



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

MARCOS ANTONIO AVIBAR RUZZA

**Extração do óleo das sementes de grão-de-bico, gérmen de trigo e sansão do campo para
a produção de biodiesel a partir da utilização de CO₂ supercrítico**

Rosana - SP

2022

MARCOS ANTONIO AVIBAR RUZZA

Extração do óleo das sementes de grão-de-bico, gérmen de trigo e sansão do campo para a produção de biodiesel a partir da utilização de CO₂ supercrítico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Doutor Assistente
Leandro Ferreira Pinto.

Rosana - SP

2022

R987e

Ruzza, Marcos Antonio Avibar

Extração do óleo das sementes de grão-de-bico, gérmen de trigo e sansão do campo para a produção de biodiesel a partir da utilização de CO₂ supercrítico / Marcos Antonio Avibar Ruzza. -- Rosana, 2022
40 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientador: Leandro Ferreira Pinto

1. Extração supercrítica. 2. Biodiesel. 3. Grão-de-bico. 4. Gérmen de trigo. 5. Sansão do campo. I. Título.

MARCOS ANTONIO AVIBAR RUZZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto
Orientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Flavia Camargo Cabrera
UNESP-Rosana

Guilherme Souza Lopez
Membro Externo

Dezembro, 2022.

Dedico este trabalho a minha família, em especial a meus pais que sempre me incentivaram a estudar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me iluminar durante a graduação e dar a oportunidade de cursar Engenharia de Energia na Unesp, agradeço aos meus pais e avós por sempre me incentivarem a estudar e por terem me ajudado em momentos difíceis, agradeço aos professores que sempre me auxiliaram durante a graduação, agradeço aos meus amigos que sempre acreditaram em mim e me apoiaram.

“Em algum lugar, algo incrível está esperando para ser
descoberto.”
Carl Sagan

RESUMO

Com o avanço das pesquisas científicas novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, na área de energia os biocombustíveis vêm ganhando cada vez mais atenção, os biocombustíveis apresentam inúmeras vantagens frente a combustíveis de origem fósseis, um biocombustível muito utilizado é o biodiesel. O biodiesel pode ser produzido através de gordura animal e vegetal, existe uma variedade muito grande de oleaginosas que podem ser utilizadas para a produção do biodiesel. O biodiesel apresenta um menor índice de poluição, é uma fonte renovável, possui um custo de produção mais baixo e libera muito menos CO₂ na atmosfera do que outros combustíveis de origem fóssil. Existe vários métodos de extração de óleo para produção de biodiesel, um método muito conhecido porém pouco eficiente é a prensagem mecânica, esse método é utilizado principalmente em processos de baixa escala, extração por solventes possui uma eficiência alta, é muito utilizada em processos industriais, utiliza no processo solventes como hidrocarbonetos, álcoois e cetonas, a extração por solvente apresenta desvantagens como a possibilidade de contaminar o extrato durante o processo de extração, outro problema é que alguns desses solventes podem apresentar um grau de toxicidade que dependendo do objetivo inviabiliza o processo de extração. A extração supercrítica utilizando o CO₂ como fluido supercrítico vem sendo muito pesquisada e utilizada nos últimos anos, o CO₂ em estado supercrítico não apresenta corrosividade, não é tóxico, não contamina o óleo durante o processo de extração, pode ser liberado no ambiente após o término do processo de extração, não requer de processos de filtragem pois o CO₂ não deixa resíduos no óleo, outra grande vantagem que o CO₂ possui é relacionado as suas condições críticas de temperatura e pressão como 31,1 °C e 73,8 bar que são significativamente baixas. Este estudo foi realizado utilizando sementes de grão-de-bico, gérmen de trigo e sansão do campo que foram adquiridas no município de Rosana-SP submetendo-as a uma extração utilizando CO₂ supercrítico, as condições de temperatura utilizadas foram de 40 a 60 °C e uma pressão de 200 a 280 bar, foi utilizada uma matriz experimental para auxiliar a realização dos experimentos. Ao fim dos experimentos foi obtido um rendimento máximo para o grão-de-bico de 5,57%, um percentual de 6,64% para o gérmen de trigo e um rendimento máximo de 4,15% para o sansão do campo, todos os experimentos chegaram aos seus rendimentos máximos após um período de 80 minutos.

Palavras-Chave: Biodiesel, CO₂ supercrítico, extração supercrítica, grão-de-bico, gérmen de trigo, sansão do campo.

