

**INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
BACHARELADO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

GABRIEL GOMES DE MOURA CARVALHO

JOÃO VITOR KRUGER VELTEN RODRIGUES PINTO

**BIODIESEL: UMA REVISÃO DE LITERATURA DO USO DO GLICEROL
RESIDUAL**

VILA VELHA - ES

2023

GABRIEL GOMES DE MOURA CARVALHO

JOÃO VITOR KRUGER VELTEN RODRIGUES PINTO

**BIODIESEL: UMA REVISÃO DE LITERATURA DO USO DO GLICEROL
RESIDUAL**

Monografia apresentada à Coordenadoria do Curso de Química Industrial do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vila Velha, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ana Brígida Soares.

VILA VELHA - ES

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C331b Carvalho, Gabriel Gomes de Moura

Biodiesel: uma revisão de literatura do uso do glicerol residual. /
Gabriel Gomes de Moura Carvalho, João Vitor Kruger Velten Rodrigues
Pinto. Vila Velha, 2023.

61 f. : il. col., 30 cm.

Inclui bibliografia.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Ana Brígida Soares.

TCC (Graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vila
Velha, Coordenadoria do Curso de Química Industrial, 2023.

1. Biodiesel. I. Pinto, João Vitor Kruger Velten Rodrigues. II. Soares, Ana
Brígida. III. Instituto Federal do Espírito Santo. IV. Título.

CDD 23 – 662.8

ANEXO III – ATA DE DEFESA DE TCC

Aos 15 dias do mês de dezembro do ano de 2023, a banca presidida pela professora Ana Brígida Soares e composta por Mauro Cesar Dias e Tatiana Oliveira Costa, reuniu-se para a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**BIODIESEL: UMA REVISÃO DE LITERATURA DO USO DO GLICEROL RESIDUAL**”, apresentado por Gabriel Gomes de Moura Carvalho e João Vitor Kruger Velten Rodrigues Pinto do Curso Superior de Química Industrial. Após a apresentação do trabalho e arguição, a banca examinadora deliberou concluindo pela **APROVAÇÃO** do Trabalho de Conclusão de Curso, desde que o(s) estudante(s) entreguem o Trabalho de Conclusão de Curso corrigido, conforme as considerações realizadas pela Banca Examinadora e sob supervisão do orientador, à Biblioteca Zilma Coelho Pinto do Ifes/Vila Velha, como requisito necessário para solicitação de colação de grau. A banca examinadora, ainda, atribuiu nota 90,0 ao trabalho.

Vila Velha-ES, 15 de dezembro de 2023.

Após defesa do TCC, a ata e a ficha de avaliação deverão ser cadastrados pelo professor de TCC no Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Contratos do Ifes (Sipac) e assinado digitalmente pelo orientador, coorientador, estudantes envolvidos com o TCC e membros da banca examinadora.



Emitido em 20/12/2023

ATA DE DEFESA Nº Ata/2023 - VVL-CCQI (11.02.34.01.08.02.04)
(Nº do Documento: 18)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 21/12/2023 10:50)

ANA BRIGIDA SOARES

PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLÓGICO

VVL-CMPQ (11.02.34.01.07.02.01)

Matrícula: 1343195

(Assinado digitalmente em 20/12/2023 13:34)

MAURO CESAR DIAS

PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLÓGICO

VVL-CCLQ (11.02.34.01.08.02.03)

Matrícula: 1331520

(Assinado digitalmente em 20/12/2023 10:04)

MELINA MOREIRA CONTI

PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLÓGICO

VVL-CCQI (11.02.34.01.08.02.04)

Matrícula: 1889143

(Assinado digitalmente em 20/12/2023 12:50)

TATIANA OLIVEIRA COSTA

PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLÓGICO

VVL-CCTQ (11.02.34.01.08.02.06)

Matrícula: 1283296

(Assinado digitalmente em 22/12/2023 11:31)

GABRIEL GOMES DE MOURA CARVALHO

DISCENTE

Matrícula: 9999281085

(Assinado digitalmente em 25/12/2023 12:34)

JOÃO VITOR KRÜGER VELTEN RODRIGUES PINTO

DISCENTE

Matrícula: 9999282618

Visualize o documento original em <https://sipac.ifes.edu.br/documentos/> informando seu número: **18**, ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA**, data de emissão: **20/12/2023** e o código de verificação: **f75f527fce**

DECLARAÇÃO DO(A) AUTOR(A)

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e à autora.

Vila Velha, 04 de dezembro de 2023.

Gabriel Gomes de Moura Carvalho
João Vitor Kruger Velten Rodrigues Pinto

AGRADECIMENTOS

Por Gabriel:

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Este projeto representa o resultado de anos de esforço, apoio e orientação que recebi ao longo dessa jornada acadêmica.

Agradeço a Deus, pela vida, e por permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

À minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente, principalmente meus pais: Antônio Marcos de Carvalho e Esmeralda Gomes de Moura Carvalho, dedico meus mais profundos agradecimentos. Seu amor, compreensão e encorajamento foram a fonte de força que me impulsionou nos momentos desafiadores.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando conhecimentos, experiências e incentivando-me a perseverar, agradeço sinceramente. Cada palavra de ânimo foi crucial para superar os obstáculos e alcançar este objetivo. Agradeço em especial a Mariana do Nascimento Ferreira e Walter Igor Gomes da Cruz por esses anos de parceria que sabemos muito bem que foi essencial para conseguirmos chegar ao fim.

Agradeço a Umberto Carlos Vicentino Júnior, sem seu constante encorajamento, compreensão e paciência, que foram pilares fundamentais que eu pudesse superar os obstáculos. Em varias etapas, você esteve ao meu lado, oferecendo suporte emocional e prático, tornando essa jornada mais leve e significativa.

Agradeço a minha orientadora, Dra. Ana Brígida Soares, pela paciência, dedicação e orientação valiosa. Seus conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento no meu processo de formação profissional ao longo do curso. Muito obrigado por esses anos de parceria.

Agradeço também aos professores que tive ao longo do curso pela qualidade do ensino e pela inspiração que me proporcionaram ao longo desses anos.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa jornada. A cada colega que passou pela minha vida e que de alguma forma fez parte dessa trajetória, minha gratidão.

Por João:

Em primeiro lugar, a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais e irmã, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

O crescente interesse na produção de biodiesel tem levantado questões pertinentes relacionadas ao glicerol residual gerado durante o processo. O glicerol, subproduto da produção de biodiesel, tem sido objeto de investigações com o objetivo de mitigar o impacto ambiental e otimizar a sua reutilização em diferentes setores industriais. Esta pesquisa inseriu-se nesse contexto, buscando contribuir para a discussão sobre a eficiência no uso do glicerol residual no âmbito do biodiesel. O objetivo geral desta pesquisa foi discutir sobre o glicerol residual, explorando métodos de reutilização e tecnologias aplicáveis para sua gestão eficiente e aproveitamento. O problema central da pesquisa focou em identificar tecnologias emergentes e existentes que permitissem a transformação do glicerol residual em produtos ou processos de valor agregado, alinhados com os princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental. A metodologia adotada baseou-se numa revisão de literatura qualitativa, descritiva e bibliográfica, enfocando trabalhos e pesquisas previamente publicadas sobre o tema. Os resultados evidenciaram várias possibilidades de aproveitamento do glicerol, desde a produção de energia até sua utilização em diversos setores industriais, validando a importância de seu manejo eficiente para a promoção da sustentabilidade ambiental e otimização dos recursos disponíveis. A discussão abarcou diversas tecnologias e métodos que demonstraram ser eficazes na gestão do glicerol residual, indicando um caminho promissor para o aprimoramento contínuo nesta área. A reutilização eficaz do glicerol mostrou-se como um elemento-chave para a sustentabilidade na produção de biodiesel, colaborando para a minimização de resíduos e promovendo uma abordagem mais integrada e ambientalmente responsável no setor. Em conclusão, a pesquisa proporcionou uma compreensão ampliada sobre o manejo eficiente do glicerol residual, sublinhando sua relevância e o potencial para contribuir significativamente para a sustentabilidade e eficiência na produção de biodiesel.

Palavras-chave: Biodiesel. Glicerol residual. Reutilização. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing interest in biodiesel production has raised pertinent questions related to the residual glycerol generated during the process. Glycerol, a byproduct of biodiesel production, has been the subject of investigations aiming to mitigate environmental impact and optimize its reuse in different industrial sectors. This research is situated within this context, seeking to contribute to the discussion about the efficiency in the use of residual glycerol in the realm of biodiesel. The overall objective of this research was to discuss residual glycerol, exploring methods of reuse and applicable technologies for its efficient management and utilization. The central problem of the research focused on identifying emerging and existing technologies that would allow the transformation of residual glycerol into products or processes of added value, aligned with principles of sustainability and environmental responsibility. The adopted methodology was based on a qualitative, descriptive, and bibliographic literature review, focusing on previously published works and research on the topic. The results highlighted various possibilities for glycerol utilization, from energy production to its use in diverse industrial sectors, validating the importance of its efficient management for promoting environmental sustainability and optimization of available resources. The discussion encompassed various technologies and methods that proved effective in the management of residual glycerol, indicating a promising path for continuous improvement in this area. The effective reuse of glycerol emerged as a key element for sustainability in biodiesel production, aiding in minimizing waste and promoting a more integrated and environmentally responsible approach in the sector. In conclusion, the research provided an expanded understanding of the efficient management of residual glycerol, underscoring its relevance and potential to significantly contribute to sustainability and efficiency in biodiesel production.

Keywords: Biodiesel. Residual glycerol. Reuse. Sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 METODOLOGIA	16
4 REVISÃO DE LITERATURA	17
4.1 CONCEITOS DA GESTÃO E A REUTILIZAÇÃO DO GLICEROL RESIDUAL	17
4.1.1 Contextualização do Glicerol Residual.....	18
4.1.1.1 Origem e produção do glicerol residual na indústria de biodiesel.....	21
4.1.1.2 Características químicas e físicas do glicerol residual	23
4.1.1.3 Importância da gestão adequada e técnicas de purificação do glicerol residual	24
4.1.1.3.1 Destilação.....	25
4.1.1.3.2 Troca iônica.....	26
4.1.1.3.3 Adsorção.....	27
4.1.2 Gestão do Glicerol Residual	28
4.1.2.1 Princípios de sustentabilidade aplicados	29
4.1.2.2 Gestão eficiente de resíduos industriais	30
4.1.2.3 Normativas e legislação aplicável	32
4.1.3 Formas de Reutilização do Glicerol Residual	33
4.1.3.1 Impactos ambientais e benefícios da reutilização adequada	37
4.1.3.2 Barreiras e limitações para a reutilização do glicerol residual.....	37
4.2 AS TECNOLOGIAS EMERGENTES E CONSOLIDADAS QUE PERMITEM A REUTILIZAÇÃO EFICAZ DO GLICEROL RESIDUAL.....	38
4.2.1 Mapeamento das Tecnologias em desenvolvimento	39
4.2.1.1 Categorização das novas tecnologias.....	40
4.2.1.2 Processos e mecanismos de tecnologias em desenvolvimento	41
4.2.2 Tecnologias Consolidadas	42

4.2.2.1 Comparação com novas tecnologias	42
4.2.2.2 Adequação e adaptação de tecnologias antigas	43
4.2.3 Avaliação da Eficácia na Reutilização do Glicerol Residual	44
4.2.3.1 Metodologias de avaliação e caracterização	45
4.2.3.2 Indicadores de eficácia	46
4.2.3.3 Resultados e contribuições para a reutilização eficaz do glicerol residual	47
4.3 AS POTENCIAIS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E INDUSTRIAIS RELACIONADAS AO MANEJO ADEQUADO DO GLICEROL RESIDUAL	48
4.3.1 Implicações Ambientais.....	48
4.3.1.1 Impactos no ecossistema e estratégias de mitigação de impactos ambientais	49
4.3.2 Implicações Industriais.....	50
4.3.2.1 Influência no processo produtivo industrial	51
4.3.2.2 Desafios e soluções para a indústria.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
6 REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O biodiesel é um biocombustível derivado de óleos vegetais ou gordura animal obtido através do processo químico denominado de transesterificação. O biodiesel representa uma alternativa ecologicamente favorável aos combustíveis fósseis, e sua produção e aplicação vêm ganhando destaque como uma estratégia importante na redução das emissões de gases de efeito estufa e na diversificação das fontes de energia. A busca por combustíveis renováveis tem levado a uma crescente atenção ao biodiesel, tornando-o um campo de pesquisa de relevância crescente no contexto das mudanças climáticas e da segurança energética (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019)

A produção de biodiesel envolve principalmente a reação de transesterificação, na qual óleos vegetais ou gorduras animais são convertidos em ésteres metílicos ou etílicos. Esta etapa é fundamental no processo, uma vez que determina a qualidade do biodiesel produzido, influenciando diretamente suas propriedades de combustão e estabilidade (COLOMBO; ENDER; BARROS, 2017). Detalhar o processo de transesterificação é crucial para compreender a conversão das matérias-primas em biodiesel e as implicações na qualidade do produto final.

Uma das questões críticas relacionadas à produção de biodiesel é a quantidade substancial de glicerina que é gerada como subproduto durante a reação de transesterificação. No processo de produção de biodiesel a partir da transesterificação de óleos vegetais, é gerado como subproduto glicerol (propano-1,2,3-triol). Normalmente, a produção de 100 kg de biodiesel rende aproximadamente 10 kg de glicerol, com pureza em torno de 50–55% (BAGNATO et al., 2017). A glicerina, ou glicerol, é um composto versátil com várias aplicações industriais, mas a superprodução desse subproduto pode desencadear desafios econômicos e logísticos (LACERDA et al., 2014). Assim, o gerenciamento eficiente da glicerina, sua valorização e utilização são tópicos essenciais para a sustentabilidade da indústria do biodiesel.

No âmbito do biodiesel, a gestão adequada do glicerol residual manifesta-se como uma questão técnica e ambiental. O glicerol representa um desafio, dado que sua disposição inadequada pode acarretar impactos ambientais negativos (MALAYIL et al., 2023). O aproveitamento eficiente desse composto químico é uma demanda emergente no campo da bioenergia. A transformação do glicerol em produtos de valor agregado constitui uma abordagem que beneficia tanto o setor econômico quanto o

ambiental, promovendo a sustentabilidade da produção de biodiesel (SILVA et al., 2017).

A efetiva gestão do glicerol, portanto, ressoa como uma questão central para o equilíbrio e eficiência do setor de biodiesel. No contexto das possíveis aplicações do glicerol, sua conversão em outros compostos químicos úteis evidencia-se (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Diante disso, salienta-se que a devida produção de polímeros, solventes e outros produtos químicos a partir do glicerol contribui para a diversificação das fontes de matéria-prima, minimizando a dependência de recursos não renováveis (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

A promoção de métodos eficientes para a utilização do glicerol na síntese de outros compostos pode impulsionar a inovação e o desenvolvimento tecnológico no campo da química verde, proporcionando soluções que conciliam produtividade e respeito ao meio ambiente (SINELI et al., 2022). A correta abordagem em relação ao glicerol residual, assim, destaca-se no panorama atual da produção de biodiesel, figurando como um elemento que reforça a viabilidade e a responsabilidade ambiental desse setor energético (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

A atenção ao glicerol residual da produção de biodiesel insere-se no campo de discussões essenciais para a comunidade acadêmica e a sociedade civil. O exame aprofundado desta temática projeta luz sobre métodos otimizados para a gestão de resíduos industriais, convergindo para a minimização de efeitos ambientais adversos e promovendo um manejo industrial mais consciente e alinhado aos princípios de sustentabilidade (KOLONNAGE; CHEW, 2023).

