RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta **Dissertação** será disponibilizado somente a partir de 19/12/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JULIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

CÂMPUS DE ARARAQUARA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E BIOPROCESSOS

MESTRADO PROFISSIONAL

OBTENÇÃO DE ACETATO DE ISOAMILA A PARTIR DE ÓLEO FÚSEL ORIUNDO DA DESTILAÇÃO ALCOÓLICA EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS

LEANDRO VITORINO TAVARES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Masarin

ARARAQUARA - SP

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JULIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

CÂMPUS DE ARARAQUARA

OBTENÇÃO DE ACETATO DE ISOAMILA A PARTIR DE ÓLEO FÚSEL ORIUNDO DA DESTILAÇÃO ALCOÓLICA EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS

LEANDRO VITORINO TAVARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Masarin

ARARAQUARA - SP

2023

Tavares, Leandro Vitorino.
T231o Obtenção de acetato de isoamila a partir de óleo fúsel oriundo dadestilação alcoólica em usinas sucroalcooleiras / Leandro Vitorino Tavares. – Araraquara, 2023.
80 f. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual Paulista. "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

Orientador: Fernando Masarin.

1. Óleo fúsel. 2. Álcool isoamílico. 3. Destilação. 4. Ácido acético. 5.Acetato de isoamila. I. Masarin, Fernando, orient. II. Título.

Diretoria do Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas UNESP - Campus de Araraquara

CAPES: 33004030170P0
Esta ficha não pode ser modificada

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Araraquara

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Obtenção de acetato de isoamila a partir de óleo fúsel oriundo da destilação alcoólica em usinas sucroalcooleiras

AUTOR: LEANDRO VITORINO TAVARES

ORIENTADOR: FERNANDO MASARIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos, área: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. FERNANDO MASARIN (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciencias Farmaceuticas do Campus de Araraquara da Unesp

Prof. Dr. ALVARO DE BAPTISTA NETO (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciencias Farmaceuticas do Campus de Araraquara da Unesp

Prof. Dr. ELIAS DE SOUZA MONTEIRO FILHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia, Física e Matemática / Instituto de Química - UNESP - Araraquara

Araraquara, 19 de dezembro de 2023

Potencial Impacto da Pesquisa na Sociedade

A obtenção de acetato de isoamila a partir do óleo fúsel, oriundo da etapa de destilação alcoólica de usinas sucroalcooleiras, é uma alternativa de para o aproveitamento deste subproduto. O acetato de isoamila é importante para a indústria de fragrâncias, solventes e sabores. Além disso, o reaproveitamento deste subproduto promove a redução da dependência de fontes petroquímicas promovendo economia de energia, contribuindo para a preservação ambiental e o desenvolvimento socioeconômico do país.

Potential impact of Research on Society

The obtaining of isoamyl acetate from fusel oil, originating of the alcoholic distillation stage of alcohol plants, is an alternative for using this by-product. Isoamyl acetate is important for the fragrance, solvent, and flavor industry. Furthermore, the reuse of this by-product promotes the reduction of dependence on petrochemical sources, promoting energy savings, environmental preservation, and socioeconomic development.

Aos meus pais, por todo amor, pelos ensinamentos, e pelos sacrifícios que fizeram para educação de seus filhos. À minha esposa, por dividir comigo os mesmos sonhos, por partilhar das mesmas alegrias e angústias e por tornar minha vida mais feliz. Aos meus filhos, que me enchem de orgulho e renovam as minhas energias todos os dias.