ABSTRACT

With the advancement of scientific research, new technologies are being developed, in the area of energy, biofuels are gaining more and more attention, biofuels have numerous advantages over fossil fuels, a biofuel that is widely used is biodiesel. Biodiesel can be produced from animal and vegetable fat, there is a wide variety of oilseeds that can be used to produce biodiesel. Biodiesel has a lower pollution rate, is a renewable source, has a lower production cost and releases much less CO₂ into the atmosphere than other fossil fuels. There are several oil extraction methods for biodiesel production, a well-known but inefficient method is mechanical pressing, this method is mainly used in low-scale processes, solvent extraction has a high efficiency, is widely used in industrial processes, uses solvents such as hydrocarbons, alcohols and ketones in the process, solvent extraction has disadvantages such as the possibility of contaminating the extract during the extraction process, another problem is that some of these solvents may present a degree of toxicity that, depending on the objective, makes the process unfeasible of extraction. Supercritical extraction using CO₂ as a supercritical fluid has been much researched and used in recent years, CO₂ in a supercritical state is not corrosive, is not toxic, does not contaminate the oil during the extraction process, and can be released into the environment after completion. of the extraction process, it does not require filtering processes because CO₂ does not leave residues in the oil, another great advantage that CO₂ has is related to its critical temperature and pressure conditions such as 31.1 °C and 73.8 bar, which are significantly casualties. This study was carried out using seeds of chickpea, wheat germ and samson that were acquired in the municipality of Rosana-SP, subjecting them to an extraction using supercritical CO₂, the temperature conditions used were 40 to 60 °C and a pressure of 200 to 280 bar, an experimental matrix was used to help carry out the experiments. At the end of the experiments, a maximum yield of 5.57% for chickpeas was obtained, a percentage of 6.64% for wheat germ and a maximum yield of 4.15% for field Samson, all the experiments reached their maximum yields after a period of 80 minutes.

KEYWORDS: Biodiesel, supercritical CO₂, supercritical extraction, chickpeas, wheat germ, field samson.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fatores e níveis para o planejamento fatorial 2 ² com ponto central.	29
Tabela 2. Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de metabólitos da semente de grão-de-bico utilizando CO ₂ supercrítico.	29
Tabela 3. Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de metabólitos do gérmen de trigo utilizando CO ₂ supercrítico.	31
Tabela 4. Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de metabólitos do sansão do campo utilizando CO ₂ supercrítico.	32

Lista de Figuras

Figura 1. Semente do grão-de-bico [61].....	17
Figura 2. Gérmen de trigo [62].....	19
Figura 3. Semente do sansão do campo [63].....	20
Figura 4. Produção nacional de biodiesel em metros cúbicos [28].	22
Figura 5. Participação regional na produção de biodiesel (2021) [28].	22
Figura 6. Produção de biodiesel por matéria-prima [29].....	23
Figura 7. Diagrama P x T da curva de transição de fase do fluido supercrítico [49].	26
Figura 8. Esquema de uma unidade experimental de extração supercrítica.	28
Figura 9. Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações do grão-de-bico por CO ₂ supercrítico.	30
Figura 10. Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações do gérmen de trigo por CO ₂ supercrítico.	31
Figura 11. Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações do sansão do campo por CO ₂ supercrítico.	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Bar	unidade de pressão
°C	unidade de temperatura
<i>m</i>	unidade de comprimento em metros
min	unidade de tempo em minutos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 Específicos	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1 GRÃO-DE-BICO	17
3.2 GÉRMEN DE TRIGO	18
3.3 SANSÃO DO CAMPO.....	19
3.4 BIODIESEL	20
3.5 EXTRAÇÃO DE ÓLEO.....	23
3.6 EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA.....	24
3.7 ESTADO DA ARTE	26
4. METODOLOGIA	27
4.1 Materiais	27
4.2 Aparato e procedimento experimental	27
<i>Extração supercrítica com CO₂</i>	27
<i>Calculo dos rendimentos das extrações</i>	29
5. RESULTADOS.....	29
5.1 Resultados grão-de-bico.....	29
5.2 Resultados gérmem de trigo.....	30
5.3 Resultados sansão do campo	32
5.4 Discussões Gerais	33
6. CONCLUSÕES	35
7. REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da ciências novas técnicas de extração vem sendo desenvolvidas e aprimoradas, a extração por fluído supercrítico utilizando o CO₂ em estado supercrítico apresenta uma eficiência alta no processo de extração de óleo, é empregado em diversas áreas como a farmacológica e alimentícia, o método de extração por gás carbônico supercrítico apresenta vantagens quando comparado a métodos convencionais como: menor tempo de extração, maiores taxas de rendimentos, conservação de determinados compostos que podem ser degradados caso seja empregado processos convencionais de extração. Outra grande vantagem é que o único resíduo presente no final da extração serão os da matéria prima utilizada, apresentando assim um alto teor de pureza, outro fator importante é que tem baixa temperatura e pressão crítica (31,1 °C e 73,8 bar) [52, 54, 55, 59, 60].

No Brasil existem programas e incentivos além de subsídios para a pesquisa e desenvolvimento relacionados a produção de biodiesel, o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pro-óleo) e Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel (ProBiodiesel), nesse contexto também ocorreu a implementação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), contribuindo com uma diversificação da matriz energética brasileira [27,28,31].

O Brasil é um país que possui uma diversidade muito grande em sua flora, uma variedade grande de matéria-prima pode ser utilizada na produção de biodiesel como o amendoim, soja, caroço de algodão, coco, dentre outras alternativas como grão-de-bico, gérmen de trigo e o sansão do campo que ainda são muito pouco estudadas, sendo possível utilizar o método de extração supercrítico no qual possui uma eficácia alta para tal propósito [19].

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo a avaliação do rendimento dos extratos do grão-de-bico (*Cicer arietinum*), germen de trigo (*Triticum Vulgare*) e sansão do campo (*Mimosa Caesalpinifolia*), que foram obtidos com a utilização de dióxido de carbono.