A abordagem deste tema é uma contribuição notável para a construção de um corpo de conhecimento que auxilie tanto o setor industrial quanto a sociedade em geral na implementação de práticas mais eficientes e ecologicamente corretas. A divulgação ampla e detalhada de informações sobre o glicerol residual e seu manejo adequado ecoa na formação de uma consciência coletiva mais aguçada sobre a responsabilidade ambiental.

Ademais, proporciona um alicerce sólido para a inovação contínua, estimulando a criação de estratégias que melhorem a eficiência na produção de biodiesel e outros biocombustíveis. Assim, ao evidenciar a relevância desta questão, busca-se impulsionar a disseminação de conhecimento e práticas que reflitam em benefícios concretos e mensuráveis para o meio ambiente e a sociedade como um todo, reafirmando o compromisso coletivo com um futuro mais sustentável e equilibrado.

O glicerol residual, resultante do processo de produção de biodiesel, emerge como um subproduto que necessita de adequada gestão e aproveitamento. Diante deste contexto, delineia-se um panorama onde o destino e a reutilização eficaz do glicerol residual permanecem como questões pendentes e urgentes para os envolvidos no setor de biocombustíveis (KALITA et al., 2022).

Diante do panorama apresentado, parte-se do seguinte problema de pesquisa neste trabalho: quais são as tecnologias emergentes e existentes que permitem a transformação do glicerol residual em produtos ou processos de valor agregado, e que simultaneamente alinham-se com os princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental?

A presente investigação caracteriza-se como uma revisão de literatura, um método que visa a síntese de conhecimentos e informações sobre um tema específico, provenientes de publicações previamente realizadas. Opta-se por uma abordagem qualitativa, que enfoca a compreensão profunda das informações, e por uma natureza descritiva, objetivando a exposição clara e ordenada dos dados, sem a intervenção do pesquisador nos fenômenos estudados.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é discutir sobre o glicerol residual oriundo da produção de biodiesel, abordando os métodos de reutilização e as tecnologias aplicáveis para sua eficiente gestão e aproveitamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) elucidar os conceitos e teorias que embasam a gestão e a reutilização do glicerol residual no contexto industrial e ambiental e científico;
- b) identificar as tecnologias emergentes e consolidadas que permitem a reutilização eficaz do glicerol residual, através pesquisas, que utilizam este composto;
- c) avaliar as potenciais implicações ambientais e industriais relacionadas ao manejo adequado do glicerol residual.

3 METODOLOGIA

O percurso metodológico adotado segue os passos da pesquisa bibliográfica, que consiste na consulta a obras já publicadas para a coleta de dados relevantes ao objeto de estudo. As buscas serão realizadas nas bases de dados Science Direct, Google Scholar e SciELO, empregando os descritores “glicerol residual”, “reutilização”, “tecnologias emergentes” e “gestão ambiental”. Estabelecem-se como critérios de inclusão: artigos científicos e patentes publicados nos últimos dez anos, textos em língua portuguesa e inglesa, acesso gratuito e aqueles que abordam especificamente a temática do glicerol residual na produção de biodiesel.

4 REVISÃO DE LITERATURA

A estrutura da pesquisa está organizada de maneira a alinhar-se diretamente com os objetivos da pesquisa. No primeiro momento é dedicado a elucidar os conceitos, teorias, artigos científicos e pesquisas que embasam a gestão e a reutilização do glicerol residual no contexto industrial e ambiental. Este segmento enfocará na consolidação de uma base teórica sólida, proporcionando a contextualização necessária para o entendimento abrangente da problemática em questão.

O segundo momento foca na identificação e descrição detalhada das tecnologias emergentes e consolidadas que permitem a reutilização eficaz do glicerol residual. Aqui, será dada ênfase às inovações tecnológicas e aos métodos já validados que apresentam potencial aplicabilidade prática na gestão do glicerol residual. O terceiro e último momento objetiva avaliar as potenciais implicações ambientais e industriais relacionadas ao manejo adequado do glicerol residual.

Este capítulo se destinará à análise crítica das informações obtidas, explorando a relevância e o impacto das estratégias de gestão do glicerol residual sobre o ambiente e o setor industrial relacionado ao biodiesel.

4.1 CONCEITOS DA GESTÃO E A REUTILIZAÇÃO DO GLICEROL RESIDUAL

O glicerol residual emerge no contexto da produção de biodiesel. Esse composto, quando não gerido e reutilizado de forma adequada, pode apresentar desafios ambientais e industriais (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017). O processo de gestão desse subproduto envolve uma série de procedimentos que buscam minimizar os impactos negativos associados ao seu descarte inadequado. Diversos métodos de gestão e reutilização do glicerol residual têm sido explorados (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019).

O conhecimento e a compreensão aprofundada desses métodos são essenciais para uma gestão eficaz e para a maximização do aproveitamento do glicerol residual (MALAYIL et al., 2023). Os conceitos que embasam a gestão e a reutilização do glicerol residual estão alinhados com os princípios de sustentabilidade e eficiência operacional. A incorporação desses conceitos nas operações industriais favorece a otimização dos recursos, a mitigação dos impactos ambientais e a conformidade com as normativas vigentes (SILVA et al., 2017).

Diferentes abordagens teóricas oferecem perspectivas variadas sobre as melhores práticas de gestão do glicerol residual. A seleção de uma abordagem apropriada é influenciada por vários fatores, incluindo a capacidade operacional e as

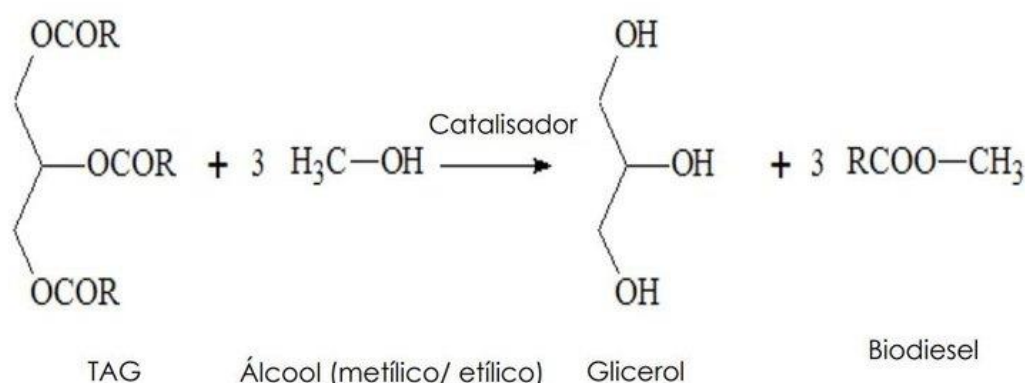
especificidades do contexto industrial em questão (SINELI et al., 2022). Nessa perspectiva, as teorias que norteiam a reutilização do glicerol residual concentram-se em estratégias que promovem a valorização desse subproduto (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

Tais teorias exploram o potencial do glicerol residual em diversas aplicações, incluindo a produção de energia e a síntese de compostos de valor agregado. A implementação efetiva dessas estratégias de reutilização exige uma avaliação criteriosa das tecnologias disponíveis, bem como uma análise aprofundada dos benefícios e limitações associados a cada abordagem. A integração bem-sucedida das práticas de reutilização do glicerol residual contribui para o avanço da sustentabilidade e da eficiência no contexto industrial e ambiental (LINS et al., 2021).

4.1.1 Contextualização do Glicerol Residual

O glicerol residual, subproduto da produção de biodiesel, ocupa um espaço notório no âmbito industrial e ambiental. A produção de biodiesel, processo químico que converte lipídios em ésteres alquílicos, gera o glicerol como subproduto em quantidade considerável (KOLONNAGE; CHEW, 2023). Este composto, ao ser liberado no ambiente sem tratamento adequado, pode apresentar efeitos adversos, impactando negativamente ecossistemas e contribuindo para problemas ambientais globais (KALITA et al., 2022).

Figura 1 - Reação de transesterificação de óleo vegetal

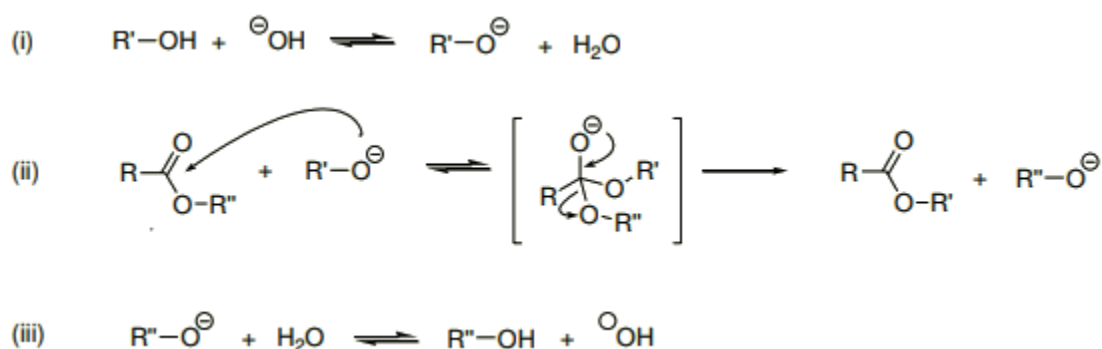


Fonte: DO NASCIMENTO et al. (2020)

De acordo com Meneghetti, Meneghetti e Brito (2013), o mecanismo amplamente aceito para a transesterificação de triacilglicerídeos com álcoois em presença de bases de Brønsted é apresentado na Figura 2. Inicialmente é formada a espécie ativa

(alcóxido) pela reação do álcool com a base, conforme a reação (i) da figura 1. Após, as carbonilas dos acilglicerídeos sofrem gradualmente ataque nucleofílico do alcóxido produzido anteriormente, formando intermediários tetraédricos, conforme reação (ii) da figura 1. A partir de um rearranjo destes intermediários, há a formação de um éster e outro alcóxido, o qual, após a desprotonação do ácido conjugado da base, formado na reação (i), regenera a base de partida. Esse mecanismo ocorre sucessivamente, até que praticamente todos os tri-, di- e monoacilglicerídeos sejam transformados em ésteres alquílicos e glicerol.

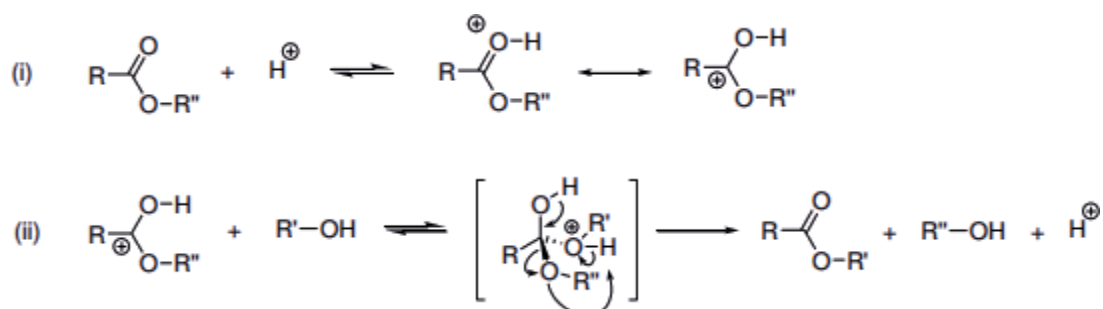
Figura 2 - Mecanismo da transesterificação em meio básico



Fonte: MENEGHETTI; MENEGHETTI; BRITO (2013)

Ainda de acordo com Meneghetti, Meneghetti e Brito (2013), na figura 2 é mostrado o mecanismo aceito para a reação de transesterificação de triacilgliceróis com álcoois em meio ácido. Uma carbonila, por exemplo, de um triacilglicerídeo, sofre um ataque eletrofílico do H^+ , conforme a reação (i) da figura 3, formando um carbocátion. A seguir, este carbocátion sofre um ataque nucleofílico de uma molécula do álcool, formando um intermediário tetraédrico. Então, ocorre a formação de, neste caso, um diacilglicerídeo e um éster graxo, juntamente com a regeneração da espécie H^+ . Por processos semelhantes serão formados os monoacilglicerídeos e glicerol.

Figura 3 - Mecanismo da transesterificação em meio ácido



Fonte: MENEGHETTI; MENEGHETTI; BRITO (2013)

A gestão eficaz do glicerol residual torna-se então uma questão de relevância para indústrias engajadas na produção de biodiesel. Esse contexto gera a necessidade de estratégias eficazes para a gestão e reutilização deste composto, abordando não somente os aspectos técnicos, mas também as implicações ambientais e normativas relacionadas. Dessa forma, observa-se que as abordagens para a gestão do glicerol residual englobam diversos métodos e tecnologias (PRADIMA et al., 2017).

A reutilização do glicerol em diferentes processos industriais representa uma estratégia viável, que alinha a eficiência operacional com o compromisso ambiental. Métodos como a conversão do glicerol em outros compostos químicos de interesse industrial, ou sua utilização como fonte de energia, estão entre as opções exploradas (ZANELLI, 2023). Cada uma dessas abordagens apresenta suas próprias exigências técnicas e operacionais, assim como implicações em termos de eficiência, custos e conformidade com padrões ambientais (SILVA et al., 2017).

