



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

STEFANY LOBO ALMEIDA

**RESÍDUOS GORDUROSOS DE INDÚSTRIA DE REFINO DE ÓLEOS VEGETAIS:
POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CONTRIBUIÇÃO PARA
DESCARBONIZAÇÃO**

FORTALEZA

2025

STEFANY LOBO ALMEIDA

**RESÍDUOS GORDUROSOS DE INDÚSTRIA DE REFINO DE ÓLEOS VEGETAIS:
POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CONTRIBUIÇÃO PARA
DESCARBONIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso referente ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A451r Almeida, Stefany Lobo.

Resíduos gordurosos de indústria de refino de óleos vegetais : potencial para produção de biogás e contribuição para descarbonização / Stefany Lobo Almeida. – 2025.

76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

Coorientação: Prof. Evandro Souza dos Santos Neto.

1. Resíduos gordurosos. 2. Digestão anaeróbia. 3. Descarbonização. I. Título.

CDD 628

STEFANY LOBO ALMEIDA

RESÍDUOS GORDUROSOS DE INDÚSTRIA DE REFINO DE ÓLEOS VEGETAIS:
POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CONTRIBUIÇÃO PARA
DESCARBONIZAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso referente ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 07/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Evandro Souza dos Santos Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Alessandra Santos Ferreira
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

À Deus e a minha família, minha base.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à Deus e à Nossa Senhora por serem amor, esperança e acolhimento em meio as minhas certezas, incertezas, sonhos, felicidades e desafios.

Aos meus pais, Synara e Cleber, e a toda a família pela renúncia, dedicação, cuidado, educação e inspiração, pois tudo o que sou devo a eles.

Ao meu irmão Sady e a minha irmã Emily, pelo compartilhar de risadas, conselhos e suporte ao longo das etapas da minha vida.

Ao meu amor, Zenóbio, pelo compartilhar da vida há 6 anos de forma única com amor, carinho, conselhos, respeito e comprometimento.

Aos meus amigos da graduação e da vida, Andreza, Bruno, Christian e Meryellen pela divisão do fardo, pelas memórias, risadas, desafios superados juntos, companheirismo e suporte.

Ao meu passarinho, Chico, por ser paz, luz, amor e carinho na minha vida.

Ao Prof. Stefanutti, pelas orientações, disponibilidade, conselhos, tranquilidade, segurança transmitidos e por toda a contribuição que foi muito significativa na concretização deste trabalho.

À Alessandra, por todos os ensinamentos, apoio, amizade e inspiração fornecidos ao longo do meu estágio que favoreceram o meu desenvolvimento profissional e construção deste trabalho de forma correlata.

Ao Evandro, pela atenção e orientação fornecidas de maneira precisa e estratégica de forma a contribuir para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa onde estagiei, por todas as oportunidades concedidas para o meu desenvolvimento em gestão ambiental e inovação, memórias geradas, amizades feitas e pelos dados fornecidos para realização deste trabalho.

Ao LABOSAN e LARSE, por todo apoio, estrutura e materiais fornecidos que tornaram possível a construção deste trabalho.

Obrigada a todos que, mesmo não mencionados diretamente, contribuíram para a construção desta etapa.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante.”

Charles Chaplin

RESUMO

A descarbonização da indústria é um desafio para reduzir os impactos ambientais e promover a transição para processos mais sustentáveis. Neste contexto, a valorização de resíduos industriais por meio de rotas biotecnológicas, como a digestão anaeróbia (DA), desempenha um papel significativo na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e no aprimoramento da gestão de resíduos. O presente estudo teve como objetivo caracterizar três tipos de resíduos gordurosos gerados no processo de refino de óleos vegetais: resíduo de terra, resíduo gorduroso de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) e resíduo do decantador, avaliando o potencial como substratos para DA e geração de biogás. A caracterização físico-química dos resíduos revelou uma fração significativa de sólidos voláteis (SV), com relação SV/ST, variando entre 2% e 93%, além da presença de óleos e graxas (O&G) em concentrações variando de 143 mg/L a 454 mg/L. Esses dados indicam diferenças nas características de biodegradabilidade dos resíduos, com o resíduo gorduroso ETE apresentando o maior potencial para conversão em biogás. A análise de metais pesados revelou concentrações dentro dos limites considerados seguros para processos biológicos, o que favorece o uso dos resíduos na DA. A classificação dos resíduos como Classe II A – Não Inerte reitera que são adequados para processos de valorização biológica. Os resultados indicam que os resíduos gordurosos analisados possuem características favoráveis para a digestão anaeróbia, oferecendo uma alternativa sustentável para a destinação desses resíduos, para a redução da carga orgânica descartada no ambiente e para a geração de biogás. Essa abordagem não apenas contribui para a descarbonização da indústria de refino de óleos vegetais, mas também se alinha aos princípios da economia circular, favorecendo o aproveitamento eficiente dos resíduos e minimizando os impactos ambientais. Dessa forma, este estudo reforça a importância de explorar tecnologias de valorização de resíduos como parte das estratégias industriais voltadas para a sustentabilidade e a mitigação das mudanças climáticas.

Palavras - chave: Resíduos gordurosos; digestão anaeróbia; descarbonização.

ABSTRACT

Decarbonizing the industry is a challenge to reduce environmental impacts and promote a transition to more sustainable processes. In this context, the valorization of industrial waste through biotechnological routes, such as anaerobic digestion (AD), plays a significant role in mitigating greenhouse gas (GEE) emissions and improving waste management. The present study aimed to characterize three types of greasy waste generated in the vegetable oil refining process: soil exclusion, greasy waste disposal from Effluent Treatment Plants (ETP) and decanter disposal, evaluating their potential as substrates for AD and biogas generation. The physicochemical characterization of the waste revealed a significant fraction of volatile solids (VS), with a SV/ST ratio ranging from 2% to 93%, in addition to the presence of oils and greases (O&G) in concentrations ranging from 143 mg/L to 454 mg/L. These data indicate differences in the biodegradability characteristics of the waste, with the greasy waste from the WWTP presenting the greatest potential for conversion into biogas. The analysis of heavy metals revealed concentrations within the limits considered safe for biological processes, which favors the use of the waste in AD. The classification of the waste as Class II A – Non-inert reiterates that it is suitable for biological valorization processes. The results indicate that the greasy waste developed has characteristics designed for anaerobic digestion, offering a sustainable alternative for the disposal of this waste, for the reduction of the organic load discharged into the environment and for the generation of biogas. This approach not only contributes to the decarbonization of the vegetable oil refining industry, but also aligns with the principles of the circular economy, favoring the efficient use of waste and minimizing environmental impacts. Thus, this study reinforces the importance of exploring waste valorization technologies as part of industrial strategies aimed at sustainability and climate change mitigation.

Keywords: Greasy waste; anaerobic digestion; decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Degomagem de óleo bruto.....	25
Figura 2 – Neutralização do óleo degomado.....	26
Figura 3 – Branqueamento do óleo neutro seco.....	28
Figura 4 – Diagrama geral da digestão anaeróbia.....	32
Figura 5 – Resíduos usados na digestão anaeróbia.....	35
Figura 6 – Quantificação das variáveis mais estudadas.....	36
Figura 7 – Concentrações adequadas de micronutrientes conforme diferentes fontes bibliográficas.....	40
Figura 8 – Inibidores e sua concentração tóxica em processos de digestão anaeróbia.....	42
Figura 9 – Considerações para a escolha do biodigestor.....	44
Figura 10 – Aspectos para enquadramento da escolha do biodigestor.....	44
Figura 11 – Processo de geração de biogás.....	47
Figura 12 – Fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.....	52
Figura 13 – Amostra de resíduo de terra.....	54
Figura 14 – Amostra de resíduo gorduroso ETE e resíduo do decantador.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de biogás na decomposição completa dos constituintes orgânicos.....	48
Tabela 2 – Metodologia, normas e métodos analíticos do laboratório externo.....	56
Tabela 3 – Normas técnicas para análises de sólidos totais e voláteis.....	57
Tabela 4 – Norma técnica para determinação de óleos e graxas.....	58
Tabela 5 – NBR 10004:2004 - Massa Bruta - Resíduo de terra.....	59
Tabela 6 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Inorgânicos - Resíduo de terra.....	60
Tabela 7 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Orgânicos - Resíduo de terra.....	60
Tabela 8 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Inorgânicos - Resíduo de terra.....	60
Tabela 9 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Orgânicos - Resíduo de terra.....	61
Tabela 10 – NBR 10004:2004 - Massa Bruta - Resíduo gorduroso ETE.....	61
Tabela 11 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Inorgânicos - Resíduo gorduroso ETE.....	62
Tabela 12 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Orgânicos - Resíduo gorduroso ETE.....	62
Tabela 13 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Inorgânicos - Resíduo gorduroso ETE.....	63
Tabela 14 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Orgânicos - Resíduo gorduroso ETE.....	63
Tabela 15 – Determinação de sólidos totais para os resíduos.....	65
Tabela 16 – Determinação de sólidos voláteis para os resíduos.....	67
Tabela 17 – Determinação de sólidos voláteis para os resíduos.....	67
Tabela 18 – Determinação de óleos e graxas.....	68

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira de biogás e biometano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácido Graxo Volátil
AOV	Ácido Orgânico Volátil
APHA	American Public Health Association
C	Carbono
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DA	Digestão anaeróbia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gt	Gigatonelada
H	Hidrogênio
HFC	Hidrofluorcarboneto
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
LABOSAN	Laboratório de Saneamento Ambiental
LARSE	Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes
LQ	Limite de Quantificação da Amostra
N	Nitrogênio
NF ₃	Trifluoreto de Nitrogênio
NH ₃	Amoniaco
NH ₄	Amônio
N ₂ O	Óxido Nitroso
O	Oxigênio
O & G	Óleos e Graxas
PFC	Composto Perfluorado
S	Enxofre

SF6	Hexafluoreto de Enxofre
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ST	Sólidos totais
SF	Sólidos fixos
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
UFC	Universidade Federal do Ceará
VMP	Valor Máximo Permitido

LISTA DE SÍMBOLOS

Eq	Equação
G	Gramas
L	Litro
ml	Mililitro
mg	Miligramas
V	Volume da amostra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo Geral.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Impacto Climáticos.....	20
3.1.1 Industrialização.....	20
3.1.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa.....	20
3.1.3 Mudanças Climáticas.....	21
3.1.4 Descarbonização.....	22
3.2 Indústria Oleoquímica.....	23
3.2.1 Contextualização.....	23
3.2.2 Composição dos Óleos e Gorduras Vegetais.....	23
3.2.3 Refino de Óleo Vegetal.....	24
3.2.3.1 Degomagem ou Hidratação.....	25
3.2.3.2 Neutralização ou Desacidificação.....	26
3.2.3.3 Branqueamento ou Clarificação.....	27
3.2.3.4 Desodorização.....	29
3.2.3.5 Resíduos Industriais.....	29
3.3 Digestão Anaeróbia.....	30
3.3.1 Processo de Biodigestão.....	30
3.3.2 Fases da Digestão Anaeróbia.....	32
3.3.2.1 Hidrólise.....	32
3.3.2.2 Acidogênese.....	33
3.3.2.3 Acetogênese.....	33
3.3.2.4 Metanogênese.....	33
3.3.3 Principais Substratos.....	34
3.3.4 Qualidade do Substrato.....	35
3.3.5 Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia.....	37
3.3.5.1 Oxigênio.....	38
3.3.5.2 Temperatura.....	38
3.3.5.3 pH - Acidez ou Alcalinidade.....	38

3.3.5.4 Concentração de C/N e Nutrientes.....	39
3.3.5.5 Teor de sólidos e carga orgânica aplicada.....	40
3.3.5.6 Pré - Tratamento.....	41
3.3.5.7 Presença de inibidores.....	41
3.3.6 Biodigestor.....	43
3.4 Biogás.....	45
3.4.1 Aspectos ambientais e econômicos.....	45
3.4.2 Origem.....	46
3.4.3 Potencial de Produção.....	48
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1 Contextualização.....	51
4.2 Fluxograma de Trabalho.....	51
4.3 Determinação dos Resíduos Industriais.....	52
4.4 Origem dos Resíduos Gordurosos.....	52
4.4.1 Resíduo de Terra.....	53
4.4.2 Resíduo Gorduroso ETE.....	53
4.4.3 Resíduo do Decantador.....	53
4.5 Coleta da Amostra dos Resíduos.....	53
4.6 Caracterizações.....	55
4.6.1 Método Analítico para Classificação de Resíduo.....	55
4.6.2 Método Analítico para Caracterização do Substrato.....	56
4.6.2.1 Série de Sólidos.....	57
4.6.3 Determinação de Óleos e Graxas.....	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1 Classificação dos Resíduos.....	59
5.1.1 Resíduo de Terra.....	59
5.1.2 Resíduo Gorduroso ETE.....	61
5.2 Cálculo Série de Sólidos.....	64
5.3 Óleos e Graxas.....	68
6 CONCLUSÃO.....	69
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade urgente de reduzir as emissões de GEE têm impulsionado a adoção de práticas mais sustentáveis. Dentro desse contexto, a implementação de soluções que contribuem para a descarbonização e a redução dos impactos ambientais tem se tornado cada vez mais essencial para os setores industriais. A produção de biogás a partir da DA surge como alternativa para a valorização de resíduos e para a promoção da sustentabilidade industrial. O biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), é uma fonte renovável de energia que pode ser utilizado para geração de eletricidade, aquecimento e como substituto de combustíveis fósseis em diversas aplicações. Além disso, o processo de DA contribui para a mitigação das emissões de GEE ao reduzir a liberação de metano através do controle da sua produção, oferecendo uma estratégia eficiente para a descarbonização de processos industriais.

Nesse sentido, a indústria de refino de óleo vegetal, que desempenha um papel central na produção de margarina e outros derivados alimentícios, gera grande quantidade de resíduos oleosos de processo. Esses resíduos, se não tratados de forma adequada, podem resultar em impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e da água, visto que o processo de refino de óleo vegetal envolve diversas etapas, como desodorização, neutralização, branqueamento e interesterificação, que geram resíduos como: (i) resíduo do decantador, composto por óleos e gorduras residuais de perdas no processamento e lavagem de óleos vegetais; (ii) resíduo gorduroso ETE, que contém frações orgânicas provenientes do tratamento dos efluentes; e (iii) resíduo de terra, originado do processo de branqueamento, utilizado para remoção de impurezas e odores do óleo.

A valorização desses resíduos por meio da DA é uma estratégia que pode transformar passivos ambientais em recursos, contribuindo para a redução das emissões de GEE e promovendo práticas industriais mais sustentáveis. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da conversão desses resíduos em biogás e investigar o seu potencial para colaborar com os esforços de descarbonização da indústria de refino de óleos vegetais. Os resíduos foram caracterizados quanto à classificação conforme a ABNT NBR 10004:2004, quanto à série de sólidos, incluindo sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) e quanto à presença de óleos e graxas (O&G), conforme os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* da APHA (2017).

O estudo foi realizado com o apoio dos laboratórios da Universidade Federal do Ceará (UFC), que possibilitaram a análise físico-química das amostras de resíduos e a determinação de sua biodegradabilidade quanto ao potencial energético para a produção de biogás. Com base nestas análises, a pesquisa caracteriza os resíduos a nível de substrato para DA, favorecendo a promoção da economia circular dentro da indústria de refino de óleo vegetal e oferecendo uma alternativa sustentável para a destinação desses resíduos. Consequentemente, a valorização dos resíduos oleosos, por meio da DA, representa uma solução estratégica para a gestão de resíduos na indústria, ao mesmo tempo em que contribui para a redução das emissões de GEE e a implementação de práticas industriais mais sustentáveis. Essa estratégia não só ajuda a mitigar os impactos ambientais da indústria, mas também oferece uma oportunidade de transformação de resíduos em recursos energéticos, alinhando-se aos princípios da economia circular e aos objetivos de sustentabilidade na indústria.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos gordurosos provenientes do processo de refino de óleos vegetais para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia, contribuindo para a valorização desses resíduos e a descarbonização da indústria.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar físico-quimicamente os resíduos gordurosos, avaliando parâmetros como série de sólidos e teor de óleos e graxas.
- Classificar os resíduos de acordo com a norma NBR 10004:2004, verificando sua periculosidade.
- Avaliar a viabilidade dos resíduos como substratos para digestão anaeróbia, considerando sua biodegradabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Impactos Climáticos

3.1.1 Industrialização

As preocupações com as mudanças climáticas e a indústria surgiram a partir de avanços científicos que identificaram a relação entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o aquecimento global, ganhando força conforme os impactos ambientais e climáticos se tornaram evidentes, algo que começou a ser discutido no final do século XIX e ganhou força ao longo do século XX. Hodiernamente, a transição para uma economia de baixo carbono é um dos maiores desafios globais, especialmente para setores industriais altamente emissores.

