do Brasil, o trabalho realizado consistiu em uma revisão sistemática da literatura para identificação e levantamento de publicações com o objetivo de realizar a conversão de RSU em biogás. Para isso, utilizando a base de dados do Thomson Reuters ISI Web of Knowledge (Web of Science), buscou-se pelo agrupamento de palavras-chave como “biogas” E “municipal solid waste” OU “biogas” E “municipal solid waste” E “scale” (Figura 3.1).

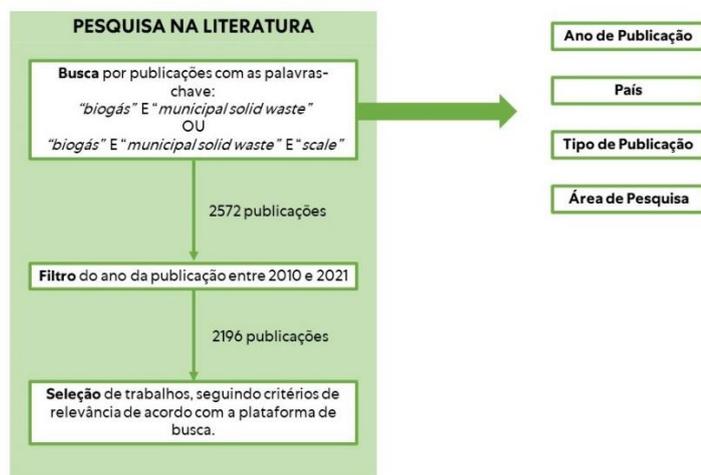
Com os resultados dessa busca inicial, os trabalhos foram classificados de acordo com ano e países de publicação. Também foram avaliados os tipos de publicação e área de pesquisa, de acordo com as classificações da *Web of Science*.

Como nessa primeira etapa as buscas retornaram um elevado número de publicações, na casa de milhares, foram necessárias algumas etapas para apoiar a seleção de alguns trabalhos para serem analisados. A primeira etapa foi a aplicação de um filtro que restringe os resultados apenas para publicações entre os anos de 2010 e 2021.

Em seguida, para guiar essa seleção de artigos, utilizou-se da própria classificação de relevância da *Web of Science*, que ordena os artigos de forma decrescente, onde os trabalhos com maior quantidade das palavras-chave encontradas no registro aparecem no topo da lista. Essa classificação leva em consideração os campos de título, resumo e palavras-chave, onde os dois primeiros possuem maior peso (CLARIVATE, 2020). A seleção também deu preferência para artigos mais recentes.

A figura 3.1 apresenta como esse procedimento inicial de pesquisa foi realizado.

Figura 3.1 - Procedimento de pesquisa das publicações



Fonte: Acervo pessoal

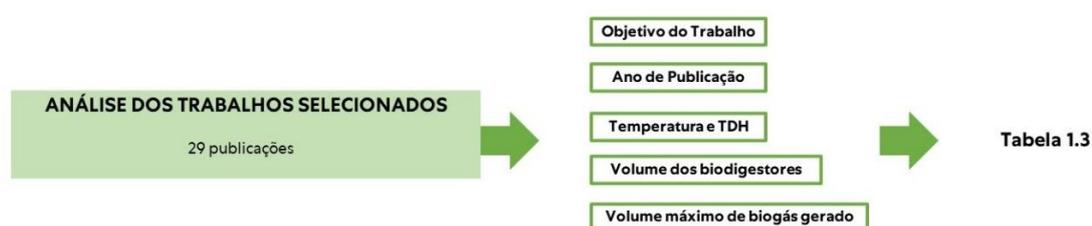
Dentre os trabalhos mais relevantes de acordo com essa classificação da plataforma, 29 foram selecionados para análise, onde os seguintes pontos foram identificados: objetivo, ano de publicação, temperatura, influência da temperatura e TDH no rendimento de biogás, volume dos biodigestores e volume máximo de biogás gerado (Tabela 2.4).

Com o objetivo de avaliar a escalabilidade da produção de biogás a partir de RSU, esses trabalhos também foram divididos de acordo com as seguintes dimensões: estudo estimativo, bancada, piloto e larga escala. As dimensões foram definidas da seguinte forma:

- Estudo estimativo: Trabalhos que apresentavam estudos teóricos através de abordagens matemáticas para estimativa de capacidade de produção e avaliação de parâmetros de produção, sem evidenciar etapas experimentais ou consolidadas para produção de biogás.
- Bancada: Trabalhos para produção experimental de biogás em frascos de pequenos volumes, variando de 0,5 a 10 m³, realizados em laboratório.
- Piloto: A grande maioria dos trabalhos classificados como piloto (83%) receberam essa autodenominação pelos seus próprios autores, conforme relatado nos trabalhos de SOUSA ET AL, 2020; PERIN ET AL, 2020; BORTH ET AL, 2020; CHINELATTO ET AL, 2021 e GRANZOTTO ET AL, 2021. Verificou-se que o volume do biodigestor utilizado nesses trabalhos variava entre 0,5 a 10 m³, sendo assim todos os demais trabalhos que possuíam volumes nessa faixa foram classificados como piloto.
- Larga escala: Os trabalhos que tiveram seu processo denominado como larga escala possuíam volume de biodigestores muito superiores daqueles que foram classificados como piloto. Esses volumes variavam de 135 até 3100 m³. Uma característica em comum desses processos é de que se tratavam de plantas comerciais com capacidade de converter grandes volumes de RSU em biogás e abastecer grandes centros, como cidades, com a bioenergia. Os processos de obtenção de biogás a partir de aterro sanitário também foram classificados como de larga escala.

A Figura 3.2 ilustra o procedimento dessas análises realizadas com os trabalhos selecionados.

Figura 3.2 - Procedimento de análise das publicações selecionadas



Fonte: Acervo pessoal

Com os dados coletados em todas as etapas da pesquisa foram construídos gráficos e tabelas a fim de medir de forma quantitativa e qualitativa os resultados obtidos.

A fim de identificar os principais fluxos de processo em larga escala para obtenção de bioenergia a partir de RSU, foi realizado um estudo de caso dos trabalhos classificados como larga escala. Assim, para esses artigos, foram coletadas as seguintes informações: país e região de localização da planta, variações do recebimento do RSU, pré-tratamento, características do processo de DA, *downstream* e destinação do biogás obtido. Também tentou-se identificar se esses trabalhos fornecem informações a respeito da cadeia logística para abastecimento das plantas.

Por fim, dentre os trabalhos selecionados, realizou-se um destaque de algumas informações a respeito daqueles que citavam processos já consolidados existentes no Brasil, a fim de compreender qual a situação atual do país frente a esse tema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

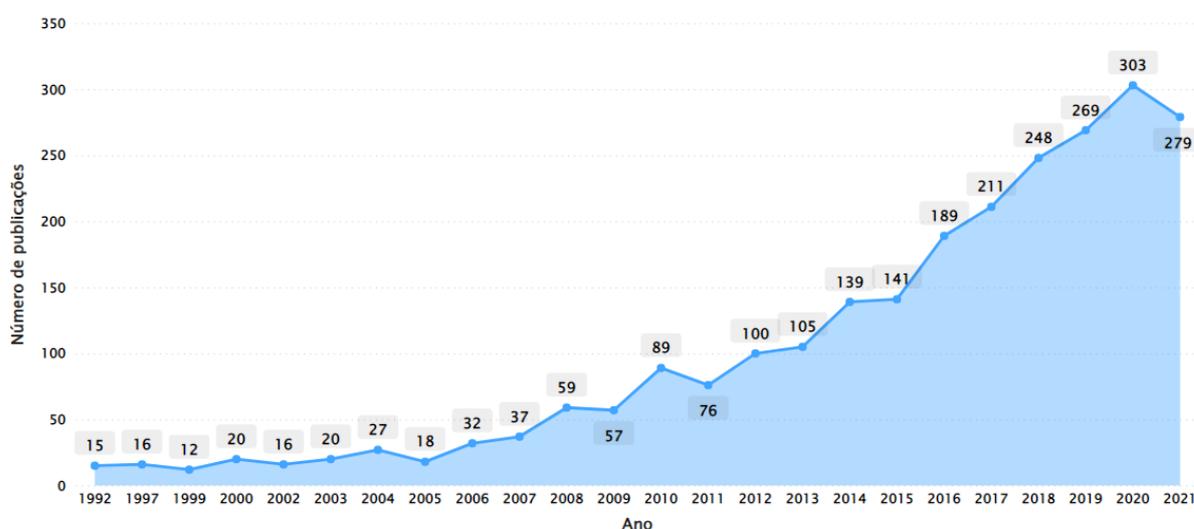
4.1. PESQUISA DE PUBLICAÇÕES

A partir do uso de palavras chaves no portal *Web of Science* e Google Acadêmico, realizou-se a busca de artigos relacionados a biogás e RSU. A pesquisa resultou em 2572 publicações, cujo alguns dados foram selecionados para discussão.