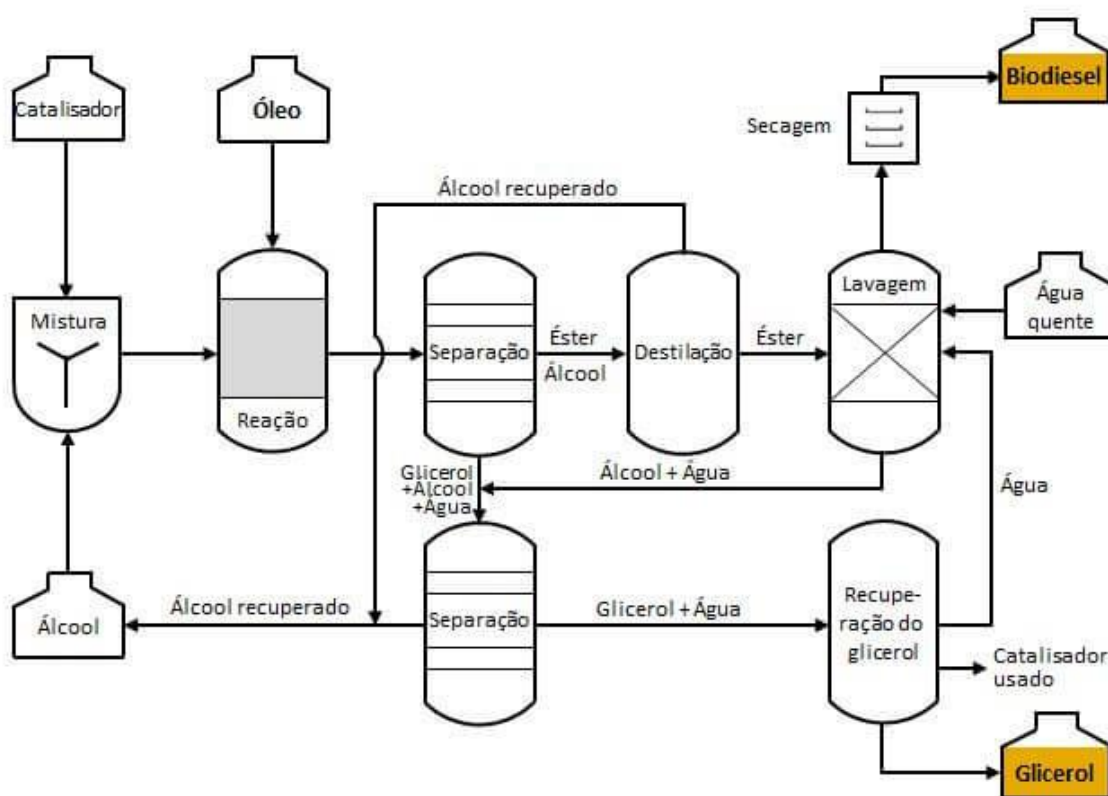
No campo regulatório, a gestão do glicerol residual é alvo de normativas específicas, que estabelecem diretrizes claras quanto ao seu manejo, tratamento e descarte (MAHESHWARI et al., 2022). Nesse contexto, a conformidade com essas normativas é essencial para garantir a operação legítima das indústrias de biodiesel, bem como para assegurar que as práticas adotadas contribuam para a minimização de impactos ambientais negativos (PEITER et al., 2016).

O alinhamento com essas diretrizes regulatórias contribui, adicionalmente, para a construção de uma imagem corporativa responsável, fortalecendo a posição da empresa no mercado e frente às comunidades em que opera (ANHESINE et al., 2022). A atenção minuciosa às regulamentações vigentes e a adoção de práticas de gestão eficazes do glicerol residual são, portanto, componentes essenciais para a sustentabilidade e sucesso no setor de produção de biodiesel (LACERDA et al., 2014).

4.1.1.1 Origem e produção do glicerol residual na indústria de biodiesel

O glicerol residual emerge predominantemente como um subproduto na produção de biodiesel. No processo de transesterificação, onde triglicerídeos são reagidos com álcool para produzir ésteres alquílicos, o glicerol é liberado em quantidades significativas (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019). Na figura 4, Oliveira (2021) ilustra um fluxograma de processo de produção de biodiesel de acordo com a forma que é mais comumente aplicada pela indústria brasileira, de acordo com o adotado na literatura.

Figura 4 - Fluxograma do processo de produção de biodiesel



Fonte: OLIVEIRA (2021)

Esse processo de produção de biodiesel, é uma alternativa de energia renovável em resposta à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diminuir a dependência de combustíveis fósseis (ADAMES et al., 2021). De acordo com o fluxograma, O procedimento inicia-se com a adição dos triacilgliceróis, denominados como óleo no processo, ao reator juntamente com o álcool e o catalisador. Esses elementos podem ser pré-misturados conforme indicado no fluxograma ou

introduzidos separadamente no reator. Ao término da reação, a mistura resultante é encaminhada para o tanque de separação por meio do processo de decantação, onde ocorre a separação do glicerol do éster. Posteriormente, o éster é direcionado para o tanque de destilação para a evaporação e recuperação parcial do álcool, que é condensado e reintroduzido no tanque inicial. Simultaneamente, o glicerol passa por um processo similar, visando recuperar o álcool presente, enquanto a água e o glicerol são direcionados para um tanque de separação. Neste estágio, a água é redirecionada para o tanque de lavagem do éster, o catalisador é descartado e o glicerol é armazenado em seu respectivo tanque. O éster, praticamente livre de álcool, é submetido a uma lavagem com água tratada, frequentemente com adição de ácido fosfórico. Este procedimento tem como finalidade neutralizar o catalisador e eliminar impurezas, incluindo o sabão formado pela interação do catalisador com a matéria-prima, especialmente quando esta é rica em gordura. Após a lavagem, o éster passa a ser denominado biodiesel, seguindo para um processo de secagem em uma centrífuga a aproximadamente 118°C. Em certos casos, é realizado um processo de filtragem para remoção das últimas impurezas. O biodiesel purificado é então submetido a verificações para garantir sua conformidade com os parâmetros de densidade, viscosidade, acidez e índice de iodo estipulados pelas normativas vigentes (OLIVEIRA, 2021).

A produção de biodiesel tem experimentado um crescimento consistente, gerando, consequentemente, volumes expressivos de glicerol residual. Este panorama reforça a necessidade de abordagens eficazes para a gestão desse subproduto (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019). O glicerol, uma molécula trifuncional, possui um vasto leque de aplicações potenciais. No entanto, sua reutilização enfrenta desafios, tais como a necessidade de purificação e a busca por aplicações economicamente viáveis (VOLPATO et al., 2022).

O glicerol pode ser empregado em numerosas aplicações industriais, como na produção de produtos químicos, combustíveis e materiais poliméricos. O aproveitamento eficaz do glicerol residual exige desenvolvimento tecnológico e inovação, bem como um comprometimento com a sustentabilidade ambiental (LINS et al., 2021). Dessa maneira, salienta-se que o manejo adequado desse subproduto pode contribuir para a eficiência operacional e a responsabilidade ambiental na indústria de biodiesel (ARAÚJO et al., 2021).

No contexto global, a gestão do glicerol residual é um tema de relevância crescente. A ampliação da produção de biodiesel traz consigo o aumento na geração de glicerol,

destacando a urgência em desenvolver estratégias robustas para o seu manejo (ZANELLI, 2023). A incorporação de práticas sustentáveis na gestão do glicerol pode desempenhar um papel essencial na mitigação de impactos ambientais adversos e na promoção de uma indústria de biodiesel mais sustentável e ecologicamente responsável (SABINO et al., 2020).

A atenção cuidadosa às práticas de manejo do glicerol residual reflete, assim, um compromisso não apenas com a eficiência industrial, mas também com a preservação ambiental.

4.1.1.2 Características químicas e físicas do glicerol residual

O glicerol residual exibe características químicas e físicas distintas. Este composto apresenta três grupos hidroxila, o que confere propriedades higroscópicas marcadas (MALAYIL et al., 2023). Esta condição favorece a solubilidade em água e diversos outros solventes orgânicos, proporcionando versatilidade em diversas aplicações industriais. Diante disso, observa-se que a sua apresentação em estado líquido à temperatura ambiente facilita de maneira significativa o manuseio e a integração em variados processos industriais (ANHESINE et al., 2022).

Este composto demonstra um ponto de fusão de aproximadamente 17,8°C e um ponto de ebulição em torno de 290°C. Tais características demonstram a estabilidade térmica do glicerol em condições normais de pressão e temperatura. O glicerol é caracterizado por sua viscosidade relativamente alta, atributo que influencia seu comportamento em soluções e misturas. Este aspecto é vital para aplicações em que a reologia desempenha um papel significativo. A densidade do glicerol, próxima a 1,26 g/cm³, reflete seu peso molecular de 92,09 g/mol (ADAMES et al., 2021).

Este composto apresenta um valor de pH próximo à neutralidade, demonstrando compatibilidade com uma ampla gama de substâncias e materiais. O índice de refração do glicerol é registrado em torno de 1,47, característica que é explorada em aplicações ópticas e de imagem (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Além disso, o glicerol exibe capacidade de formar ligações de hidrogênio, um aspecto crucial para interações moleculares e reatividade química (VOLPATO et al., 2022).

Em relação à reatividade, o glicerol pode participar de diversas reações químicas. A presença de múltiplos grupos hidroxila torna possível a ocorrência de reações de esterificação e transesterificação (SINELI et al., 2022). Estas reações são empregadas na síntese de ésteres de glicerol, compostos com aplicabilidade ampla em setores industriais diversos. O glicerol também pode ser submetido a processos

de oxidação, produzindo compostos como o ácido glioixílico e di-hidroxi-acetona (ARAÚJO et al., 2021).

O potencial redox do glicerol é um parâmetro relevante para suas aplicações em processos eletroquímicos e de oxidação. Assim, as características químicas e físicas do glicerol residual desempenham papéis fundamentais em sua funcionalidade, aplicabilidade e manejo em contextos industriais diversos (SILVA et al., 2017). Demais propriedades do glicerol estão citadas na tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do glicerol a 20°C

Fórmula química	C ₃ H ₈ O ₃
Massa molecular	92,09382 g mol ⁻¹
Densidade	1,261 g cm ⁻³
Viscosidade	1,5 Pa s
Ponto de fusão	18,2 °C
Ponto de ebulição	290 °C
Calorias	4,32 kcal g ⁻¹
Ponto de fulgor	160 °C
Tensão Superficial	64,00 mN m ⁻¹
Coeficiente de temperatura	-0,0598 mN (mK) ⁻¹

Fonte: Beatriz; Araújo; Lima (2011)

4.1.1.3 Importância da gestão adequada e técnicas de purificação do glicerol residual

A gestão adequada do glicerol residual é um tema central na indústria do biodiesel. O glicerol, um subproduto desta indústria, pode ser um agente poluente caso não seja devidamente tratado e descartado (KOLONNAGE; CHEW, 2023). A mitigação de impactos ambientais negativos é uma responsabilidade inerente à gestão industrial, e o manejo adequado do glicerol residual está neste contexto. Assim, o gerenciamento eficiente do glicerol residual implica em sua reutilização em diferentes processos industriais (SABINO et al., 2020).

Evita-se descartes inadequados e contribuindo para a sustentabilidade do setor. A adoção de práticas que contemplem a transformação do glicerol residual em produtos de valor agregado, como a produção de biogás, demonstra ser uma estratégia viável. A incorporação do glicerol em processos de produção de compostos químicos de interesse também se destaca. A realização de reações químicas envolvendo o glicerol residual pode resultar na obtenção de compostos como o ácido glioixílico e di-hidroxi-acetona, amplamente utilizados na indústria (ZANELLI, 2023).

A valorização do glicerol residual, portanto, não apenas minimiza o passivo ambiental, mas também pode representar uma fonte adicional de receita para a indústria do biodiesel, otimizando os recursos disponíveis e promovendo a economia circular (PRADIMA et al., 2017). As abordagens envolvendo a utilização do glicerol residual em processos fermentativos para a produção de biomoléculas de interesse, como polímeros biodegradáveis, também demonstram potencial (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019).

As impurezas que contaminam o glicerol podem ser: catalisador, álcool (etanol ou metanol), ácidos graxos, óleo residual, ésteres, água, sabões e sais, que conferem ao mesmo um baixo valor agregado. (SILVA, 2019)

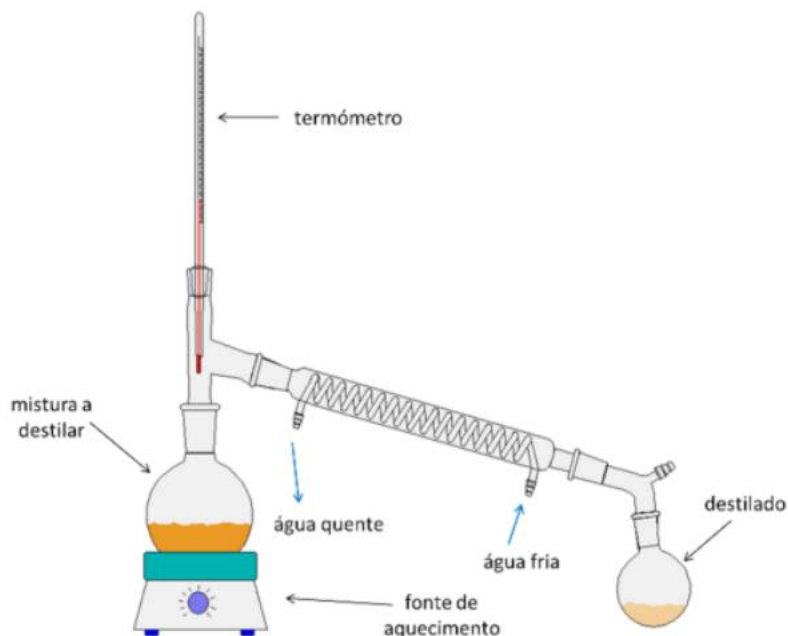
A purificação do glicerol, um subproduto comum na produção de biodiesel, é uma etapa essencial para garantir sua qualidade e aplicabilidade em diversas indústrias. Diversas técnicas são empregadas para purificar o glicerol, removendo impurezas e resíduos associados ao processo de transesterificação. O glicerol bruto pode ser purificado por diferentes métodos, tais como: destilação, filtração, tratamento químico, adsorção, troca iônica, extração, decantação e cristalização. A combinação de dois ou mais métodos durante o processo pode promover uma maior eficiência na remoção de impurezas. A rota mais utilizada para a purificação é a recuperação do álcool por destilação, seguida pela remoção de sal por resina de troca iônica e adsorção utilizando carbono ativado (SILVA, 2019).

4.1.1.3.1 Destilação

A destilação é um método de separação de substâncias com base em suas diferentes temperaturas de ebulição. As substâncias envolvidas podem ser um líquido e um sólido ou dois líquidos distintos. Esse processo de separação é fundamentado no equilíbrio líquido/vapor. Ao aplicar calor a uma mistura líquida e promover sua vaporização parcial, resultam duas fases distintas: uma líquida e outra de vapor, cada uma com composições diferentes. A disparidade na composição entre as fases decorre das variadas volatilidades dos componentes iniciais da mistura. Quanto maior a discrepância nas volatilidades, maior será a diferença na composição entre a fase líquida e de vapor, facilitando assim a separação por destilação (LEAL, 2015). Em termos simples, o processo de destilação pode ser dividido em dois passos: primeiro, a mistura é aquecida para converter pelo menos parte do líquido (ou de um dos líquidos) em vapor; segundo, esse vapor é condensado em outra parte do processo. Quando uma solução é destilada, seus componentes entram em ebulição em temperaturas diferentes, permitindo a separação. O dispositivo utilizado para esse fim

é chamado de destilador, como exemplificado em um modelo simples na figura 5 (LEAL, 2015).

Figura 5 - Esquema simplificado de uma montagem para destilação.