O físico francês Joseph Fourier (1824) foi um dos primeiros a descrever o efeito estufa natural, identificando como a atmosfera retém calor. O cientista sueco Svante Arrhenius (1896) sugeriu que o aumento das concentrações de CO₂, devido à queima de carvão, poderia aquecer o planeta, relacionado pela primeira vez as atividades industriais às mudanças climáticas (FOURIER, 1824; ARRHENIUS, 1896).

A medição do CO₂ atmosférico por Charles David Keeling (1958) demonstrou um aumento constante das concentrações de gases de efeito estufa (KEELING, 1960). Após a Segunda Guerra Mundial, o crescimento industrial acelerado foi associado ao aumento das temperaturas globais. O Relatório Brundtland (1987) introduziu o conceito de desenvolvimento sustentável, reconhecendo a relação entre o crescimento industrial e as mudanças climáticas (WCED, 1987). Posteriormente, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), criado em 1988, identificou a indústria como uma das principais fontes de emissões de GEE IPCC (2023). Acordos como o Protocolo de Quioto (1997) e o Acordo de Paris (2015) estabeleceram metas globais para limitar as emissões industriais.

Nesse sentido, as iniciativas para mitigar as emissões industriais têm se voltado para a otimização do uso de energia e materiais, adoção de novos processos produtivos,

eletrificação das operações e substituição de combustíveis por alternativas de menor impacto ambiental (CNI, 2023).

3.1.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa

Os principais GEE são CO₂, CH₄, N₂O e gases fluorados HFCs, PFCs, SF₆ e NF₃ que são oriundos, principalmente, de atividades humanas como queima de combustíveis fósseis, desmatamento, processos industriais e decomposição de resíduos, sendo responsáveis pelo aumento exorbitante do aquecimento global (IPCC, 2023).

Estando o Brasil em quinto lugar como maior emissor de CH₄ do mundo, onde cada tonelada de CH₄ tem 28 vezes mais potencial de elevar a temperatura do planeta em cem anos do que uma tonelada de CO₂ (OBSCLIMA, 2022).

Ainda segundo OBSCLIMA (2022), as emissões de metano totalizaram 3,17 milhões de toneladas no setor de resíduos em 2020. Estando a distribuição das emissões relacionadas:

- Disposição final de resíduos sólidos: equivale a 66,6% do total emitido.
- Tratamento de efluentes líquidos domésticos: equivale a 26% do total emitido.
- Tratamento de efluentes líquidos industriais: 6,2% do total emitido.
- Incineração e/ou queima a céu aberto: 1,2% do total emitido.
- Tratamento biológico de resíduos sólidos 0,04% do total emitido.

A adoção de soluções sustentáveis como geração de biogás controlado a partir de biodigestores tem se mostrado promissor para tratar o resíduos a partir da degradação biológica e captura dos gases gerados, sobretudo, o CH₄ para aproveitamento como fonte de energia (MENEZES et al., 2023).

3.1.3 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas são um dos desafios mais urgentes da atualidade e estão diretamente relacionadas ao aumento dos GEE (MENEZES et al., 2023). Segundo IPCC (2023), as emissões líquidas globais de GEE antropogênicas atingiram $59 \pm 6,6$ GtCO₂-eq em

2019, representando um aumento de 12% em relação a 2010 e 54% em relação a 1990. Desse total, a maior parcela provém de CO₂ gerado pela combustão de combustíveis fósseis e processos industriais CO₂, seguido pelo metano CH₄ e gases fluorados, destacando a relevância dos setores de energia, transporte, indústria e edificações, responsáveis por cerca de 79% das emissões globais.

Nesse sentido, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), elucidam os compromissos para o desenvolvimento de uma sociedade preocupada com o futuro das próximas gerações. Aderir ao Pacto Global da ONU representa o compromisso por parte de diversas empresas em pôr em prática ações vinculadas aos 17 ODS existentes. O ODS 12, que visa assegurar padrões de consumo e produção sustentáveis, incentiva o reaproveitamento de resíduos industriais e a transição para processos mais eficientes. Além disso, o ODS 13, relacionado à ação climática, destaca a necessidade de integrar medidas de descarbonização no planejamento corporativo (SOARES et al., 2022). A transição para modelos de economia circular é imprescindível para reduzir emissões e garantir a sustentabilidade das cadeias produtivas industriais, conforme ONU (2023). Acrescenta-se que é crucial que indústrias invistam em tecnologias limpas para limitar o aquecimento global a 1,5°C (IPCC, 2023).

Os critérios Environment (Ambiente), Social (Social) e Governance (Governança) ESG reforçam essa abordagem ao priorizar a sustentabilidade como eixo central da governança corporativa. Empresas que adotam práticas alinhadas ao ESG não apenas reduzem riscos ambientais e regulatórios, mas também fortalecem sua reputação no mercado. Como destaca a Global Reporting Initiative GRI (2023), a transparência em metas e ações sustentáveis é fundamental para demonstrar o compromisso com a redução de emissões e a mitigação dos impactos climáticos.

3.1.4 Descarbonização

Conforme Batista et al. (2023), a descarbonização consiste na diminuição da liberação de carbono na atmosfera, principalmente na forma de CO₂ com propósito de viabilizar uma economia com emissões mais baixas, contribuindo para a neutralidade climática por meio da transição energética.

Complementar a isto, a descarbonização é uma peça central na agenda climática global, estando intimamente relacionada à transição para uma economia de baixo carbono, ao

uso de tecnologias limpas, à eficiência energética e à adoção de fontes de energia renováveis. Na economia e indústria, o conceito foi expandido para descrever a transição energética em setores específicos, como energia, transporte e indústria, por meio da substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis e mais limpas (ABIOPÁS, 2022).

3.2 Indústria Oleoquímica

3.2.1 Contextualização

A previsão é de que o uso de óleos vegetais para alimentação represente 55% do consumo total do planeta em 2033, impulsionado pelo crescimento populacional e pelo aumento do uso per capita em países de baixa e média renda, onde a produção mundial inclui óleos extraídos de oleaginosas, como soja e palma, estando perdas e desperdícios atreladas a todas as etapas de obtenção e utilização deste material (OECD; FAO, 2024). No Brasil, predomina a produção do óleo de soja, seguido do óleo de palma (polpa) e algodão (VIEIRA, 2023).

3.2.2 Composição dos Óleos e Gorduras Vegetais

Óleos e gorduras fazem parte dos lipídios e possuem como principal composição os triglicerídeos que são resultado da condensação do glicerol e ácido graxo, onde as gorduras são constituídas por mistura de triglicerídeos apresentando assim maiores saturações molecular (OLIVEIRA et al., 2021).

Os lipídeos são substâncias químicas caracterizadas por sua hidrofobicidade que representa a incapacidade de se dissolverem em água. Exemplos incluem ácidos graxos, esterois, ceras e carotenoides, que possuem cadeias orgânicas longas, compostas por átomos de carbono e hidrogênio ou grupos funcionais com heteroátomos, como álcoois e ésteres. Entre os lipídeos, óleos e gorduras desempenharam um papel fundamental na história da humanidade, sendo utilizados desde as civilizações antigas como combustível para iluminação, lubrificante e na produção de sabões e tintas, tanto em sua forma natural quanto modificada quimicamente (VIEIRA, 2023).

A distinção entre ambos está relacionada ao estado físico à temperatura de 25°C, onde os óleos permanecem na forma líquida, enquanto as gorduras apresentam consistência sólida ou pastosa (ANVISA, 2022). Quanto à tipologia, a classificação dos óleos é feita com

base na composição de seus ácidos graxos. Dentre os principais, destacam-se o ácido palmítico, oleico e linoleico, podendo também conter, em menor proporção, ácido esteárico e linolênico (OLIVEIRA et al., 2021).

Quanto aos ácidos graxos, estes podem ser encontrados tanto na forma livre quanto combinada, sendo que, nesta última, aparecem predominantemente como monoacilglicerídeos, diacilglicerídeos e triacilglicerídeos, que são seus principais constituintes. Além disso, os fosfatídeos também representam uma forma importante de ácidos graxos combinados, resultantes da substituição de um ácido graxo por um grupo fosfato. Devido à grande diversidade de ácidos graxos presentes nos óleos e gorduras, sua composição química costuma ser expressa com base nos tipos de ácidos graxos encontrados, e não nos compostos individuais que formam a mistura (RAMALHO; SUAREZ, 2013).

3.2.3 Refino de Óleo Vegetal

O refino de óleos vegetais é entendido como um conjunto de processos físicos e químicos que objetivam transformar óleos brutos em óleos comestíveis oriundo de processos de extração (solvente, prensa ou combinados), removendo componentes indesejáveis com o mínimo impacto no óleo e minimizando a perda de óleo (TIRITAN et al., 2020).

Nos processos físicos, utiliza-se destilação a vapor por ser mais econômico e gera menos resíduos, contudo, esse processo é limitado a óleos com maior acidez e pode afetar óleos mais sensíveis. No refino químico, remove-se compostos indesejáveis por neutralização alcalina e gera-se mais resíduos e custos, além de eliminar compostos bioativos. (VIEIRA, 2023).

Quanto à compostos indesejáveis, óleos brutos contém impurezas como ácidos graxos, mono e diglicerídeos, pigmentos, metais, tocoferois, esterois, fosfatídeos, ceras, resíduos de farelo, proteínas, açúcares, amido, pesticidas, micotoxinas, umidade e sujeira (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015). Tiritan et al. (2020) e Nunes (2013), reiteram que o refino busca melhorar o odor, qualidade e aparência do óleo através da remoção de componentes como:

- Substâncias coloidais, proteínas, fosfolipídios e produtos de sua decomposição;
- Ácidos graxos livres e seus sais, ácidos graxos oxidados, lactonas, acetais e polímeros;

- Corantes tais como clorofila, xantofila, carotenóides;
- Substâncias voláteis como hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular;
- Substâncias inorgânicas a exemplo dos sais de cálcio e de outros metais, silicatos, fosfatos e outros.

No intuito de atingir estes objetivos, o processo de refino de óleos vegetais para torná-lo próprio para consumo inclui: degomagem, neutralização, clarificação e desodorização, conforme Instrução Normativa nº 49 MAPA (2006).

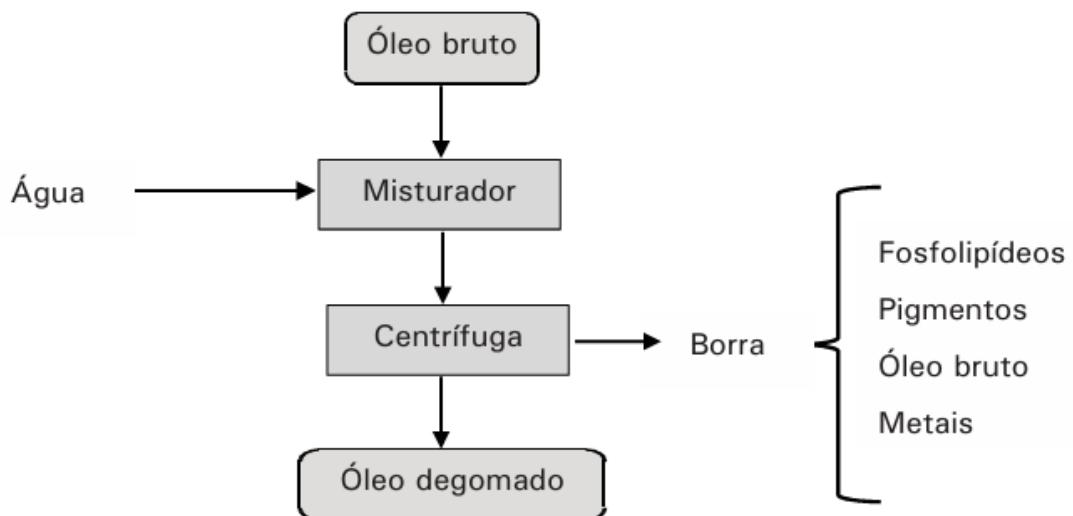
3.2.3.1 Degomagem ou Hidratação

A degomagem, também conhecida por hidratação, é a primeira etapa de refino do óleo bruto, onde retiram-se substâncias indesejáveis como proteínas, substâncias coloidais e fosfatídeos, dentre eles a lecitina que possui valor comercial. Estas duas últimas substâncias citadas, conhecidas também como “gomas”, são facilmente hidratáveis se tornando insolúveis, o que possibilita a remoção (OLIVEIRA et al., 2021).

Os principais processos existentes para a degomagem de óleos brutos são a degomagem com água e a degomagem ácida (OLIVEIRA et al., 2021). O método mais comum consiste em adicionar de 1% a 3% de água ao óleo aquecido a 60-70 °C por 20 a 30 minutos, seguido de centrifugação. As gomas formadas são secas a vácuo e a lecitina comercial extraída contém cerca de 60% de fosfatídeos. A degomagem também pode ser feita de forma contínua ou com ácido fosfórico, que remove até 90% dos fosfatídeos, mas resulta em lecitina impura (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015). O esquema simplificado de degomagem é apresentado na Figura 1 .

Para gomas não hidratadas, realiza-se a degomagem ácida, onde complexos metal/fosfolipídios são separados através de ácidos em sais metálicos insolúveis em óleo e ácido fosfatídico. Óleos de palma, coco, palmiste e oliva pertencem a essa categoria de forma que devem ser degomados com ácido e lavados de para serem processados economicamente no estágio posterior ao branqueamento de forma a influenciar na redução em até 30% do uso de terra de branqueamento ou terra clarificante (JORGE, 2009).

Figura 1 – Degomagem de óleo bruto.



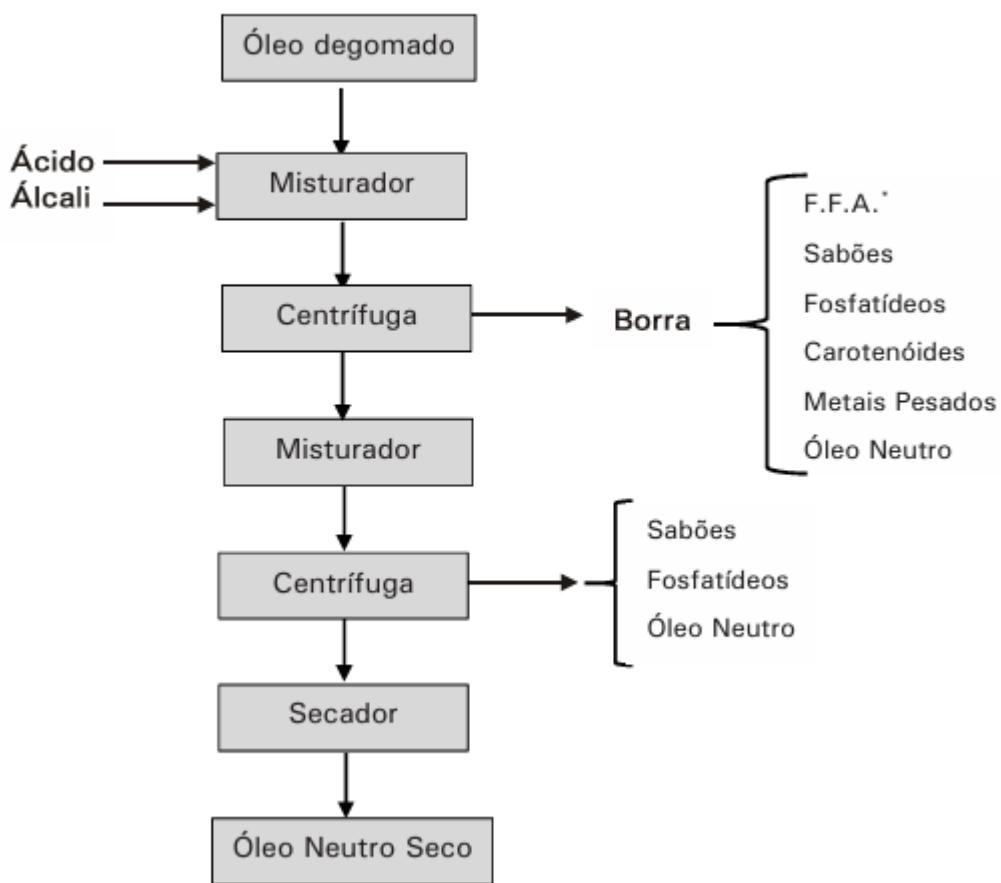
Fonte: (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015).