4.1.1. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS ESTUDOS AO LONGO DOS ANOS

Através das pesquisas fica claro que o biogás é uma fonte de energia promissora para substituição dos combustíveis fósseis no que diz respeito a geração de energia térmica e elétrica. Nesse sentido, sua obtenção através da DA do RSU vem sendo cada vez mais estudada ao longo dos anos (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Publicações a respeito de produção de Biogás a partir de Resíduos Sólidos Urbanos desde 1992 na base de dados da Web of Science



Fonte: Acervo pessoal

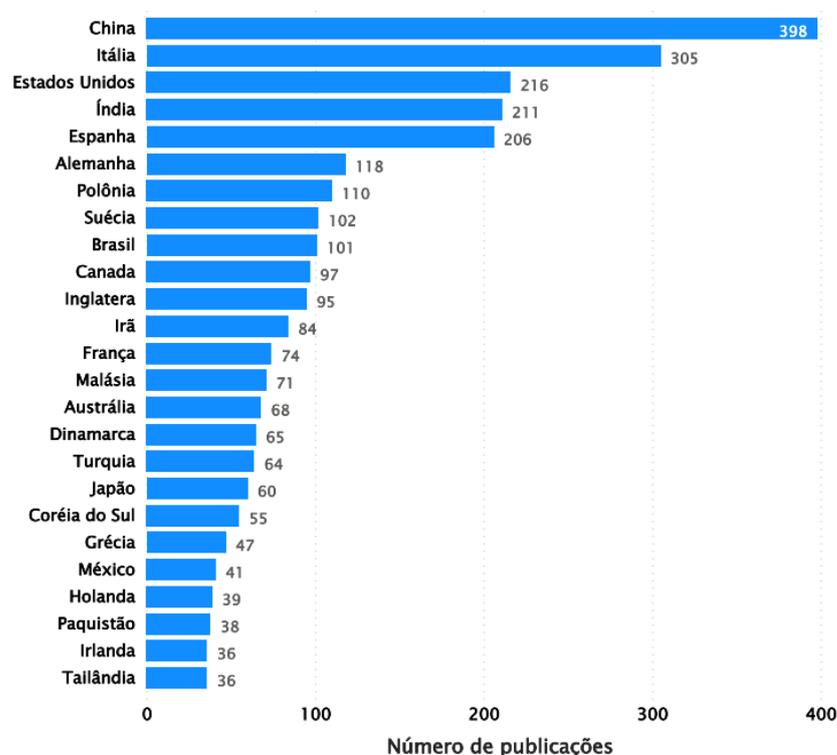
Observa-se uma tendência crescente de 2012 a 2020, sendo o ano de 2020 o de maior destaque, tendo um total de 303 publicações acerca do tema. O elevado número de publicações no ano de 2020 pode ser relacionado a pandemia de covid-19 que recentemente afetou todo o planeta, restringindo a mobilidade e o exercício presencial de diversas profissões, como a de alguns pesquisadores, que puderam dedicar maiores esforços no estudo e publicação de artigos científicos.

4.1.2. PAÍSES QUE MAIS PUBLICAM

A fim de identificar os países que mais avançaram sobre o tema, realizou-se também uma segregação por número de publicações em cada país (Figura 4.2). Atualmente a China lidera essa lista, possuindo 398 artigos publicados representante de 14,5% de todos os trabalhos. Esse dado vai de encontro com o fato que o país possui diversas iniciativas sustentáveis para gestão de resíduos, sendo a valorização energética uma delas.

Seguido da China, temos a Itália, os Estados Unidos e a Índia com 305, 216 e 211 publicações, respectivamente. O Brasil ocupa a nona posição de países que mais publicaram, tendo um total de 101 trabalhos publicados.

Figura 4.2 - Número de publicações por país



Fonte: Acervo pessoal

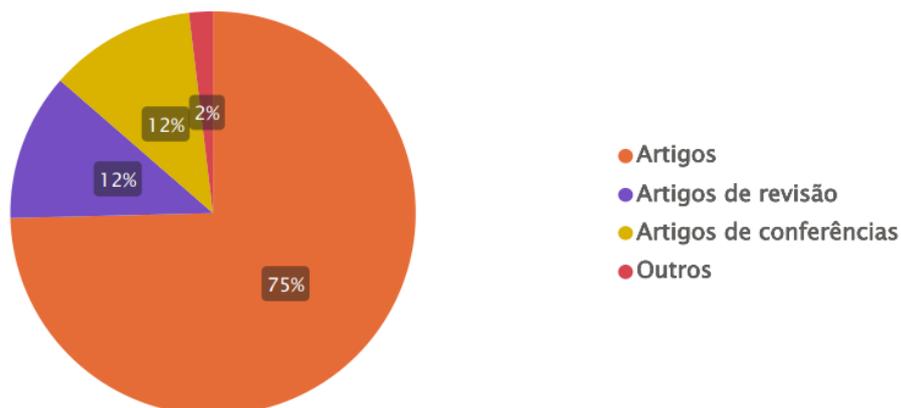
4.1.3. TIPOS DE PUBLICAÇÃO

Utilizando a segregação por tipos de publicação da plataforma Web of Science, que classifica os trabalhos em artigos, artigos de revisão, artigos de conferência, capítulos de livros e outros, realizou-se a construção da Figura 4.3.

Os artigos de pesquisa correspondem a 2043 trabalhos ou 75%, enquanto os artigos de revisão apenas 12%. Isso evidencia que a obtenção de biogás a partir dos resíduos sólidos urbanos vem sendo explorada através de pesquisas científicas, sendo ainda um assunto recente e com grande potencial de exploração.

Os artigos de conferência, que correspondem a artigos de anais de eventos, também somam 12% do total de publicações, enquanto 2% são relacionados a outros tipos de trabalho que podem ser, por exemplo, materiais editoriais e capítulos de livros.

Figura 4.3 - Porcentagem de cada tipo de publicação

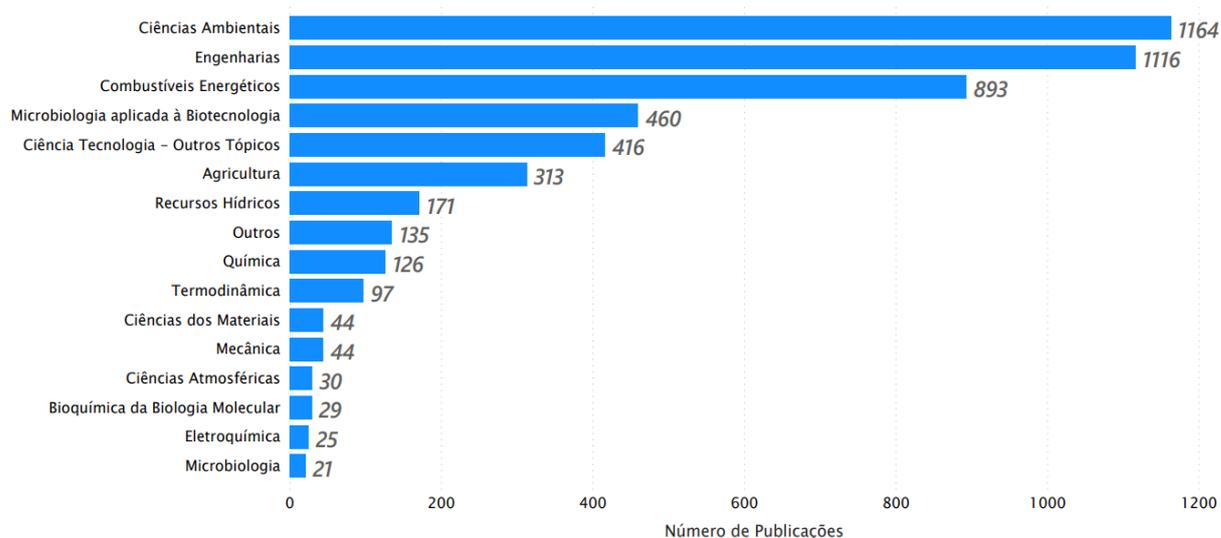


Fonte: Acervo pessoal

4.1.4. ÁREAS DE PESQUISA

A última análise realizada consistiu em agrupar as publicações de acordo com suas áreas de pesquisa (Figura 4.4). Observa-se que grande parte dos estudos são classificados como “Ciências Ambientais”, “Engenharias” e “Combustíveis Energéticos”, evidenciando novamente o potencial desses processos e tecnologias na substituição dos combustíveis fósseis para geração de energia. A “Microbiologia aplicada à Biotecnologia” também leva grande destaque ao passo, que por exemplo, existem diversos trabalhos com o intuito de avaliar parâmetros da DA no que diz respeito à microbiologia desses sistemas.