2.1 Específicos

- i) Análise dos efeitos da temperatura e pressão no rendimento da extração de óleo de matrizes oleaginosas com CO₂ supercrítico;
- ii) Estudo das cinéticas de extração dos óleos extraídos óleo avaliando o efeito de variáveis de processo (temperatura, pressão e densidade) sobre o rendimento em óleo;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 GRÃO-DE-BICO

A *Cicer Arietinum*, conhecido como grão-de-bico tem alto valor biológico devido ao maior grau de digestibilidade que possui em sua proteína. É cultivado principalmente no subcontinente indiano que é a região peninsular do subcontinente asiático. Índia e Paquistão juntos contribuem com mais de 75% da produção mundial, a produção mundial de grão-de-bico é dispersa geograficamente tendo cultivo em vários países além da Índia e Paquistão como também Austrália, Turquia, Estados Unidos que lideram a produção mundial estimada em 2018 em aproximadamente 17 milhões de toneladas. A Índia lidera essa produção sendo responsável por mais de 65% de toda a produção mundial, isso corresponde a mais de 9 milhões de toneladas de grão-de-bico, no Brasil o consumo e cultivo de Grão-de-bico é muito pequeno, porém por ser uma leguminosa de inverno com um alto valor proteico, acaba tendo um grande potencial como forma de cultivo alternativo [1, 4, 6].

Figura 1. Semente do grão-de-bico [61].



A produção de grão-de-bico no Brasil é de aproximadamente 3 a 4 mil toneladas por ano, esse valor é insuficiente para abastecer o mercado interno brasileiro, sendo necessário a importação dessa leguminosa de países como o México e Argentina. Os estados que mais

produzem essa cultura são Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais e Bahia, somente em 2019 o Brasil importou 7,2 mil toneladas de grão-de-bico. O principal tipo de Grão-de-bico cultivado no Brasil é o Kabuli que é caracterizado por ter uma granulometria maior e ser mais claro, essa oleaginosa é extremamente rica em proteínas, sais minerais e outras diversas vitaminas como A, C, E e K. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) existe registro de 5 cultivares de grão-de-bico no Brasil, a Embrapa Hortaliças é a única instituição em território nacional que trabalha no melhoramento genético de cultivares de grão-de-bico. Com relação ao cultivo o grão-de-bico se desenvolve melhor em solos ricos em nutrientes e com muita cobertura de matéria orgânica além de uma característica de solo similar a textura sílico-argilosa caracterizada por um alto teor de umidade com variação de pH ideal entre neutro e alcalino (6 a 9) [2, 4, 5].

A área cultivada de grão-de-bico no Brasil cresceu vertiginosamente mais de 1.000% somente em 2018, chegando a 9.000 hectares, segundo a Embrapa no ano anterior a cultura ocupava em área cultivada somente 800 hectares [3].

3.2 GÉRMEN DE TRIGO

O *Triticum Vulgare* mais conhecido como gérmen de trigo é a parte mais nobre desse cereal que é um dos mais cultivados no mundo, a produção mundial de trigo referente à safra de 2021/2022 foi de aproximadamente 780 milhões de toneladas, a área total de plantio foi equivalente a 222 milhões de hectares, o que equivale em área a aproximadamente 220 milhões de campos de futebol, os maiores produtores dessa gramínea são União Europeia, China, Índia, Rússia e Estados Unidos [7].

A produção brasileira foi durante à safra 2021/2022 de aproximadamente 7,7 milhões de toneladas, isso representa pouco mais de 66% do que é consumido pelo mercado interno, sendo o Sul a região que mais produz, cerca de 92% de toda a produção nacional, O trigo é uma das culturas mais antigas do mundo, surgiu como cultura agrícola na região do crescente fértil, o trigo tem inúmeras utilidades principalmente no setor alimentício cerca de 80% de sua produção mundial é para a confecção de pães, o trigo também é muito utilizado para produzir biscoitos, farinha, farelo, bolos, macarrão, pizza, massas em geral, entre outros [8].

O gérmen de trigo representa de 2-3% do grão de trigo, podendo ser separado do mesmo, o percentual de óleo encontrado no gérmen é de 11%, o gérmen de trigo é rico em vitamina E, além de possuir essa característica também possui em sua composição uma concentração significativa de ácido graxos poliinsaturado, aminoácidos essenciais com

concentrações significativas de lisina, treonina e também metionina. Através da análise físico-química foi obtido um alto teor de proteínas cerca de 30%, 13% de fibras, 11% de gorduras, 12% umidade e em torno de 4% de cinzas, O óleo de gérmen de trigo é utilizado como antioxidante, em cosméticos, agente de controle de insetos, produtos fármacos, entre outros. A metodologia e o tipo de solvente utilizada para a obtenção da extração do óleo do gérmen de trigo influenciam diretamente no rendimento e qualidade do resultado obtido. A metodologia mais empregada para extração do óleo é com a utilização de solvente por possuir um baixo teor de óleo o gérmen de trigo, o tipo de solvente também varia, pois, dependendo do solvente escolhido ocorrem alterações nas propriedades físico-químicas do óleo. Para óleos vegetais o solvente mais usado é o n-hexano devido à baixa temperatura de ebulição (63-69 °C) [9, 10].

Figura 2. Gérmen de trigo [62].