3.2.3.2 Neutralização ou Desacidificação

A segunda etapa, denominada neutralização, busca remover impurezas solúveis como proteínas, ácidos graxos oxidados e produtos resultantes da decomposição de glicerídeos, a partir da dispersão de solução alcalina no óleo. Para isto, existem dois métodos principais de neutralização: o descontínuo, mais antigo, e o contínuo, mais moderno de forma que a concentração da solução alcalina e as condições do processo variam conforme o teor de ácidos graxos livres no óleo bruto (VIEIRA, 2023). O processo descontínuo é raramente utilizado no Brasil e é mais comum em indústrias de pequeno porte (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015).

Já a neutralização cáustica é feita tratando o óleo degomado com hidróxido de sódio diluído, em processos contínuos, semicontínuos ou em bateladas. Esta etapa remove o ácido fosfórico remanescente, formando sabões com ácidos graxos livres e impurezas não glicídicas. Esses sabões, ou borra, podem ser separados por sedimentação ou centrifugação (JORGE, 2009). Na Figura 2 é possível entender de forma simplificada o processo.

Figura 2 – Neutralização do óleo degomado.



Fonte: (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015).

3.2.3.3 Branqueamento ou Clarificação

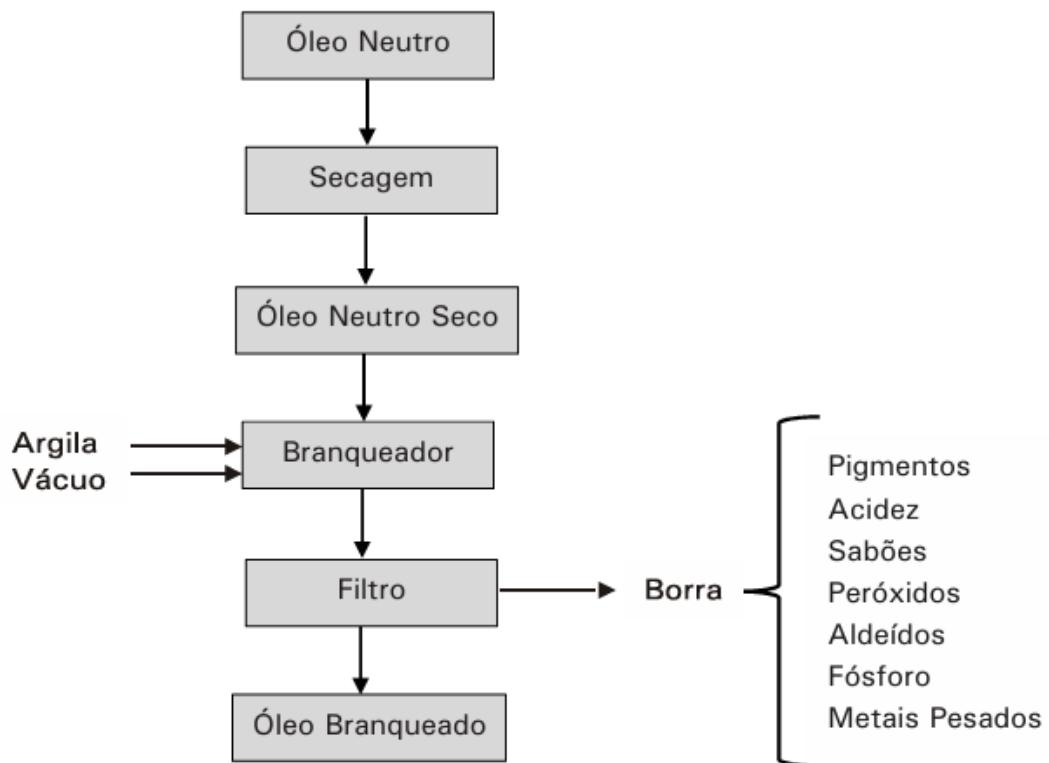
O branqueamento, também conhecido como etapa de clarificação do óleo, é um processo de adsorção que remove substâncias coloridas e impurezas. Apesar das etapas anteriores de refino contribuírem para remoção considerável de quantidades de pigmentos do óleo, o branqueamento possibilita tornar o óleo incolor, o que é uma exigência no mercado oleoquímico (VIEIRA, 2023).

Conforme Mandarino, Hirakuri e Roessing (2015), a obtenção de óleos praticamente incolores é possível através da adição terras clarificantes, ativadas ou naturais, misturadas, às vezes, com carvão ativado, em proporções que variam de 10:1 a 20:1 p/p de terras clarificantes: carvão ativado. Destaca-se que para JORGE (2009), para uma clarificação de óleo de soja efetiva, o ideal é a utilização de terra clarificante ativada para retirada de impurezas críticas como átomos de alumínio, ferro e magnésio mediante tratamento com ácido mineral.

O óleo neutralizado e degomado ainda contém umidade, sendo necessário o aquecimento do óleo antes da mistura com a terra clarificante, sendo posteriormente filtrada em filtros-prensa. No Brasil, esse processo é geralmente descontínuo, mas algumas indústrias utilizam a forma contínua, onde a terra clarificante é introduzida como uma suspensão a 10%. O resíduo formado nesse processo, conhecido como “bolo”, é coletado nos filtros-prensa contendo aproximadamente 50% de óleo (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015). Para Vieira (2023), este resíduo formado contém cerca de 35% de óleo tratado, sendo usualmente introduzido ao solo como descarte limpo.

O processo de clarificação do óleo pode ser resumido em: mistura da quantidade requerida de adsorvente com a de óleo, secagem e desaeração da mistura óleo/adsorvente, aquecimento da mistura à temperatura de clarificação, manutenção da determinação tempo de contato óleo/adsorvente à temperatura de clarificação, resfriamento da mistura e separação do adsorvente do óleo por filtração (VIEIRA, 2023). Na Figura 3 observa-se o esquema simplificado disto.

Figura 3 – Branqueamento do óleo neutro seco.



Fonte: (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015).

3.2.3.4 Desodorização

A desodorização é a última etapa de refino de óleo vegetal e é constituída de quatro etapas básicas: desaeração, aquecimento, retenção e resfriamento, tendo como base a destilação de componentes voláteis por arraste de vapor e sob pressão reduzida visando a remoção de sabores e odores indesejáveis no óleo. As variáveis de processo chave são: pressão, temperatura, tempo e vapor (Tiritan et al., 2020).

Durante esta etapa, são removidas substâncias ainda presentes no óleo como peróxidos, aldeídos, cetonas, álcoois, hidrocarbonetos e pigmentos, como carotenóides, ácidos graxos livres e resíduos de pesticidas organoclorados absorvidos pelo óleo durante a extração (RODRIGUEZ, 2014).

Este processo ocorre em alta temperatura e baixa pressão, acelerando a destilação, protegendo contra a oxidação e evitando a hidrólise. Substâncias não saponificáveis, que não foram eliminadas na neutralização, são removidas nessa etapa, junto com parte dos ácidos graxos livres. A redução desses ácidos entre as etapas indica a eliminação eficiente dos voláteis, que são mais facilmente removidos sob as mesmas condições de tratamento (JORGE, 2009).

3.2.3.5 Resíduos Industriais

A capacidade de processamento da indústria de óleos vegetais no Brasil está estimada em 219.067 toneladas por dia, o que resulta em uma capacidade anual de aproximadamente 72,3 milhões de toneladas, representando um crescimento de 4,5% em relação a 2023 (ABIOVE, 2024).

Acrescenta-se que esta indústria opera em grande escala, utilizando matéria-prima proveniente de diversas safras, com variação na frescura e composição. Isso resulta na presença de componentes essenciais, impurezas e resíduos (VAISALI et al., 2015).

Os resíduos industriais são classificados de acordo com normas e legislações ambientais que consideram aspectos como origem, riscos e composição. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a norma ABNT NBR 10.004/2004 estabelecem diretrizes para essa categorização, em que a origem dos resíduos industriais é um dos critérios

de classificação, abrangendo setores como o químico, petroquímico, metalúrgico, alimentício, têxtil e de papel e celulose, cada um gerando diferentes tipos de resíduos. A identificação adequada dos resíduos industriais é fundamental para determinar as estratégias de tratamento e descarte, assegurando a conformidade com as regulamentações ambientais e minimizando riscos ecológicos e sanitários.

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 10.004/2004, os resíduos são divididos em perigosos (Classe I), quando apresentam características como inflamabilidade, toxicidade ou corrosividade, e não perigosos (Classe II), que podem ser subdivididos em não inertes (Classe II A), quando sofrem degradação ao longo do tempo, e inertes (Classe II B), quando permanecem estáveis sem causar impactos ambientais significativos.

De acordo com Cirne et al. (2007), resíduos industriais podem representar desafios ambientais devido ao alto teor de lipídios e matéria orgânica, tornando necessária a adoção de estratégias de tratamento e reaproveitamento. Entre as alternativas viáveis para a destinação desses resíduos, a digestão anaeróbica tem sido amplamente estudada devido ao seu potencial para geração de biogás. Para Ahiring (2004), o processo anaeróbio converte matéria orgânica em biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, proporcionando uma alternativa sustentável para o tratamento e aproveitamento energético de resíduos industriais.

Segundo OBSCLIMA (2022), as soluções com maior potencial de redução de resíduos são:

- Redução e eliminação da disposição em aterros sanitários de resíduos orgânicos;
- Ampliação e promoção a recuperação de energética e queima do gás de aterro sanitário;
- Diversificação das rotas de tratamentos de resíduos sólidos, ampliando taxas de tratamento biológico;

3.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

3.3.1 Processo de Biodigestão

A digestão anaeróbia é um processo biológico no qual microrganismos degradam matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás e digestato. O biogás gerado é composto principalmente por CH₄ e CO₂. Em menor proporção, podem estar presentes gases como vapor d'água, oxigênio, hidrogênio, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, nitrogênio e amônia (DEODATO, 2019).

A digestão, além de ser uma abordagem eficaz para o tratamento de resíduos orgânicos, é considerada uma tecnologia promissora para diminuir a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a geração de energia com menor impacto ambiental (SCHIEVANO; D'IMPORZANO; ADANI, 2009). Acrescenta-se que para Milanez et al. (2018), a quebra biológica de material orgânico na ausência de oxigênio é o principal método de produção de biogás. Para Cruz e Camporez (2023), a DA dos resíduos gera uma significativa fonte de energia renovável, ao mesmo tempo em que favorece a reutilização de nutrientes, ajudando a diminuir os impactos ambientais associados à gestão desses materiais.

Vale ressaltar que existe possibilidade de co-digestão com diferentes resíduos, visando uma maior estabilidade do processo biológico (FNR, 2010). A co-digestão envolve a degradação simultânea de dois ou mais substratos, trazendo benefícios tanto para a digestão anaeróbia quanto para a viabilidade econômica do processo. A combinação de diferentes resíduos melhora a produção de metano ao equilibrar a relação C:N:P e suprir minerais essenciais, além de reduzir efeitos inibidores ou tóxicos que poderiam ocorrer na digestão de um único substrato (ALVES, 2016).

Segundo Cabral et al. (2015), os principais compostos orgânicos com potencial energético são os carboidratos, as proteínas e as gorduras. Por meio da digestão anaeróbica completa, esses compostos são convertidos em biogás, sendo o metano o principal gás gerado. O potencial de produção de biogás de um substrato aumenta conforme a proporção de matéria orgânica em relação aos sólidos totais.

Resíduos ricos em lipídios são gerados em grande quantidade anualmente por diversas indústrias, como a de processamento de alimentos, matadouros, óleos comestíveis, laticínios e lagares de azeite, sendo estes últimos particularmente relevantes em países mediterrâneos. Embora os lipídios estejam frequentemente presentes nesses resíduos, eles representam um dos componentes mais problemáticos, pois podem causar entupimento e dificultar a transferência de massa nos biodigestores anaeróbios, além de favorecer a

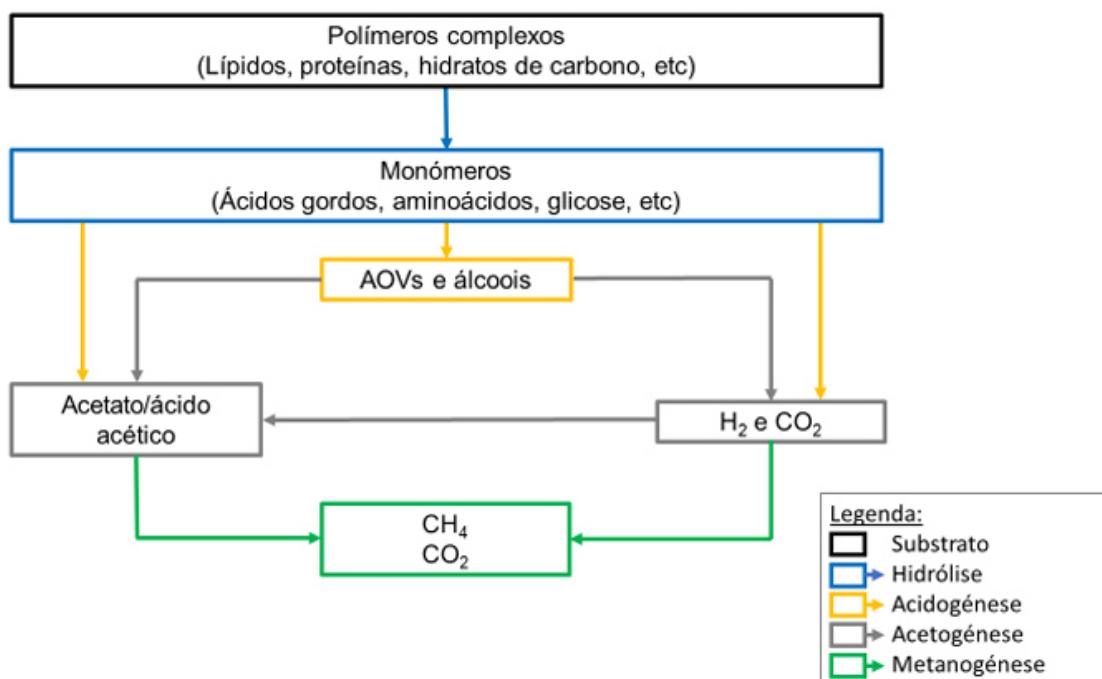
flutuação e perda de biomassa ativa. Essas dificuldades reduzem a eficiência operacional dos biodigestores, exigindo um pré-tratamento físico-químico para a remoção da fração lipídica antes da digestão anaeróbia (CIRNE et al., 2007).

A digestão promove tanto o reaproveitamento quanto a redução dos resíduos industriais de forma a fornecer principalmente o biogás, um combustível renovável que pode ser aproveitado para produzir calor e eletricidade. Essa tecnologia fornece uma abordagem sustentável para utilização de biomassa para convertimento em energia de forma a contribuir para descarbonização (KUNZ; STEINMETZ; DO AMARAL, 2022).

3.3.2 Fases da Digestão Anaeróbia

O processo de formação do biogás através da digestão anaeróbia se divide em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, na qual a geração do biogás ocorre na última etapa do processo (DEODATO, 2019). O processo está simplificado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama geral da digestão anaeróbia.



Fonte: Deodato (2019).