Figura 4.4 - Quantidade de estudos por área



Fonte: Acervo pessoal

4.2. PUBLICAÇÕES RELEVANTES

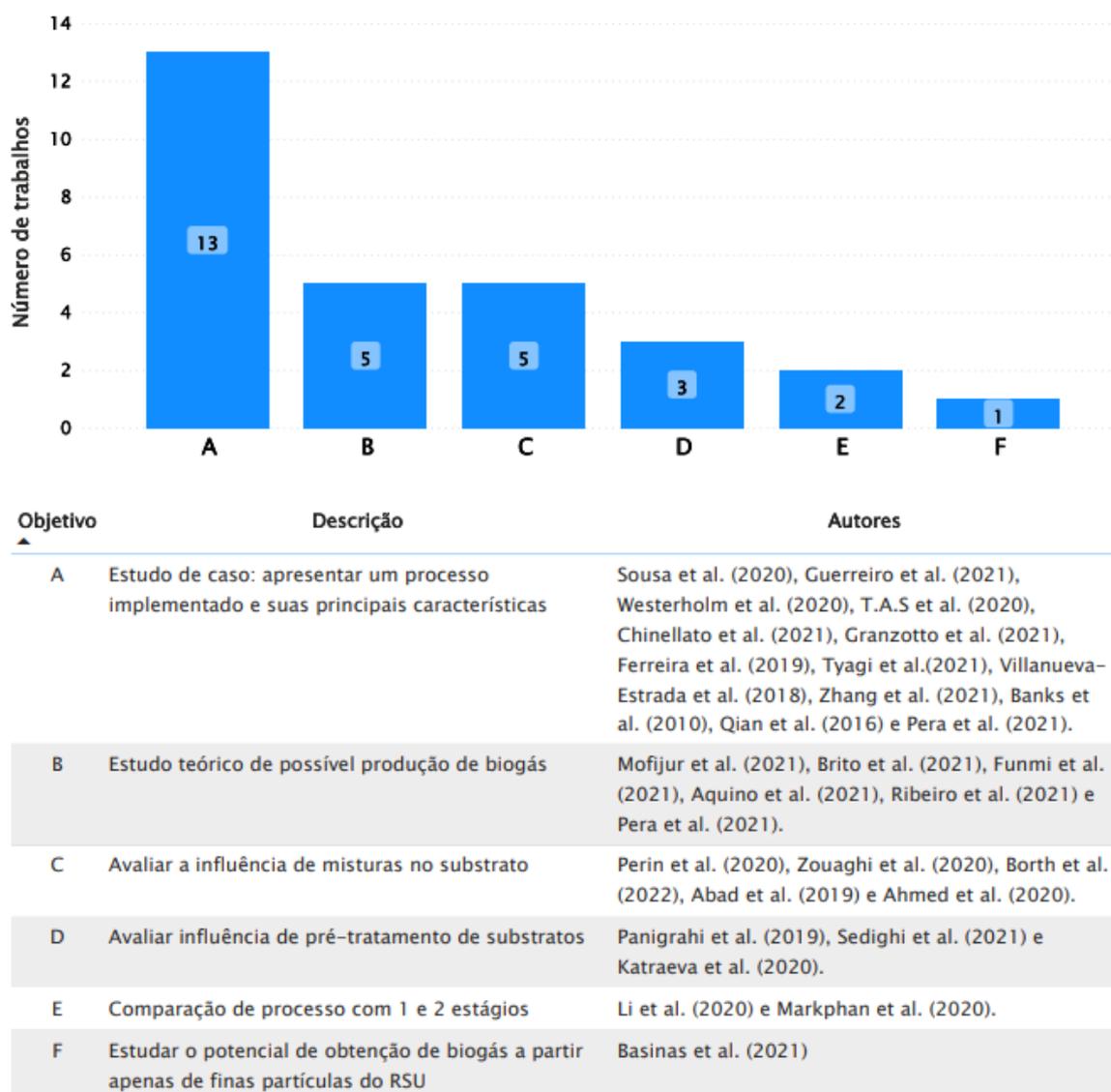
Com base na relevância dada pelas plataformas de pesquisa, selecionou-se publicações com diferentes características a fim de aprofundar o entendimento de como a literatura científica aborda a temática de produção de biogás a partir de RSU. Esses 29 artigos selecionados foram apresentados na Tabela 2.4, onde a partir dela foram realizadas análises de objetivo dos trabalhos, ano de publicação, alguns parâmetros operacionais como temperatura e tempo de retenção hidráulica (TDH), volume do biodigestor utilizado, volume de geração de biogás e classificação da dimensão do processo.

A partir disso, também foram identificados trabalhos com aplicação em larga escala já existentes no Brasil e em outros locais ao redor do mundo.

4.2.1. OBJETIVOS DOS TRABALHOS SELECIONADOS

Os trabalhos selecionados possuíam diferentes objetivos específicos (Tabela 2.4). No entanto, a fim de realizar uma associação entre os trabalhos, esses objetivos específicos foram generalizados em 6 objetivos que podem ser visualizados na Figura 4.5 que também apresenta o número de trabalhos correspondente a cada objetivo e quais os autores referentes a esses trabalhos.

Figura 4.5 - Objetivo dos trabalhos selecionados



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se pela Figura 4.5 que a maior parte dos trabalhos selecionados (45%) tem como objetivo um estudo de caso para apresentar um processo de produção de biogás a partir de RSU. Esses trabalhos possuem como característica apresentar um monitoramento desses processos, dando detalhes dos seus parâmetros e capacidade de operação, bem como suas dificuldades e desafios. Assim, esses artigos foram de grande importância para a construção dessa monografia, uma vez que serviram de base para identificação dos principais processos e suas variações, que serão abordados mais adiante.

Em seguida, correspondendo ao objetivo de 17% dos trabalhos selecionados, estão os estudos teóricos, que se basearam em modelos matemáticos para prever a produção de biogás e energia através de informações como a quantidade de resíduos coletados em locais como cidades e universidades.

Também correspondendo a 17% dos trabalhos selecionados, estão os artigos com objetivo de avaliar a influência de diferentes proporções de componentes no substrato utilizado na DA. Os RSU correspondem a uma ampla variedade de resíduos gerados em ambiente urbano, podendo ser alimentares, de jardinagem (como por exemplo, resultado de poda de árvores) e outros. Assim, alguns desses trabalhos avaliaram o impacto de diferentes proporções de resíduos de jardinagem adicionados a resíduos alimentares na realização da DA visando a produção de biogás (PERIN ET AL, 2020 e BORTH ET AL, 2022). Outros trabalhos avaliaram esse impacto a partir da adição de lodo de esgoto ao RSU (ZOUAGHI ET AL, 2020 e AHMED ET AL, 2020). Por fim, dentro desse objetivo também foi inserido um trabalho que estuda a viabilidade da adição de resíduos industriais em uma planta que opera utilizando RSU como substrato (ABAD ET AL, 2019).

A diferenciação da DA em 1 e dois estágios também foi o objetivo de dois trabalhos. Em ambos, os autores concluem que a utilização de dois estágios otimiza os rendimentos do processo, resultando em maiores taxas de produção de biogás.

Por último, um único trabalho se diferenciou dos demais por ter como objetivo avaliar a produção de biogás apenas de finas partículas do RSU, que variavam de 3.5 a 24 mm.

4.2.2. DISTRIBUIÇÃO ANUAL DOS TRABALHOS RELEVANTES SELECIONADOS

Como pode ser observado na Figura 4.6, dos 29 artigos selecionados, a grande maioria se encontra nos anos de 2020 e 2021. Essa tendência era prevista, uma vez que no momento da seleção dos artigos, deu-se preferência para aprofundar a análise naqueles mais recentes, uma vez que refletem dados mais atuais a respeito do tema e de plantas em operação.

No entanto, essa tendência também é observada na Figura 4.1, deixando evidente o crescimento de publicações e pesquisas acerca do tema nos últimos anos.

Figura 4.6 - Distribuição dos artigos selecionados de acordo com o ano da publicação

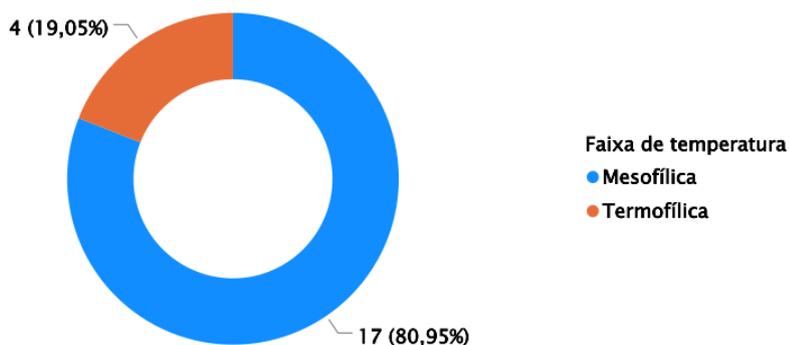


Fonte: Acervo pessoal

4.2.3. TEMPERATURA, TDH E RENDIMENTO DE BIOGÁS

Em relação a temperatura de operação dos trabalhos analisados, observa-se na Figura 4.7 que a grande maioria (80,95%) se encontra na faixa mesofílica, ou seja, entre variando entre 35 °C e 37 °C.