Índice de Figuras

Figura 1. Produção de etanol no Brasil, de 1980 a 2021. Fonte*: Única (2023) Adaptado*. 13
Figura 2. Reações enzimáticas que convertem aminoácidos em álcoois de cadeia ramificada média. Fonte: *WEI, 2013.* 20
Figura 3. Destilaria de álcool hidratado com extração de óleo fúsel. Fonte: *Jacques (2003), Adaptado.*.....21
Figura 4. Diagrama ternário. Álcool isoamílico (1) + etanol (2) + água (3). Fonte*: Kadir et al. (2008)* 24
Figura 5. Fluxograma de produção de álcool Isoamílico. *Fonte: Oliveira (2016)*.....27
Figura 6. Estrutura molecular de um éster. *Elaborado pelo próprio autor*.....27
Figura 7. Reação de Esterificação. Fonte: *Solomons e Fryle (2002)*. 29
Figura 8. Esterificação catalisada por ácidos (esterificação de *Fischer*). Fonte: *Adaptado de Solomons e Fryhle (2002).*.....30
Figura 9. Estrutura molecular do acetato de isoamila. *Elaborado pelo próprio autor.* 30
Figura 10. Diagrama de fases mistura n-hexano, n-octano a 1 atm (temperatura x composição). Fonte: *Adaptado de Seader (2006).*.....32
Figura 11. Diagrama de fases (x,y) para n-hexano e n-octano a 1 atm.....33
Figura 12. Valor de *K* dos álcoois superiores em função da concentração molar de etanol em misturas hidroalcoólicas. Fonte*: Batista (2008); Ferreira (2012).....*34
Figura 13. Volatilidade relativa dos álcoois superiores com o etanol em função da concentração molar de etanol. Fonte: *Batista (2008); Ferreira (2012)*. 35
Figura 14. Diagrama de fases (x,T), etanol-água a 1 atm. Fonte*: Chemsep, 2023.* .41
Figura 15. Diagrama de fases (x,y), etanol-água a 1 atm. Fonte: *Chemsep (2023).* 42
Figura 16. Diagrama de fases (x,T), acetona-clorofórmio a 1 atm. Fonte: *Chemsep (2023).*.....43
Figura 17. Diagrama de fases (x,y), acetona-clorofórmio a 1 atm. Fonte: *Chemsep (2023).*.....43
Figura 18. Decantador de óleo fúsel em operação.....46
Figura 19. Coletor de óleo fúsel.....47
Figura 20. Concentração de óleo fúsel.....48
Figura 21. Representação de destilação fracionada em bancada de laboratório.....49

Figura 22. Sistema de destilação fracionada. 50
Figura 23. Representação evaporação com refluxo. 51
Figura 24. Esterificação de *Fischer* para síntese de acetato de isoamila 51
Figura 25. Separação líquido-líquido após esterificação de *Fischer* 52
Figura 26. Destilação fracionada para separação de acetato de isoamila 53
Figura 27. Diagrama de fases. Mistura binária metanol e água a 1,013 bar. 56
Figura 28. Diagrama de fases. Mistura binária etanol e água a 1,013 bar. 56
Figura 29. Diagrama de fases. Mistura binária n-propanol e água a 1,013 bar. 57
Figura 30. Diagrama de fases. Mistura binária isobutanol e água a 1,013 bar. 57
Figura 31. Diagrama de fases. Mistura binária álcool isoamílico e água a 1,013 bar. 58
Figura 32. Diagrama de fases. Mistura binária metanol e álcool isoamílico a 1,013 bar. 59
Figura 33. Diagrama de fases. Mistura binária etanol e álcool isoamílico a 1,013 bar. 59
Figura 34. Diagrama de fases. Mistura binária n-propanol e álcool isoamílico a 1,013 bar. 60
Figura 35. Diagrama de fases. Mistura binária isobutanol e álcool Isoamílico a 1,013 bar 60
Figura 36. Cromatograma de uma mistura de compostos (padrões analíticos, diluentes e padrão interno) obtido pela técnica de cromatografia em fase gasosa (CG) 61

Índice de Tabelas

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do óleo fúsel.....22

Tabela 2. Concentração média ($g.L^{-1}$) de 3 séries de amostras de óleo fúsel de diferentes usinas sucroalcooleiras 22

Tabela 3. Ponto de ebulição dos principais componentes do óleo fúsel a 1 atm. 23

Tabela 4. Dados experimentais das linhas de amarração para o sistema álcool isoamílico (1) + etanol (2) + água (3) 24

Tabela 5. Ésteres e aromas relacionados.....28

Tabela 6. Faixa de dormação de azeótropos.....44

Tabela 7. Faixa de temperatura de fracionamento da segunda destilação de óleo fúsel refinado.....49

Tabela 8. Formação de azeótropos entre álcoois e água a 1,0 atm. 58

Tabela 9. Identificação e tempo de retenção obtido de cromatografia em fase gasosa (CG) de uma mistura de compostos (padrões analíticos, diluentes e padrão interno). 62

Tabela 10. Curvas analíticas de padrões analíticos obtidas por cromatografia em fase gasosa (CG). 63

Tabela 11. Concentrações dos componentes das amostras de óleo fúsel. 63

Tabela 12. Concentrações dos componentes das amostras de óleo fúsel refinado .64

Tabela 13. Percentual e massa de álcool isoamílico nas amostras de óleo fúsel e óleo fúsel refinado 64