3.3 SANSÃO DO CAMPO

A *Mimosa Caesalpinifolia* mais conhecida no Brasil como sansão do campo ou sabiá é nativa da caatinga, aparece com certa frequência tanto em formações primárias como secundárias, bastante comum em estados como Piauí, Pernambuco, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba. O sansão do campo é muito utilizado como cerca viva para a recuperação de áreas degradadas ou até mesmo enriquecimento de matas e florestas nativas, projetos paisagísticos e também pode ser cultivada para a obtenção da madeira por possuir uma alta resistência à umidade, ser bastante densa e compacta. O sansão do campo consegue se desenvolver rapidamente mesmo em terras com pouca umidade e pobre em nitrogênio,

possui alta capacidade de regeneração e bastante resistência à seca. A planta alcança altura de aproximadamente de 7 a 8 metros durante a fase adulta, possui copa baixa, tronco de 20-30 cm de diâmetro, alta capacidade de rebrota, folhagem compostas, muitas raízes compridas e densas, tal característica favorece a grande absorção de água pela planta e rápida e vasta produção de folhagem [11-14, 16, 18].

Figura 3. Semente do sansão do campo [63].



O sabiá é muito empregada em sistemas do tipo agroflorestais, sendo utilizada como cercas vivas e quebra-ventos, muito utilizada também no processo de tutoramento de outras culturas como videiras auxiliando assim em uma melhor orientação para o crescimento da mesma, além de contribuir para o enriquecimento do solo por meio de deposição de matéria orgânica com altos teores de nitrogênio, diminuindo assim os custos com determinados insumos [15, 17].

3.4 BIODIESEL

Com o crescente desenvolvimento das cidades e indústrias ocorre um aumento pela demanda de energia, a necessidade por fontes energéticas proveniente de combustíveis fósseis vem causando inúmeros problemas ambientais, uma das maneiras de reduzir as consequências desfavoráveis é fazendo o uso de biocombustíveis como o biodiesel, o biodiesel pode ser utilizado como substituto do diesel convencional, o Brasil apresenta inúmeras vantagens para o cultivo e manejo de cultivares que podem ser utilizados como fontes de matéria-prima rica em óleos vegetais, dentre elas um solo propício para o cultivo de inúmeras oleaginosas.

O Biodiesel é um combustível renovável, ele é obtido principalmente através de um processo chamado de transesterificação. Uma das vantagens é que ele pode ser produzido

através de diversas fontes oleaginosas, o tipo de fonte utilizada para produzir o biodiesel vai influenciar diretamente no rendimento do processo. O Biodiesel produzido pode ser de primeira, segunda ou terceira geração, outros fatores que influenciam durante o processo de produção são temperatura, tempo de reação, concentração do catalisador na reação de transesterificação, entre outros. [19 – 22, 26].

Segundos dados do relatório da British Petroleum Statistical Review of World Energy em 2018 a produção de biocombustíveis no mundo foi cerca de 95.371.000 de toneladas, mais de 9% de aumento com relação ao ano anterior, somente o Brasil em 2018 produziu cerca de mais de 5,3 bilhões de litros de biodiesel. O processo de transesterificação pelo qual se obtém o biodiesel é a reação química entre um éster e um álcool após isso é gerado um novo éster e álcool, existe também a transesterificação por alcoólise. O processo de transesterificação ocorre com a mistura do óleo utilizado seja de origem vegetal ou animal com um álcool simples com presença de um catalisado, o resultado dessa reação química é o biodiesel e a glicerina, sendo o biodiesel uma mistura de ésteres de ácidos graxos, o metano e etanol são os álcoois que mais são empregados durante o processo de produção do biodiesel, o metanol acaba apresentando maior eficiência, dentre os catalisadores mais utilizados se encontra o hidróxido de sódio (NaOH), posteriormente é necessário realizar a separação do biodiesel e da glicerina podendo ser por decantação [23 - 25]

O biodiesel ganhou mais destaque no Brasil com o aumento da preocupação ambiental ganhou destaque não só internacionalmente mas principalmente no Brasil, com intuito de encontrar meios eficazes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) o governo federal apoiou vários programas que estimulavam o fomento do biodiesel no Brasil em especial o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pro-óleo) e Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel (ProBiodiesel), nesse contexto também ocorreu a implementação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), dentre os objetivos propostos pelo programa estava garantir a demanda de biodiesel por meio de adição compulsória ao diesel mineral, em 2020 o nível de adição de biodiesel estava em 12% com relação ao diesel mineral, nas figuras 4 e 5 é possível observar a produção total nacional e a produção total por região de biodiesel [27, 28, 31].

Figura 4. Produção nacional de biodiesel em metros cúbicos [28].