Figura 4.7 - Número de trabalhos que apresentam processos com operação na faixa de temperatura mesofílica e termofílica



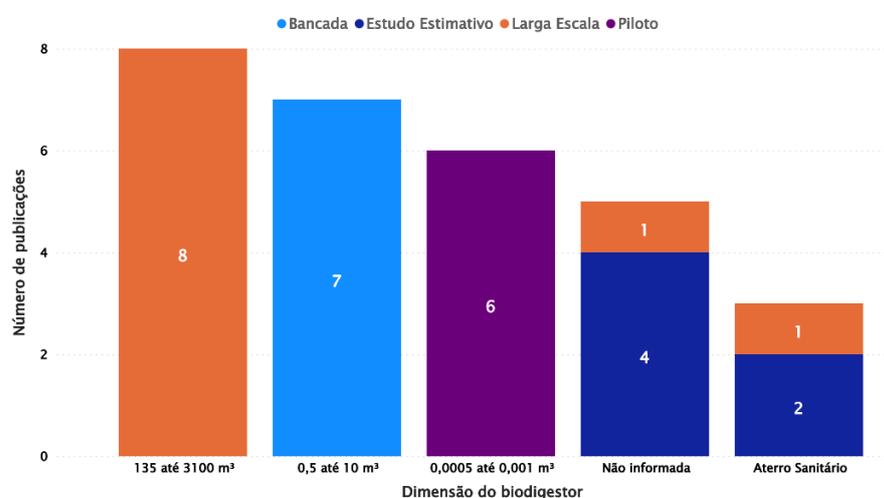
Fonte: Acervo pessoal

A escolha por essa faixa de temperatura se dá devido às bactérias que realizam a DA serem mais produtivas nessa faixa de temperatura. No entanto, a depender da temperatura do RSU utilizado no processo, ou até mesmo de algum outro co-substrato que possa vir a ser utilizado (como por exemplo águas residuais), pode-se optar por operar a biodigestão em temperaturas termofílicas. No entanto, os processos termofílicos levam desvantagem em relação aos mesófilos, uma vez que são mais vulneráveis às perturbações no sistema (BALAT ET AL, 2009).

4.2.4. ESCALA DOS TRABALHOS SELECIONADOS E VOLUME DE BIOGÁS OBTIDO

Visando identificar boas exemplificações de processos em larga escala, destacou-se quantas dentre as publicações escolhidas se tratavam de trabalhos que descreviam processos com capacidade de tratar grandes volumes de resíduos. Para isso, a Figura 4.8 apresenta o número de publicações de acordo com a dimensão do biodigestor utilizado no processo.

Figura 4.8 - Número de publicações de acordo com cada faixa de volume de biodigestor



Fonte: Acervo pessoal

Conforme visto na Figura 4.8, dos trabalhos selecionados cerca de 34% apresentam plantas para processamento de resíduos e geração de biogás em larga escala, 24% experimentos de bancada realizados em laboratório, 21% estudos estimativo que projetam possíveis produções de biogás a partir de cálculos e 21% projetos de processos piloto dos quais sua maior parte (83%) tratava-se de processos voltados a realizar a digestão de resíduos alimentares gerados em universidades (SOUSA ET AL, 2020; PERIN ET AL, 2020; BORTH ET AL, 2022; ZHAN ET AL, 2021; GRANZOTTO ET AL, 2021).

Em relação aos processos em larga escala, 10 trabalhos foram classificados nessa categoria, sendo que 8 eram relacionados a processos com biodigestores de volume variando de 135 a 3100 m³, 1 relacionado a captação de biogás diretamente de aterro sanitário e 1 não especificou qual o volume do reator utilizado, sendo que também foi classificado como larga escala uma vez que a planta descrita é comercial, tendo capacidade de processar 50000 toneladas de resíduos por ano gerando 7500 MWh de eletricidade que é vendida à rede elétrica para abastecimento (ABAD ET AL, 2019).

A Figura 4.9 apresenta uma relação entre o volume dos biodigestores utilizado nos trabalhos selecionados com o volume de biogás obtido por cada um desses reatores. Para o caso de processos onde eram utilizados mais de um reator em paralelo, o volume considerado foi a soma de todos os reatores que fazem parte da planta.

Figura 4.9 - Escala dos biodigestores dos trabalhos analisados e seu respectivo volume de biogás obtido

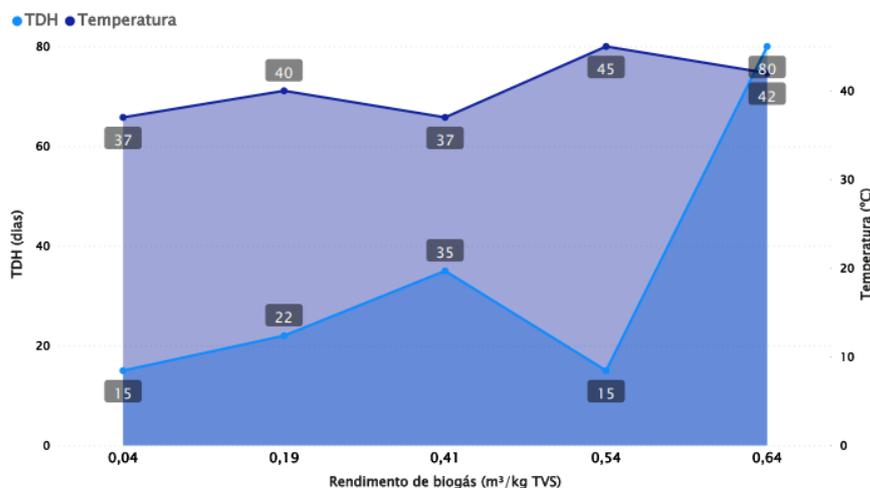


Fonte: Acervo pessoal

De acordo com a Figura 4.9, os maiores volumes de biogás foram obtidos nos biodigestores de maior volume, sendo que o maior volume de biogás obtido foi de 19525 m³/dia em biodigestores que totalizam um volume de 2400 m³. Esses melhores resultados foram obtidos em uma planta localizada na cidade de Rende, na Itália, que possui dois biodigestores de 1200 m³ cada (totalizando os 2400 m³), com capacidade de realizar o tratamento de 20000 toneladas de resíduos por ano (PERA ET AL, 2021). De maneira geral, e comparando as informações fornecidas na Figura 4.8 e Figura 4.9, evidencia-se também que os maiores volumes de biogás obtidos foram alcançados nas plantas dos processos em larga escala, seguido de menores volumes em plantas piloto e valores bem baixos nos estudos de bancada.

Também analisando a produção de biogás, especificamente o rendimento de biogás obtido (m³/kg), a Figura 4.10 apresenta como esse resultado variou de acordo com as diferentes temperaturas e tempo de retenção hidráulica (tempo médio em dias que o substrato levou para ser completamente digerido) reportadas nos trabalhos.

Figura 4.10 - Rendimento de biogás obtido de acordo com a temperatura e o TDH do processo



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se pela Figura 4.10 que o melhor rendimento de biogás obtido esteve no processo que teve como condição de operação uma temperatura de 42 °C e TDH de 80 dias. Nesse exemplo, que é o descrito no trabalho de Banks et al (2010), a planta localizada na Inglaterra alcançou um rendimento de 0,64 m³ de biogás por kg de sólidos voláteis totais, sendo capaz de processar 5000 toneladas de resíduo por ano.

4.2.5. PROCESSOS CONSOLIDADOS EM LARGA ESCALA

Conforme Figura 4.8, dentre os trabalhos selecionados, 10 foram classificados como de larga escala. Esses trabalhos correspondem a plantas *WtE* em operação na China, Brasil, Suécia, Finlândia, Índia, Espanha, Itália e Reino Unido.

Os objetivos desses trabalhos foram diversos (Tabela 2.4), porém a grande maioria dos artigos realizou um monitoramento ou estudo de caso da operação da planta, sendo possível coletar e reunir pontos a respeito do fluxo dessas plantas, desde a chegada do RSU até a destinação do biogás obtido.

Assim, o processo para obtenção de biogás a partir do RSU foi dividido em 5 etapas, sendo elas: recepção do RSU, pré-tratamento, digestão anaeróbia,

downstream e destinação. As características de cada trabalho a respeito dessas etapas foram organizadas conforme apresenta a Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Processos descritos nos trabalhos selecionados para conversão de RSU em biogás

Autor	País / Região	Recepção do RSU	Pré-tratamento	Digestão anaeróbia	Downstream	Destinação
Li et al. (2020)	China / Shandong province	Somente a fração orgânica do RSU coletados de restaurantes através de um sistema inteligente de coleta	Triagem manual seguida de uma prensa-parafuso para remover impurezas e extrudar os resíduos, resultando em uma polpa. A polpa é aquecida em um reator hidrotérmico e depois levada para um separador trifásico onde é extraído óleo. Os resíduos seguem para um tanque de homogeneização.	Tanques mantidos a 37 °C com agitadores hidráulicos removíveis e dividido em dois espaços, permitindo que a acidogênese e metanogênese ocorram em locais separados. TDH de 15 dias em cada um dos espaços. Recirculação de lodo digerido, onde o que não é recirculado é utilizado como fertilizante	Não detalha, apenas mencionando que se trata de uma etapa físico-química que requer elevadas pressões	Utilização como fonte de energia no aquecimento dos biodigestores e injeção de biometano na rede de gás natural
Guerrero et al. (2021)	Brasil	Aterro sanitário. Recebe RSU sem distinções	N/A	N/A	GNR Fortaleza: Absorção física com solvente orgânico; Gás Verde: separação por membrana e criogênica ; GNR Dois Arcos: Absorção física com água	GNR Fortaleza: injeção de biometano na rede de gás natural; Gás Verde: Compressão de biometano em cilindros para venda a indústrias e estações de gás; GNR Dois Arcos: Compressão e venda para estações de gás