Fonte: Leal (2015)

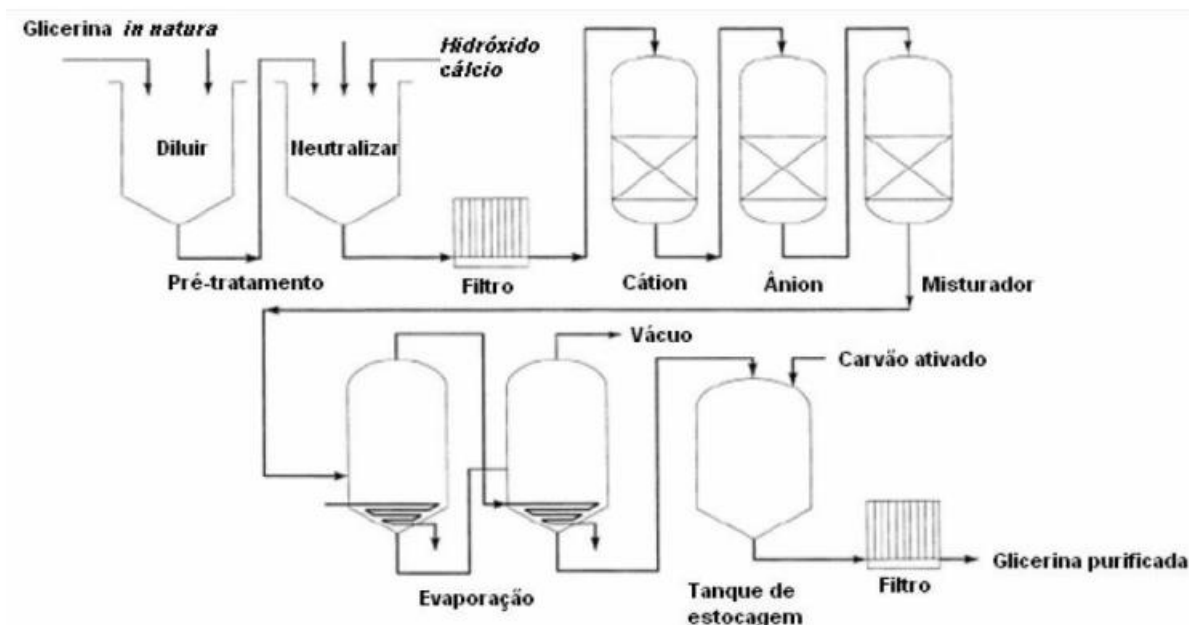
A destilação para purificação do glicerol é geralmente realizada para remoção inicial de água (Ponto de Ebulição = 100 °C) e álcoois (Ponto de Ebulição do etanol = 72 °C; Ponto de Ebulição do metanol = 64 °C), seguida pela destilação do glicerol, tendo como base para a eficácia da separação seu ponto de ebulição mais elevado (290 °C). É um método simples e eficiente para purificar o glicerol bruto com elevados teores de sais e matéria orgânica não-glicerol, obtendo a glicerina destilada. (SILVA, 2019).

4.1.1.3.2 Troca Iônica

As resinas de troca iônica, como o próprio nome diz ela faz uma troca de íons, de forma simplificada podemos dizer que um íon indesejável será trocado por outro de interesse de cada aplicação. Este método de purificação da glicerina vem ganhando grande aceitação devido a simplicidade de operação e baixo consumo de energia. Esse procedimento é baseado no uso de resinas de troca iônica para o refino da glicerina obtida da hidrólise ou transesterificação (MEDEIROS et al, 2017). Para tratamento de glicerina proveniente da saponificação, um pré-tratamento é indicado para remoção, como por exemplo, a acidificação. De acordo com a figura 6, a purificação por troca iônica consiste na passagem do material filtrado através de sucessivos leitos com resinas de cátion forte e ânion fraco (tipo I), e cátion fraco e

ânion forte (tipo II). Este processo ocorre de forma eficiente com soluções diluídas contendo de 25 a 40%. Com a passagem do material através das resinas ocorre a eliminação de traços de ácidos graxos, cor, odor, e outras impurezas minerais presentes (CARVALHO; CEOLATO, 2014).

Figura 6 - Fluxograma da purificação da glicerina por troca iônica



Fonte: Carvalho e Ceolato (2014)

4.1.1.3.3 Adsorção

A adsorção é um processo de transferência de massa que investiga a capacidade de certos sólidos de concentrar em sua superfície substâncias específicas presentes em fluidos líquidos ou gasosos, permitindo a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO, 2020). À medida que os componentes adsorvidos se acumulam na superfície externa, a eficácia da adsorção aumenta com a maior área superficial por unidade de massa sólida. Portanto, os adsorventes geralmente consistem em sólidos com partículas porosas. A substância que se acumula na interface do material é comumente chamada de adsorvato ou adsorbato, enquanto a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula é referida como adsorvente ou adsorbente (NASCIMENTO, 2020).

Na purificação do glicerol, nessa etapa é possível por meio dos adsorventes ser realizada a remoção de água residual, metanol, sal, e certos constituintes que causam o odor e a coloração da mesma. Adsorventes comerciais são divididos em quatro classes principais: zeólitas, alumina ativada, sílica gel e carvão ativado. Dentre estes, o carvão ativado é o mais comumente utilizado (ULIANA et al., 2015).

A eficácia dessas estratégias depende de um planejamento cuidadoso e da implementação de tecnologias apropriadas. O desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias para o aproveitamento do glicerol residual são essenciais para maximizar os benefícios associados à sua gestão (LINS et al., 2021). A integração efetiva do glicerol residual em cadeias produtivas diversas requer a colaboração entre diferentes setores industriais e a adoção de uma visão holística, considerando não apenas os aspectos técnicos, mas também as implicações ambientais e econômicas (MAHESHWARI et al., 2022).

O comprometimento com práticas sustentáveis e a inovação tecnológica são elementos-chave para assegurar a gestão adequada do glicerol residual no cenário industrial contemporâneo.

4.1.2 Gestão do Glicerol Residual

Na abordagem da gestão do glicerol residual, o entendimento de determinados conceitos é essencial. Enfatiza-se a necessidade de integração de tecnologias de processamento que permitam o reaproveitamento deste subproduto. A utilização do glicerol residual em diferentes aplicações industriais constitui um pilar na gestão eficiente deste composto (LINS et al., 2021). O aproveitamento em processos produtivos diversos, como a produção de compostos químicos e biogás, pode ser viabilizado com a implementação de tecnologias adequadas (KALITA et al., 2022).

Nessa perspectiva, o desenvolvimento contínuo de métodos eficazes para a transformação do glicerol residual é parte integral deste contexto, contribuindo para a maximização do aproveitamento deste subproduto e minimização de impactos ambientais adversos (CHOZHAVENDHAN et al., 2020). A implementação de sistemas eficazes de gestão do glicerol residual implica também na colaboração contínua entre diferentes setores industriais e entidades regulatórias (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

Complementarmente, destaca-se a relevância da implementação de práticas que visam a sustentabilidade e eficiência econômica. A gestão do glicerol residual deve estar alinhada com os objetivos de minimização de resíduos e otimização do uso de recursos, princípios fundamentais para a operação sustentável de indústrias do biodiesel (LACERDA et al., 2014). O emprego de práticas que permitam a valorização do glicerol residual, transformando-o em produtos de valor agregado, é parte integrante de uma gestão eficaz (SILVA et al., 2017).

As estratégias adotadas devem contemplar a avaliação contínua dos processos de gestão, garantindo sua eficácia e conformidade com normativas ambientais e

industriais vigentes (SINELI et al., 2022). O compromisso com a excelência operacional e sustentabilidade é evidenciado pela implementação de práticas de gestão do glicerol residual alinhadas com estes princípios. A avaliação e monitoramento contínuos dos processos de gestão do glicerol residual são igualmente fundamentais (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

Assegurar que as estratégias implementadas sejam eficazes e estejam em conformidade com regulamentações e diretrizes industriais e ambientais é imperativo (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). A realização de auditorias e avaliações periódicas permite a identificação e correção tempestiva de possíveis ineficiências ou não conformidades nos processos de gestão do glicerol residual. Este procedimento contribui para a manutenção de práticas de gestão eficientes (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

Reforça-se, assim, o compromisso com a operação sustentável e economicamente viável da indústria do biodiesel, ao mesmo tempo que garante a conformidade com padrões regulatórios e normativas vigentes.

4.1.2.1 Princípios de sustentabilidade aplicados

A integração de princípios de sustentabilidade na gestão do glicerol residual emerge como componente essencial no contexto industrial atual. Práticas focadas na economia circular, redução de emissões, eficiência energética, preservação de recursos naturais e gestão responsável de resíduos delineiam o escopo de atuação neste domínio. Ao adotar a economia circular, as indústrias reconhecem o valor do glicerol residual, realçando seu potencial como recurso secundário (PRADIMA et al., 2017).

Esta abordagem fundamenta-se na transformação deste subproduto em novos insumos industriais, promovendo a circularidade de materiais e minimizando a geração de resíduos (CHOZHAVENDHAN et al., 2020). Adicionalmente, a atenção voltada para a redução de emissões ressalta o compromisso com a mitigação de impactos ambientais negativos. Este enfoque conduz a adoção de tecnologias e processos que limitam a liberação de compostos nocivos no ambiente, garantindo a conformidade com normativas ambientais vigentes (MAHESHWARI et al., 2022).

Outrossim, a ênfase na eficiência energética figura como princípio central na gestão sustentável do glicerol residual. A implementação de tecnologias e processos eficientes no manejo deste subproduto otimiza o consumo de energia, contribuindo para a redução de custos operacionais e minimização do consumo de recursos energéticos não renováveis (KALITA et al., 2022). Esta estratégia alinha-se com a

preservação de recursos naturais, reforçando a importância de práticas que assegurem a utilização responsável e consciente de insumos naturais (MALAYIL et al., 2023).

A adoção de métodos que maximizam a utilização do glicerol residual e minimizam o uso de recursos naturais é congruente com a gestão responsável de resíduos (SILVA et al., 2017). A prática de gestão responsável enfatiza a necessidade de métodos eficazes para o tratamento e destinação apropriada do glicerol residual, garantindo que o manejo deste subproduto ocorra de maneira ambientalmente adequada e em conformidade com regulamentações pertinentes (ANHESINE et al., 2022).

Por fim, a consolidação destes princípios na gestão do glicerol residual reforça o compromisso com a sustentabilidade, promovendo operações industriais ambientalmente responsáveis e economicamente viáveis (PEITER et al., 2016). A implementação coordenada destes princípios proporciona uma estrutura sólida para a gestão eficaz do glicerol residual, favorecendo a maximização de benefícios e minimização de riscos associados ao manejo deste subproduto (ADAMES et al., 2021).

A gestão do glicerol residual, pautada nos princípios de sustentabilidade, demonstra a responsabilidade ambiental e o compromisso com práticas operacionais alinhadas com a preservação do ecossistema e otimização de recursos.

4.1.2.2 Gestão eficiente de resíduos industriais

A gestão eficiente de resíduos industriais requer uma abordagem sistêmica e estruturada. A minimização da geração de resíduos no início do ciclo produtivo representa uma estratégia primordial. Implementar processos de produção que maximizem a eficiência e minimizem o desperdício constitui um passo essencial. Ademais, a reutilização e reciclagem de resíduos industriais emergem como práticas cruciais (LACERDA et al., 2014).

Tais medidas proporcionam não apenas a redução do volume de resíduos enviados para disposição final, mas também a recuperação de materiais valiosos que, de outra forma, seriam descartados (VOLPATO et al., 2022). A identificação e separação adequada de resíduos, de modo a facilitar os processos de reciclagem, assumem relevância notável neste contexto. Além da minimização e reciclagem, a disposição final adequada dos resíduos industriais constitui um componente crítico (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019). A figura 7 ilustra um ciclo de gerenciamento de resíduos sólidos.

Figura 7 - Fluxo de gerenciamento de resíduos sólidos.



Fonte: ABREGEL (2023)

A escolha de métodos de disposição que atendam às regulamentações ambientais e que minimizem o impacto ao meio ambiente é imprescindível. Além disso, a tecnologia desempenha um papel determinante na gestão eficiente de resíduos industriais (ARAÚJO et al., 2021). A adoção de tecnologias avançadas permite o monitoramento preciso e a gestão eficaz de resíduos, contribuindo para a identificação de oportunidades de minimização, reutilização e reciclagem (LINS et al., 2021).

A implementação de sistemas de gestão ambiental (SGA) proporciona um quadro estruturado para a gestão de resíduos, promovendo a conformidade com as regulamentações, a redução de riscos e a melhoria contínua das práticas de gestão de resíduos (ZANELLI, 2023). O SGA representa uma estrutura composta por procedimentos, técnicas e processos destinados a auxiliar organizações na gestão e controle mais eficaz dos aspectos e impactos ambientais decorrentes de suas atividades. Este sistema é aplicável a organizações de variados tamanhos e setores, oferecendo uma abordagem universal. O SGA desempenha um papel crucial ao capacitar as organizações a integrarem considerações ambientais em suas operações cotidianas, possibilitando a identificação e controle dos impactos no meio ambiente. Sua regulação é pautada pela NBR ISO 14001, uma norma internacional voltada para a gestão ambiental. Esta norma consiste em um conjunto de práticas e políticas organizacionais com o propósito de conciliar práticas econômicas com o

desenvolvimento ambiental sustentável. O objetivo primordial é orientar as empresas para a preservação ambiental, contrapondo-se ao cenário econômico centrado na exploração de recursos naturais (PIMENTA, 2022). A integração de tecnologias de informação e comunicação (TIC) facilita o rastreamento, a coleta de dados e a análise de informações relacionadas aos resíduos industriais, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões informadas e estratégicas (LINS et al., 2021).

Finalmente, a educação e a capacitação contínua de todos os envolvidos no processo produtivo e de gestão de resíduos são fundamentais. A compreensão clara das responsabilidades, regulamentações e melhores práticas no manejo de resíduos industriais garante a implementação eficaz de estratégias de gestão de resíduos. Além disso, a promoção de uma cultura organizacional que valoriza a sustentabilidade e a gestão responsável de resíduos é crucial para o sucesso a longo prazo de qualquer estratégia de gestão de resíduos industriais (SINELI et al., 2022).

Esta abordagem integrada, que combina tecnologia, regulamentação, educação e cultura organizacional, oferece um caminho robusto para a gestão eficiente de resíduos industriais, alinhada com os princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

4.1.2.3 Normativas e legislação aplicável

A normatização e a legislação em vigor apresentam diretrizes claras e objetivas referentes ao glicerol residual, subproduto do biodiesel. O Brasil, sendo um dos líderes globais na produção de biodiesel, tem em sua legislação específica a estruturação normativa que rege a produção, a distribuição e o descarte relacionados ao biodiesel e seus resíduos.

O Art. 225 da Constituição Federal do Brasil estabelece o direito de todos a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, impondo ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988). A Lei Nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecendo diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, as responsabilidades dos geradores e do poder público e os instrumentos aplicáveis (BRASIL, 2010).

A Resolução CONAMA Nº 357/2005 e a Resolução CONAMA nº 430/2011 complementam os parâmetros normativos ao determinarem a classificação dos corpos de água e diretrizes para o seu enquadramento, bem como estabelecer as condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2011). É possível

identificar, ademais, a Norma Brasileira ABNT NBR 16725:2011, referente à quantificação de carbono equivalente em biocombustíveis (ABNT, 2011).