3.3.2.1 Hidrólise

Conforme Cruz e Camporez (2023), a hidrólise é a primeira fase do processo de degradação anaeróbia que resulta na formação de compostos dissolvidos, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos oriundos da conversão de polímeros complexos, tais como lipídios, proteínas e polissacáridos.

A relevância da hidrólise na taxa de degradação depende diretamente das características do substrato. Quando a matéria orgânica é complexa e difícil de degradar, a hidrólise exerce um papel determinante na velocidade global do processo, podendo ser considerada a etapa limitante da digestão. A duração dessa etapa varia conforme o tipo de substrato: para carboidratos, pode levar poucas horas, enquanto para proteínas e lipídios, o tempo pode se estender por dias (KUNZ et al, 2022).

Deodato (2019) reitera que esse processo pode restringir a eficiência geral da digestão anaeróbia, principalmente quando o substrato contém compostos como celulose, proteínas, lignina e lipídios.

3.3.2.2 Acidogênese

Nesta etapa, os monômeros gerados na hidrólise são degradados por bactérias acidogênicas a ácidos orgânicos de cadeia curta com moléculas de até cinco carbono como ácidos butírico, propiônico e acético, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono (FRN, 2010).

Esta degradação dos produtos da hidrólise é caracterizada pela acidificação do processo devido a formação de Ácidos Orgânicos Voláteis (AOVs) como ácido acético, ácido propanóico e ácido butírico (DEODATO, 2019).

3.3.2.3 Acetogênese

Na etapa de acetogênese, os produtos formados na etapa acidogênica são oxidados, originando substratos adequados para a ação dos microrganismos metanogênicos, que são fundamentais na formação do biogás. Durante este processo, ocorre a degradação de ácidos graxos e álcoois, resultando na produção de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (CRUZ e CAMPOREZ, 2023). A fase acetogênica é um fator limitante para a taxa de degradação na etapa final Deublein e Steinhauser (2011).

3.3.2.4 Metanogênese

A metanogênese refere-se à quarta e última fase do processo de degradação anaeróbia que ocorre em um ambiente totalmente anaeróbio, onde o carbono presente na biomassa é convertido em metano e dióxido de carbono pela ação de arqueas metanogênicas (FNR, 2010).

O processo de metanogênese é exotérmico e pode ocorrer por duas vias metabólicas principais: a acetoclástica, em que o acetato é convertido em metano, e a hidrogenotrófica, onde o metano é formado a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Fatores como o pH e a concentração de amônia podem favorecer o predomínio das arqueas hidrogenotróficas (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015).

3.3.3 Principais Substratos

De acordo com Cruz e Camperez (2023), em condições controladas, é possível otimizar as condições operacionais para acelerar a velocidade do processo e aumentar a eficiência de produção do biogás, haja vista que, se tratando de um meio reacional bioquímico, o tipo de substrato características do digestor e as condições de operação influencia na obtenção da mistura de gases que compõem o biogás.

De acordo com o *Guia do Biogás* (2022), CIBiogás (2022) e Instituto 17 (2021), os principais substratos utilizados para geração de biogás no Brasil são oriundos de três setores: agropecuária (suinocultura, bovinocultura e avicultura), agroindústria (frigorífico, laticínios, sucroenergética e indústria de alimentos e bebidas) e saneamento (fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e estação de tratamento de efluentes).

Conforme Deublein e Steinhauser (2011), todos os tipos de biomassa podem ser aproveitados como substratos, desde que contenham componentes principais como carboidratos, proteínas, gorduras, celulose e hemicelulose. Contudo, a seleção da biomassa deve considerar alguns aspectos importantes:

- O teor de substância orgânica deve ser compatível com o processo de digestão escolhido;
- A substância orgânica precisa apresentar um alto valor nutricional, maximizando o potencial de produção de gás;
- O substrato deve estar isento de patógenos ou organismos nocivos que demandam tratamento prévio à digestão;

- Deve conter níveis reduzidos de substâncias prejudiciais ou resíduos sólidos, garantindo a eficiência do processo digestivo.

Para Soares et al. (2022), ainda há uma grande oportunidade para utilização de resíduos da indústria de alimentos para produção de metano e biometano de forma que os resíduos da suinocultura e da indústria de alimentos e/ou bebidas somam 70% dos empregados na biodigestão. Na Figura 5 são listados os resíduos para produção de biogás.

Figura 5 – Resíduos usados na digestão anaeróbia.

Atividade Produtiva	Resíduos e Efluentes
Agricultura e Pecuária	Cascas, fezes, urina, palha e substratos utilizados no recobrimento de currais
Cervejarias	Bagaço de malte, restos de filtro e efluentes
Curtume	Resíduos das operações de descarne e divisão de tripa, licores de curtimento sem cromo e lodo de sistemas de tratamento
Indústrias farmacêuticas	Efluentes e resíduos com alto teor de substâncias biodegradáveis
Panificação	Efluentes da produção, resíduos da limpeza e lotes de produtos inadequados ao consumo
Produção de açúcar e etanol	Vinhaça, torta de filtro e bagaço
Produção de amidos e farinhas de cereais, mandioca, batatas	Efluentes e restos da produção
Produção de café e chás	Efluentes e biomassas geradas na separação e na filtração
Produção de carne e açougues	Efluentes, sangue, intestinos, carne não comercializável e gordura
Produção de celulose, papéis e cartonagens	Lodo da lixívia verde, lodo de branqueamento, rejeitos e lodos de fibras e outros efluentes da produção
Produção de conservas	Efluentes, resíduos e restos da produção
Produção de laticínios	Soro de leite, lotes estragados e resíduos dos separadores de gordura
Produção de leveduras, doces e outros produtos	Efluentes e resíduos da produção
Produção de óleos e margarinas	Efluentes, torta de filtro de gordura e outros resíduos da produção
Produção de refrigerantes	Efluentes e restos de produção
Produção de sucos e vinhos	Efluentes, lotes estragados e biomassas geradas na filtração
Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU)	Resíduos orgânicos sem contaminantes, separados na fonte, e resíduos orgânicos obtidos após triagem

Fonte: Soares et al. (2022).

3.3.4 Qualidade do Substrato

Conforme Kunz et al. (2022), para avaliar aspectos como as características de degradabilidade de substratos, são realizados ensaios laboratoriais em pequena escala, sob condições controladas e monitoradas. A análise da composição química e física dos resíduos é uma etapa essencial. Além disso, os ensaios biocinéticos têm grande relevância, pois permitem observar a interação real entre microrganismos e substratos.

Para Cruz e Camporez (2023), esses testes envolvem a medição da produção de biogás a partir de uma quantidade conhecida de biomassa ou matéria orgânica, expressa como Sólidos Voláteis (SV), Demanda Química de Oxigênio (DQO) ou Carbono Orgânico Total (COT), presente no inóculo ou no substrato.

A quantidade de sólidos em um substrato, englobando materiais orgânicos e inorgânicos, é um parâmetro crucial que determina a massa total destinada ao processamento. No contexto da DA, a decomposição biológica foca principalmente na fração orgânica do substrato. Consequentemente, um teor mais elevado de sólidos voláteis totais tende a aumentar a eficiência da bioconversão dos resíduos (CABRAL et al., 2015).

Proença (2022) reitera que, a biodegradação anaeróbia ocorre apenas na fração orgânica do substrato. Portanto, quanto maior for o teor de sólidos voláteis, maior será a eficiência na conversão da matéria orgânica.

Vale ressaltar que a presença de lipídios pode afetar a eficiência da digestão anaeróbica. Os lipídios são inicialmente hidrolisados em glicerol e ácidos graxos de cadeia longa, que podem inibir a atividade microbiana devido à formação de agregados gordurosos e à toxicidade para microrganismos específicos do processo (CIRNE et al., 2007).

Conforme FRN (2010), existe uma relação direta entre a quantidade de matéria orgânica presente no resíduo a ser tratado e no potencial de produção de biogás, de forma que o aumento da matéria, influencia na elevação do potencial de geração do gás.

Somado a isso, o substrato desempenha um papel fundamental na taxa de DA, sendo essencial para o funcionamento adequado da tecnologia e operação do processo. Quando um componente vital do substrato se esgota, o metabolismo dos microrganismos é interrompido. Além disso, dependendo da composição dos substratos, produtos intermediários gerados durante a decomposição podem agir como fatores limitantes ou inibidores da degradação. Por exemplo, a decomposição de gorduras pode resultar na

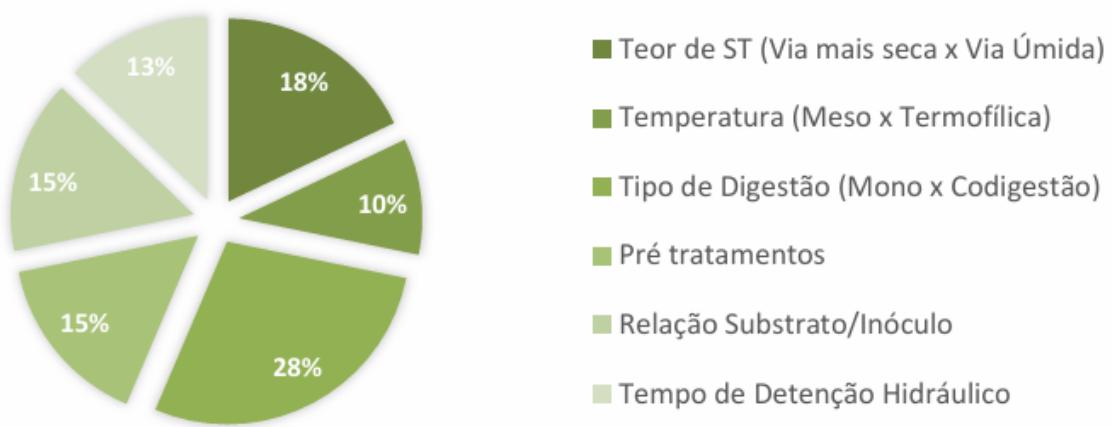
formação de ácidos graxos, que dificultam a degradação subsequente (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

Apesar dos desafios, resíduos ricos em lipídios apresentam alto potencial para geração de biogás, uma vez que possuem elevado rendimento energético em comparação a substratos baseados em carboidratos ou proteínas (SANDERS, 2001). Estudos demonstram que a adição controlada de resíduos lipídicos pode aumentar significativamente a produção de metano, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável (AHIRING, 2004).

3.3.5 Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia

Sampaio, Oliveira e Gonçalves (2021), discutem a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos com alto teor de sólidos, destacando as tendências e potencialidades desse processo a partir da seleção sistematizada de referências bibliográficas chamado PROKNOW-C, considerando um período de 2015 a 2018, que permitiu a quantificação das variáveis mais estudadas conforme Figura 6.

Figura 6 – Quantificação das variáveis mais estudadas.



Fonte: Sampaio, Oliveira e Gonçalves (2021)

Para Deodato (2019), vários parâmetros influenciam a taxa das reações nas diferentes fases do processo de DA em um ambiente anaeróbio. Destacam-se entre eles a presença de oxigênio, a temperatura, o pH, os nutrientes, o teor de sólidos, carga orgânica, além da toxicidade e da inibição provocada por certas substâncias químicas.

Acrescenta-se que, a produção de biogás por DA pode variar principalmente devido à qualidade do resíduo inserido no biodigestor, ao nível de diluição e ao tempo de detenção. No entanto, outros fatores também podem influenciar essas variações, como a inclusão de um substrato complementar (co-digestão) (HASAN; FEITOSA; DE ALMEIDA, 2019).

3.3.5.1 Oxigênio

Segundo Cabral et al. (2015), a presença de oxigênio em pequenas quantidades pode ser suficiente para prejudicar a sobrevivência da maioria das espécies de arqueias, mas é impossível impedir completamente sua entrada no biodigestor. Mesmo assim, as arqueias metanogênicas não são imediatamente inibidas ou paralisam sua atividade, pois convivem com bactérias aeróbias provenientes das etapas de degradação anteriores. Algumas bactérias anaeróbias facultativas conseguem sobreviver tanto em ambientes com ou sem oxigênio.

3.3.5.2 Temperatura

A temperatura é um fator crucial na DA, influenciando diretamente o crescimento microbiano e a eficiência na produção de biogás. Como os microrganismos não conseguem regular sua temperatura interna, dependem do ambiente externo para otimizar reações enzimáticas e a multiplicação celular. Para maximizar a geração de metano, é recomendado manter a temperatura entre 35°C e 37°C, já que temperaturas abaixo desse intervalo favorecem a produção de ácidos graxos e álcoois, o que pode reduzir o pH e interromper o processo (MAGALHÃES, 2018).

Para Deublein e Steinhauser (2011), a operação termofílica proporciona uma taxa de degradação cerca de 50% mais alta e, especialmente em materiais ricos em gordura, melhora a disponibilidade microbiana dos substratos, resultando em um aumento no rendimento de biogás. Segundo a Kunz et al. (2022), o aumento de temperatura influencia no aumento da solubilidade de compostos orgânicos, melhorando as velocidades de reações bioquímicas.

3.3.5.3 pH - Acidez ou Alcalinidade

O pH é um fator crucial para a atividade dos microrganismos metanogênicos, já que cada tipo de microrganismo tem uma faixa de pH ideal para seu crescimento. Estudos

indicam que um pH adequado pode aumentar a produção de metano pelas arqueias metanogênicas, enquanto valores muito abaixo ou acima do ideal podem causar distúrbios no sistema. Assim, a manutenção do pH é fundamental para o sucesso do processo, e em casos de instabilidade, a adição de substâncias alcalinas, como bicarbonato de sódio, pode ajudar a equilibrar o pH e evitar desequilíbrios microbianos (MAGALHÃES, 2018). Para Deublein e Steinhauser (2011), um ótimo pH para microrganismos formadores de metano está entre pH = 6,7 e 7,5.

3.3.5.4 Concentração de C/N e Nutrientes

Íons como enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato são indispensáveis para garantir a eficiência da biodigestão. No entanto, compostos sulfurados podem prejudicar o processo anaeróbio ao promoverem a precipitação de nutrientes traços, como ferro, níquel, cobre e molibdênio (KUNZ et al., 2022).

Ademais, íons de metais pesados, como Cu^{2+} e Zn^{2+} , assim como íons de metais alcalinos, alcalino-terrosos e amônio (NH_4^+), podem gerar efeitos inibitórios. Em muitos casos, essa toxicidade é reversível, pois os microrganismos anaeróbios apresentam um alto potencial de aclimatação quando dispõem de tempo suficiente (KUNZ et al., 2022).

Conforme Deublein e Steinhauser (2011), a proporção adequada entre macronutrientes e micronutrientes é essencial para a estabilidade do processo, após o carbono, o nitrogênio é o nutriente mais importante para a formação das enzimas responsáveis pelo metabolismo.

A relação correta entre carbono e nitrogênio (C/N) no substrato é crucial, pois uma relação C/N muito alta, com excesso de carbono e falta de nitrogênio, pode reduzir a atividade metabólica, impedindo a completa degradação do carbono e comprometendo o rendimento de metano. Por outro lado, uma razão C/N baixa pode resultar em altas concentrações de azoto, causando acúmulo de amoníaco (NH_3) e inibindo a metanogênese (DEODATO, 2019).

Acrescenta-se que uma quantidade excessiva de nitrogênio pode gerar amônia em níveis prejudiciais, inibindo o crescimento bacteriano e podendo até levar ao colapso da população microbiana. A recomendação é uma relação C/N deve estar na faixa de 10 a 30

(FNR, 2010). A Figura 7 apresenta as concentrações ideais de diversos nutrientes essenciais para o transporte de elétrons e a função de determinadas enzimas.

Figura 7 – Concentrações adequadas de micronutrientes conforme diferentes fontes bibliográficas.

Micro-nutriente	Faixa de concentração [mg/l]			
	conforme [2-18]	conforme [2-19]	conforme [2-16] ^a	conforme [2-17] ^b
Co	0,003-0,06	0,003-10	0,06	0,12
Ni	0,005-0,5	0,005-15	0,006	0,015
Se	0,08	0,08-0,2	0,008	0,018
Mo	0,005-0,05	0,005-0,2	0,05	0,15
Mn	N.E.	0,005-50	0,005-50	N.E.
Fe	1-10	0,1-10	1-10	N.E.