Westerholm et al. (2020)	Finlândia e Suécia	Somente a fração orgânica do RSU coletados de restaurantes e casas em sacos de papel ou plástico condicionados em lixeiras específicas	Moagem e prensa-parafuso	Reator com escoamento pistonado (PFR). Temperatura variando entre 39 a 54 °C e TDH entre 37 e 66 dias. Em alguns casos desse estudo, houve recirculação de digerido e adição de compostos (hidróxido de ferro, cálcio, sódio, cobalto, níquel, selênio, tungstênio e ácido clorídrico) para redução de H ₂ S	Não específica	Combustível veicular e injeção na rede de gás natural
T.A.S et al. (2020)	Índia / Telangana	Recebe RSU sem distinções	Não específica como é feita a seleção da fração orgânica, apenas menciona que ela acontece e que em seguida os resíduos passam por um triturador com adição de água. Após, essa polpa passa por uma peneira para garantir o tamanho máximo de partículas (4 mm) que seguem para o tanque de alimentação	Três reatores patenteados com a tecnologia indiana <i>Anaerobic Gas lift Reactor</i> (AGR) com recirculação do digerido e TDH de 14,5 dias.	Purificador com preenchimento de partículas de ferro para captura de traços de H ₂ S seguido de um removedor de umidade. O biogás excedente não utilizado é queimado	Geração de energia elétrica, podendo os três reatores juntos gerar até 178 kWh/dia
Ferreira et al. (2019)	Brasil / Rio de Janeiro	Somente a fração orgânica do RSU	Não específica	Túneis de metanização, com sistema de canaletas para recolhimento de lixiviado. Se assemelham aos reatores do tipo "garagem"	Sistema químico-biológico composto de absorção com água e tanque de dessorção biológico anaeróbio. O excedente de biogás é queimado.	Cogeração de energia térmica e elétrica para abastecimento da planta.

Tyagi et al.(2021)	Índia / North Goa	Recebe RSU sem distinções	Prensa-parafuso para remover impurezas e extrudar os resíduos, resultando em uma polpa	Digestor com temperatura entre 48-58 °C que pode operar em série através de escoamento pistonado (PFR) com TDH de 15 dias ou de forma contínua como três reatores de tanque agitado (CSTR)	Não detalha, apenas mencionando que se trata de uma etapa de purificação biológica, seguida de resfriamento para remoção da umidade. O excesso de biogás é queimado em um sistema de queima.	Geração de energia elétrica, com uma média de 345 kWh/dia
Abad et al. (2019)	Espanha / Granollers	Recebe RSU sem distinções	Peneira rotativa e separador magnético, seguida da adição de água em um homogeneizador para formação de polpa. Em seguida a polpa é peneirada e levada para hidro ciclones para remoção de grânulos	Não especifica	Não especifica	Geração de energia térmica para aquecimento dos trocadores de calor da planta e energia elétrica para venda, chegando a 20830 kWh/dia
Pera et al. (2021)	Itália / Calábria	Somente a fração orgânica do RSU	Peneira rotativa	Dois reatores horizontais de escoamento pistonado (PFR), com temperatura mantida a 40 °C e TDH de 22 dias. O lodo digerido é encaminhado para utilização como composto orgânico	Não detalha, apenas mencionando que se trata de uma etapa química seguida de uma seção de purificação	Injeção de biometano na rede de gás natural
Banks et al. (2010)	Reino Unido	Somente a fração orgânica do RSU	Triturador seguido da adição de digerido recirculado e maceração	Tanque mantido a 42 °C com agitação contínua devido a recirculação de gás. O lodo digerido passa por um tratamento térmico a 70 °C e é encaminhado para fertilização no setor agrícola.	Não especifica	Cogeração de energia térmica e elétrica

Qian et al. (2016)	China / Heilongjiang Province	Recebe RSU sem distinções	Triagem manual e peneira rotativa	Duas linhas, onde cada uma possuí 6 reatores do tipo "garagem", que são alimentados por retroescavadeiras que depositam os resíduos nesses locais. A temperatura é mantida a 37 °C através de um sistema de aquecimento da parede e chão com água. É dispersado sob o substrato um inóculo contendo bactérias metanogênicas, e após 35 dias (TDH) a retroescavadeira retira o resíduo digerido.	Não especifica	Não especifica
-----------------------	-------------------------------------	------------------------------	--------------------------------------	--	----------------	----------------

Fonte: Acervo pessoal

Dentre essas plantas, foram identificadas duas maneiras de receber o substrato; na primeira o resíduo que chega às centrais trata-se somente da fração orgânica do RSU e é coletado em restaurantes, cozinhas industriais e até mesmo casas que separam somente a fração orgânica do resíduo em sacolas e latas específicas para coleta. Nesse modelo, a etapa de pré-tratamento do resíduo pode ser facilitada uma vez que a fração inorgânica não existe ou é mínima. A segunda maneira consiste em receber RSU na íntegra, sendo necessário um pré-tratamento eficiente para eliminar a fração inorgânica. Esse processo de seleção da fração orgânica do RSU pode acontecer primeiramente através de uma triagem manual dos resíduos seguida de uma extrusão que separa a fração orgânica da inorgânica forçando a passagem do resíduo por uma matriz em elevadas pressões. Também como etapas de pré-tratamento as plantas devem contar com trituradores, a fim de reduzir o tamanho das partículas e peneiras para garantir que somente partículas de tamanhos determinados sigam para a DA.

Após obtenção da fração orgânica do RSU, em alguns casos ele ainda pode ser misturado à água ou material digerido para formação de uma pasta, também chamada de polpa. No entanto isso não é uma regra, conforme observa-se no trabalho de PERA ET AL, 2021, que utiliza a fração orgânica pura, sem adição de água ou algum outro aditivo ao substrato.

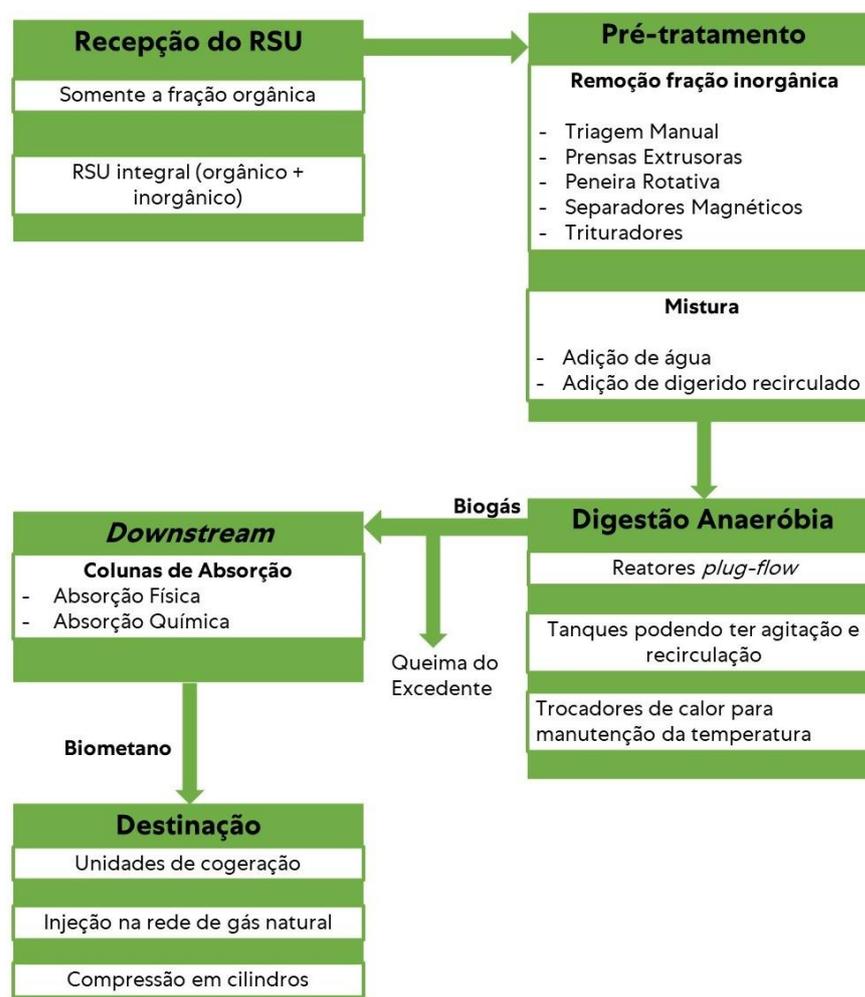
O substrato é então bombeado para os digestores, que podem ter diferentes capacidades (Figura 4.8 e Figura 4.9) e configurações, podendo ou não ter recirculação e agitadores, onde o processo pode durar (TDH) de 15 a 80 dias (Figura 4.10).

O biogás gerado é então encaminhado para o processo de *downstream* (1.6). Nos trabalhos selecionados nem todos discutem acerca dessa etapa, embora alguns mencionem a utilização de absorção física (depuramento com água) e química.