Tabela 14. Volumes obtidos na primeira destilação do óleo fúsel refinado 65

Tabela 15. Resultados obtidos da segunda destilação do óleo fúsel por faixa de temperatura.....65

Tabela 16. Concentrações e percentuais mássicos dos componentes nas amostras destiladas de óleo fúsel refiando.....66

Tabela 17. Massas, percentuais e rendimentos de purificação de álcool isoamílico de óleo fúsel.....67

Tabela 18. Quantificação das amostras de acetato de isoamila sintetizado.....68

Tabela 19. Concentração e percentual mássico dos componentes nas amostras de acetato de isoamila (amostras D).....68

Tabela 20. Massas, percentuais e rendimento mássicos da síntese de acetato de isoamila. 69

Tabela 21. Produção de acetato de isoamila por 100 gramas de óleo fúsel refinado 69

Lista De Símbolos

α_{ij}	Volatilidade Relativa entre os compontes i e j
$\hat{\phi}_i^V$	Coeficiente de fugacidade do componente i na fase vapor
γ_i	Coeficiente de atividade da espécie i
μ_i	Potencial químico da substância i na mistura
f_i^L	Fugacidade da espécia i na fase líquida
f_i^V	Fugacidade da espécia i na fase vapor
n	Número de mols
P	Pressão
P_i^{sat}	Pressão de vapor saturado do componente i
POY_i	Fator de Poynting
S	Entropia
T	Temperatura
V	Volume
x_i	Fração molar do componente i na fase líquida
y_i	Fração molar do componente i na fase vapor

Lista de Abreviaturas

AAS	Ácido Acetilsalicílico
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ATP	Adenosina Trifosfato
CG	Cromatografia em Fase Gasosa
CO_2	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CLAE	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
CoA	Co-enzima A
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DIC	Detector de Ionização de chama
ELV	Equilíbrio Líquido Vapor
E1G	Etanol de Primeira Geração
E2G	Etanol de Segunda Geração
MTBE	Éter metil-terc-butílico
Pró-álcool	Programa Nacional do Álcool
OPAEP	Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo
UNIFAC	UNIQUAC Functional-group Activity Coefficients

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVO 16
2.1. Objetivo Principal 16
2.2. Objetivos específicos 16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
3.1. Produção de etanol 17
3.2. Óleo fúsel 19
3.3. Extração e tratamento de óleo fúsel 23
3.4. Álcool isoamílico 26
3.5. Ésteres 27
3.6. Acetato de isoamila 30
3.7. Volatilidade relativa 31
3.8. Equilíbrio líquido vapor (ELV) 35
3.9. Azeótropos 40
4. METODOLOGIA 45
4.1. Avaliação de fenômeno de azeotropismo entre componentes do óleo fúsel 45
4.2. Coleta das amostras 45
4.3. Refino do óleo fúsel 47
4.4. Separação do álcool isoamílico 48
4.5. Obtenção de acetato de isoamila 50
4.6. Cromatografia em fase gasosa (CG) 54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 56
5.1. Formação de azeótropos entre componentes do óleo fúsel e água 56
5.2. Método analítico para determinação de álcoois e ésteres 61

5.3. Purificação do álcool Isoamílico 63
5.4. Síntese do acetato de isoamila 68
6. CONCLUSÃO.....70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

RESUMO

O Brasil se destaca como um dos maiores produtores de biocombustíveis do mundo. Em relação à produção de etanol, o Brasil ocupa a segunda posição no *ranking* global, ficando atrás apenas dos Estado Unidos. Somente na safra 2020/2021, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) foram produzidos aproximadamente 30 bilhões de litros de etanol. Um dos subprodutos obtidos na destilação do etanol é o óleo fúsel que é uma mistura de álcoois com pesos moleculares superiores ao etanol que se concentra em uma determinada região da coluna de retificação e precisa ser removida do processo para evitar que ocorra perdas de etanol no processo de destilação. Dentre os componentes do óleo fúsel, o que possui a maior concentração é o álcool isoamílico ou 3-metil-1-butanol, alcançado valores próximos de 40% (massa/massa) da composição do óleo fúsel. A maioria das usinas do Brasil dosam este subproduto no etanol hidratado produzido por não possuir ou desconhecer uma forma de se reutilizar o mesmo, visto que possui valor comercial muito baixo. O presente estudo tem como objetivo de produzir acetato de isoamila com elevada pureza a partir da reação de álcool isoamílico (previamente obtido de óleo fúsel) com um ácido carboxílico, no caso o ácido acético, em presença de um ácido forte como catalisador. Este éster obtido com alto teor de pureza é utilizado como flavorizante na indústria de alimentos por conferir aroma de banana aos produtos e possui alto valor agregado. O rendimento alcançado na purificação de álcool isoamílico foi de aproximadamente 80%. Já em relação à síntese de acetato de isoamíla, obteve-se rendimento médio de 60,6%. O rendimento global da produção de acetato de isoamila a partir de óleo fúsel concentrado foi de 22,5%, indicando ser uma alternativa tecnicamente viável para aproveitamento do óleo fúsel.