Fonte: FNR (2010)

3.3.5.5 Teor de sólidos e carga orgânica aplicada

A avaliação do teor de sólidos é fundamental para determinar a quantidade de matéria orgânica presente em um substrato com potencial para degradação por microorganismos. Esse teor é um fator-chave para a caracterização da matéria orgânica a ser biodigerida, pois está diretamente associado ao nível de umidade do substrato, influenciado pelo excesso ou falta de água. Quanto maior a porcentagem de matéria orgânica com relação aos sólidos totais, maior o potencial de produção de biogás de um substrato (SV/ST) (CABRAL et al., 2015).

Acrescenta-se que quanto maior a concentração de SV, maiores chances de produção de biogás de forma que a quantidade de sólidos voláteis objetiva identificar a quantidade de matéria biodegradável disponível no substrato para digestão anaeróbia, onde materiais com teores de SV acima de 80% apresentam perfil de alta biodegradabilidade (HASAN; FEITOSA; DE ALMEIDA, 2019).

Para Deodato (2019), o aumento do rendimento de biogás produzido está relacionada com a disponibilidade de Carga Orgânica Aplicada (COA) que tem como um dos principais parâmetros os SV. No entanto, a elevada concentração de SV aumenta também o risco de acumulação de AOVs e acidificação no digestor.

Segundo Apha (2017), existem nove frações diferentes de sólidos diferidos pelas característica de tamanho da partícula e volatilidade possíveis de serem quantificadas em uma amostra de substrato a ser biodigerida: sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis (SV), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos dissolvidos fixos (SDF) e sólidos dissolvidos voláteis (SDV).

3.3.5.6 Pré - Tratamento

Processos anaeróbios que trabalham com alto teor de sólidos relativos a presença de frações gordurosas no substratos estão sujeitos a processos de pré-tratamento para acelerar a etapa da hidrólise como os processos do tipo térmico, de extração de lipídeos, de pré-aeração, enzimático e físico (SAMPAIO, OLIVEIRA e GONÇALVES, 2021)

De forma complementar, a realização de pré-tratamentos possibilita que o substrato esteja mais acessível aos microrganismos anaeróbios e melhora a eficiência do processo ao influenciar na velocidade e no grau de degradação (AZEITONA, 2012).

3.3.5.7 Presença de inibidores

Para Deodato (2019), a inibição no processo anaeróbio está relacionada à concentração dos inibidores, à composição do substrato e à capacidade das bactérias de se adaptarem a esses inibidores.

Isto é reflexo do fato das bactérias anaeróbicas necessitarem de concentrações baixas desses compostos, tratando-os como elementos-traço, o que lhes permite degradar uma grande parte dos inibidores presentes (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

Quadro 1 – Concentrações inibidoras ou tóxicas de diferentes metais em solução no reator.

Substâncias	Quantidade mínima necessária como elemento traço [mg/L]	Parâmetros afetados	Concentração na qual a inibição começa [mg/L] (íons livres)	Concentração na qual a inibição começa [mg/L] (Como carbonato)	Toxicidade [mg/L] para microrganismos adotados
Cr (Cromo)	0,005–50	–	28–300	530	500
Fe (Ferro)	1–10	–	n.d.	1750	n.d.
Ni (Níquel)	0,005–0,5	–	10–300	n.d.	30–1000
Cu (Cobre)	Essencial para MO acetogênicos		5–300	170	170–300
Zn (Zinco)	Essencial para MO acetogênicos		3–400	160	250–600
Cd (Cádmio)	n.d.	–	70–600	180	20–600
Pb (Chumbo)	0,02–200	–	8–340	n.d.	340
Na (Sódio)	n.d.	pH – Wert	5000–30 000	n.d.	60 000
K (Potássio)	n.d.	Osmose dos formadores de metano	2500–5000	n.d.	n.d.
Ca (Cálcio)	n.d.	Ácidos graxos de cadeia longa	2500–7000	n.d.	n.d.
Mg (Magnésio)	Essencial para MO acetogênicos	Ácidos graxos	1000–2400	n.d.	n.d.
Co (Cobalto)	0,06	–	n.d.	n.d.	n.d.
Mo (Molibdênio)	0,05	–	n.d.	n.d.	n.d.
Se (Selênio)	0,008	–	n.d.	n.d.	n.d.
Mn (Manganês)	0,005–50	–	1500	n.d.	n.d.
HCN (Ácido cianídrico)	0,0	–	5–30	n.d.	n.d.
C ₆ H ₅ O (Fenol)	–	Inibe até que os microrganismos se adaptem. Depois é completamente degradado.	n.d.	n.d.	n.d.

Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).

É importante distinguir entre inibidores adicionados ao biodigestor através do substrato e aqueles formados durante a decomposição. O excesso de substrato também pode prejudicar o processo, já que substâncias em altas concentrações, como antibióticos, solventes, metais pesados e outros compostos, podem afetar negativamente a atividade bacteriana (FNR, 2010). A Figura 8 detalha a relação do inibidor com a concentração deste.

Figura 8 – Inibidores e sua concentração tóxica em processos de digestão anaeróbia.

Inibidor	Concentração de inibição	Observação
Oxigênio	> 0,1 mg/l	Inibição das arqueas metanogênicas anaeróbias obrigatórias.
Sulfeto de hidrogênio	> 50 mg/l H ₂ S	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório.
Ácidos graxos voláteis	> 2.000 mg/l HAc (pH = 7,0)	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias
Nitrogênio amoniacal	> 3.500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	Quanto maiores o pH e a temperatura, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias
Metais pesados	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Só metais dissolvidos apresentam efeito inibidor. Descontaminação pela precipitação de sulfeto.
Desinfetantes antibióticos	N.E.	Efeito inibitório varia com o composto.

Fonte: FNR (2010)

3.3.6 Biogestor

Biogestores são responsáveis pela conversão de biomassas residuais ou cultivadas em biogás e digestato com auxílio de microorganismos, em que, independentemente do modelo do biogestor (indiano e variação chinesa; modelo de lagoa coberta, UASB e CSTR), os principais parâmetros que devem ser controlados nos reatores são: pressão parcial de hidrogênio, temperatura, pH, alcalinidade, concentração de ácidos voláteis, nutrientes, nitrogênio amoniacal e amônia livre (SOARES et al., 2022)

Para Kunz et al. (2022), o modelo do biodigestor é um ponto central para um bom funcionamento da digestão anaeróbia. A Figura 9 ilustra pontos-chave para a escolha do biodigestor.

Figura 9 – Considerações para a escolha do biodigestor.

Tecnologia	Pontos-chave	Opções
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontínua para biodigestores de batelada Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato
Temperatura do reator	Risco para patógenos*	Temperatura mesofílicas quando não há risco de patógenos Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos (ex.: lixo orgânico doméstico)
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor

Fonte: Kunz et al. (2022)

Para Menezes (2023), os biodigestores podem ser agrupados em três principais aspectos (econômicos, financeiros, sociais e ambientais) conforme a Figura 10.

Figura 10 – Aspectos para enquadramento da escolha do biodigestor.

Dimensão	Benefícios	Referências
Econômica	Geração de Energia	Barichello et al, 2015; Calza et al, 2015; Garfi, Martí-Herrero, Garwood, e Ferrer, 2016; Gomes e Raiher, 2013; Marin, et al. 2016; Montoro, et al 2017; Montoro, et al 2013; Silva e Cirani, 2016; Sosa, Díaz, Cruz, e De La Fuente, 2014
	Produção de Biofertilizantes	Barichello, et al. 2015; Garfi, et al. 2016; Marin, et al. 2016; Montoro, et al. 2017; Montoro, et al. 2013; Silva e Cirani, 2016
	Redução de custos	Cabanillas, Tablada, Ferreyra, Perez, e Sucani, 2017; Calza, et al. 2015; Gomes e Raiher, 2013; Marin, et al. 2016; Montoro, et al. 2017; Montoro, et al. 2013; Mukherjee, Cromley, Shah, e Bravo-Ureta, 2015; Silva e Cirani, 2016; Silva, Cirani, e Serra, 2016
Social	Desenvolvimento Sustentável	Cabanillas, et al. 2017; Marin, et al. 2016; Silva e Cirani, 2016; Silva, et al. 2016
	Geração de Renda	Gomes e Raiher, 2013; Marin, et al. 2016
	Biogás para cozinhar	Garfi, et al. 2016; Sosa, et al. 2014
	Melhoria na Qualidade de vida	Garfi, et al. 2016
	Redução do êxodo rural	Barichello, et al. 2015
Ambiental	Destinação de Resíduos	Andreazzi, Gonçalves, Santos, Maria, e Lazaretti, 2015; Barichello, et al. 2015; Gomes e Raiher, 2013; S. Montoro, et al. 2013; Silva e Cirani, 2016; Silva, et al. 2016
	Redução de GEE/ Crédito Carbono	Barichello, et al. 2015; Garfi, et al. 2016; Silva e Cirani, 2016
	Tecnologia Limpa/Ecoinovação	Silva e Cirani, 2016; Silva, et al. 2016

Fonte: Menezes (2023)

3.4 BIOGÁS

3.4.1 Aspectos ambientais e econômicos

O biogás é uma fonte de energia renovável e sustentável, gerada a partir do aproveitamento de resíduos, com aplicações em diferentes setores da economia. Sua produção está alinhada aos princípios da economia circular e contribui para a descarbonização. No ciclo de vida do biogás, o carbono liberado na combustão é compensado pelo carbono absorvido pela biomassa durante seu crescimento. Consequentemente, tem - se os seguintes atributos ambientais do biogás (ABILOGÁS, 2022).

- Tratamento e valorização de resíduos conforme PNRS;
- Mitigação das emissões de GEEs pela substituição de combustíveis fósseis;
- Captura e armazenagem de CO₂;

- Geração de créditos de carbono;

Nesse sentido, de acordo com Soares et al. (2022), o biogás se destaca como uma alternativa energética sustentável e uma solução eficiente para o tratamento de resíduos, visto que a sua renovabilidade está associada ao fato de ser produzido a partir da decomposição anaeróbia de matéria orgânica, como resíduos industriais, esgoto sanitário, resíduo orgânico através de biodigestores. Possuindo vantagens como:

- Produção a partir de resíduos orgânicos disponíveis;
- Geração próxima ao local de consumo;
- Solução a passivos ambientais que se tornam ativos energéticos

3.4.2 Origem

A produção de biogás está integrada ao ciclo global do carbono, com a decomposição anaeróbica da matéria orgânica liberando entre 590 milhões e 800 milhões de toneladas de metano por ano. Sistemas de recuperação de biogás utilizam esses processos bioquímicos para decompor diferentes tipos de biomassa, aproveitando o metano gerado como uma fonte de energia (SOARES et al., 2022).

Acrescenta-se que biogás é considerado uma fonte com "pegada negativa de carbono", pois além de ser de baixa emissão, também contribui para a mitigação da poluição que seria gerada pelos resíduos que servem como matéria-prima. O metano que, sem aproveitamento, poluiria o solo e a atmosfera, é convertido em energia (MILANEZ et al., 2018).

A produção de biogás ocorre a partir da digestão anaeróbia de materiais orgânicos, como resíduos industriais, dejetos de animais e lodo de esgoto, em um ambiente sem oxigênio dentro de biodigestores. Esse gás é formado majoritariamente por metano e dióxido de carbono, além de conter pequenas quantidades de outros compostos, como sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, vapor de água e amônia (SOARES et al., 2022). Destaca-se que a composição típica do biogás varia conforme os dados do Quadro 2.

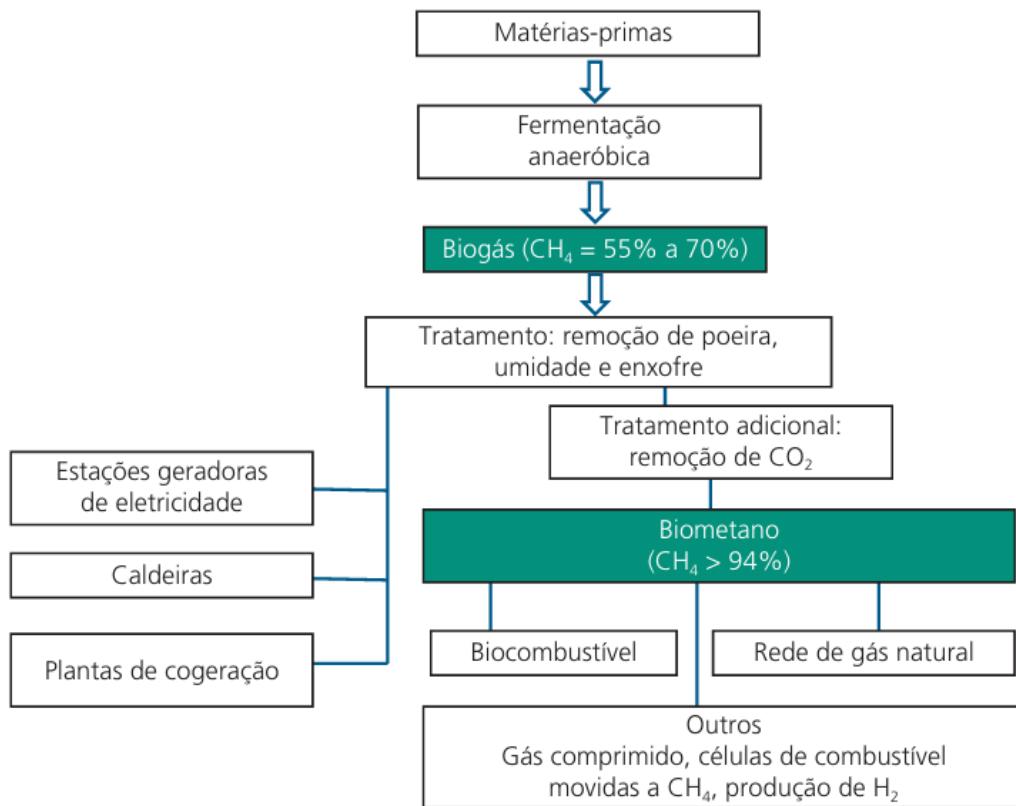
Quadro 2 – Composição do Biogás.

Compostos	Porcentagem (%)
Metano (CH_4)	62-80
Gás Carbônico (CO_2)	30-38
Nitrogênio (N_2)	0,05-1
Oxigênio (O_2)	0,0022
Gás sulfídrico (H_2S)	<0,01

Fonte: Cruz e Camporez (2023).

Segundo CIBiogás (2022), a diversidade na composição química do biogás possibilita a adoção de diferentes rotas tecnológicas, permitindo seu aproveitamento completo tanto para fins energéticos quanto industriais. Para isso, diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas ou aprimoradas com o propósito de oferecer ao mercado soluções mais eficientes para a remoção de contaminantes e gases traços presentes no biogás, ampliando assim suas possibilidades de aplicação. O grande interesse nesses processos está na valorização do CO_2 e do CH_4 , gases associados ao efeito estufa e componentes do biogás, que podem ser utilizados na produção de combustíveis líquidos de alto valor agregado e com balanço de carbono neutro. A Figura 11 simplifica o processo de formação de biogás e suas possíveis utilizações.

Figura 11 – Processo de geração de biogás



Fonte: RABONI e URBINI (2014, apud MILANEZ et al., 2018).

3.4.3 Potencial de Produção

De acordo com Cabral et al. (2015), existe uma proporcionalidade direta entre a porcentagem de matéria orgânica com relação aos sólidos totais e o potencial de produção de biogás de um substrato tendo em vista que a concentração de sólidos totais ST são compostos pelo conjunto de matéria orgânica e mineral. Logo, SV é um parâmetro chave para medir a concentração de matéria orgânica. Complementa-se que para Soares et al. (2022), o teor de ST é totalmente dependente da matéria-prima, não devendo estar muito diluído nem muito concentrado.

A Tabela 1 estabelece uma relação de produção de biogás a partir da constituição da matéria orgânica por substâncias como carboidratos, proteínas e gorduras, onde é possível observar uma maior produção de biogás a partir da degradação gorduras (óleos e graxas) relacionado ao SV (CABRAL et al., 2015).

Tabela 1 – Produção de biogás na decomposição completa dos constituintes orgânicos.

SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS	PRODUÇÃO DE BIOGÁS* [m ³ /kgSV]	TEOR DE CH ₄ [%]	ENERGIA	
			[MJ/kg SV]	[kWh/kg SV]
Carboidratos	0,83	50	15,1	4,2
Proteínas	0,72	72	18,4	5,1
Gorduras	1,43	70	36,0	10,0

Fonte: DWA M 363 (2010, apud Cabral et al., 2015)

Observa-se que substratos com alto teor de carboidratos (cana-de-açúcar, restos de frutas) tendem a ser convertidos mais rapidamente em biogás em detrimento dos substratos com alto teor de proteína são convertidos mais lentamente e atingem maiores taxas de produção. Já as gorduras (óleos e graxas orgânicas) têm a maior produção do biogás atrelada a quantidade de matéria orgânica seca, SV (CABRAL et al., 2015).

Cirne et al. (2007) investigaram a DA de resíduos ricos em lipídios e observaram que a concentração de lipídios influência tanto na inibição quanto na recuperação do processo ao apresentarem elevado potencial energético, pois sua degradação pode resultar em um maior rendimento de metano quando comparados a proteínas ou carboidratos, tornando-os um substrato atrativo para digestão anaeróbia e co-digestão.

Para Angelidaki e Sanders (2004), SV e DQO são comumente utilizados para determinação da concentração de resíduo, sendo o primeiro mais usual para efluentes e o segundo para resíduos sólidos, conforme seguintes unidades:

- Demanda química de oxigênio (DQO): g-O₂/l,
- Teor de sólidos voláteis (SV): g-VS/l ou %

A análise de sólidos totais, voláteis e fixos consta no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater da APHA (American Public Health Association) de forma a analisar materiais orgânicos com base no seu potencial de incendiar e queimar a dada temperatura em detrimento de resíduos inorgânico, fornecendo, assim, a quantidade de matéria seca e úmida, onde os sólidos voláteis representam a fração orgânica.

Acrescenta-se que é possível estimar por meio de cálculo teórico de produção bioquímica de metano (TBMP - Theoretical Biochemical Methane Potential), o potencial teórico de bioconversão anaeróbia de um dado substrato para condições normais

de temperatura e pressão (CNTP) frente à composição conhecida do substrato de entrada (CHONS), perfeita homogeneização, condições bacteriológicas e atividade metanogênica ideais, digestão completa, produtos finais da reação CH₄, CO₂, NH₃ e H₂S e não há acúmulo de cinzas (MEDEIRO et al, 2023).

Consequentemente, tem-se a Equação 1 de estimativa de geração de biogás conforme considerações de Buswell e Mueller para (Cv Hw Ox Ny Sz) (MEDEIRO et al, 2023).

Eq 1:

$$TBMP(\text{ml CH}_4/\text{g.SV}) = \frac{22,4 \left(\frac{v}{2} + \frac{w}{8} - \frac{x}{4} - \frac{3y}{8} - \frac{z}{4} \right)}{12,017v + 1,0079w + 15,999x + 14,0067y + 32,065z}$$

Considerando apenas CHON, tem -se a Equação 2:

Eq 2:

$$TBMP(\text{ml CH}_4/\text{g.SV}) = \frac{22,4 \left(\frac{v}{2} + \frac{w}{8} - \frac{x}{4} - \frac{3y}{8} \right)}{12,017v + 1,0079w + 15,999x + 14,0067y}$$

Acrescenta-se que para Angelidaki e Sanders (2004), a estimativa de biogás gerada pode ser determinada com base em características típicas de alguns substratos conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Características teóricas dos componentes típicos de substrato.

Substrato	Composição	COD/VS	CH4 rendimento	CH4 rendimento	CH4
Tipo		g-COD/g-VS	STPI/g-VS	STPI/g-COD	(%)
Carboidrato	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	1,19	0,415	0,35	50
Proteína (Nitrogênio convertido em NH ₃)	C ₅ H ₇ NO ₂	1,42	0,496	0,35	50
Lipídeo	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆	2,9	1,014	0,35	70
Etanol	C ₂ H ₆ O	2,09	0,730	0,35	75
Acetato	C ₂ H ₄ O ₂	1,07	0,373	0,35	50
Propionato	C ₃ H ₆ O ₂	1,51	0,530	0,35	58

Fonte: Adaptado Angelidaki e Sanders (2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Contextualização

A crescente preocupação com a gestão sustentável de resíduos tem impulsionado a busca por soluções eficientes para tratamento e destinação final de diferentes resíduos industriais. No contexto deste estudo, os resíduos analisados são provenientes de uma fábrica de refino de óleo vegetal, cuja atividade gera grandes quantidades de resíduos mensais que, atualmente, recebem destinação final nobre ao não incluir o envio para aterro sanitário, contudo, são vistos como oportunos para aproveitamento energético, construção de uma economia circular e redução da geração de emissão de GEE através da produção de biogás.

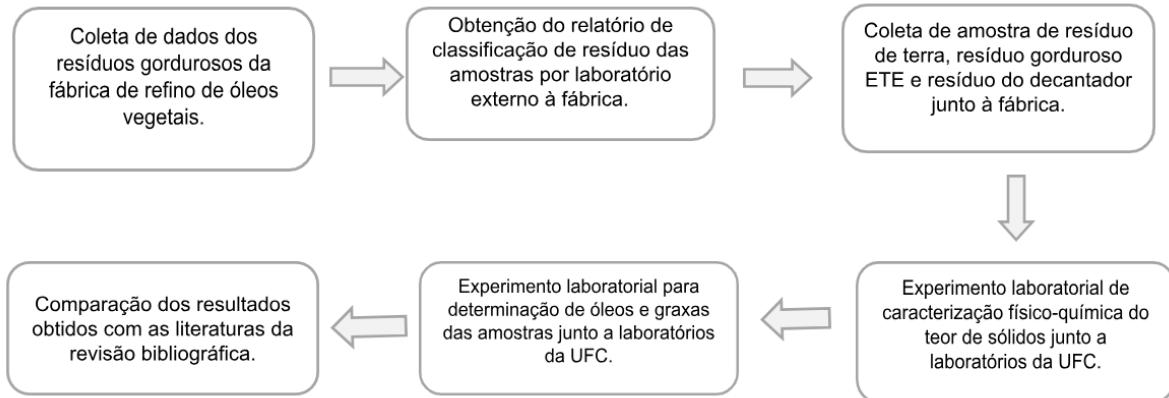
Nesse sentido, contou-se com o apoio e colaboração do Laboratório de Saneamento Ambiental (Labosan) e o Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE), ambos vinculados à Universidade Federal do Ceará, para fornecerem estrutura e equipamentos para caracterização dos resíduos escolhidos para o estudo. Acrescenta-se ainda que foram aproveitadas informações de classificação destes resíduos conforme análises externas disponíveis pela fábrica para um melhor respaldo normativo.

Ademais, o trabalho é pautado na comparação das caracterizações levantadas dos resíduos com a literatura apresentada para avaliar a possibilidade da digestão anaeróbica para geração de biogás.

4.2 Fluxograma de Trabalho

Este trabalho foi estruturado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 12 .

Figura 12 – Fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.



Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

4.3 Determinação dos Resíduos Industriais

Dentre os resíduos gerados pela fábrica de refino de óleos vegetais, priorizou-se a escolha dos mais volumosos em tonelada de resíduo mensal, dispendiosos financeiramente e estratégicos quanto às características físico-químicas.

Através de um levantamento a nível de inventário de resíduos da fábrica, considerando um horizonte de cinco anos, observou-se a prevalência de uma geração volumosa de resíduo de terra, resíduo do decantador e resíduo gorduroso ETE.

Assim, optou-se por apresentar neste trabalho o Inventário de Resíduos do ano de 2024 apenas com as informações dos resíduos de interesse conforme elucidado no Quadro 4.

Quadro 4 – Inventário de Resíduos da Indústria de Refino de Óleos Vegetais.

Código IBAMA	Identificação do Resíduo	Etapas de Origem no Processo	UN	QUANTIDADE GERADA DE RESÍDUOS												Total	Classe do Resíduo	Tipo de Destinação	Resposta Final Sí ou não para a reciclagem e NÃO para as	Tratamento Interno ou Externo
				Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro					
191209	Resíduo de Terra da Refinaria	Processo de Branequeamento	Kg	205.820	198.420,00	223.731,00	175.320,00	72.170,00	70.440,00	0,00	2.850,00	18.540,00	6.370,00	52.280,00	54.870,00	1.080.813,00	Classe II - Não Perigoso	Compostagem	NÃO	Externo
191209	Resíduo de Terra da Refinaria	Processo de Branequeamento	Kg	0	0,00	0,00	67.920,00	109.330,00	126.070,00	228.520,00	97.620,00	48.140,00	44.240,00	4.080,00	38.750,00	764.670,00	Classe II - Não Perigoso	Coprocassamento	NÃO	Externo
191209	Resíduo de Terra da Refinaria	Processo de Branequeamento	Kg	0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	59.470,00	50.480,00	40.770,00	0,00	150.720,00	Classe II - Não Perigoso	Reciclagem	NÃO	Externo	
190809	Resíduo Gorduroso ETE	Separação de efluente e resíduos	Kg	0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	99.110,00	215.420,00	155.240,00	158.840,00	631.610,00	Classe II - Não Perigoso	Tratamento Físico-Químico	NÃO	Externo	
				160.790	137.230,00	165.420,00	190.980,00	214.290,00	185.940,00	77.950,00	120.370,00	66.200,00	0,00	0,00	0,00	1.319.170,00	Classe II - Não Perigoso	Reciclagem	NÃO	Externo
200306	Resíduos das caixas de esgoto contendo substâncias não tóxicas(*)	Rede de esgoto / Fossos da Refinaria	Kg	285.830	128.300,00	239.495,00	240.430,00	244.130,00	107.970,00	83.310,00	489.210,00	156.140,00	352.820,00	185.280,00	157.960,00	2.670.875,00	Classe II - Não Perigoso	Tratamento Físico-Químico	NÃO	Externo
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	780,00	310,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.090,00		Coprocassamento	NÃO	Externo	
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32.630,00	14.690,00	0,00	47.320,00	Classe II - Não Perigoso	Reciclagem	NÃO	Externo

Fonte: Adaptação do Inventário de Resíduos da Empresa pela Autora (2025).

4.4 Origem dos Resíduos Gordurosos

4.4.1 Resíduo de Terra

A nomenclatura “resíduo de terra” é utilizada internamente na fábrica de refino de óleos vegetais para designar o resíduo gerado no processo de branqueamento de óleos vegetais (soja, palma, palmiste) que tem como objetivo remover pigmentos indesejáveis do óleo (clorofila), sabões, traços de metais, produtos de oxidação, umidade, dentre outras impurezas através das etapas do branqueamento.

Uma das etapas envolve a dosagem de terra, que consiste na adição de terra clarificante a um tanque de óleo que promoverá a agitação intensa de ambos para que a terra adsorva pigmentos e impurezas. A quantidade de terra a ser adicionada neste processo depende do padrão técnico de processo que define a dosagem da terra de acordo com a qualidade e tipo de óleo a ser processado.

Posteriormente, é realizada a filtração do óleo e descarregamento da terra com partículas de óleo e impurezas através de filtros de placas. Após isto, o resíduo de terra gerado segue para ser tratada e destinada externamente.

4.4.2 Resíduo Gorduroso ETE

O resíduo gorduroso gerado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da refinaria que recebe resíduos do processo de refino de óleos vegetais surge principalmente devido à separação de fases durante o tratamento dos efluentes. Esse resíduo é formado por uma combinação de óleos e gorduras residuais, partículas suspensas e outros compostos orgânicos presentes nos rejeitos industriais.

4.4.3 Resíduo do Decantador

O resíduo do decantador, também conhecido como resíduo de caixa de esgoto da planta industrial, é um material sedimentado gerado no processo de separação física dos efluentes industriais. Esse resíduo é composto predominantemente por partículas suspensas, sólidos sedimentáveis, resíduos orgânicos, óleos residuais e outras substâncias não tóxicas provenientes das diversas etapas do processamento do óleo.

4.5 Coleta da Amostra dos Resíduos

No intuito de obter amostra de resíduo de terra, resíduo gorduroso da ETE e resíduo do decantador, solicitou-se ao setores geradores dos resíduos da indústria cerca de 500 g de resíduo de terra e 300 g de cada um dos outros dois resíduos de interesse que foram fornecidas ao laboratório da UFC no período de 4 de julho de 2024, mesma data de obtenção das amostras através da empresa. As Figura 13 e Figura 14 ilustram as amostragens obtidas junto à empresa.

Figura 13 – Amostra de resíduo de terra.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Figura 14 – Amostra de resíduo Gorduroso ETE resíduo do decantador.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

4.6 Caracterizações

4.6.1 Método Analítico para Classificação de Resíduo

Com intuito de classificar os resíduos segundo a NBR 10004:2004, utilizou-se dos relatórios de classificação do resíduo de terra e resíduo gorduroso ETE conduzidas por um laboratório externo a pedido da fábrica de refino de óleos vegetais no ano de 2022.

A empresa forneceu amostras de ambos os resíduos para o laboratório de análises externo conforme especificações da NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos, que estabelece os procedimentos para garantir a coleta de amostras representativas e a confiabilidade das análises laboratoriais. A norma especifica as técnicas de amostragem para diferentes tipos de resíduos, o que é fundamental para a caracterização e classificação adequada dos materiais analisados.

Vale ressaltar que as normas NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos foram essenciais para a caracterização ambiental de resíduos, pois avaliam seu potencial de contaminação e ajudam a determinar sua classificação segundo a NBR 10004:2004.

Acrescenta-se que, conforme NBR 10005:2004, simula-se o que aconteceria se o resíduo fosse exposto à água e seus contaminantes migrassem para o meio líquido de forma a avaliar se substâncias tóxicas podem ser carregadas pela água subterrânea. Para NBR

10006:2004, mede-se os contaminantes que se dissolvem completamente em um meio aquoso, independente da lixiviação de forma a avaliar se o resíduo é quimicamente solúvel em água e pode liberar substâncias tóxicas em condições normais.

De acordo com o relatório do laboratório, a classificação foi realizada conforme a Tabela 2 para as duas amostras.

Tabela 2 – Metodologia, normas e métodos analíticos do laboratório externo.

Metodologia	"SW 846 (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number 846, Washington, DC"
Normas de Referência	Norma NBR 10004:2004 da ABNT - Classificação de Resíduos Sólidos Norma NBR 10006:2004 da ABNT - Ensaio de Solubilização Norma NBR 10005:2004 da ABNT - Ensaio de Lixiviação
Métodos Analíticos	Metais Totais (ICP-OES): SMWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B / Preparo: EPA 3010 A: 1992 Mercúrio: EPA 245.7: 2005 Ânions: EPA 300.0: 1993, POP PA 032 Cianeto Livre: ISO 14403-2: 2012 Cianeto: Determinação: EPA ISO 14403-2: 2012 / Preparo: EPA 9010 C: 2004 Índice de Fenóis: ISO 14402: 1999 pH: EPA 9045 D: 2004 SVOC: Determinação: EPA 8270 E:2018 / Preparo: EPA 3510 C:1996 Porcentagem de Sólidos e Cinzas: SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 2540 G Solubilização: ABNT NBR 10006: 2004, SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 4500H+ B Lixiviação: ABNT NBR 10005: 2004, SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 4500H+ B VOC: Determinação: EPA 8260 D: 2018 / Preparo: EPA 5021A: 2014

Fonte: Adaptado do relatório de análises do laboratório externo pela Autora (2025).

Assim, para a análise do resíduo de terra, considerou-se a origem deste material como resultado do processo de branqueamento na planta com data de amostragem em 02/09/2022 fornecida ao laboratório e data de entrada no laboratório em 03/02/2022. Para o resíduo gorduroso de processo, a amostragem foi realizada em 16/08/2022 e a entrada no laboratório em 16/08/2022.

No laboratório, as amostras foram submetidas a uma série de análises conforme as normas técnicas, incluindo ensaios de lixiviação segundo NBR 10005:2004 e solubilização de acordo com NBR 10006:2004, para identificar a presença de substâncias tóxicas que poderiam afetar a qualidade ambiental. A classificação dos resíduos foi realizada segundo os critérios da NBR 10004:2004, determinando se os resíduos eram perigosos ou não perigosos, com base nas características físico-químicas observadas.