Após a purificação, os destinos mencionados para o biometano no trabalho foram: geração de energia térmica e elétrica através de unidades de cogeração (*CHP*), utilização como combustível veicular, injeção da rede de gás natural e compressão em cilindros para venda à indústrias e estações de gás.

A Figura 4.11 resume os principais tópicos nos trabalhos selecionados referentes ao processo em larga escala desde a recepção do RSU até a obtenção da bioenergia, que também foram apresentados na Tabela 4.2.

Figura 4.11 - Processo para obtenção de biometano a partir do RSU e suas variações de acordo com os trabalhos selecionados



Fonte: Acervo pessoal

Em relação as questões logísticas, conforme mencionado no tópico 2.3, dedicado a abordar questões logísticas da cadeia de suprimentos para plantas *WtE*, poucos trabalhos na literatura trazem essas questões com grande riqueza de detalhes. Essa dificuldade também foi encontrada nos trabalhos selecionados, visto que ao passo que são estudados e apresentados diversos parâmetros da operação da planta para conversão de RSU em biogás, as questões logísticas são pouco discutidas ou não são apresentadas. Assim, em relação a esses estudos, não foi possível identificar melhores práticas para etapas como a coleta, armazenamento e

transporte dos resíduos para abastecimento das plantas. Em contrapartida, o trabalho de Li (LI ET AL, 2020) menciona a utilização de um sistema inteligente de recolha e transporte dos resíduos, onde os veículos são equipados com sistemas de GPS e sistemas de pesagem dos resíduos a bordo para garantia da qualidade e quantidade de resíduo no abastecimento da planta.

Dentre os trabalhos classificados como larga escala dois deles são do Brasil (FERREIRA ET AL, 2019 e GUERREIRO ET AL, 2021). O trabalho de Guerreiro apresenta um estudo de caso de 3 aterros sanitários no Brasil que são registrados e seguem os padrões da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para captação de biogás e sua posterior conversão em biometano para comercialização. Esses aterros estão localizados em Fortaleza (Ceará), Seropédica (Rio de Janeiro) e São Pedro da Aldeia (Rio de Janeiro), e possuem capacidade de processar 300.000, 480.000 e 35.000 m³ de biogás por dia, respectivamente. Felizmente esses processos continuam em ascensão e são visados por investidores, conforme a recentemente divulgada ampliação do sistema de captação de biogás de Seropédica (EPBR, 2022) mostrando que essas tecnologias possuem potencial de expansão, uma vez que além de sustentáveis podem ser altamente rentáveis.

Já trabalho de Ferreira apresenta uma tecnologia inédita no país, mostrando que o país também possui capacidade para a consolidação de novos processos *WtE*. Nesse trabalho, que visa tratar RSU provenientes do Rio de Janeiro, são utilizados os denominados túneis de metanização, muito semelhantes aos reatores do tipo “garagem”, também descrito no trabalho de QIAN ET AL, 2016. A planta atualmente encontra-se em estado de comissionamento e possui capacidade para realizar o tratamento de até 30 toneladas de resíduos por dia, e espera-se que seja capaz de realizar a geração de 129 MWh/mês de energia elétrica, sendo que desse valor, 80,8 MWh/mês seria excedente e poderia ser distribuído na rede elétrica.

Assim, esses dois trabalhos são exemplos claros de que o Brasil possui capacidade para geração de biometano a partir do RSU, seja através da implementação de novas tecnologias através de plantas dedicadas para esse fim, ou até mesmo utilizando a captação de biogás de aterros sanitários já existentes no país. A implementação desses processos demanda investimentos em infraestrutura e pesquisa, exigindo assim o esforço de diferentes frentes, como de governos, agências de pesquisa e inovação, indústrias e investidores. Esse destino para os resíduos são sustentáveis e rentáveis, uma vez que o biometano pode dar origem a energia térmica

e elétrica, além de poder ser utilizado diretamente como combustível veicular e comprimido em cilindros para sua comercialização junto a outras indústrias.

5. CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de avançar nas análises que foram descritas nessa pesquisa, sugere-se que outros estudos sejam realizados a fim de monitorar o avanço das tecnologias e implementações de plantas em larga escala para produção de biogás no Brasil e no mundo. Através do estudo desses processos, sugere-se determinar qual a melhor configuração, visando aspectos técnicos e econômicos, de plantas para instalação no Brasil visando a captação de RSU em grandes centros, como metrópoles. Além disso, essas análises também permitem demonstrar como o Brasil está avançando em relação ao tema nos âmbitos políticos (possíveis projetos de incentivo), privado (investimento de empresas no ramo bioenergético) e de ensino (pesquisas científicas e implementação de projetos piloto nas instituições).

Outro ponto importante a ser estudado, por ser um dos gargalos do processo, diz respeito a configuração das malhas logísticas que abastecem as centrais de tratamento. Poucos estudos retratam esse cenário, e se faz necessário entender qual a melhor configuração que permita abastecimento de RSU na quantidade necessária para operação da planta, ao passo que o processo não perca sua rentabilidade.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou ser viável a produção de biogás em larga escala a partir da digestão anaeróbia do RSU, sendo essa uma possível rota sustentável para destinação de resíduos no Brasil. Nesses processos os resíduos, antes sem nenhum fim, se tornam uma importante matéria prima demandando robustez em processos que dizem respeito a sua coleta, transporte, armazenamento, processamento e destinação.

Através da análise de publicações na base de dados da *Web of Science*, constatou-se que nos últimos anos é crescente o número de trabalhos relacionados ao tema, demonstrando que o campo é amplamente estudado e possui capacidade de expansão. A China destaca-se como o país detentor do maior número de

publicações, ficando o Brasil na nona posição. Nos países que se destacam na implementação de grandes projetos para produção de biogás, percebe-se uma constante onda de incentivos e projetos liderados pelo governo e parcerias público-privadas, inclusive para projetos piloto que posteriormente dão origem a grandes plantas.

Uma análise detalhada dos artigos mais relevantes selecionados mostrou que 80,95% dos processos apresentados operavam em temperaturas mesofílicas. Os melhores resultados de rendimento de biogás foram alcançados no processo com temperatura de 42°C e TDH de 80 dias. Dos artigos selecionados, 34% apresentavam processos em larga escala, os quais foram analisados a fim de identificar as principais etapas envolvidas no processo. Essa análise demonstrou que existe uma grande variação nas etapas de recepção do RSU, pré-tratamento, DA, *downstream* e destinação da bioenergia. Em relação as questões logísticas, observa-se que a maioria desses trabalhos não detalha o funcionamento dessas malhas, sendo essa uma oportunidade de discussão e estudo visto que os custos dessas operações são elevados e podem ser críticos para a viabilidade do processo.

Especificamente no Brasil, de acordo com os trabalhos analisados, nota-se a existência de alguns processos já implementados. Dentre esses processos existe a captação direta de biogás de aterros sanitários e a implementação de alguns processos dedicados para conversão de RSU em biogás a partir de biodigestores, onde muitos deles são realizados dentro de instituições de ensino. No entanto, dado o cenário do país, que ainda apresenta destinações insustentáveis para RSU como os lixões a céu aberto, o país ainda muito tem a avançar a respeito do tema.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, Vanessa; AVILA, Romina; VICENT, Teresa; Front, Xavier. **Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion treatment plant: Biogas production impact and economic factors.** Bioresource Technology, v. 283, p. 10, mar. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.064>.

AHMED, Banafsha; TYAGI, Vinay Kumar; PRIYANKA; KHAN, Abid Ali; KAZMI; A. A. **Optimization of process parameters for enhanced biogas yield from anaerobic**

co-digestion of OFMSW and bio-solids. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 12, p. 607, jul. 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00919-3>.

ALFAIA, Raquel Greice de Souza M.; COSTA, Alyne Moraes; CAMPOS, Juacyara Carbonelli. **Municipal solid waste in Brazil: A review.** *Waste Management & Research*, p. 1-15, 2017. <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>.

ANP. **Resolução nº 685, de 29 de junho de 2017.** Disponível em: encurtador.com.br/eALR1. Acesso em: 31 mar. 2022.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. **Produção de Biogás a partir de Resíduos Orgânicos utilizando Biodigestor Anaeróbico.** Tese (Dissertação) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

AYOUB, Nasser; MARTINS, Ricardo; WANG, Kefeng; SEKI, Hiroya; NAKA, Yuji. **Two levels decision system for efficient planning and implementation of bioenergy production.** *Energy & Conversion Management*, v. 48, p. 709, nov. 2016. Elsevier BV. doi:10.1016/j.enconman.2006.09.012.

BALAT, M.; BALAT, H. **Biogas as a Renewable Energy Source—A Review.** *Energy Sources*, v. 31, p. 1280, mai. 2009. <https://doi.org/10.1080/15567030802089565>.

BANKS, Charles J.; CHESSHIRE, Michael; HEAVEN, Sonia; ARNOLD, Rebecca. **Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance.** *Bioresource Technology*, v. 102, p. 612, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.005>.

BARUA, Pranta; HOSSAIN, Nazia. **Waste to energy: an overview by global perspective.** *Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals*, Woodhead Publishing, v. 32, p. 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823139-5.00011-3>.