A Lei Nº 9.478/1997, conhecida como Lei do Petróleo, além da Lei Nº 9.847/1999, proporciona um arcabouço legal para a fiscalização das atividades relacionadas ao petróleo, seus derivados e biocombustíveis (BRASIL, 1997; 1999). A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por sua vez, regulamenta a especificação do biodiesel no Brasil, com a Resolução ANP Nº 14/2012, proporcionando diretrizes claras para a produção e a comercialização deste combustível renovável (ANP, 2012).

Outras normativas relevantes incluem a Resolução ANP Nº 45/2014, que regula as atividades de produção de biodiesel, especificando aspectos relacionados à qualidade e ao controle deste biocombustível (ANP, 2014). A Lei Nº 12.493/2011, referente ao selo combustível social, e a Lei Nº 13.263/2016, que altera a Lei Nº 8.918/1994, completam o quadro legal, garantindo a qualidade dos produtos e insumos na produção do biodiesel e seus subprodutos (BRASIL, 2016).

Com este conjunto normativo, o Brasil assegura a conformidade e a regulamentação necessária para a gestão adequada do glicerol residual, visando a proteção ambiental e a sustentabilidade em todo o ciclo de vida do biodiesel.

4.1.3 Formas de Reutilização do Glicerol Residual

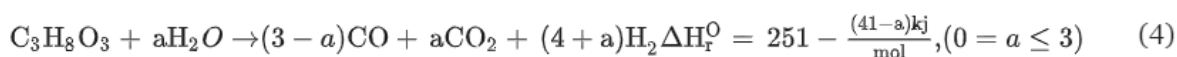
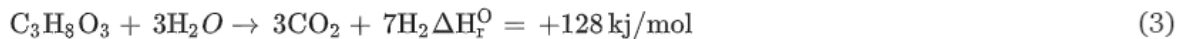
O glicerol residual, subproduto da produção de biodiesel, apresenta-se como matéria-prima potencial para diversos processos industriais. No campo da química verde, o glicerol pode ser utilizado como solvente ecológico e biodegradável, substituindo solventes tóxicos e não biodegradáveis comumente utilizados em reações químicas industriais. Adicionalmente, o glicerol pode ser convertido em compostos de alto valor agregado, como o ácido láctico, um importante insumo para a indústria de plásticos biodegradáveis (MAHESHWARI et al., 2022).

Neste contexto, a utilização do glicerol como matéria-prima para a produção de compostos químicos de interesse industrial contribui para a valorização deste subproduto e para a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado do glicerol residual (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). No setor energético, destaca-se que, ao longo dos anos, o uso do glicerol tem sido considerado como potencial fonte para a produção de hidrogênio por reforma a vapor (KALITA et al., 2022).

Este processo envolve a reação do glicerol com água em presença de um catalisador, resultando na produção de hidrogênio e outros compostos, sendo o hidrogênio um

combustível limpo que pode ser utilizado em células a combustível para a geração de energia elétrica. De acordo com Alsaffar et al. (2023), glicerol reage com o vapor em uma reação catalisada para produzir hidrogênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Os vários estágios de reação na reforma a vapor do glicerol podem ser representados pelas Eqs. (1), (2), (3), (4), representadas na figura 8. A reforma a vapor do glicerol é caracterizada pela pirólise, onde o glicerol é convertido termicamente em gás de síntese, conforme representado na Eq. (1). A reação é altamente endotérmica. Na equação (2), observa-se uma mudança na composição do gás de síntese, onde CO_2 e H_2 são formados a partir de CO e H_2O através da reação de deslocamento água-gás. Uma conversão completa de glicerol em gás de síntese rico em hidrogênio pode ser representada pela Eq. (3). A equação (4) representa a expressão geral para conversão termocatalítica de glicerol.

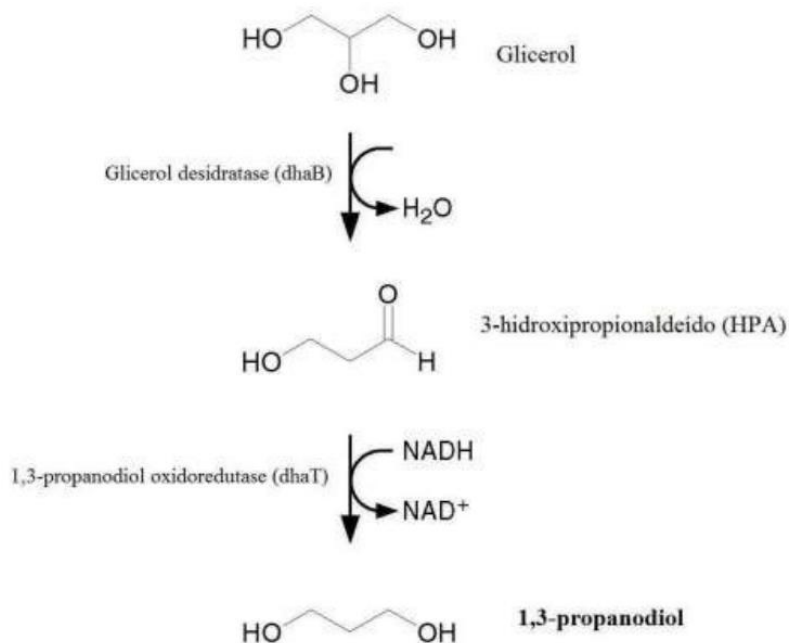
Figura 8 - Estágios de reação na reforma a vapor do glicerol



Fonte: ALSAFFAR et al. (2023)

No campo da biotecnologia, o glicerol é utilizado como substrato para a produção de compostos de interesse, como a 1,3-propanodiol, um monômero utilizado na produção de polímeros, pela ação de microrganismos específicos em processos de fermentação (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017). De acordo com Ferreira (2014), o glicerol é convertido em 1,3-propanodiol através de duas etapas como mostra a Figura 9. Na primeira etapa, a enzima glicerol desidratase (dhaB) catalisa a remoção de uma molécula de água do glicerol, produzindo 3-hidroxi propionaldeído. Na segunda etapa, a enzima 1,3-propanodiol oxidoreductase (dhaT) reduz o 3-hidroxi propionaldeído a 1,3-propanodiol simultaneamente a oxidação da forma reduzida do co-fator nicotinamida adenina dinucleotídeo (NADH) para sua forma oxidada, NAD^+ .

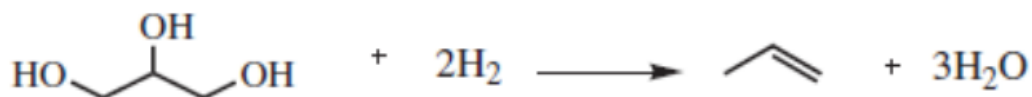
Figura 9 - Rota metabólica de produção de 1,3-propanodiol a partir de glicerol.



Fonte: Ferreira (2014)

Outra abordagem para uso do glicerol gerado pela reação de transesterificação do biodiesel é na produção do propeno, resina obtida a partir de derivados de petróleo e utilizada para fazer polipropileno. Esse plástico é amplamente utilizado em automóveis, eletrodomésticos, seringas descartáveis, fraldas, embalagens para alimentos e produtos de limpeza (DE SANTANTA, 2016). De acordo com Peiter et al. (2016) A glicerina pode ser transformada em propeno, através de uma reação de hidrogenólise sobre catalisadores específicos, conforme pode ser observada na figura 10. A produção de propeno inicia-se com a glicerina purificada por um processo de adição de hidrogênio.

Figura 10 - Hidrogenólise da glicerina a propeno.



Fonte: Peiter et al. (2016)

Além disso, o glicerol pode ser aplicado na produção de cosméticos, na indústria farmacêutica, na composição de cápsulas, xaropes e pomadas; na química, em tintas, vernizes e detergentes; na alimentícia, para conservar bebidas e alimentos, como

refrigerantes, balas, bolos, carnes e rações (DE SANTANA, 2016). O quadro 1 apresenta produtos que podem ser obtidos da transformação do glicerol e possíveis aplicações na indústria de forma geral. A utilização judiciosa do glicerol residual em diversos segmentos industriais não apenas mitiga os desafios associados ao seu descarte, mas também propicia a criação de valor, reforçando a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental das cadeias produtivas envolvidas (SILVA et al., 2017). Assim, com o uso dessas tecnologias, é propício um ambiente para o avanço sustentável na produção de biodiesel e no manejo do glicerol residual, destacando a importância da inovação contínua e da aplicação criteriosa de técnicas comprovadas no cenário atual e futuro (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019).

Quadro 1 – Produtos químicos derivados de glicerol.

Produto	Processos	Aplicação
1,3-dihidroxiacetona (DHA)	Oxidação direta e indireta	Principal ingrediente de cosméticos, intermediário na síntese de produtos químicos
1,2-propanodiol	Hidrogenólise	Utilizado como plastificante e agente de estabilização
Ácido fórmico	Oxidação Seletiva	Portador de energia na célula direta de combustível ácido fórmico
Ácido succínico	Fermentação com succinogenes Actinobacillus	Intermediário na produção de produtos químicos na indústria farmacêutica e de alimentos
Acroleína	Desidratação a vapor/ Fase gasosa Desidratação a vapor/ Fase líquida	Intermediário na formação de ácido acrílico e seus ésteres
1,3-propanodiol	Fermentação usando Klebsiella, Lactobacillus, Cianobacter, etc., Hidrogenólise ou Hidroformilação	Matéria-prima na produção de lubrificantes, polímeros, alimentos, solventes, adesivos, remoção de fósforo e nitrato de águas residuárias
2,3-butanodiol	Fermentação usando Klebsiella, Lactobacillus, Cianobacter, Clostridium	Borracha sintética, fármaco, cosméticos, aromatizantes, combustíveis, corante e produtos biodegradáveis

Propanol	Fermentação usando Propanobacterium	Conservantes de alimentos, precursor de fármacos e herbicidas
Poliésteres	Policondensação	Usado na indústria têxtil, componente na indústria de tomadas de plástico
Hidrogênio	Fermentação usando Escherichia coli, reforma água supercrítica, reforma a vapor, reforma a vapor autotérmica	Síntese de metano e amoníaco, usado em células de combustível, combustível para motores de combustão interna

Fonte: Adaptado de SILVA; SOUZA; ANTERO (2017).

4.1.3.1 Impactos ambientais e benefícios da reutilização adequada

A produção de biodiesel e a consequente geração de glicerol residual apresentam impactos ambientais discerníveis. A disposição inadequada do glicerol pode contribuir para a contaminação de corpos d'água, afetando ecossistemas aquáticos e comprometendo a qualidade da água para uso humano e animal. A incineração do glicerol residual, embora seja uma opção para sua disposição, resulta na emissão de gases poluentes para a atmosfera, exacerbando o problema das mudanças climáticas e da qualidade do ar (PRADIMA et al., 2017).

O descarte em aterros, por sua vez, ocupa espaço valioso que poderia ser usado de maneira mais eficiente, e pode levar à lixiviação de compostos prejudiciais ao solo e às águas subterrâneas (MAHESHWARI et al., 2022). Em contrapartida, a reutilização adequada do glicerol residual na produção de biodiesel apresenta benefícios ambientais evidentes. A transformação do glicerol em compostos de valor agregado pode mitigar os problemas de descarte, proporcionando uma solução circular para este subproduto da produção de biodiesel (SILVA et al., 2017).

A utilização do glicerol como fonte de energia, ao ser convertido em hidrogênio, contribui para a geração de energia limpa, auxiliando na redução das emissões de gases de efeito estufa e na diminuição da dependência de combustíveis fósseis (MALAYIL et al., 2023). Assim, salienta-se que a gestão responsável e inovadora do glicerol residual torna-se um elemento-chave para a sustentabilidade ambiental no âmbito da produção de biodiesel (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

4.1.3.2 Barreiras e limitações para a reutilização do glicerol residual

A reutilização do glicerol residual na produção de biodiesel enfrenta barreiras e limitações específicas. Uma das barreiras percebidas está relacionada às questões técnicas e tecnológicas. Há uma carência de tecnologias consolidadas e

economicamente viáveis para a transformação eficiente do glicerol residual em produtos de valor agregado (LACERDA et al., 2014).

Esta carência tecnológica limita as opções disponíveis para a reutilização do glicerol, fazendo com que muitas vezes seja descartado de maneira inadequada, acarretando impactos ambientais negativos. O desenvolvimento e a implementação de tais tecnologias requerem investimento significativo, o que pode ser uma barreira para empresas de pequeno e médio porte (PRADIMA et al., 2017).

Outra limitação é a falta de regulamentação específica e diretrizes claras para a gestão e reutilização do glicerol residual. A ausência de um marco regulatório bem definido pode resultar em incerteza para os produtores de biodiesel, que podem hesitar em investir em tecnologias de reutilização de glicerol devido à falta de clareza quanto aos requisitos regulatórios e padrões aplicáveis (SINELI et al., 2022).

Ademais, a falta de incentivos governamentais para a reutilização do glicerol também pode ser vista como uma barreira, tornando economicamente desvantajoso para as empresas investirem em práticas de reutilização do glicerol residual.

4.2 AS TECNOLOGIAS EMERGENTES E CONSOLIDADAS QUE PERMITEM A REUTILIZAÇÃO EFICAZ DO GLICEROL RESIDUAL

A reutilização do glicerol residual, subproduto da produção de biodiesel, insere-se em um contexto onde tecnologias emergentes e consolidadas desempenham um papel fundamental. No campo das tecnologias emergentes, destaca-se o processo de pirólise, que permite a transformação do glicerol residual em syngás, um gás que pode ser utilizado como fonte de energia (MALAYIL et al., 2023). Este processo, ainda em fase de desenvolvimento e aprimoramento, embora não tenha teorias consolidadas detalhando como é realizado o mecanismo dessa reação, esse método apresenta potencial para oferecer uma solução inovadora para a reutilização do glicerol residual (SILVA et al., 2017).