4.6.2 Método Analítico para Caracterização do Substrato

Para caracterização das amostras dos três resíduos, foram realizadas análises físico-químicas: análise de sólidos totais e análise de sólidos voláteis, no intuito de determinar o percentual de matéria orgânica a partir da identificação do percentual de água presente em cada amostra.

A técnica utilizada é o método padrão recomendado pela *American Water Works Association* para avaliação de águas e também águas residuárias, conforme estabelecido no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

4.6.2.1 Série de Sólidos

A análise dos sólidos totais permite determinar a quantidade de água presente em cada amostra. O processo envolve a secagem da amostra em estufa a 103°C até que sua massa se estabilize. Para otimizar o procedimento, adotou-se um período padrão de 24 horas, tempo considerado suficiente para que não haja mais variação de peso.

Acrescenta-se que, utilizou-se um volume de 20 mL e realizou-se duplicata para cada uma das amostras visando minimizar erros relativos aos procedimentos experimentais e não homogeneidade das amostras de forma a considerar o valor mediano para sólidos totais e voláteis. Para a coleta de amostras, foram obtidas 300g de amostras e utilizados 20 gramas no caso de materiais sólidos ou semissólidos junto a empresa geradora dos resíduos e as cápsulas empregadas no experimento foram identificadas e pesadas previamente. Após a permanência de 24 horas na estufa junto às amostras, foram transferidas para um dessecador, onde permaneceram por alguns minutos para resfriamento antes da pesagem final.

Para determinar a quantidade de sólidos voláteis, as amostras foram submetidas à calcinação em um forno mufla a 550°C durante uma hora após saírem da estufa. Após isto, os materiais remanescentes na cápsula de cada amostra correspondem aos sólidos fixos.

O cálculo dos sólidos voláteis foi realizado pela diferença entre a massa dos sólidos totais e a dos sólidos fixos. Essa fração representa a parte da amostra que se volatiliza durante a queima na mufla, correspondendo ao material orgânico disponível para biodegradação por micro-organismos. A Tabela 3 evidencia as normas utilizadas.

Tabela 3 – Normas técnicas para análises de sólidos totais e voláteis.

Parâmetro	Normas Técnicas	Título
ST	2540 B	Gravimétrico: evaporação e secagem a 103 - 105°C
STV	2540 E	Gravimétrico: ignição a 500 - 550°C

Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

Segundo APHA 2540 B, o método de cálculo é apresentado na Equação 3.

Eq 3:

$$ST = \frac{(A-B) \times 1000}{V}$$

Onde:

ST Sólidos Totais (mg/L);

A Amostra de resíduo seco, após estufa (mg) + peso da cápsula;

B Peso da cápsula;

V Volume da Amostra (ml)

Para APHA 2540 E, o método de cálculo é apresentado na Equação 4:

Eq 4:

$$\begin{aligned}\% ST &= \frac{(A-B) \times 100}{C-B} \\ \% SF &= \frac{(D-B) \times 100}{A-B} \\ \% SV &= \frac{(A-D) \times 100}{A-B}\end{aligned}$$

Onde:

ST Sólidos Totais (%);

SF Sólidos Fixos (%);

SV Sólidos Voláteis (%);

A Amostra de resíduo seco, após estufa (mg) + peso da cápsula;

B Peso da cápsula;

C Massa inicial da amostra;

D Amostra de resíduo seco após mufla (mg) + peso da cápsula;

4.6.3 Determinação de Óleos e Graxas

A determinação de óleos e graxas foi realizada nas amostra de resíduos do decantador e resíduo gorduroso ETE, utilizando-se o método 5520B da APHA (2017), que é voltado para a determinação de óleos e graxas em amostras de água e efluentes, sendo um dos procedimentos mais clássicos para essa análise. A Tabela 4 evidencia a norma utilizada.

Tabela 4 – Norma técnica para determinação de óleos e graxas.

Parâmetro	Normas Técnicas	Título
Óleos e graxas (O&G)	5520B	Método de Extração por Solventes

Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

O método consiste na extração dos óleos e graxas presentes nas amostras utilizando um solvente orgânico, seguido da evaporação do solvente e pesagem do resíduo para quantificação gravimétrica. Os principais reagentes e materiais utilizados são:

- Hexano ou éter de petróleo: solventes para extração, pois possuem boa eficiência na extração e menor toxicidade ambiental em comparação ao tetracloreto de carbono.
- Sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4): Utilizado para remover a umidade da amostra antes da evaporação do solvente, evitando interferências na pesagem do resíduo extraído.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Classificação dos Resíduos

5.1.1 Resíduo de Terra

A caracterização da terra de refinaria proveniente do processo de branqueamento revelou um resíduo com elevado teor de sólidos 97,5%, indicando uma predominância de material seco e pouca umidade, em que SV acima de 80% apresentam perfil de alta biodegradabilidade (HASAN; FEITOSA; DE ALMEIDA, 2019).

O pH de 3,40 demonstra uma alta acidez, o que pode comprometer a atividade microbiológica, especialmente das bactérias metanogênicas, que atuam de forma mais eficiente em um pH próximo da neutralidade 6,5-7,5 (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

A Tabela 5 destaca estas informações.

Tabela 5 – NBR 10004:2004 - Massa Bruta - Resíduo de terra.

NBR 10004:2004 - Massa Bruta				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	3,40	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H_2S)	mg/kg	20	80,0	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	97,5	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	1	< 1	250 (c)

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Conforme Tabela 6 e Tabela 7, foram detectadas concentrações elevadas de alumínio (7,05 mg/L), ferro (4,81 mg/L) e manganês (20,2 mg/L), além de um alto teor de sulfato (1260 mg/L). Além disso, a amostra apresentou um índice de fenóis de 0,12 mg/L. Níveis considerados altos para NBR 10004:2004.

A nível de quantidade mínima para ser considerado elemento traço para inibição da DA, os valores de ferro e manganês foram inferiores aos limites a (1 -10 mg/L) e (0,005 - 50 mg/L), respectivamente (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

A nível de metais pesados com efeito inibitório para DA, os valores de Zn, Cr, e Cu da amostra não foram superiores a Cu > 50 mg/L, Zn > 150 mg/L, Cr > 100 mg/L (FNR, 2010).

Tabela 6 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Inorgânicos - Resíduo de terra.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,293	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,0130	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	2,5	19,0	250
Cobre	mg/L	0,005	0,0100	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	5,84	0,3
Fluoreto	mg/L	0,25	< 0,25	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,04	1,10	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,449	0,1
Mercúrio	mg/L	0,000075	0,00018	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,5	< 0,5	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selénio	mg/L	0,005	< 0,005	0,01
Sódio	mg/L	0,5	176	200
Sulfato	mg/L	2,5	22,2	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,2	0,37	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,150	5,0

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Tabela 7 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Orgânicos - Resíduo de terra.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-HCH)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025)

Para massa bruta lixiviada, comparando-se os resultados obtidos com Valore Máximo Permitido (VMP) para NBR 10004:2004 pode-se afirmar que os parâmetros satisfazem os limites permitidos. Notar nas Tabela 8 e Tabela 9,

Tabela 8 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Inorgânicos - Resíduo de terra.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsénio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,0200	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	< 0,1	150
Mercúrio	mg/L	0,000075	0,000088	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selénio	mg/L	0,005	< 0,005	1,0

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Tabela 9 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Orgânicos - Resíduo de terra.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-HCH)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Em função dos resultados apresentados e outros contidos no relatório do laboratório externo, a amostra de resíduo de terra foi classificada como Classe II A - Resíduo Não Inerte, o que denota, segundo NBR 10004:2004, possibilidade de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

5.1.2 Resíduo Gorduroso ETE

A caracterização do resíduo gorduroso ETE conforme a NBR 10007:2004, revelou um teor de sólidos de 63,9%, indicando boa quantidade de carga orgânica, que pode ser favorável à produção de biogás.

O pH de 5,64, apesar de mais elevado do que o pH do resíduo de terra, ainda apresenta caráter ácido frente ao limite ótimo de 6,5-7,5 (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

Acrescenta-se que, para massa bruta, ao comparar os resultados obtidos com os VMP estabelecidos pela NBR 10004:2004, os parâmetros estão dentro dos limites permitidos. Verifica-se o discutido na Tabela 10.

Tabela 10 – NBR 10004:2004 - Massa Bruta - Resíduo gorduroso ETE.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	5,64	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	31	< 31	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	63,9	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	1,5	< 1,5	250 (c)

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Além disso, a análise dos metais pesados indicou concentrações elevadas de ferro (5,84 mg/L), alumínio (0,293 mg/L), manganês (0,449 mg/L) e mercúrio (0,00018 mg/L) para a massa solubilizada. Também foi detectado um índice de fenóis de 1,10 mg/L. Níveis considerados altos para NBR 10004:2004.

A nível de quantidade mínima para ser considerado elemento traço para inibição da DA, os valores de ferro e manganês foram bem inferiores aos limites (1 -10 mg/L) e (0,005 - 50 mg/L), respectivamente (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011).

A nível de metais pesados com efeito inibitório para digestão anaeróbia, os valores de Zn, Cr, e Cu da amostra não foram superiores a Cu > 50 mg/L, Zn > 150 mg/L, Cr > 100 mg/L (FNR, 2010).

Tabela 11 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Inorgânicos - Resíduo gorduroso ETE.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,293	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,0130	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	2,5	19,0	250
Cobre	mg/L	0,005	0,0100	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	5,84	0,3
Fluoreto	mg/L	0,25	< 0,25	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,04	1,10	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,449	0,1
Mercúrio	mg/L	0,000075	0,00018	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,5	< 0,5	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,005	< 0,005	0,01
Sódio	mg/L	0,5	176	200
Sulfato	mg/L	2,5	22,2	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,2	0,37	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,150	5,0

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Tabela 12 – NBR 10006:2004 - Solubilizado - Orgânicos - Resíduo gorduroso ETE.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-HCH)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Para massa bruta lixiviada, comparando-se os resultados obtidos com VMP para NBR 10004:2004 pode-se afirmar que os parâmetros satisfazem os limites permitidos.

Tabela 13 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Inorgânicos - Resíduo gorduroso ETE.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,0120	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	< 0,1	150
Mercúrio	mg/L	0,000075	0,00012	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,005	< 0,005	1,0

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Tabela 14 – NBR 10005:2004 - Lixiviado - Orgânicos - Resíduo gorduroso ETE.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroeteno	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	20,0
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	0,0061	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Cloreto de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	< 0,001	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,2
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,1
Hexaclorbutadieno	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,0003	0,0314	200
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	2,0
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,00005	< 0,00005	200
Pentaclorofenol	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,9
Piridina	mg/L	2,5	< 2,5	5,0
Tetracloreto de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetraclometeno	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,002	< 0,002	0,5
Tricloroeteno	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,003

Fonte: Adaptado do Relatório do Laboratório Externo pela Autora (2025).

Em função dos resultados apresentados e outros contidos no relatório do laboratório externo, a amostra de resíduo foi classificada como Classe II A - Resíduo Não Inerte. Ressalta-se que para NBR 10004 (2004), os resíduos Classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

5.2 Cálculo Série de Sólidos

As análises físico-químicas das amostras de resíduos (I a III) foram realizadas mediante aplicação dos métodos padrão para exame de água e esgoto (APHA, 2017). Os valores obtidos estão nas Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17:

Para análise de sólidos totais, seguiu-se a metodologia evaporação e secagem a 103°C - 105°C - 2540 B.

Eq 3:

$$ST = \frac{(A-B) \times 1000}{V}$$

Para amostra I:

$$ST = [(83,5497 - 83,4381) * 1000] / 0,02 = 5580 \text{ mg/L}$$

$$ST = [(77,4703 - 77,3925)*1000]/0,02 = 3890 \text{ mg/L}$$

$$ST (\text{média}) = (5580 + 3890)/2 = 4735 \text{ mg/L}$$

Para amostra II:

$$ST = [(83,6554 - 81,6325)*1000]/0,02 = 101145 \text{ mg/L}$$

$$ST = [(79,0187 - 76,8767)*1000]/0,02 = 107100 \text{ mg/L}$$

$$ST (\text{média}) = (101145 + 107100)/2 = 104123 \text{ mg/L}$$

Para amostra III:

$$ST = [(94,596 - 80,5948)*1000]/0,02 = 700060 \text{ mg/L}$$

$$ST = [(92,4226 - 78,44092)*1000]/0,02 = 700670 \text{ mg/L}$$

$$ST (\text{média}) = (700060 + 700670)/2 = 700365 \text{ mg/L}$$

Os resultados da análise da série de sólidos totais estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Determinação de sólidos totais para os resíduos.

Amostra	Peso da Cápsula (g)	Amostra de resíduo seco, após estufa + peso da cápsula (g)	ST (mg/L)	ST (mg/L) da média
I	83,4381	83,5497	5580	4735
	77,3925	77,4703	3890	
II	81,6325	83,6554	101145	104123
	76,8767	79,0187	107100	
III	80,5948	94,596	700060	700365
	78,4092	92,4226	700670	

Legenda: Amostra I = resíduo do decantador; Amostra II = resíduo gorduroso ETE; Amostra III = resíduo de terra

Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

Para análise de sólido voláteis, seguiu-se a metodologia de ignição a 500 - 550°C 2540 E, conforme:

Eq 4:

$$\% ST = \frac{(A-B) \times 100}{C-B}$$

$$\% SF = \frac{(D-B) \times 100}{A-B}$$

$$\% SV = \frac{(A-D) \times 100}{A-B}$$

Onde,

Para amostra I:

$$SV = [(83,5497 - 83,4697) * 1000] / 0,02 = 4000 \text{ mg/L}$$

$$SV = [(77,4703 - 77,422) * 1000] / 0,02 = 2415 \text{ mg/L}$$

$$SV (\text{média}) = (4000 + 2415) / 2 = 3207 \text{ mg/L}$$

Para amostra II:

$$SV = [(83,6554 - 81,804) * 1000] / 0,02 = 922570 \text{ mg/L}$$

$$SV = [(79,0187 - 77,005) * 1000] / 0,02 = 100684 \text{ mg/L}$$

$$SV (\text{média}) = (922570 + 100684) / 2 = 96627 \text{ mg/L}$$

Para amostra III:

$$SV = [(94,596 - 94,3064) * 1000] / 0,02 = 14480 \text{ mg/L}$$

$$SV = [(92,4226 - 92,0233) * 1000] / 0,02 = 19965 \text{ mg/L}$$

$$SV (\text{média}) = (14480 + 19965) / 2 = 17223 \text{ mg/L}$$

É possível observar na Tabela 16 os resultados dos sólidos voláteis.

Tabela 16 – Determinação de sólidos voláteis para os resíduos.

Amostra	Amostra de resíduo seco, após estufa + peso da cápsula (g)	Amostra de resíduo seco após mufla + peso da cápsula (g)	SV (mg/L)	SV (mg/L) da média
I	83,5497	83,4697	4000	3207
	77,4703	77,422	2415	
II	83,6554	81,804	92570	96627
	79,0187	77,005	100684	
III	94,596	94,3064	14480	17223
	92,4226	92,0233	19965	

Legenda: Amostra I = resíduo do decantador; Amostra II = resíduo gorduroso ETE; Amostra III = resíduo de terra

Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

De posse dos valores de sólidos totais e sólidos voláteis, é possível determinar os sólidos fixos e a relação SV/ST.

Onde,

Para amostra I:

$$SF = 4735 - 3207 = 1527 \text{ mg/L}$$

$$SV/ST = 3207/4735 = 68\%$$

Para amostra II:

$$SF = 104123 - 96627 = 1527 \text{ mg/L}$$

$$SV/ST = 96627/104123 = 93\%$$

Para amostra III:

$$SF = 933820 - 17223 = 916598 \text{ mg/L}$$

$$SV/ST = 17223/933820 = 2\%$$

Os resultados da análise da série de sólidos voláteis e relação SV/ST estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Determinação de sólidos voláteis para os resíduos.