BASINAS, Panagiotis; RUSÍN, Jiří; CHAMRÁDOVÁ, Kateřina. **Dry anaerobic digestion of the fine particle fraction of mechanically-sorted organic fraction of municipal solid waste in laboratory and pilot reactor.** *Waste Management*, [S.L.], v. 136, p. 83-92, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.041>.

BORTH, Priscila Liane Biesdorf; PERIN, Jessica Klarosk Helenas; TORRECILHAS, Arthur Ribeiro; LOPES, Daiane Dias; SANTOS, Samantha Christine; KURODA, Emília Kiyomi; FERNANDES, Fernando. **Pilot-scale anaerobic co-digestion of food and garden waste: Methane potential, performance and microbial analysis.** *Biomass and Bioenergy*, v. 157, 106331, fev. 2022. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106331>.

BOTTANI, Eleonora; MANNINO, Francesca; GIUSEPPE, Vagnali; MONTANARI, Roberto. **A routing and location model for food waste recovery in the retail and distribution phase**. *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 21, p. 557, mar. 2018. <https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1458826>.

BOTTANI, Eleonora; VIGNALI, Giuseppe; MOSNA, David; MONTANARI, Roberto. **Economic and environmental assessment of different reverse logistics scenarios for food waste recovery**. *Sustainable Production and Consumption*, v. 20, p. 289, jul. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.007>.

BRASIL, Lei nº 12.305/10, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: nº 147, seção 1, p. 3, Brasília, DF, ago. 2010.

BRITO, Romulo Carvalho de; BARROS, Regina Mambeli; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Samuel Placido Galdino da. **Municipal solid waste management and economic feasibility for electricity generation from landfill gas and anaerobic reactors in a Brazilian state**. *Environmental Technology & Innovation*, [S.L.], v. 22, p. 101453, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101453>.

BRIZI, Federico; SILVEIRA, Jose Luz; DESIDERI, Umberto; REIS, Joaquim Antonio dos; TUNA, Celso Eduardo; LAMAS, Wendell de Queiroz. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 193, out. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.088>.

BRIZI, Federico; SILVEIRA, Jose Luz; DESIDERI, Umberto; REIS, Joaquim Antonio dos; TUNA, Celso Eduardo; LAMAS, Wendell de Queiroz. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 193, out. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.088>.

CAMPOS, Victor Arruda Ferraz; SILVA, Valter Bruno; CARDOSO, João Sousa; BRITO, Paulo S.; TUNA, Celso Eduardo; SILVEIRA, José Luz. **A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development**. *Renewable Energy*, v. 178, p. 802, jun. 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.107>.

CHINELLATO, G.; BATTISTA, F.; BOLZONELLA, D.; CAVINATO, C. **Single-phase anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste without dilution: Reactor stability and process performance of small, decentralised plants**. *Waste Management*, v. 125, p. 103, mar. 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.009>.

CHRISTY, P. Merlin; GOPINATH, L. R; DIVYA, D. **A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 34, p. 167, jun. 2014. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010>.

CIBIOGÁS. Nota técnica nº 001 / 2021. **Panorama do Biogás no Brasil 2020.** Foz do Iguaçu, mar. 2021. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

CLARIVATE. **Opções de Classificação.** Disponível em: http://images.webofknowledge.com/WOKRS5132R4.2/help/pt_BR/WOK/hs_sort_options.html#:~:text=Relev%C3%A2ncia,aparecem%20no%20topo%20da%20lista. Acesso em: 31 mar. 2022.

CLERCQ, Djavan De; WEN, Zongguo; GOTTFRIED, Oliver; SCHMIDT, Franziska; FEI, Fan. **A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p. 204, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.047>.

CLERCQ, Djavan De; WEN, Zongguo; GOTTFRIED, Oliver; SCHMIDT, Franziska; FEI, Fan. **A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p. 204, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.047>.

CLERCQ, Djavan De; WEN, Zongguo; GOTTFRIED, Oliver; SCHMIDT, Franziska; FEI, Fan. **A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p. 204, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.047>.

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 São Paulo.** Energy, [S.L.], v. 239, p. 122326, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.122326>.

DEHKORDI, Seyed Mohammad Mehdi Noorbakhsh; JAHROMI, Ahmad Reza Taghipour; SHUMAL, Mohammad; DEHNAVI, Ali. **Investigation of biogas production potential from mechanical separated municipal solid waste as an approach for developing countries (case study: Isfahan-Iran).** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 119, 109586, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109586>.

EBADIAN, Mahmood; SOWLATI, Tareneh; SOKHANSANJ, Shahab; TOWNLEY-SMITH, Lawrence; STUMBORG, Mark. **Modeling and analysing storage systems in agricultural biomass supply chain for cellulosic ethanol production.** Applied

Energy, v. 102, p. 840, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.049>.

FERREIRA, B.; LOBATO, L. C. S.; COLTURATO, L. F. D.; TORRES, E.O.; POMBO, L. M.; PUJATTI, F. J. P.; ARAÚJO, J. C.; CHERNICHARO, C. A. L. **Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro - Brazil**. Renewable Energy, v. 146, p. 1976, ago. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.049>.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Vérdi de. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso**. Tese (Mestrado) – Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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**. SN Appl. Sci., v. 3, p. 34, jan. 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03973-8>.

GAIKWAD, Rohit; VILLADSEN, Sebastian; RASMUSSEN, Jan Pihl; GRUMSEN, Flemming Bjerg; NIELSEN, Lars Pleth; GILDERT, Gary; MOLLER, Per; FOSBOL, Philip Loldrup. **Container-Sized CO₂ to Methane: Design, Construction and Catalytic Tests Using Raw Biogas to Biomethane**. Catalysts, v. 10, 1428, dez. 2020. <https://doi.org/10.3390/catal10121428>.

GALVEZ, Daniel; RAKOTONDRANAIVO, Auguste; MOREL, Laure; CAMARGO, Mauricio. **Reverse logistics network design for a biogas plant: An approach based on MILP optimization and Analytical Hierarchical Process (AHP)**. Journal of Manufacturing Systems, v. 37, p. 616, out. 2012. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.005>.

GAN, Jianbang. **Supply of biomass, bioenergy, and carbon mitigation: Method and application**. Energy Policy, v. 35, p. 6003, dez. 2007. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.014>.

GRANZOTTO, F.; AITA, C.; SILVEIRA, D. D.; MAYER, D. D.; PUJOL, S. B.; PIÑAS, J. A. V.; HOFFMANN, R. **Use of anaerobic biodigester in the treatment of organic waste from a university restaurant**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, 105795, out. 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105795>.

GUERREIRO, Érica Machado da Silva; ORNELAS-FERREIRA, Bernardo; RITTER, Elisabeth. **BIOMETHANE PRODUCTION BY LICENSED BRAZILIANS LANDFILLS AND POTENTIAL ENERGY USE IN MUNICIPALITIES**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 251-257, dez. 2021.

HAMELINCK, Carlo N.; SUURS, Roald A. A.; FAAIJ, André P. C. **International bioenergy transport costs and energy balance**. *Biomass & Bioenergy*, v. 29, p. 114, mai. 2015. Elsevier BV. doi:10.1016/j.biombioe.2005.04.002.

HOOK, Mikael; TANG, Xu. **Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review**. *Energy Policy*, [S.L.], v. 52, p. 797, nov. 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>.

HU, Yicheng; SCARBOROUGH, Matthew; AGUIRRE-VILLEGAS, Horacio; LARSON, Rebecca A.; NOGUERA, Daniel R.; ZAVALA, Victor M. **A Supply Chain Framework for the Analysis of the Recovery of Biogas and Fatty Acids from Organic Waste**. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, p. 6211, abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04932>.

IAKOVOU, E.; KARAGIANNIDIS, A.; VLACHOS, D.; MALAMAKIS, A. **Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis**. *Waste Management*, v. 30, p. 1860, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.030>.

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

KHAN, Imran Ullah; OHTMAN, Mohd H. D.; HASHIM, Haslenda; MATSUURA, Takeshi; ISMAIL, A.F; RAZAEI-DASHTARZHANDI, M; AZELEE, I.W. **Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage**. *Energy Conversion and Management*, [S.L.], v. 239, p. 277, ago. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>.

KOUGIAS, Panagiotis G.; ANGELIDAKI, Irini. **Biogas and its opportunities—A review**. *Front. Environ. Sci*, v. 12, abr. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>.

LI, Kun.; WANG, Kaijun; WANG, Jingyao; QUAN, Yuan; SHI, Chuan; WU; Jing; Zuo, Jiane. **Performance assessment and metagenomic analysis of full-scale innovative two-stage anaerobic digestion biogas plant for food wastes treatment**. *Journal of Cleaner Production*, v. 264, 121646, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121646>.

LI, Kun.; WANG, Kaijun; WANG, Jingyao; QUAN, Yuan; SHI; Chuan; WU; Jing; Zuo, Jiane. **Performance assessment and metagenomic analysis of full-scale innovative two-stage anaerobic digestion biogas plant for food wastes**

treatment. Journal of Cleaner Production, v. 264, 121646, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121646>.

LIMA, Danuza Gusmão Gomes de Andrade. **A gestão dos resíduos sólidos urbanos e sua relação com as mudanças climáticas.** V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Recife, out. 2009.