Palavras-chave: Óleo fúsel; álcool isoamílico; destilação; ácido acético; acetato de isoamila.

ABSTRACT

Brazil stands out as one of the largest biofuels producers in the world. Regarding ethanol production, Brazil ranks second in the global ranking, behind only the United States. Only in the 2020/2021 crop season, approximately 30 billion liters of ethanol were produced, according to data from the National Supply Company (CONAB). One of the byproducts obtained in the distillation of ethanol is fusel oil, which is a mixture of alcohols with higher molecular weights than ethanol that concentrates in a specific region of the rectification column and needs to be removed from the process to avoid ethanol losses during distillation. Among the components of fusel oil, the one with the highest concentration is isoamyl alcohol or 3-methyl-1-butanol, reaching values close to 40% (mass/mass) of the fusel oil composition. Most Brazilian plants dose this byproduct into the hydrated ethanol produced because they do not have or are unaware of a way to reuse it, as it has a very low commercial value. The present study aims to produce isoamyl acetate with high purity from the reaction of isoamyl alcohol (previously obtained from fusel oil) with a carboxylic acid, in this case acetic acid, in the presence of a strong acid as a catalyst. This ester obtained with high purity content is used as a flavoring agent in the food industry as it imparts a banana aroma to products and has high added value. The yield achieved in the purification of isoamyl alcohol was approximately 80%. Regarding the synthesis of isoamyl acetate, an average yield of 60.6% was obtained. The overall yield of Isoamyl acetate production from concentrated fusel oil was 22.5%, indicating it to be a technically viable alternative for the utilization of fusel oil.

Keywords: Fusel oil; isoamyl alcohol; distillation; acetic acid; isoamyl acetate.

1. INTRODUÇÃO

Como um dos principais produtores de bioetanol há mais de 40 anos, desde que, fomentado por incentivos públicos através do programa Proálcool, lançado em 1975, o Brasil ocupa lugar destaque dentre os maiores produtores mundiais de biocombustíveis.

Com a comercialização dos carros tipo *flex* a partir de 2003, houve um aumento considerável na demanda por etanol, chegando a um recorde anual de produção (hidratado e anidro) na safra de 2018/2019, com aproximadamente 35 bilhões de litros, este aumento pode ser observado na Figura 1 apresentada abaixo (ÚNICA, 2023)

Figura 1. Produção de etanol no Brasil, de 1980 a 2021. Fonte*: Única (2023) Adaptado*.

Segundo a Embrapa, o grande diferencial da produção de bioetanol a partir da cana-de-açúcar é o fato que em seu processo produtivo aproveita-se praticamente todo o material, uma vez que os subprodutos são utilizados como fonte de energia, fertilizantes, alimentos e mais atualmente para produção de etanol 2G (etanol celulósico).

Nas usinas sucroalcooleiras, vários subprodutos e efluentes de processo são obtidos nas etapas de produção de açúcar-etanol, como lodo dos decantadores de caldo, vinhaça, *flegmaça*, excesso de fermento, óleo fúsel, dentre outros.

Ao mesmo tempo que novas tecnologias são implementadas ao sistema produtivo de açúcar-etanol, o etanol brasileiro proveniente de cana-de-açúcar se consolida cada vez mais como uma excelente alternativa em substituição dos combustíveis fósseis. Um exemplo disso é o etanol celulósico (etanol 2G) que através de processos químicos e enzimáticos permitem a hidrólise das cadeias celulósicas em açúcares fermentescíveis, permitindo que seja possível a produção de etanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar e, além disso, a vinhaça que deixa a destilaria deste processo é biodigerida em biorreatores com o objetivo de produzir gás metano, suprindo o déficit de bagaço de cana-de-açúcar que foi utilizado para produção de etanol e que seria queimado em caldeiras para cogeração de energia, por biometano, um outro tipo de combustível verde (JOPPERT, 2019).