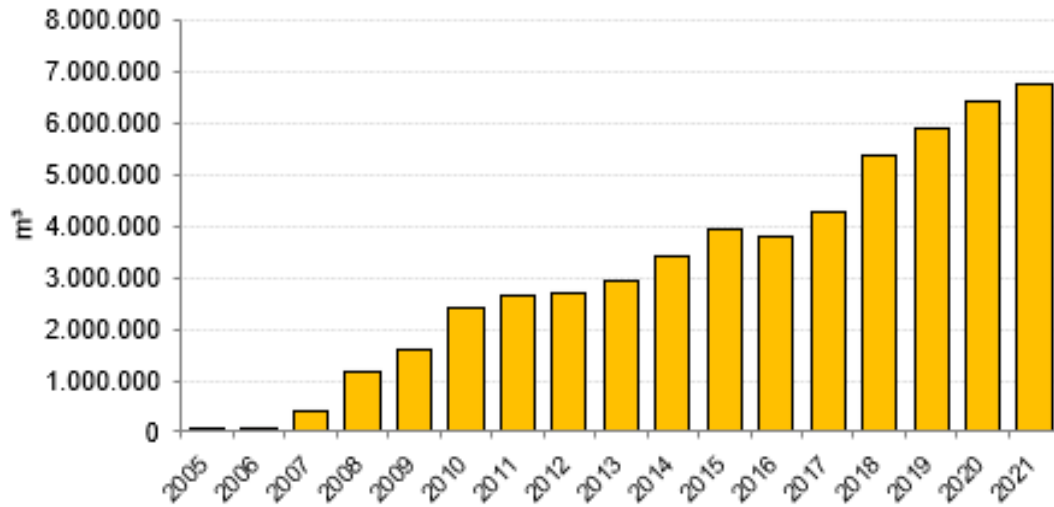
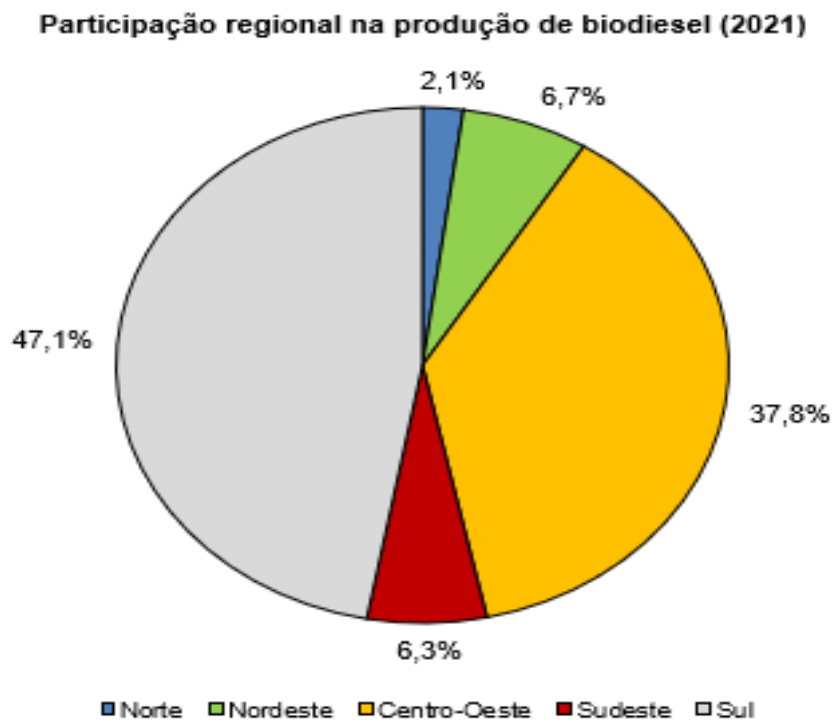


Figura 5. Participação regional na produção de biodiesel (2021) [28].

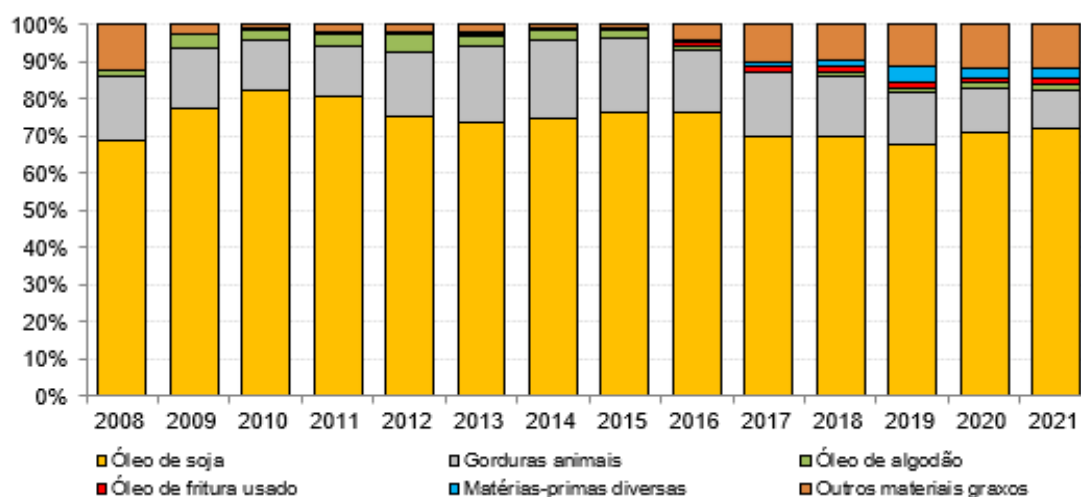


A figura 4 traz um dado importante, na ilustração é possível observar que a produção nacional de biodiesel aumentou em mais de 10 vezes nos últimos 15 anos.

Observando a figura 5 é possível identificar que no Brasil a região Centro-Oeste e Sul são as que mais se destacam na produção de biodiesel, somente a região Centro-Oeste produziu 2.553,664 de m³ já a região Sul produziu 3.182,198 m³. [28]

No Brasil a soja é a matéria-prima que mais se destaca para a produção de biodiesel, sendo somente ela responsável por mais de 72% da produção total em 2021 como é possível observar na figura 6 [29, 30].

Figura 6. Produção de biodiesel por matéria-prima [29].