MARIANI, Leidiane. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil.** Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2018.

MARKPHAN, Wattananarong; MAMIMIN, Chonticha; SUKSONG, Watanasak; PRASERTSAN, Poonsuk; O-THONG, Sompong. **Comparative assessment of single-stage and two-stage anaerobic digestion for biogas production from high moisture municipal solid waste.** PeerJ, ago. 2020. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.9693>.

MIKHEEVA, E. R.; KATRAEVA, I. V.; VOROZHTSOV, D. L.; LITTI, Yu. V.; NOZHEVNIKOVA; A. N. **Efficiency of Two-Phase Anaerobic Fermentation and the Physicochemical Properties of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste Processed in a Vortex-Layer Apparatus.** Applied Biochemistry and Microbiology, v. 56, p. 736, nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.1134/S0003683820060113>.

MOFIJUR, M.; FATTAH, I. M. R.; KUMAR, P. S.; SIDDIKI, S. Y. A. **Bioenergy recovery potential through the treatment of the meat processing industry waste in Australia.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, 105657, mai. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105657>.

NANDA, Sonil; BERRUTI, Franco. **Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review.** Environmental Chemistry Letters, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 1433-1456, 23 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>.

organic fertilizer, and value-added chemicals: an integrated biorefinery approach. Biomass Conversion and Biorefinery, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01252-5>.

OUR WORLD IN DATA. **Energy Mix.** 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy>. Acesso em: 30 mar. 2022.

PANIGRAHI, Sagarika; SHARMA, Hari Bhakta; DUBEY, Brajesh K. **Anaerobic co-digestion of food waste with pretreated yard waste: A comparative study of methane production, kinetic modeling and energy balance.** Journal of Cleaner

Production, v. 243, 118480, set. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118480>.

PERA, Adolfo; SELLARO, Miriam; MIGLIORI, Massimo; BIANCO, Micaela; ZANARDI, Giuseppe. **Dry Mesophilic Anaerobic Digestion of Separately Collected Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Two-Year Experience in an Industrial-Scale Plant.** Processes, v. 9, p. 213, jan. 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9020213>.

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.** Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 272, p. 123130, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123130>.

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.** Journal of Cleaner Production, v. 272, 123130, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123130>.

POUDEL, Ram Chandra; KHATIWADA, Dilip; ARYAL, Prakash; SAPKOTA, Manju. **Chapter 17 - Large-scale biogas upgrading plants: future prospective and technical challenges.** Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading, p. 467, 2021. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822808-1.00017-9>.

QIAN, M. Y.; LI, R. H.; LI, J.; WEDWITSCHKA, H.; NELLES, M.; STINNER, W.; ZHOU, H. J. **Industrial scale garage-type dry fermentation of municipal solid waste to biogas.** Bioresource Technology, v. 217, p. 82, out. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.076>.

RAM, Chhotu; KUMAR, Amit; RANI, Pushpa. **Municipal Solid Waste Management: A Review of Waste to Energy (WtE) Approaches.** Bioresources, Adigrat, p. 4275-4320, mar. 2021. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/municipal-solid-waste-management-a-review-of-waste-to-energy-wte-approaches/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

RAVULA, P. P.; GRISSO, R. D.; CUNDIFF, Shahab J. S.; TOWNLEY-SMITH, Lawrence; STUMBORG, Mark. **Comparison between two policy strategies for scheduling trucks in a biomass logistic system.** Bioresource Technology, v. 99, p. 5710, fev. 2009. Elsevier BV. doi:10.1016/j.biortech.2007.10.044.

RIBEIRO, Natalia de Souza; BARROS, Regina Mambeli; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Samuel Placido Galdino da. **Electric**

energy generation from biogas derived from municipal solid waste using two systems: landfills and anaerobic digesters in the states of são paulo and Minas Gerais, Brazil. Sustainable Energy Technologies And Assessments, [S.L.], v. 48, p. 101552, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2021.101552>.

RONI, Mohammad S.; EKSIOGLU, Sandra D.; CAFFERTY, Kara G.; JACOBSON, Jacob J. **A multi-objective, hub-and-spoke model to design and manage biofuel supply chains.** Ann Oper Res, v. 249, p. 351, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2102-3>.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane.** Biomass and Bioenergy, v. 35, p. 1633, mar. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>.

SEDIGHI, Afsane; KARRABI, Mohsen; SHAHNAVAZ, Bahar; MOSTAFAVINEZHAD, Morteza. **Bioenergy production from the organic fraction of municipal solid waste and sewage sludge using mesophilic anaerobic co-digestion: an experimental and kinetic modeling study.** Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 153, p. 111797, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111797>.

SEEG. **Na contramão do mundo, Brasil aumentou emissões em plena pandemia.** 2021. Disponível em: <https://bityli.com/nUhGI>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SNIS. Diagnóstico Temático: **Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2021. Ministério do Desenvolvimento Regional. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

SOUSA, Maria Helena de; SILVA, Alice Sabrina F. da; CORREIA, Raphael Chaves; LEITE, Nathalia P.; BUENO, Claudio Eduardo G.; PINHEIRO, Ricardo L. S.; SANTANA, J. S; SILVA, J. L; SALES, A. T; SOUZA, C. C; AQUINO, K. A. S; SOUZA; R. B; PINHEIRO; I. O; HENRÍQUEZ; J. R; SCHULER; A. R. P; SAMPAIO; E. V. S. B; DUTRA; E. D; MENEZES; R. S. C. **Valorizing municipal organic waste to produce biodiesel, biogas,**

SUN, Ou; FAN, Neng. **A Review on Optimization Methods for Biomass Supply Chain: Models and Algorithms, Sustainable Issues, and Challenges and Opportunities.** Process Integr Optim Sustain, v. 4, p. 203, mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00108-9>.

T.A.S., Jayanth; MAMINDLAPELLI, Naveen Kumar; BEGUM, Sameena; ARELLI, Vijayalakshmi; JUNTUPALLY, Sudharshan; AHUJA, Shruthi; DUGYALA; Sandeep Kumar; ANUPOJU, Gangagni Rao. **Anaerobic mono and co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and landfill leachate at industrial scale: Impact**

of volatile organic loading rate on reaction kinetics, biogas yield and microbial diversity. *Science of the Total Environment*, v. 748, 14262, set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142462>.

TANIGAKI, Nobuhiro; MANAKO, Kazutaka; OSADA, Morihiro. **Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system.** *Waste Management*, v. 32, p. 667, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.019>.

TYAGI, Vinay Kumar; KAPOOR, Aparna; ARORA, Pratham; BANU, J. Rajesh; DAS, Sukanya; PIPESH, Shubham; KAZMI, A. A. **Mechanical-biological treatment of municipal solid waste: Case study of 100 TPD Goa plant, India.** *Journal of Environmental Management*, v. 292, 112741, mai. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112741>.

UNEP. **COP26 termina em acordo, mas deixa a desejar na ação climática.** 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/cop26-termina-em-acordo-mas-deixa-desejar-na-acao-climatica>. Acesso em: 30 mar. 2022.

VILLANUEVA-ESTRADA, Ruth Esther; ROCHA-MILLER, Roberto; ARVIZU-FERNÁNDEZ, José Luiz; GONZÁLEZ, Alejandra Castro. **Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of Prados de la Montaña, Mexico City.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 31, p. 236, fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.005>.

VOGELI, Yvonne; LOHRI, Christian Riu; GALLARDO, Amalia; DIENER, Stefan; ZURBRUGG, Christian. **Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries.** Eawag. 2014. Disponível em: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/biowaste.pdf

VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D.; KOUKIOS, E. G. **Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method.** *Biomass & Bioenergy*, v. 20, p. 101, set. 2000.

WESTERHOLM, M.; LIU, T.; SCHNURER, A. **Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology.** *Bioresource Technology*, v. 304, 122981, mai. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122981>.

WOO, Young-bin; CHO, Seolhee; KIM, Jiyong; KIM, Byung Soo. **Optimization-based approach for strategic design and operation of a biomass-to-hydrogen supply chain.** *Hydrogen Energy*, v. 41, p. 5405, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.153>.

WORLD BANK. **What A Waste Global Database**. 2022. Disponível em: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0039597>. Acesso em: 31 mar. 2022.

ZAMRI, M. F. M. A.; HASMADY, Saiful; AKHIAR, Afifi; IDERIS, Fazril; SHAMSUDDIN, A. H.; MOFIJUR, M.; FATTAH, I. M.; MAHLIA, T. M. I. **A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 137, 110637, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110637>.

ZHANG, Jingxin; GU, Danning; CHEN, Jiaqi; HE, Yiliang; DAI, Yanjun; LOH, Kai-Chee; TONG, Yen Wah. **Assessment and optimization of a decentralized food-waste-to-energy system with anaerobic digestion and CHP for energy utilization**. *Energy Conversion and Management*, v. 228, 113654, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113654>.

ZOUAGHI, Lamis Yousra Shahrzed Khelifa; DJELAL, Hayet; SALEM, Zineb. **Anaerobic co-digestion of three organic wastes under mesophilic conditions: lab-scale and pilot-scale studies**. *Environment, Development And Sustainability*, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 9014-9028, 6 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-020-01009-0>.