Enquanto tal, requer atenção contínua para a superação de desafios técnicos e otimização de sua eficiência e viabilidade econômica. As tecnologias consolidadas, por outro lado, representam opções já estabelecidas para a reutilização do glicerol residual (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Uma dessas tecnologias é a produção de compostos químicos de valor agregado. Este método envolve a conversão do glicerol em compostos químicos que podem ser utilizados em diversas aplicações industriais (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

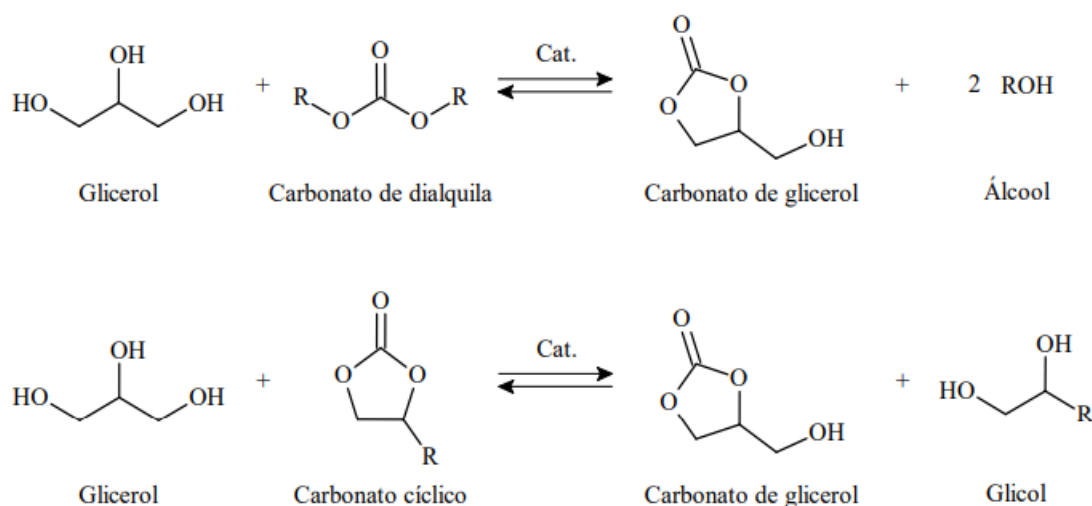
A realização deste processo ocorre por meio de reações químicas específicas, cuja eficácia e eficiência são comprovadas pela sua aplicação extensiva na indústria química (SINELI et al., 2022). Contudo, embora sejam tecnologias já estabelecidas, necessitam de constante monitoramento e ajustes para garantir sua operacionalidade e conformidade com normas e regulamentos ambientais. A fermentação microbiana é outra tecnologia consolidada que permite a reutilização do glicerol residual (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

É essencial que a implementação e operação destas tecnologias ocorram de acordo com as melhores práticas e padrões industriais, visando a otimização dos resultados e a minimização de impactos ambientais adversos.

4.2.1 Mapeamento das Tecnologias em desenvolvimento

No domínio do biodiesel e do glicerol residual, as tecnologias em desenvolvimento têm mostrado uma variedade de alternativas. A pirolise é um dos métodos em ascensão que permite a transformação do glicerol residual em produtos com valor agregado, tais como acroleína (PEITER et al., 2016). Outra tecnologia emergente que apresenta potencial é a transesterificação, um processo químico que converte glicerol residual em carbonato de glicerol (DE PAULA, 2022). O carbonato de glicerol pode ser produzido a partir de reações de transcarbonatação entre o glicerol e ésteres do ácido carbônico de cadeias abertas (carbonato de dialquila) ou de cadeias cíclicas (carbonato cíclico), conforme apresentado na Figura 11. Essas reações também podem ser chamadas de reações de transesterificação e diferentes ésteres do ácido carbônico podem ser utilizados (DE PAULA, 2022).

Figura 11 - Reações, simplificadas, entre o glicerol e ésteres do ácido carbônico.



Fonte: De Paula (2022)

Tal processo, portanto, amplia de maneira significativa a gama de aplicabilidade do glicerol residual em outras áreas industriais, permitindo sua utilização como matéria-prima em diversos processos químicos (LACERDA et al., 2014).

Assim, as tecnologias emergentes para a reutilização do glicerol, como a fermentação para produção de biogás, mostram-se como alternativas para o aproveitamento eficiente deste composto. O biogás produzido pode ser utilizado como fonte de energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade do processo de produção de biodiesel como um todo (VOLPATO et al., 2022). A evolução dessas tecnologias possibilita o aprimoramento dos processos de reutilização do glicerol, otimizando a produção e minimizando os impactos ambientais associados à produção de biodiesel e ao manuseio do glicerol residual. Tais avanços são essenciais para garantir a viabilidade e a eficiência do setor de biodiesel a longo prazo (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019).

4.2.1.1 Categorização das novas tecnologias

No âmbito das tecnologias voltadas ao biodiesel e ao uso do glicerol residual, emerge a necessidade de uma categorização que possibilite compreender, com maior clareza, as inovações no setor (ARAÚJO et al., 2021). A categorização pode ser delineada em três segmentos: tecnologias para conversão, purificação e aplicação do glicerol residual. Cada segmento, em sua especificidade, visa otimizar diferentes aspectos relacionados ao manejo do glicerol, permitindo uma gestão mais eficaz e alinhada aos padrões de sustentabilidade e eficiência operacional (LINS et al., 2021).

A categoria de conversão engloba tecnologias que transformam o glicerol residual em outros compostos químicos valiosos. Para a conversão do glicerol, destacam-se tecnologias como a pirólise e a transesterificação, que viabilizam a produção de compostos de alto valor agregado, sem a geração de resíduos prejudiciais ao ambiente (ZANELLI, 2023). Na categoria de purificação, a eletrodialise é um exemplo de tecnologia emergente que permite separar impurezas do glicerol de maneira eficiente (SABINO et al., 2020).

Esta etapa é fundamental para garantir a qualidade do glicerol, possibilitando sua reutilização em processos industriais diversos. A categoria de aplicação, por sua vez, contempla tecnologias para a utilização do glicerol residual em diversos setores industriais, ampliando seu espectro de utilização e contribuindo para a redução do descarte inadequado (ANHESINE et al., 2022). A observância dessa categorização

permite uma visão estruturada das tecnologias disponíveis e em desenvolvimento no âmbito do biodiesel e glicerol residual (ARAÚJO et al., 2021).

Proporciona, deste modo, um direcionamento mais assertivo para investimentos em pesquisa e desenvolvimento, focando em tecnologias que atendam de maneira eficaz as necessidades do setor (VOLPATO et al., 2022). A contínua evolução e aprimoramento dessas tecnologias são elementos essenciais para assegurar a sustentabilidade e a eficiência na produção de biodiesel, bem como na gestão adequada do glicerol residual, mitigando impactos ambientais e promovendo a circularidade de recursos no processo produtivo (MAHESHWARI et al., 2022).

4.2.1.2 Processos e mecanismos de tecnologias em desenvolvimento

Processos de destilação, um método consolidado, têm sido aprimorados para a extração e purificação deste composto, proporcionando uma abordagem confiável e eficaz para a obtenção de glicerol de alta pureza a partir de matrizes residuais. Ao mesmo tempo, a conversão catalítica é empregada para a transformação do glicerol em produtos valiosos (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019).

Este mecanismo, que envolve a utilização de catalisadores específicos, facilita a conversão do glicerol em uma ampla gama de compostos químicos, otimizando assim sua reutilização em diversas aplicações industriais (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017). Um exemplo é a utilização de catalisadores de nióbio e vanádio para obtenção de ácido fórmico através do glicerol residual (OLIVEIRA 2016). Tais tecnologias emergentes e aprimoradas vêm revolucionando a gestão do glicerol, promovendo a eficiência e a sustentabilidade neste setor específico. Outro aspecto crucial reside na implementação de processos de conversão biológica do glicerol (SINELI et al., 2022).

Métodos inovadores que envolvem a utilização de microrganismos específicos, como certas cepas de bactérias, estão sendo amplamente explorados para a conversão eficiente do glicerol em compostos de alto valor agregado, como 1,3-propanodiol, visto na figura 6, e ácido 3-hidroxipropiônico (CHOZHAVENDHAN et al., 2020). Esses compostos encontram aplicação em uma miríade de setores industriais, desde a fabricação de polímeros até a produção de solventes e produtos químicos especializados (KOLONNAGE; CHEW, 2023).

Este mecanismo biológico não apenas oferece uma rota viável para a valorização do glicerol, mas também contribui significativamente para a minimização do impacto ambiental associado ao descarte inadequado deste composto residual (MAHESHWARI et al., 2022). Nessa perspectiva, a combinação dessas tecnologias de ponta, incluindo destilação aprimorada, conversão catalítica e processos

biológicos, representa um avanço significativo na gestão do glicerol residual (PRADIMA et al., 2017).

Ao otimizar a extração, purificação e reutilização do glicerol, esses métodos estão contribuindo de maneira substancial para a promoção da eficiência e sustentabilidade na indústria do biodiesel (KALITA et al., 2022). O contínuo desenvolvimento e integração dessas tecnologias inovadoras irão, sem dúvida, fortalecer ainda mais a capacidade deste setor de atender às crescentes demandas globais por fontes de energia renovável e soluções ambientalmente sustentáveis, garantindo ao mesmo tempo a valorização eficaz do glicerol residual, um subproduto previamente subutilizado (SILVA et al., 2017).

4.2.2 Tecnologias Consolidadas

No âmbito das abordagens consolidadas, o glicerol tem sido objeto de estudos consolidados para o seu tratamento e utilização. O processo de purificação do glicerol, que inclui métodos como a destilação e a adsorção, são práticas comuns e tradicionais (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019). O glicerol purificado é amplamente utilizado em várias aplicações industriais, incluindo a produção de produtos farmacêuticos, alimentícios e cosméticos. Este uso multifacetado do glicerol sublinha a relevância das tecnologias estabelecidas na gestão eficaz do glicerol residual gerado na produção de biodiesel (VOLPATO et al., 2022).

Além disso, outros métodos tradicionais relacionados ao glicerol incluem a sua conversão em produtos químicos industriais valiosos. Este procedimento, que emprega catalisadores ácidos ou básicos em condições específicas de reação, tem sido uma abordagem amplamente utilizada (LINS et al., 2021). O papel essencial dessas tecnologias tradicionais no manuseio do glicerol residual reforça a importância contínua de métodos já consagrados no campo do biodiesel, mesmo com a evolução contínua das tecnologias emergentes (ARAÚJO et al., 2021).

4.2.2.1 Comparação com novas tecnologias

Percebe-se uma crescente abordagem comparativa entre tecnologias tradicionais e novas, destacando as diferentes abordagens e estratégias adotadas (PRADIMA et al., 2017). Em processos tradicionais, que são comprovados e estabelecidos, entretanto em muitas vezes apresentam limitações em termos de eficiência e sustentabilidade. Em contraste, as tecnologias emergentes buscam abordar e superar essas limitações, explorando novas rotas para a utilização do glicerol residual. Novos métodos e rotas inovadoras para a valorização do glicerol estão sendo investigadas, como sua

conversão em produtos químicos de valor agregado e materiais avançados, como o biogás (SILVA et al., 2017).

Esses desenvolvimentos, embora promissores, estão em estágios iniciais de pesquisa e desenvolvimento, e muitos desafios permanecem para a sua implementação em larga escala e integração eficiente nos sistemas existentes de produção de biodiesel (MALAYIL et al., 2023). A comparação entre as tecnologias tradicionais e emergentes no uso do glicerol residual, portanto, revela um cenário de evolução e inovação contínua (KOLONNAGE; CHEW, 2023).

Enquanto as tecnologias tradicionais oferecem robustez e confiabilidade com base em anos de operação e otimização, as novas tecnologias apresentam oportunidades para melhorar a eficiência, a sustentabilidade e a valorização do glicerol (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Ambos os conjuntos de tecnologias têm papéis cruciais a desempenhar na promoção de uma indústria de biodiesel mais sustentável e eficiente, e o progresso futuro dependerá da integração eficaz dessas abordagens diversas (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

É evidente que as tecnologias emergentes precisarão superar barreiras significativas para a implementação bem-sucedida, por exemplo o processo de pirólise do glicerol, tendo inclusos desafios técnicos, econômicos e regulatórios, para complementar ou substituir as tecnologias tradicionais existentes no espaço da produção de biodiesel (ZANELLI, 2023).

4.2.2.2 Adequação e adaptação de tecnologias antigas

A incorporação de técnicas atualizadas nesses sistemas antiquados pode realçar o desempenho global, facilitando a produção mais eficaz de biodiesel e proporcionando rotas mais viáveis para o aproveitamento do glicerol residual (LINS et al., 2021). A adaptação de processos passados não apenas realça a eficiência, mas também favorece uma maior conformidade com as normativas ambientais contemporâneas, promovendo a sustentabilidade no âmbito da produção de biodiesel (ARAÚJO et al., 2021).

A adaptação de tecnologias preexistentes envolve a integração meticulosa de inovações contemporâneas com sistemas estabelecidos, uma tarefa que exige uma compreensão aprofundada tanto das tecnologias antigas quanto das novas (ZANELLI, 2023). É uma operação que demanda um planejamento detalhado e uma execução minuciosa para assegurar que as melhorias propostas sejam implementadas sem comprometer a integridade dos sistemas existentes (SABINO et al., 2020).

A otimização do manejo do glicerol residual, nesse contexto, emerge como um elemento chave, proporcionando não apenas uma melhoria na eficiência operacional, mas também oportunidades para a exploração do glicerol como uma fonte potencial de receita adicional e aplicação em outros processos industriais (PEITER et al., 2016). Ao proceder com a adequação e a adaptação de tecnologias antigas no campo do biodiesel e do glicerol residual, uma execução cuidadosa e considerada é imperativa para garantir que os benefícios sejam maximizados, ao passo que as interrupções e complicações sejam minimizadas (ANHESINE et al., 2022).

As organizações e entidades envolvidas nessa transição devem priorizar a comunicação eficaz, a coordenação metódica e um comprometimento inabalável com os padrões de qualidade e eficiência, assegurando que as tecnologias adaptadas operem em sua capacidade máxima, proporcionando benefícios substanciais em termos de produção de biodiesel e gestão otimizada do glicerol residual. É um empreendimento que, embora complexo e desafiador, detém o potencial para promover melhorias significativas na produção de biodiesel, catalisando avanços contínuos nesse campo essencial (LACERDA et al., 2014).

4.2.3 Avaliação da Eficácia na Reutilização do Glicerol Residual

Na indústria de biodiesel, a questão do glicerol residual é uma consideração operacional essencial. A geração deste subproduto durante a produção de biodiesel apresenta desafios tanto em termos de gestão de resíduos como de maximização de eficiência e rentabilidade (KOLONNAGE; CHEW, 2023). Em um contexto de esforços contínuos para otimizar cada aspecto da produção de biodiesel, a reutilização do glicerol residual surge como um componente central desses esforços (KALITA et al., 2022).

A avaliação metódica da eficácia deste processo é necessária para garantir que as metas operacionais e ambientais sejam atendidas, enquanto se maximiza a utilização de todos os insumos e subprodutos do processo de produção de biodiesel (PRADIMA et al., 2017). Esse processo de avaliação é realizado de forma rigorosa e objetiva para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados, garantindo que as abordagens de reutilização do glicerol sejam tanto viáveis quanto eficazes (MAHESHWARI et al., 2022).

Na busca por métodos eficazes de reutilização de glicerol residual, diversas estratégias são exploradas, requerendo avaliação rigorosa para garantir que o processo seja economicamente viável e ambientalmente responsável (MALAYIL et al., 2023). Dessa forma, a realização destes processos de avaliação é essencial para

determinar a viabilidade técnica das várias estratégias de reutilização propostas (SILVA et al., 2017).