3.5 EXTRAÇÃO DE ÓLEO

Os óleos e gorduras possuem uma infinidade de atribuições, eles são utilizados em outras áreas além da energética, podem ser empregados no setor alimentício, assim como em hidratantes, perfumes, fragrâncias, cosméticos em geral, na indústria em resinas, graxas, tintas, lubrificantes, entre outros produtos [32].

Existem determinados métodos para a extração de óleo, o método empregado muitas vezes depende do objetivo para qual o óleo vai ser utilizado, isso pode comprometer a viabilidade econômica do processo, no entanto nos últimos anos a preocupação com a segurança e o meio ambiente vem influenciando bastante no desenvolvimento de pesquisas que optam por métodos de extração de óleo mais eficazes e que causam menos impactos ambientais. Os métodos modernos muitas vezes utilizam solventes verdes que não apresentam sinais de poluição como água, etanol, acetato de etila, dióxido de carbono, líquidos iônicos, tecnologia de fluido supercrítico, as vantagens apresentadas são significativas pois essas técnicas apresentam matéria-prima renovável e reduzem emissões geradas por solventes orgânicos [32, 34, 35, 36].

Vários fatores influenciam o rendimento final do processo como a capacidade que cada solvente possui em solubilizar o óleo presente na matéria-prima e extraí-lo da mesma,

temperatura e pressão durante o processo de extração, o tamanho da partícula da matéria-prima utilizada, entre outros [38, 39].

A técnica por prensagem hidráulica é bastante antiga e pouco eficiente extraindo no máximo 80% do óleo, no entanto apresenta um baixo custo e não gera nenhum tipo de contaminação ou poluente, o método de extração mais empregado é com o uso de solvente orgânico que acaba dissolvendo o óleo e o separa por evaporação e destilação ou desemulsificação e centrifugação. Dentre os solventes orgânicos mais utilizados temos o n-hexano, hexano, éter de petróleo, acetato de etila, acetona e clorofórmio [32, 33, 37].

Existe outros métodos de extração de óleo que são empregados na indústria, dentre eles temos a extração enzimática aquosa (EEA), técnica que utiliza água para extrair o óleo da matéria oleaginosa, no entanto a água demora a degradar a parede celular da matéria prima contribuindo para um resultado de baixo rendimento [40, 41, 42]. Extração assistida por micro-ondas (EAM), apresenta um alto rendimento. O gerador de micro-ondas fornece energia para um material polarizável que consiste no solvente e material oleoso, a radiação interage com os dipolos que estão na matriz fazendo com que o mesmo entre em um processo de rotação por conta do campo eletromagnético, gerando calor que acaba sendo transferido para o interior do material, a combinação do calor em conjunto com a radiação desencadeada pelas micro-ondas contribui para a formação de vapor de água, esse fenômeno é chamado de eletroporação que degrada a parede celular da oleaginosa e contribui para uma melhor extração [43, 44]. Extração assistida por ultrassom (EAU) seu mecanismo de extração possui ampla eficiência por combinar a produção de bolhas de cavitação, vibração, pulverização, todos esses processos contribuem para o rompimento e degradação da parede celular, auxiliando assim no processo de extração da oleaginosa [45, 46]. Extração assistida por campo elétrico de pulso (CEP) essa tecnologia gera uma descarga elétrica de pulso em alta tensão diretamente no material da oleaginosa por um tempo de milissegundos ou microssegundos [32, 47, 48].

3.6 EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA

O fluido supercrítico tem como definição qualquer fluido que independente das características de líquido ou gás que apresenta propriedades de temperatura e pressão acima dos valores críticos, obedecendo essas características o fluido supercrítico possui uma menor viscosidade e maior difusividade que solventes tradicionais utilizados em processos de

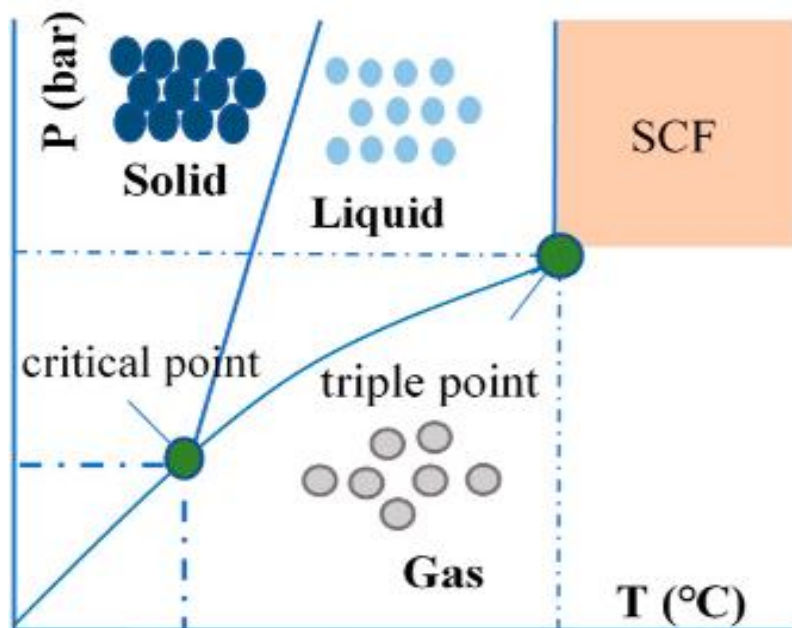
extração de óleo, essas características auxiliam em uma extração mais eficiente já que o solvente consegue penetrar com mais facilidade na matéria [49,50,51].