Atualmente, grande parte dos efluentes industriais como o lodo dos decantadores e a vinhaça que é subproduto da destilação do etanol, são levados para lavoura de cana-de-açúcar para adubação e servem como fonte de nutrientes e minerais para o desenvolvimento da planta.

A tecnologia empregada para diminuição do volume de efluente que é direcionado para a lavoura com objetivo principal de reduzir custos com transportes e gastos energéticos com sistemas de bombeamento de vinhaça, geralmente é composta por uma série de trocadores de calor tubulares tipo película fina (*falling films*) que evaporam a água contida na vinhaça utilizando vapor vegetal (oriundo do processo de produção de açúcar), vapor de escape (proveniente do processo de geração de energia elétrica nas turbinas) ou até mesmo vapor alcoólico do topo das colunas de destilação (POVEDA, 2014).

O óleo fúsel, assim como a vinhaça, é um subproduto do sistema de destilação do etanol, e por ser produzido em uma quantidade muito menor que a vinhaça e não possuir elevados valores comerciais, ainda é objeto de pouco estudo e não despertou grande interesse econômico nas unidades alcooleiras. Este subproduto é proveniente da fermentação alcoólica e consiste em uma mistura de álcoois superiores, etanol, água e outros componentes. Sua importância comercial reside principalmente na presença do álcool isoamílico, que é uma das substâncias utilizadas na fabricação de ésteres, compostos relevantes para a indústria química que possuem alto valor

agregado. A recuperação desse álcool superior é realizada por meio de operações unitárias que exploram o equilíbrio de fases, como a destilação e a separação líquido-líquido (CORRÊA et al., 2019).

Dentro do âmbito do conceito apresentado este trabalho visa recuperar e refinar o álcool isoamílico presente no óleo fúsel, obtido no processo de destilação do etanol, visando produzir o acetato de etila que é um éster com alto valor agregado. A purificação de o álcool isoamílico a partir de óleo fúsel, bem como sua conversão em acetato de etila é um processo pouco estudado, portanto, sendo este trabalho inovador.

6. CONCLUSÃO

Diante do exposto na presente dissertação pode-se concluir:

- Os álcoois cujas concentrações são relevantes no óleo fúsel apresentaram formação de azeótropos de mínimo com a água à pressão atmosférica aproximando-se dos valores dos azeótropos relatados na literatura;
- Foram obtidos em média de 37,1% (m/m) de álcool isoamílico nas amostras de óleo fúsel refinado, o que equivale a aproximadamente 80% (m/m) do valor da concentração de álcool isoamílico contida no óleo fúsel não refinado (original);
- Foi possível obter amostras com elevadas concentrações de álcool isoamílico, (acima de 80%, m/m), evidenciando que a metodologia aplicada é adequada para realização do processo de purificação;
- Contudo, em um processo contínuo, que ocorre em estado estacionário no interior de uma coluna de múltiplos estágios, o fracionamento não ocorre desta forma, com consecutivos cortes na coleta de condensado destilado de acordo com a temperatura do topo da coluna, e sim, pelo monitoramento da temperatura e da pressão em diferentes regiões da coluna e realizando-se a extração na fase líquida de forma automática apenas no local que a temperatura está dentro da faixa de interesse, possibilitando a extração de álcool isoamílico com concentrações ainda mais elevadas (acima de 90%,m/m);
- O rendimento médio de acetato de isoamila produzido a partir de álcool isoamílico previamente purificado foi de 60,6% (m/m), similar aos valores encontrados na literatura;
- O rendimento global de obtenção de acetato de isoamila foi de 22,5% (m/m), ou seja, a cada 100 gramas de óleo fúsel refinado, foi possível sintetizar aproximadamente 22,5 gramas de acetato de isoamila;
- A princípio este resultado se mostra interessante, uma vez que encontramos valores de comercialização para o álcool isoamílico de aproximadamente R$ 25,00 por litro (agosto de 2023). Este valor é mais que 10 vezes superior ao valor de comercialização média do litro do óleo fúsel pelas usinas que é próximo ao valor do litro do etanol hidratado combustível comercializado, o

que indica que os métodos empregados para separação de álcool isoamílico e síntese de acetato de isoamila em laboratório possuem elevado potencial de expansão para uma escala piloto e também no futuro a possibilidade da construção de uma planta em escala industrial para obtenção de álcool isoamílico e acetato de isoamila a partir de óleo fúsel, minimizando gastos com transportes e concentrando as operações em um mesmo parque industrial;