Amostra	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	SV/ST
I	4735	3207	1527	68%
II	104123	96627	7496	93%
III	933820	17223	916598	2%

Legenda: Amostra I = resíduo do decantador; Amostra II = resíduo gorduroso ETE; Amostra III = resíduo de terra

Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

Evidencia-se que a amostra I tem baixa concentração de sólidos, mas a relação SV/ST denota que a maioria do material é orgânico e biodegradável. A amostra II tem altíssima fração de SV/ST o que demonstra excelente potencial para digestão anaeróbica, sendo um resíduo altamente orgânico e adequado para geração de biogás.

Apesar da altíssima concentração de sólidos na amostra III, a fração SV/ST é baixa, indicando que grande parte do material não é biodegradável. Para Cabral et al. (2015), a digestão anaeróbica depende da fração orgânica dos resíduos, principalmente os sólidos voláteis, que servem como substrato para a produção de biogás. Os resíduos com maiores valores de SV têm maior potencial para conversão em biogás.

5.3 Óleos e Graxas

A Tabela 18 expõe os resultados obtidos de O&G para os dois resíduos testados em laboratório.

Tabela 18 – Determinação de óleos e graxas

Amostra	O&G (mg/L)
I	143
II	454

Legenda: Amostra I = resíduo do decantador; Amostra II = resíduo gorduroso ETE;

Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

A presença O&G pode levar a maior produção de biogás devido ao alto valor energético dos lipídios. Contudo, também representa um fator crítico que pode influenciar significativamente a eficiência do processo de DA.

Embora os lipídios possuam alto potencial energético, concentrações elevadas podem levar à formação de ácidos graxos de cadeia longa, que são tóxicos para os microrganismos metanogênicos, resultando na inibição da produção de biogás (CIRNE et al., 2007).

6 CONCLUSÃO

O presente estudo investigou o reaproveitamento de resíduos gordurosos provenientes de uma indústria de refino de óleos vegetais, com foco na viabilidade de sua conversão em biogás por meio da digestão anaeróbia. Foram analisados três resíduos principais: resíduo de terra, resíduo gorduroso da ETE e resíduo do decantador. A caracterização dos resíduos de terra e do resíduo gorduroso da ETE, conforme a norma NBR 10004:2004, permitiu classificá-los como não perigosos, o que subsidia a análise do potencial de valorização desses materiais em termos de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. No entanto, o resíduo do decantador não foi classificado segundo essa norma, o que limita uma avaliação mais abrangente sobre seu aproveitamento.

Os ensaios laboratoriais da série de sólidos demonstram que o resíduo gorduroso da ETE possui elevado teor de matéria orgânica biodegradável, indicando um bom potencial para a geração de biogás. Esse resultado está alinhado com a literatura, que aponta resíduos ricos em lipídios como substratos de alto rendimento energético na digestão anaeróbia, devido ao seu maior poder calorífico. O resíduo do decantador, apesar de conter frações orgânicas, apresentou características que podem dificultar sua degradação anaeróbia, tornando necessária uma avaliação mais detalhada sobre sua viabilidade energética. Já o resíduo de terra apresentou desafios adicionais para a digestão anaeróbia devido à presença de gordura adsorvida e à sua baixa biodegradabilidade, podendo demandar pré-tratamentos ou co-digestão para viabilizar seu aproveitamento energético. Além disso, a análise de óleos e graxas revelou que o resíduo gorduroso da ETE apresenta uma alta concentração desses compostos. Por outro lado, o resíduo do decantador apresentou menor teor de óleos e graxas, o que pode impactar sua eficiência na conversão anaeróbia.

Por fim, além do potencial energético identificado, o reaproveitamento desses resíduos pode trazer benefícios ambientais significativos, reduzindo passivos industriais e contribuindo para a descarbonização do setor. A valorização desses resíduos está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo uma abordagem mais sustentável para a gestão de resíduos na indústria de refino de óleos vegetais. Dessa forma, este estudo reforça a importância do desenvolvimento de alternativas sustentáveis para a destinação de resíduos industriais e incentiva futuras pesquisas voltadas para a otimização da digestão anaeróbia e a ampliação do aproveitamento energético desses materiais.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A digestão anaeróbia, no entanto, é um processo multifatorial que depende de parâmetros como a relação C/N, tempo de detenção hidráulica, carga orgânica aplicada, presença de inibidores, pré-tratamento, co-digestão, entre outros fatores. Assim, embora o estudo tenha identificado o potencial energético dos resíduos analisados, sua aplicação prática requer pesquisas adicionais para otimizar as condições operacionais e avaliar a viabilidade técnico-econômica da conversão desses resíduos em biogás, com destaque para ensaios de biodegradabilidade entre os microrganismos e substrato aliados a determinação por estimativa do potencial de geração de biogás.

Outro aspecto relevante para pesquisas futuras é a análise da viabilidade econômica e ambiental da implementação dessa tecnologia em escala industrial. Avaliações do ciclo de vida, custos de implantação e operação, bem como os possíveis benefícios na redução de emissões de gases de efeito estufa, são fundamentais para subsidiar a tomada de decisão por parte do setor industrial. Acrescenta-se como oportuno também a comparação dos resultados com a nova atualização da NBR 10004:2004.

Por fim, recomenda-se a realização de testes em escala piloto, visando validar os resultados laboratoriais e possibilitar ajustes nas condições operacionais antes da aplicação em plantas industriais. Essas investigações contribuirão para o avanço do aproveitamento energético de resíduos do refino de óleo vegetal, alinhando-se às estratégias de economia circular e descarbonização.

REFERÊNCIAS

- 1 CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. *Descarbonização da Indústria: Análise de experiências internacionais e recomendações para o Brasil*. Brasília: CNI, 2023. Disponível em: https://static.portalaindustria.com.br/media/filer_public/f6/dd/f6ddbf14-6eea-4c18-a008-7c05b778ec3e/id_248438_descarbonizacao_da_industria_interativo.pdf. Acesso em: 9 fev. 2025.
- 2 BATISTA, Marina de Oliveira et al. **Energia em tempo de descarbonização: uma revisão com foco na economia sustentável**. 2023.
- 3 SAMPAIO, Solaine Ramos; OLIVEIRA, Caio Reboli de; GONÇALVES, Ricardo Franci. Panorama da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos com alto teor de sólidos: tendências e potencialidades. *Revista DAE*, 2021. DOI: 10.36659/dae.2021.048.
- 4 PROENÇA, Alexandre Júlio et al. **Potencial de produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UFSC**. 2022.
- 5 ALVES, Joel Fernando Malheiro. **Valorização de resíduos por co-digestão anaeróbia**. 2016. Dissertação de Mestrado.
- 6 DOMINGUES, Paulo Manuel Simão da Ponte. **Produção de biogás por codigestão anaeróbia e sua valorização**. 2021. Tese de Doutorado.
- 7 LIMA, H. Q. **Determinação de parâmetros cinéticos do processo de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de Santo André–SP por meio de testes do potencial bioquímico de metano**. 2016. Tese de Doutorado. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do ABC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Energia, área de concentração: Tecnologia, Engenharia e Modelagem. Santo André, 2016. 153p.
- 8 AZEITONA, D. C. L. **Efeitos de Pré-tratamentos Térmicos na Digestão Anaeróbia Termófila de Resíduos de Casca de Batata**. 2012. 142f. Tese de Doutorado. Dissertação

(Mestrado em Tecnologia e Segurança Alimentar)–Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

9 GUERI, Matheus Vitor Diniz et al. **Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão.** *Revista Geama*, v. 7, n. 3, p. 13-27, 2021.

10 MEDEIROS, A. F. et al. **Avaliação da produção de metano a partir da codigestão de resíduos sólidos orgânicos com macrófitas aquáticas.** *Revista DAE*, v. 71, n. 239, p. 115-128, jan. 2023. DOI: 10.36659/dae.2023.009.

11 MENDES, Adriano Aguiar et al. Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos. **Química Nova**, v. 28, p. 296-305, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. *Programa Nacional do Biogás e Biometano.* São Paulo: ABiogás, 2022. Disponível em: https://assets-global.website-files.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 9 fev. 2025.

12 MANDARINO, José Marcos Gontijo; HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; ROESSING, Antonio Carlos. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos.** 2. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2015.

13 CABRAL, C. B. G. et al. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o brasil substratos, digestores e uso de biogás-Probiogás.** Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

14 CRUZ, Walter Igor Gomes; CAMPOREZ, João Pedro Coslop. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSAS RESIDUAIS: UMA ABORDAGEM TEÓRICA.** 2023.

15 OBSCLIMA. **SEEG 2022:** Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Relatório final.** Fortaleza, 2022. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2022/10/ObsClima_SEEG2022_FINAL.pdf. Acesso em: 9 fev. 2025.

- 16 DEODATO, Alexandre Mestre. **Otimização da Produção de Biogás por Co-digestão Anaeróbia.** 2019. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado em Engenharia das Energias Renováveis, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- 17 VAISALI, Chandrasekar et al. Refining of edible oils: a critical appraisal of current and potential technologies. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 50, n. 1, p. 13-23, 2015.
- 18 RODRIGUEZ, R. Extração, refino e hidrogenação de óleos e gorduras. **Trabalho de Conclusão de Curso-Fundação Educacional do Município de Assis–FEMA**, Assis, p. 60, 2014.
- 19 TIRITAN, Maria Gabriela et al. **Refino de óleos vegetais via extração líquido-líquido em escala piloto com eliminação das etapas de clarificação e desodorização.** 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- 20 OLIVEIRA, Amanda Fernanda de et al. **Inogran: indústria de óleos vegetais.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- 21 SANTOS, Sara Gracielle Rodrigues et al. Estudo da produção de óleo vegetal e sua reutilização para obtenção de sabão. 2022.
- 22 ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033.** Paris: OECD Publishing, 2024. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2024-2033_4c5d2cfb-en.html. Acesso em: 8 fev. 2025.
- 23 ADULTERADOS, COMESTÍVEIS PUROS E.; CARVALHO, ANA CAROLINA DE OLIVEIRA. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE ÓLEOS VEGETAIS.
- 24 SOARES, I. P. et al. **Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2022.

25 GHARBY, Said. Refining vegetable oils: Chemical and physical refining. **The Scientific World Journal**, v. 2022, n. 1, p. 6627013, 2022.

26 VIEIRA, Igor João Machado. **Métodos alternativos utilizados para extração e refino de óleos vegetais**. 2023.

27 BUSWELL, Arthur M.; NEAVE, Sidney Lionel. Laboratory studies of sludge digestion. **Bulletin (Illinois State Water Survey) no. 30**, 1930.

28 ANGELIDAKI, Irini; SANDERS, Wendy. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. **Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology**, v. 3, p. 117-129, 2004.

29 HOLM-NIELSEN, Jens Bo; AL SEADI, Teodorita; OLESKOWICZ-POPIEL, Piotr. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource technology**, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009.

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

31 MARIANI, Leidiane. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. **Doutor**, Universiade de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2018.

32 HASAN, Camila; FEITOSA, Anny Kariny; DE ALMEIDA, MARIA CRISTINA. Produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais: Análise dos teores de sólidos totais, voláteis e fixos em amostras pré e pós digestão anaerobia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 257-273, 2019.

33 MAGALHÃES, Geísa Vieira Vasconcelos. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real**. 2018.

34 FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. **Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, Gülzow**, 2010.

35 COELHO, Suani Teixeira (Coord.). **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. Vanessa Pecora Garcilasso, Antônio Djalma Nunes Ferraz Junior, Marilin Mariano dos Santos, Caio Luca Joppert. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2018.

36 DE, PRODUÇÃO E. USO. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOGÁS E BIOMETANO. 2018.

37 MILANEZ, Artur Yabe et al. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. 2018.

38 FONTES, Amanda Vilaça. Processo de industrialização da soja no Brasil. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

39 AHIRING, B. **Increase in methane yield by lipid addition to anaerobic digesters**. Renewable Energy, v. 29, n. 3, p. 1023-1032, 2004.

40 PETRUY, A. & LETTINGA, G. Digestion of lipid-rich wastewater in expanded granular sludge bed reactors. Water Research, v. 31, n. 3, p. 620-630, 1997.

41 JORGE, Neuza. Química e tecnologia de óleos vegetais. **São Paulo: Cultura Acadêmica**, v. 1, p. 165, 2009.

42 INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ (IDR-Paraná). **Óleos vegetais: Instrução Normativa nº 49/06. Curitiba, 2020**. Disponível em: https://www.idrparana.pr.gov.br/sites/iapar/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/oleos_veg_ref_in_49_06.pdf. Acesso em: 1 fev. 2025.

43 AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Perguntas e respostas sobre óleos e gorduras vegetais. Brasília, 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/alimentos/perguntas-e-respostas-arquivos/perguntas-e-respostas-sobre-oleos-e-gorduras-vegetais-gepar-120122.pdf>

Acesso em: 1 fev. 2025.

44 CIRNE, D. G. et al. Anaerobic digestion of lipid-rich waste—Effects of lipid concentration. **Renewable energy**, v. 32, n. 6, p. 965-975, 2007.

45 NUNES, Cleiton Antônio. **Tecnologia de óleos e gorduras para engenharia de alimentos**. Lavras:[sn], 2013.

46 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Capacidade instalada da indústria de óleos vegetais**. Disponível em: <https://abiove.org.br/capacidade-instalada-da-industria-de-oleos-vegetais/>. Acesso em: 29 jan. 2025.

47 RAMALHO, Hugo F.; SUAREZ, Paulo AZ. A química dos óleos e gorduras e seus processos de extração e refino. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 2-15, 2013.

48 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Biodiesel: incremento na demanda e melhoria na qualidade**. Disponível em: <https://abiove.org.br/biodiesel-incremento-na-demanda-e-melhoria-na-qualidade/>. Acesso em: 28 jan. 2025.

49 ABIogás. **Produção de combustíveis líquidos a partir de biogás e biometano**. [s.d.]. Disponível em: <https://abiogas.org.br/publicacoes/producao-de-combustiveis-liquidos-a-partir-de-biogas-e-biometano/>. Acesso em: 26 jan. 2025.

50 SCHIEVANO, Andrea; D'IMPORZANO, Giuliana; ADANI, Fabrizio. Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 8, p. 2537-2541, 2009.

51 EMBRAPA. Refino. In: Agência de Informação Tecnológica. **Tecnologia de alimentos**. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/grupos-de-alimentos/oleaginosas/refino>. Acesso em: 24 jan. 2025.

52 IPCC. **Relatório de Síntese do AR6: Mudança Climática 2023**. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 18 jan. 2025.

53 ONU. **Relatório de Desenvolvimento Sustentável 2023**. Nova York: Organização das Nações Unidas, 2023. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment>. Acesso em: 18 jan. 2025.

54 GRI. *Global Sustainability Standards Board Report*. Amsterdã: **Global Reporting Initiative, 2023**. Disponível em: <https://www.globalreporting.org>. Acesso em: 18 jan. 2025.

55 ARRHENIUS, S. **On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground**. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 41, n. 251, p. 237-276, 1896.

56 FOURIER, J. **Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires**. *Annales de Chimie et de Physique*, v. 27, p. 136-167, 1824.

57 IEA. **World Energy Outlook 2022**. Paris: International Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 18 jan. 2025.

58 IPCC. **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr>. Acesso em: 18 jan. 2025.

59 KEELING, C. **The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere**. *Tellus*, v. 12, n. 2, p. 200-203, 1960.

60 STEFFEN, W. et al. **The Anthropocene: conceptual and historical perspectives**. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 369, n. 1938, p. 842-867, 2015.

61 WCED. **Our Common Future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

62 DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. John Wiley & Sons, 2011.

63 KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** 2022.

64 **GUIA DO BIOMASSA.** P3 *Guia final do biogás.* 2022. Disponível em: https://guiadobiogas.com.br/download/P3_Guia_FINAL.pdf. Acesso em: 19 jan. 2025.

65 DE MENEZES, Fredson Gomes et al. **O papel dos biodigestores na agropecuária para mitigação das mudanças climáticas: uma análise dos benefícios ambientais.** 2023.

66 SANDERS, W. T. M. **Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates.** Water Science and Technology, v. 44, n. 8, p. 69-76, 2001.

67 **AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA.** *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* 23rd ed. Washington, D.C.: APHA, AWWA, WEF, 2017.