O fluido supercrítico têm viscosidade e difusividade semelhante a gases e densidade semelhante a líquidos, outra característica é que o fluido supercrítico consegue controlar com maior facilidade valores de pressão e temperatura que desencadeiam uma alternância em propriedades termo físicas, ou seja ao variar a pressão e temperatura é possível influenciar no poder de solvatação, difusividade do fluido, viscosidade, densidade para que se possa obter um maior rendimento da extração de óleo de uma oleaginosa, além de serem econômicos, sustentáveis e ecologicamente corretos [52].

Existe uma gama de solventes que podem vir a ser utilizados como fluido supercrítico, no entanto alguns fatores influenciam na escolha do solvente como por exemplo a condição crítica de temperatura e pressão do fluido, custo do produto, toxicidade e maior poder de solvatação, o dióxido de carbono (CO_2) vem se consolidando nessa área como um dos gases comumente mais utilizados como fluido supercrítico por possuir inúmeras vantagens, o dióxido de carbono conhecido também como gás carbônico é um composto químico formado por dois átomos de oxigênio e um átomo de carbono, ele está presente de maneira abundante na atmosfera, é produzido através da queima de matéria orgânica e através da respiração de animais. A condição crítica de temperatura e pressão influencia na escolha do solvente, pois uma temperatura e pressão baixa para atingir as condições críticas significa que menos energia será gasta para elevar o fluido a uma pressão e temperatura necessária, outro fator importante é que o fluido ao estar em condições supercríticas tem o seu poder de solvatação aumentado, isso permite que ocorra um aumento de permeação do solvente no soluto [49, 53, 54].

O dióxido de carbono possui inúmeras vantagens, é relativamente barato pela facilidade e praticidade que se tem de se obter esse composto, não apresenta corrosividade e nem é tóxico para a saúde humana além de apresentar condições críticas de valores baixos de temperatura e pressão como $31,1\text{ }^\circ\text{C}$ e $73,8\text{ bar}$, outro grande fator é que após a extração e decompressão do sistema o dióxido de carbono pode ser liberado no ambiente por se encontrar no estado gasoso a temperatura e pressão ambiente, assim o óleo extraído da matéria prima fica isento do solvente sem necessidade de optar por um tratamento de purificação do extrato, o dióxido de carbono também pode ser reaproveitado ao invés de ser liberado no ambiente [52, 54, 55].

Figura 7. Diagrama P x T da curva de transição de fase do fluido supercrítico [49].



O CO₂ supercrítico apresenta uma gama de vantagens ao ser utilizado no processamento de alimentos se consolidando cada vez mais nesse setor, podendo contribuir com o aumento de produtividade, a eficiência do fluido supercrítico como solvente é maior para componentes apolares [56].

3.7 ESTADO DA ARTE

A extração por fluido supercrítico já está consolidada na indústria por apresentar inúmeras vantagens e benefícios, principalmente no setor alimentício aonde muitas vezes para se obter um resultado satisfatório a única alternativa para se utilizar como solvente é o fluido supercrítico, além de não apresentar riscos ao meio ambiente, apresenta um rendimento elevado, podendo ter seu custo barateado por um aumento de escala [54 – 56].

Dentre as pesquisas realizadas na área de extração supercrítica Jianjun et al. [49] realizaram um estudo de recuperação de compostos valiosos e saudáveis de subprodutos de alimentos marinhos e agrícolas aonde foi constatado um grande potencial na aplicação de tecnologias de extração verde como fluidos supercríticos na extração de produtos e subprodutos do processamento de alimentos agrícolas, esse tipo de tecnologia não apenas melhorou a eficiência do processamento como também economizou energia e reduziu a poluição [49].

Soon Hong et al. [57] em seu trabalho sobre, análise da viabilidade tecnoeconômica para comissionar uma planta em Singapura de extração do óleo de patchouli com CO₂

supercrítico, a análise mostrou-se economicamente viável para uma escala de produção de 11.500 kg de óleo de patchouli por ano, essa estimativa foi aplicada em condições operacionais de pressão 12 MPa, temperatura 40 °C, tendo como resultado um custo de produção por quilo de óleo de apenas 53,87 USD/Kg, o tempo de retorno para recuperar o capital investido é de 5,4 anos [57].

Ana Carolina Fornereto et al. [58] em seu estudo sobre análise do potencial da extração com fluido supercrítico do óleo-resina de rejeitos industriais de *Capsicum annum*, obteve resultado satisfatório quanto ao rendimento do óleo-resina variando entre 9,38% e 10,08%, o solvente utilizado foi o CO₂ supercrítico, em diferentes condições, foram utilizadas temperaturas de 40 °C e 60 °C e pressão de 200 bar e 250 bar, os extratos apresentam inúmeros compostos bioativos como flavonoides, ácidos graxos, carotenoides e fenólicos [58].

4. METODOLOGIA

4.1 Materiais

O grão de bico, gérmen de trigo e sansão do campo foram comprados em uma loja de produtos alimentícios no município de Rosana-SP, as 3 matrizes foram trituradas em um liquidificador e peneiradas em peneiras granulométricas (Tamis) à 60 meches, posteriormente secas em uma estufa a 50 °C por 72h, O dióxido de carbono (99,9% em peso - fase líquida) foi adquirido da Air Liquid S.A (Brasil).