O rigor nesse processo de avaliação é mantido em todos os momentos para garantir que todos os aspectos da reutilização do glicerol residual sejam minuciosamente examinados e avaliados, garantindo que apenas as estratégias mais eficazes sejam implementadas na prática (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Nessa perspectiva, há que se pontuar que a avaliação da eficácia na reutilização do glicerol residual continua sendo uma prioridade na produção de biodiesel (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

A implementação bem-sucedida de estratégias de reutilização de glicerol depende de uma avaliação rigorosa e objetiva, garantindo que cada abordagem seja avaliada com precisão antes da implementação (SINELI et al., 2022). Este processo de avaliação é um elemento central na otimização contínua da produção de biodiesel, garantindo que o glicerol residual, um subproduto significativo do processo de produção, seja manejado de maneira eficaz e eficiente, maximizando o valor e minimizando o impacto ambiental (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

Esse compromisso contínuo com a avaliação rigorosa sustenta os esforços contínuos para melhorar cada aspecto da produção de biodiesel e da gestão de glicerol residual.

4.2.3.1 Metodologias de avaliação e caracterização

No domínio da produção de biodiesel e utilização do glicerol residual, diversas metodologias são adotadas para avaliação e medição de parâmetros relevantes. Espectroscopia no infravermelho é uma dessas metodologias (KOLONNAGE; CHEW, 2023). Utilizada para determinar a composição química de amostras de biodiesel e glicerol, essa técnica fornece dados precisos sobre a presença e concentração de diferentes compostos. Tais informações são cruciais para a otimização da produção e o manejo apropriado do glicerol residual (KALITA et al., 2022).

A cromatografia é outro método empregado. Utilizada para separar e analisar compostos presentes no biodiesel e no glicerol, essa técnica permite uma avaliação detalhada da composição das amostras, fornecendo dados essenciais para a tomada de decisões relacionadas à produção e ao manejo de resíduos (LINS et al., 2021). O emprego de métodos analíticos de avaliação e caracterização, como a calorimetria, é também notável. Esta técnica, que mede as mudanças de entalpia associadas a reações químicas, é empregada para avaliar a eficiência energética do biodiesel e a viabilidade da reutilização do glicerol residual (ARAÚJO et al., 2021).

A obtenção de dados calorimétricos detalhados permite uma avaliação abrangente do desempenho energético do biodiesel e da eficácia das estratégias de reutilização do glicerol, contribuindo assim para a otimização contínua dos processos de produção e manejo de resíduos (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019). A adoção de metodologias de avaliação e medição rigorosas e precisas é vital para garantir a eficiência, segurança e sustentabilidade da produção de biodiesel e do uso do glicerol residual (VOLPATO et al., 2022).

A utilização dessas técnicas, desde a espectroscopia no infravermelho até a cromatografia e calorimetria, possibilita a coleta de dados abrangentes e precisos sobre cada aspecto da produção de biodiesel e do glicerol residual, garantindo assim que as operações sejam conduzidas de maneira eficiente, eficaz e ambientalmente responsável, otimizando a produção e minimizando os impactos negativos no ambiente (ZANELLI, 2023).

4.2.3.2 Indicadores de eficácia

Na esfera do biodiesel e do uso de glicerol residual, a mensuração de indicadores de eficácia é procedimento capital. O teor de pureza do biodiesel é um dos indicadores avaliados. Este índice avalia a concentração de ésteres alquila presente, permitindo inferir a qualidade do biodiesel produzido (SABINO et al., 2020). O rendimento na produção de biodiesel é outro indicador. Este mensura a relação entre o volume de biodiesel produzido e a quantidade de matéria-prima utilizada (VOLPATO et al., 2022).

O monitoramento desses indicadores é elemento chave para assegurar a produção eficiente de biodiesel. No que tange ao glicerol residual, a eficácia de sua reutilização é também mensurada (PRADIMA et al., 2017). O teor de impurezas presentes no glicerol é um indicador relevante. Este índice permite avaliar a necessidade de processos de purificação adicionais antes da reutilização do glicerol. A eficiência dos processos de transformação do glicerol em subprodutos úteis é outro indicador fundamental (SILVA et al., 2017).

Este mensura a quantidade de subprodutos obtidos em relação ao volume de glicerol processado. Ambos os conjuntos de indicadores, relativos ao biodiesel e ao glicerol residual, desempenham papel essencial no monitoramento e na avaliação contínua dos processos de produção e reutilização. A observação rigorosa desses indicadores permite identificar oportunidades de otimização, assegurando a operação eficiente e a entrega de produtos de alta qualidade (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

É de suma relevância a continuidade na monitorização desses indicadores para a manutenção e aprimoramento constante dos processos relacionados ao biodiesel e ao glicerol residual (KALITA et al., 2022).

4.2.3.3 Resultados e contribuições para a reutilização eficaz do glicerol residual

Na esfera do biodiesel e glicerol residual, observam-se resultados consistentes em relação à reutilização eficaz do glicerol. Observou-se a produção de polímeros, um resultado concreto e mensurável (KOLONNAGE; CHEW, 2023). O glicerol, quando processado adequadamente, demonstrou ser matéria-prima eficaz na produção de materiais poliméricos, uma rota citada anteriormente para sua reutilização. A conversão de glicerol em energia é outro resultado observado (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

Mediante processos térmicos e enzimáticos, foi possível converter o glicerol em energia, oferecendo uma fonte alternativa de energia renovável e contribuindo para a minimização do descarte inapropriado deste subproduto (MAHESHWARI et al., 2022). As contribuições para a reutilização eficaz do glicerol residual são tangíveis e abrangentes. A produção de compostos de valor agregado a partir do glicerol proporciona a diversificação das fontes de matéria-prima para a indústria química e contribui para a economia circular (LINS et al., 2021).

A conversão do glicerol em energia, como a produção de hidrogênio, viabiliza a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, corroborando com os esforços globais de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Além disso, a redução do descarte de glicerol no ambiente contribui para a mitigação de impactos ambientais negativos associados à disposição inadequada desse resíduo (ANHESINE et al., 2022).

É essencial observar que os resultados e contribuições supracitados reforçam a relevância da adoção de práticas e tecnologias inovadoras para a gestão eficaz do glicerol residual (SABINO et al., 2020). É imperativo aprimorar continuamente os processos e tecnologias associados à reutilização do glicerol para maximizar os benefícios econômicos, ambientais e sociais decorrentes da valorização deste subproduto no contexto de produção de biodiesel (MAHESHWARI et al., 2022).

Cabe ressaltar que tais resultados e contribuições são alcançados em consonância com os princípios de sustentabilidade, contribuindo para o alcance de objetivos mais amplos relacionados à proteção ambiental e à promoção do desenvolvimento sustentável (ZANELLI, 2023).

4.3 AS POTENCIAIS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E INDUSTRIAIS RELACIONADAS AO MANEJO ADEQUADO DO GLICEROL RESIDUAL

No contexto do manejo adequado do glicerol residual, identificam-se implicações ambientais específicas. O processamento correto desse subproduto pode mitigar a liberação inapropriada de resíduos no ambiente (MALAYIL et al., 2023). Tais ações são instrumentais na prevenção da contaminação do solo e da água. A reutilização do glicerol, ao ser orientada de maneira correta, pode resultar na minimização de resíduos, apresentando uma contribuição positiva para a sustentabilidade ambiental (ANHESINE et al., 2022).

A redução na emissão de compostos nocivos para a atmosfera, proveniente da disposição inadequada do glicerol, é uma consequência notável do manejo adequado desse resíduo (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Ademais, são observadas implicações industriais decorrentes do manejo apropriado do glicerol residual. O glicerol pode ser efetivamente transformado em uma variedade de produtos químicos, incluindo compostos utilizados como intermediários na indústria química (ADAMES et al., 2021).

O aproveitamento deste subproduto na produção de bioplásticos e outros materiais sustentáveis evidencia uma alternativa viável e ambientalmente favorável. O manejo correto do glicerol também pode proporcionar economia de recursos para as indústrias, minimizando a necessidade de descarte e possibilitando a reutilização como insumo em outros processos produtivos. Outrossim, o manejo adequado do glicerol residual revela-se como uma abordagem integral, capaz de gerar impactos benéficos tanto no âmbito ambiental quanto industrial (SINELI et al., 2022).

A implementação de tecnologias eficazes para o tratamento e reutilização do glicerol constitui uma estratégia alinhada com os objetivos de sustentabilidade e eficiência industrial (ZANELLI, 2023). O alinhamento de práticas ambientalmente responsáveis com as operações industriais não apenas fortalece o compromisso com a sustentabilidade, mas também promove a otimização dos processos produtivos, evidenciando o papel crucial do manejo adequado do glicerol residual na interseção entre a proteção ambiental e o desenvolvimento industrial (VOLPATO et al., 2022).

4.3.1 Implicações Ambientais

O gerenciamento inadequado do glicerol residual pode resultar em desafios ambientais expressivos (KOLONNAGE; CHEW, 2023). Dentre as questões ambientais relativas, destaca-se a possível contaminação da água e do solo em caso de descarte inapropriado. A presença deste composto em corpos d'água pode

provocar desequilíbrios ecológicos e prejudicar a biodiversidade aquática (ARAÚJO et al., 2021).

O descarte inadequado no solo afeta a flora e a fauna, influenciando negativamente os ecossistemas terrestres e comprometendo a qualidade do solo para uso futuro. No contexto da produção de biodiesel, um gerenciamento responsável e eficiente do glicerol residual visa mitigar os impactos ambientais adversos. O desenvolvimento de métodos para reutilização do glicerol na produção de outros produtos químicos pode representar uma estratégia válida para minimizar o volume de resíduos gerados e evitar o descarte inadequado (PRADIMA et al., 2017).

Assim, é essencial a busca por abordagens inovadoras que permitam o aproveitamento do glicerol em outros processos industriais, contribuindo de maneira assertiva para a economia circular e para a minimização do impacto ambiental relacionado ao descarte deste resíduo (SABINO et al., 2020). Além de representar um compromisso com a preservação ambiental, a gestão adequada do glicerol residual pode resultar em benefícios econômicos para os produtores de biodiesel (MAHESHWARI et al., 2022).

A transformação deste resíduo em produtos de valor agregado pode gerar novas fontes de receita e contribuir para a viabilidade econômica da produção de biodiesel (KALITA et al., 2022). Dessa forma, observa-se que as estratégias voltadas para o manejo adequado do glicerol residual não apenas atendem às demandas ambientais, mas também podem alavancar significativamente o desenvolvimento sustentável do setor de biodiesel, corroborando a relevância do tema para o cenário atual (ZANELLI, 2023).

4.3.1.1 Impactos no ecossistema e estratégias de mitigação de impactos ambientais

A produção e utilização do biodiesel, embora se apresentem como alternativas de geração de energia renovável, apresentam implicações no ecossistema que não podem ser desconsideradas (CHOZHAVENDHAN et al., 2020). A geração de glicerol residual, proveniente da produção de biodiesel, pode acarretar efeitos no ecossistema, caso não seja manejado de maneira adequada. O descarte inadequado do glicerol residual no ambiente pode levar à contaminação de corpos d'água, prejudicando a vida aquática e alterando a qualidade da água para consumo e outros usos (LINS et al., 2021).

A descarga de glicerol no solo pode afetar a microbiota do solo, alterando o equilíbrio ecológico e afetando o crescimento e saúde da vegetação. Na esfera de impactos no ecossistema, a liberação de glicerol pode resultar em alterações nas características

físico-químicas do solo e da água (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017). Tais alterações podem provocar uma série de desequilíbrios ecológicos, afetando a fauna e a flora local, e levando a perturbações que vão além do local de descarte (LACERDA et al., 2014).

A deterioração da qualidade da água e do solo afeta não apenas os organismos que habitam esses ambientes, mas também os seres humanos que dependem desses recursos naturais para sobrevivência e realização de atividades agrícolas e industriais (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019). Consequentemente, torna-se evidente a necessidade de implementação de medidas de gerenciamento eficazes para o glicerol residual, de modo a evitar tais impactos no ecossistema (SILVA et al., 2017). A adoção do uso tecnologias exige um investimento inicial, mas os benefícios a longo prazo para o ambiente e a conformidade com a legislação ambiental podem compensar os custos. A educação e a conscientização dos envolvidos no processo de produção de biodiesel e no manejo do glicerol residual constituem uma estratégia adicional. A formação de profissionais capacitados e a conscientização sobre as implicações do manejo inadequado do glicerol são essenciais para a implementação de práticas sustentáveis (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019).

A compreensão dos riscos e a implementação de boas práticas podem contribuir de forma significativa para a minimização dos impactos ambientais relacionados ao glicerol residual. Nessa perspectiva, observa-se que a incorporação de práticas sustentáveis no manejo do glicerol residual, originado da produção de biodiesel, é uma exigência premente para garantir a proteção do ecossistema e assegurar a viabilidade a longo prazo do uso do biodiesel como fonte de energia renovável (PEITER et al., 2016).

4.3.2 Implicações Industriais

As implicações industriais relacionadas ao biodiesel e ao uso de glicerol residual abrangem diversas dimensões operacionais e regulatórias. A produção de biodiesel gera glicerol como subproduto, resultando em um excedente que necessita de manuseio apropriado (DOMINGOS; PITT; CHIVANGA BARROS, 2019). Nesse contexto, a necessidade de processos para o gerenciamento adequado desse resíduo influencia o planejamento e as operações industriais (SILVA; SOUZA; ANTERO, 2017).

A implementação de métodos eficientes para a reutilização do glicerol pode requerer investimentos em tecnologia e desenvolvimento, assim como adaptações nas linhas de produção (CHOZHAVENDHAN et al., 2020). Dessa maneira, o cumprimento das

normativas ambientais relativas ao descarte ou reaproveitamento do glicerol é outro aspecto que impacta a indústria, exigindo vigilância constante para assegurar a conformidade com a legislação vigente (SINELI et al., 2022).

Outra implicação industrial aborda a eficiência e a inovação. O setor industrial é impelido a buscar soluções inovadoras para a utilização do glicerol, proporcionando oportunidades para o desenvolvimento de novos produtos e processos (KALITA et al., 2022). Esta busca por inovação, embora benéfica a longo prazo, pode apresentar desafios, como a necessidade de pesquisa e desenvolvimento contínuo e a adaptação às demandas de mercado (KOLONNAGE; CHEW, 2023).

O engajamento com as tendências de sustentabilidade e a transição para práticas mais verdes também são fatores que influenciam a indústria do biodiesel e do glicerol, reforçando a importância de estratégias alinhadas com os objetivos de sustentabilidade global. A coordenação e a integração entre diferentes setores industriais também se destacam como uma implicação relevante (MAHESHWARI et al., 2022).

O glicerol residual, ao ser reaproveitado em outros segmentos industriais, demanda uma coordenação eficaz entre as indústrias envolvidas. Esta integração envolve a logística de transporte do glicerol, a adaptação de processos produtivos e a compatibilidade com os padrões de qualidade de diferentes setores. Este aspecto ressalta a importância de uma abordagem colaborativa e integrada para maximizar o aproveitamento do glicerol residual, contribuindo para a eficiência industrial e a minimização de impactos ambientais negativos (PRADIMA et al., 2017).

4.3.2.1 Influência no processo produtivo industrial

A influência no processo produtivo industrial relacionado ao biodiesel e ao glicerol residual é caracterizada por várias dimensões operacionais. Na produção de biodiesel, o glicerol precisa ser gerenciado de forma adequada, exigindo estratégias eficientes para seu tratamento e disposição. O desenvolvimento de métodos para a reutilização do glicerol é essencial, e a implementação destas estratégias pode influenciar diretamente o processo produtivo (SILVA et al., 2017).