- No entanto, cabe ressaltar que para conclusão da análise de viabilidade econômica, ainda é necessário a realização de estudos em escala piloto para aprimoramento dos balanços energéticos, além de estudos de como se comportarão os materiais utilizados para fabricação dos equipamentos, principalmente os materiais empregados para confecção do reator que será empregado na esterificação de *Fischer* que, devido à catálise ácida e à utilização de ácido acético como reagente, serão submetidos à operação em pH ácido. Além disso, é interessante que sejam avaliados o descarte dos resíduos gerados neste processo;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA, T. O. **Análise comparativa dos processos de produção de etanol anidro**. 2017. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ABDULLAH, B. et al. Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, n. 4, p. 37-50, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.018. Acesso em: 10 jan. de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). Resolução ANP nº 907, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 220, p. 71, 23 nov. 2022.

BATISTA, F. R. M. **Estudo do processo de destilação alcoólica contínua: simulação de plantas industriais de produção de álcool hidratado, álcool neutro e cachaça**. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

BRAGA, V. S. **A Influência da temperatura na condução de dois processos fermentativos para produção de cachaça**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiróz”, Piracicaba, 2006.

BUCHSPIES, B.; KALTSCHMITT, M. A consequential assessment of changes in greenhouse gas emissions due to the introduction of wheat straw ethanol in the context of European legislation. **Applied Energy**, v. 211, n. set. 2017, p. 368– 381, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.105. Acesso em: 10 jan. de 2023.

CAVARZAN, G. M. Economia, discurso e poder: os bastidores políticos do segundo plano nacional de desenvolvimento (II PND). **Revista Aedos**, *[s. l.]*, v. 1, n. 1, 2008.

CONAB. **Produção de etanol de milho avança no país como opção sustentável e de valor agregado**. Brasília: Conab, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2021. Acesso em: 10 jan. de 2023.

CORRÊA, J. J. et al. Liquid-Vapor equilibrium thermodynamics of the fusel oil: a case study – **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16, n. 29, 2019.

COSTA, T. S.; ORNELAS, D. L.; GUIMARÃES, P. I. C.; MERÇON, F. Confirmando a Esterificação de Fischer por meio dos aromas. **Química Nova na Escola**, n. 19, p. 36-38, maio 2004.

DE SOUZA, F. B. **Obtenção de aditivo para diesel a partir do óleo fúsel**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2022.

ELIAS, M. A. Determinação do coeficiente de atividade na diluição infinita em sistema etanol água-sal por microextração em fase solida-GCFID. **Química Nova**, v. 37, n. 7, p. 1177-1181, 2014.

FELTRE, R. **Química**: química orgânica. 6. ed. São Paulo: Moderna, 2004.

FERREIRA, A. R. **Ésteres sintéticos derivados do ácido 3-metil-4-nitrobenzoico e avaliação de sua atividade antfúngica**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, PB, 2018.

FERREIRA, M. C. **Estudo do processo de destilação do óleo fúsel**. 2012. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

GOLÇALVES, F. O. **Análise da produção de etanol visando soluções para melhorar a eficiência econômica e ambiental**. 2020. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2020.

JACQUES, K. A.; LYONS, T. P.; KELSALL, D. R. **The alcohol textbook**. 4. ed. Nottingham: University Press, 2003.

JOPPERT, L. C. **Análise da substituição energética de bagaço de cana-de-açúcar por biogás produzido a partir de resíduos de usinas de açúcar e álcool para produção de etanol 2G**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2019.

KADIR, S. et al. Liquid–liquid equilibria of the ternary systems 3-methyl-1-butanol + ethanol + water and 2-methyl-1-propanol + ethanol + water at 293.15 K. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 53, n. 4, 2008.

KISTER, H. Z. **Distillation Design**. Alhambra: McGraw Hill, 1992. cap. 1, p. 3 - 16.

MARINHO, L. H. N. et al. Viabilidade técnica e econômica de uso do óleo fúsel em mistura com o etanol combustível. *In*: Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia, 6., 2020, Brasília, DF. **Anais** [...]. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 267-272.

MONTOYA, N. et al. Colombian fusel oil. **Ingeniería e Investigación**, v. 36, n. 2, p. 21-27, 24 ago. 2016.

NEVES, A. A. S. A. S. **Avaliação do aproveitamento de óleos alimentares usados para a produção de biodiesel na área metropolitana do Porto**. 2008. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, 2008.

NYARI, N. L. D. et al. Processo enzimático para produção de acetato de isoamila livre de solvente orgânico, **Brazilian Journal of Food Research**, Campo Mourão, v. 10 n. 1, p. 129-148, 2019.

NORDSTRÖM, K. Formation of esters, acids and alcohols from alfa-keti acids by brewer's yeast. **Journal of the Institute of Breweing**, London, v. 69, p.483-495, 1963.

OLIVEIRA, C. A.; SOUZA, A. C. J.; SANTOS, A. P. B.; SILVA, B. V.; LACHTER, E. R.; PINTO, A. C. Síntese de ésteres de aromas de frutas: um experimento para cursos de graduação dentro de um dos princípios da química verde. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v.6, n.1, p.152-167, jan/fev 2014.

OLIVEIRA, M. A. D.; BARBOSA, N. A.; GIATI, T. M. **Simulação da obtenção de álcool isoamílico a partir do óleo fúsel via destilação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) Universidade São Francisco, Campinas, 2016.

OXITENO S/A Indústria e comércio. **Ficha de Segurança de Matéria-prima**. Propriedades físico-químicas do óleo fúsel. 5 f. 2008. Disponível em: https://www.santos.sp.gov.br. Acesso em: 24 mar. de 2023.

OXITENO S/A Indústria e comércio. **Boletim Técnico**: acetato de isopentila. 2014. Disponível em: https://www.yumpu.com/pt/document/view/28813305/acetato-de-isopentila-oxiteno. Acesso em: 24 mar. de 2023f.

PATIL, A.G.; KOOLWAL, S. M.; BUTALA, H.D. Fusel oil: composition, removal and potential utilization. **International Sugar Journal**, v. 104, n. 1238, p. 51-63, 2002.

PAULILLO, L. F.; MELLO, F. O. T.; VIAN, C. E. F. Análise da competitividade das cadeias de agroenergia no Brasil. *In*: BUAINAIN, A. M.; BATALHA, M. O. (Coord.). **Análise da competitividade das cadeias agroindustriais brasileiras**. São Carlos: DEP-UFSCAR/IEUNICAMP, fev. 2006. 119 p. (Projeto MAPA/IICA).

PÉREZ, E. R.; CARDOSO, D. R.; FRANCO, D. W. Análise dos álcoois, ésteres e compostos carbonílicos em amostras de óleo fúsel. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 10-12, fev. 2001.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineering Handbook**. 7th ed. New York: McGraw-Hill Companies, 1997.

PINTO, G. M. F. **Química orgânica prática: análise de compostos orgânicos**. 2006. Apostila. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

POVEDA, M. M. R. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2014.

SILVA, J. B. **Produção de acetato de isoamila via esterificação enzimática em sistema livre de solvente.** 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI Erechim, 2014

SILVA, R. S. **Avaliação técnica da utilização do óleo fúsel, subproduto da produção de etanol da cana-de-açúcar**: revisão. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, PB, 2019.

SILVA, R. O. et al. Multi-objective optimization of an industrial ethanol 87 distillation system for vinasse reduction: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 956–963, maio. 2018. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618304980. Acesso em: 10 jan. 2021.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. **Separation process principles**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C. **Introdução à termodinâmica de engenharia química**. 7. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

SOLOMONS, G.; FRYHLE, C. Ácidos Carboxílicos e seus derivados, adição-eliminação nucleofílica no carbono acílico. *In*: SOLOMONS, G.; FRYHLE, C. **Química Orgânica**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Cap. 17, p. 101-106.

WEI, J. et al. Branched-chain 2-keto acid decarboxylases derived from Psychrobacter. **Fems Microbiology Letters,** v. 346, n. 2, p. 105-112, agosto 2013. DOI: 10.1111/1574-6968.12208.

UNICAdata – Observatório da Cana e Bioenergia. **Histórico de produção e moagem**. 2023. Disponível em: https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2. Acesso em: 11 abril 2023.