Requer-se o investimento em tecnologia, adaptação de linhas de produção e conformidade com as regulamentações ambientais. No âmbito da produção de biodiesel, a gestão adequada do glicerol residual é essencial para manter a eficiência operacional e a conformidade com os padrões ambientais (LACERDA et al., 2014). Dessa maneira, a reutilização do glicerol em outros processos industriais ou sua

transformação em novos produtos são abordagens que podem ser adotadas (ADAMES et al., 2021).

A coordenação eficaz entre diferentes etapas do processo produtivo e a integração entre diferentes setores industriais são necessárias para garantir que o glicerol seja manejado de forma eficiente. Este manejo adequado do glicerol pode contribuir para a otimização do processo produtivo, melhorando a eficiência e minimizando os impactos ambientais negativos. A necessidade de pesquisa e desenvolvimento contínuo é outro aspecto que influencia o processo produtivo no contexto do biodiesel e do glicerol residual (CAVALCANTI; FERNANDES, 2019).

Nessa perspectiva, salienta-se que a busca por soluções inovadoras para a utilização eficiente do glicerol impulsiona a inovação, com o desenvolvimento de novas tecnologias e processos (VOLPATO et al., 2022). Esta busca por inovação e eficiência é vital para garantir a sustentabilidade do processo produtivo, enfatizando a necessidade de uma abordagem proativa e bem planejada para a gestão do glicerol na indústria do biodiesel (ARAÚJO et al., 2021).

4.3.2.2 Desafios e soluções para a indústria

Na esfera industrial relacionada ao biodiesel, os desafios decorrentes do manuseio do glicerol residual são notórios. A presença desse subproduto em grandes quantidades requer gestões específicas para sua alocação e reutilização adequadas (SABINO et al., 2020). É evidente a necessidade de processos que viabilizem a transformação do glicerol residual em compostos de valor agregado, evitando o descarte inapropriado e minimizando o impacto ambiental.

As regulamentações governamentais são essenciais à implementação de novas tecnologias, garantindo que as operações estejam em conformidade com as normas ambientais e de segurança vigentes. Ademais, a colaboração entre os setores industriais e acadêmicos pode facilitar a identificação e adoção de métodos eficazes para o manuseio do glicerol residual. A troca de conhecimentos e tecnologias pode acelerar o desenvolvimento de processos inovadores e eficientes, beneficiando todo o setor industrial relacionado ao biodiesel (PEITER et al., 2016). A busca por processos que possam converter o glicerol residual em compostos valiosos é incessante e essencial para aprimorar a competitividade e o desempenho da indústria do biodiesel. O desenvolvimento e a integração de tais processos em operações existentes são acompanhados por um investimento significativo em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura (KALITA et al., 2022).

A realização bem-sucedida desses investimentos pode levar a melhorias substanciais na eficiência e na rentabilidade industrial, bem como no perfil de sustentabilidade da produção de biodiesel. Contudo, é essencial que tais esforços estejam alinhados com as regulamentações e normativas pertinentes, garantindo a conformidade e a viabilidade de longo prazo das operações industriais. O impacto do biodiesel e do uso do glicerol residual no desempenho e na competitividade industrial é inegável e multifacetado (CHOZHAVENDHAN et al., 2020).

A incorporação eficiente de tecnologias de reutilização de glicerol pode impulsionar a inovação, melhorar a eficiência operacional e fortalecer a posição competitiva da indústria no mercado global. Ao mesmo tempo, a capacidade de mitigar os impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado de glicerol é um elemento-chave para garantir a sustentabilidade a longo prazo das operações industriais relacionadas ao biodiesel (PRADIMA et al., 2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa objetivou discutir sobre o glicerol residual, abordando os métodos de reutilização e as tecnologias aplicáveis para sua eficiente gestão e aproveitamento. Foi observada uma integração perceptível entre as esferas ambiental e industrial no manejo do glicerol residual. Os métodos avaliados destacaram a conversão de glicerol em compostos químicos de valor agregado, como 1,3-propanodiol e poliésteres, e a produção de energia renovável, através da produção de hidrogênio, revelando um compromisso palpável com a minimização de resíduos e promoção da eficiência nos processos industriais.

Esse aspecto evidenciou um alinhamento com os princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental, essenciais na atual conjuntura global. Os conceitos que embasam a gestão e a reutilização do glicerol residual no contexto industrial e ambiental foram elucidados durante o desenvolvimento do trabalho. A pesquisa revelou o uso do glicerol residual na produção de biogás e como componente para produção de polímeros, exemplificando a economia circular em ação e promovendo a utilização eficiente de recursos.

A observação desse reaproveitamento contribuiu significativamente para a compreensão da gestão eficiente do glicerol residual e ressaltou a relevância de uma abordagem integrada na sua administração. O levantamento identificou tecnologias emergentes e consolidadas que permitem a reutilização eficaz do glicerol residual. A geração de energia a partir do glicerol como um exemplo, demonstrou ser uma rota viável, oferecendo soluções tangíveis para a gestão do glicerol residual. Essas tecnologias provaram ser essenciais para maximizar o uso eficiente do glicerol, fornecendo informações relevantes para futuras implementações e inovações no setor.

Durante a avaliação, as potenciais implicações ambientais e industriais relacionadas ao manejo adequado do glicerol residual foram examinadas detalhadamente. A pesquisa reafirmou o compromisso com a sustentabilidade ambiental e a importância de práticas industriais ambientalmente responsáveis. Verificou-se que o manejo apropriado do glicerol residual tem potencial para minimizar a dependência de fontes de energia não renováveis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, colaborando para a proteção do ambiente global.

Em relação ao problema de pesquisa proposto, foi realizada uma análise profunda das novas tecnologias e já existentes que permitiram a transformação do glicerol residual em produtos ou processos de valor agregado. A pesquisa contribuiu para um

entendimento aprofundado dos mecanismos de transformação eficaz do glicerol residual e reforçou a necessidade de desenvolvimento contínuo e inovação nesse domínio para garantir práticas alinhadas com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental.

No percurso da pesquisa, foram examinadas diversas tecnologias e métodos aplicáveis à reutilização do glicerol residual. O compromisso observado com a minimização de resíduos e a eficiência nos processos industriais ressaltou a relevância da integração e colaboração entre os setores industrial e ambiental para maximizar o aproveitamento do glicerol residual.

Os resultados desta pesquisa proporcionam uma base sólida para a antecipação de futuros avanços no aproveitamento do glicerol residual na interface entre as esferas ambiental e industrial. As tecnologias emergentes identificadas, como a produção de energia a partir do glicerol e a utilização como componente na produção de polímeros, delineiam um horizonte promissor para práticas sustentáveis na gestão de subprodutos industriais. Observa-se um crescente reconhecimento da economia circular como um paradigma-chave, exemplificado pelas aplicações inovadoras do glicerol residual, apontando para um futuro em que a simbiose entre a indústria e o meio ambiente é ainda mais aprimorada. O estudo enfatiza a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento, incentivando a exploração de novas frentes tecnológicas e estratégias integradas, que serão essenciais para a evolução positiva no campo da gestão sustentável de resíduos industriais, especialmente o glicerol residual. Este cenário propõe não apenas a otimização das práticas existentes, mas também abre espaço para a descoberta de inovações que possam contribuir significativamente para a transição rumo a uma indústria mais sustentável e responsável ambientalmente.

6 REFERÊNCIAS

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Art. 225. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 maio 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16725:2011. Biocombustíveis - Quantificação de carbono equivalente. Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. **Institui a política energética nacional**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 07 ago. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999. **Dispõe sobre a fiscalização das atividades relativas ao petróleo**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 27 out. 1999.

ANP. Resolução ANP nº 14, de 11 de março de 2012. **Regulamenta a especificação do biodiesel no Brasil**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 mar. 2012.

ANP. Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014. **Regula as atividades de produção de biodiesel**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 26 ago. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.493, de 1º de setembro de 2011. **Institui o selo combustível social. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 02 set. 2011.

BRASIL. Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016. **Altera a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 24 mar. 2016.

ADAMES, L. V. et al. Produção de hidrogênio em reator anaeróbio de fluxo contínuo utilizando glicerol bruto oriundo da produção de biodiesel. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 2, p. 1-11, 2021.

ALSAFFAR, M. A. et al. Competitiveness of hydrogen production by glycerol reforming in fixed-bed reactor: An overview of the catalytic performance, product distribution and reactant conversions. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

ANHESINE, M. W. et al. Utilização da cinza do bagaço de cana de açúcar no processo de purificação do biodiesel produzido a partir de óleos e gorduras residuais. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 13720-13745, 2022.

ARAÚJO, M. L. et al. Effect of the addition of residual glycerol in anaerobic digestion of starch and abbatoir effluents. Revista em **Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 407-415, 2021.

BAGNATO, G. et al. Glycerol production and transformation: a critical review with particular emphasis on glycerol reforming reaction for producing hydrogen in conventional and membrane reactors. **Membranes**, v. 7, n. 2, p. 17, 2017.

BEATRIZ, A., ARAÚJO, Y. J. K., Lima, D. P. Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas. **Química Nova**, 34(2), 306–319. 2011.

CARVALHO, M. A. G.; CEOLATO, T. A. **Esterificação de glicerina industrial**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CAVALCANTI, W. M.; FERNANDES, M. A. Aplicação do glicerol residual da produção de biodiesel em compósitos lignocelulósicos. **Acta Mechanica et Mobilitatem**, v. 4, n. 1, p. 21-27, 2019.

CHOZHAVENDHAN, S. et al. A review on influencing parameters of biodiesel production and purification processes. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 1, p. 1-6, 2020.

COLOMBO, K.; ENDER, L.; BARROS, A. A. C. The study of biodiesel production using CaO as a heterogeneous catalytic reaction. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 26, n. 2, p. 341-349, 2017.

DE PAULA, G. M.. **Formação do carbonato de glicerol por transesterificação catalítica heterogênea**. 2022.

DE SANTANA, K. V. et al. **GLICEROL RESIDUAL DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL E SUAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS POR VIAS QUÍMICAS E BIOTECNOLÓGICAS**. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. VII . 2016. Campina Grande - PB.

DOMINGOS, A. M.; PITT, F. D.; CHIVANGA BARROS, A. A. Purification of residual glycerol recovered from biodiesel production. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 42-51, 2019.

FERREIRA, T. F. **Produção de 1, 3-propanodiol a partir de glicerina por via biotecnológica**. 2014. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio DE Janeiro, Rio de Janeiro.

KALITA, P. et al. Biodiesel as renewable biofuel produced via enzyme-based catalyzed transesterification. **Energy Nexus**, v. 6, p. 1-17, 2022.

KOLONNAGE, T. N.; CHEW, I. M. L. Environmental and cost analysis for polyhydroxyalkanoate production from glycerol byproduct: A case study from integrated soap and biodiesel plants. **Cleaner Environmental Systems**, v. 9, p. 1-15, 2023.

LACERDA, C. V. et al. Reaproveitamento do glicerol residual do processo de produção de biodiesel utilizando catalisador à base de HPA suportado em ácido nióico para a obtenção de aditivos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 5, p. 1332-1352, 2014.

LEAL, João Paulo. Destilação. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 1, 2015.

LINS, M. A. et al. Efeito da adição de glicerol residual na digestão anaeróbia de efluentes de fecularia e abatedouro. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 407-415, 2021.

MAHESHWARI, P. et al. A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, p. 1-19, 2022.

MAHESHWARI, Pranjali et al. A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, p. 131588, 2022.

MALAYIL, S. et al. Utilization of residual fatty acids in matter organic non-glycerol from a soy biodiesel plant in filaments used for 3D printing. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 8, p. 215-223, 2023.

MEDEIROS, I. M. A. F. et al. **Abrandamento de águas via troca iônica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; BRITO, Y. C.. A Reação de Transesterificação, Algumas Aplicações e Obtenção de Biodiesel. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 5, n. 1, p.63-73, 2013. Disponível em: <<http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v5n1a07.pdf>>. Acesso em: 01 de dezembro de 2019.

DO NASCIMENTO, Tassio Lessa et al. **Avaliação do óleo e biodiesel de soja (glycine max) a partir de parâmetros físico-químicos**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 3, p. 12685-12695, 2020.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020. (Estudos da pós-graduação). Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271>>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

OLIVEIRA, F. **Como é o processo de produção de biodiesel**. Sustenare. 2021. Disponível em: <<https://www.sustenare.com.br/como-e-o-processo-de-producao-de-biodiesel/>>. Acesso em 03 de dezembro de 2023.

PIMENTA, J. **Sistema de Gestão Ambiental: o que é e qual seu objetivo?**. Recicla club. Disponível em: <<https://recicla.club/sistema-de-gestao-ambiental-o-que-e/>>. Acesso em 03 de dezembro de 2023.

OLIVEIRA, H. S. **Conversão de glicerina residual de biodiesel em ácido fórmico utilizando catalisadores de nióbio e vanádio**. 2016.

PEITER, G. C. et al. Alternativas para o uso do glicerol produzido a partir do biodiesel. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 4, p. 519-537, 2016.

PRADIMA, J. et al. Review on enzymatic synthesis of value-added products of glycerol, a by-product derived from biodiesel production. **Resource-Efficient Technologies**, v. 3, n. 4, p. 394-405, 2017.

SABINO, V. C. C. et al. Produção de dihidroxiacetona a partir da glicerina residual da produção de biodiesel: uma visão teórica. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 10, n. 2, p. 144-161, 2020.

SILVA, D. B.; SOUZA, B. R. de.; ANTERO, R. V. P. Produção biotecnológica de produtos de valor agregado utilizando glicerol residual proveniente da síntese de biodiesel. **Evidência**, v. 17, n. 2, p. 63-86, 2017.

SILVA, F. et al. Avaliação da produção de hidrogênio a partir da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e glicerol residual da produção de biodiesel. **Química Nova**, v. 40, n. 5, p. 523-527, 2017.

SILVA, S. S. O. **Estudo do processo de purificação e eterificação do glicerol residual proveniente da indústria do biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia de Pós-Graduação em Engenharia Química, Fortaleza, 2019.

SINELI, P. E. et al. Bioconversion of sugarcane molasses and waste glycerol on single cell oils for biodiesel by the red yeast *Rhodotorula glutinis* R4 from Antarctica. **Energy Conversion and Management: X**, v. 16, p. 108, 2022.

ULIANA, N. R. et al. APLICAÇÃO DE ADSORVENTE ALTERNATIVO PARA PURIFICAÇÃO DE UM RESÍDUO DE GLICERINA. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 15587-15594, 2015.

VOLPATO, C. P. T. et al. Utilização de glicerol como substrato na produção de biossurfactante. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. 1-11, 2022.

ZANELLI, G. S. **Obtenção de hidrogênio pela reforma a vapor do glicerol residual do biodiesel utilizando catalisadores de Ni/La₂O₃-CeO₂/SiO₂**. 2023. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2023.