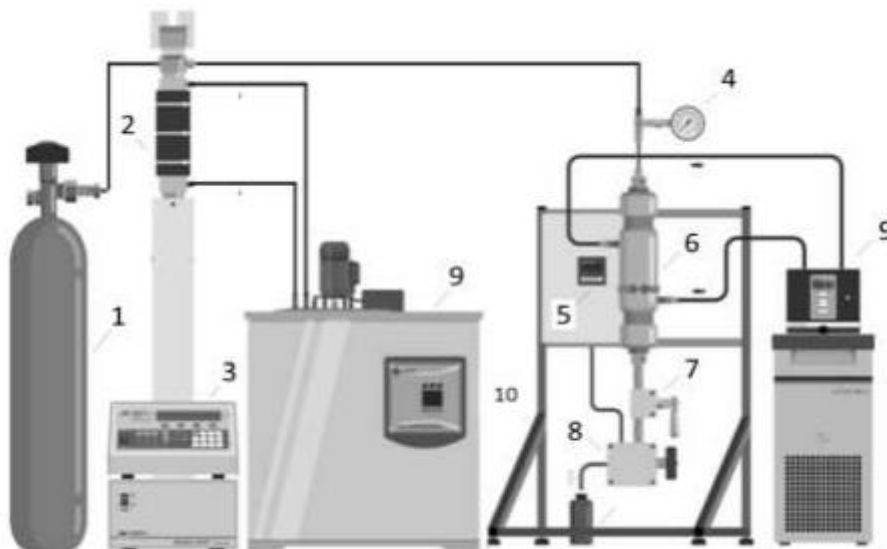
4.2 Aparato e procedimento experimental

Extração supercrítica com CO₂

Os parâmetros para temperatura, pressão e vazão foram escolhidos com base em trabalhos reportados da literatura.

Os ensaios experimentais foram conduzidos em uma unidade de extração no laboratório do campus da FEC - Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana – Unesp, a unidade de extração é composta por um cilindro de CO₂, uma bomba seringa (ISCO 260D, EUA), um banho termostático, um vaso de extração encamisado construído em aço, um transdutor de pressão absoluta (Smar LD301, Brasil) conforme a figura 8.

Figura 8. Esquema de uma unidade experimental de extração supercrítica.



Na Figura 8, o ponto 1 representa o Cilindro de CO₂, o ponto 2 representa a bomba seringa (ISCO 260D, EUA), o ponto 3 representa o banho termostático, o ponto 4 representa o indicador de pressão do sistema, o ponto 5 representa o controlador de temperatura, o ponto 6 representa o extrator, o ponto 7 representa a válvula de controle de vazão, o ponto 8 representa a válvula tipo agulha, o ponto 9 representa o banho termostático e o ponto 10 representa a estrutura em alumínio aonde o sistema está acoplado.

O extrator foi alimentado uniformemente com 4g de material (grão-de-bico, gérmen de trigo, sansão do campo) separados por experimentos, o espaço vazio da célula de extração foi preenchido com esferas de vidro (leito inerte). O CO₂ assim que iniciado o experimento passou pelo leito inerte e posteriormente pelo material triturado, a bomba e o extrator foram simultaneamente pressurizados com a pressão estabelecida assim que a temperatura desejada foi atingida através da configuração estabelecida no controlador de temperatura. Após a pressão operacional ser atingida o sistema ficou em repouso por 30 minutos para alcançar o equilíbrio e garantir que o CO₂ supercrítico estivesse saturado no início da extração.

As extrações foram realizadas com pressões preestabelecidas de 200, 240 e 280 bar, e temperaturas preestabelecidas de 40 °C, 50 °C e 60 °C e vazão de CO₂ de 2,0 mL.min⁻¹, a partir de um planejamento fatorial 2² com triplicata no ponto central (Tabela 1). A taxa de fluxo de 2,0 mL.min⁻¹ de solvente foi controlada por uma válvula micrométrica (Parker Autoclave Engineers, EUA) mantida a 90 °C. O extrato total foi coletado em frascos de vidro e pesados em 6 ciclos iniciais de 5 min e 5 ciclos de 10 min.

Tabela 1. Fatores e níveis para o planejamento fatorial 2² com ponto central.

Fatores	Símbolos	Unidades	Níveis		
			-1	0	+1
Temperatura	T	°C	40	50	60
Pressão	P	Bar	200	240	280

Calculo dos rendimentos das extrações

A análise de rendimento das extrações foi determinada gravimetricamente por uma balança analítica e o cálculo é a razão entre a massa total extraída e a massa inicial da oleaginosa no extrator, como é mostrado na Equação 1.

$$Y = \frac{M_{fa} - M_f}{M_a} \times 100$$

Eq. (1)

O valor de M_{fa} representa o peso do óleo extraído, M_f é o valor pesado do frasco que foi utilizado no processo e M_a é o valor aferido da amostra das oleaginosas.

5. RESULTADOS

5.1 Resultados grão-de-bico

Os experimentos foram realizados com o grão-de-bico. As condições experimentais como temperatura, pressão, tempo e o rendimento para extração por CO₂ supercrítico com vazão de (2,0 mL.min⁻¹) são apresentadas na Tabela 2. Os experimentos apresentaram um rendimento total que variou de 4,7 e 5,57%.

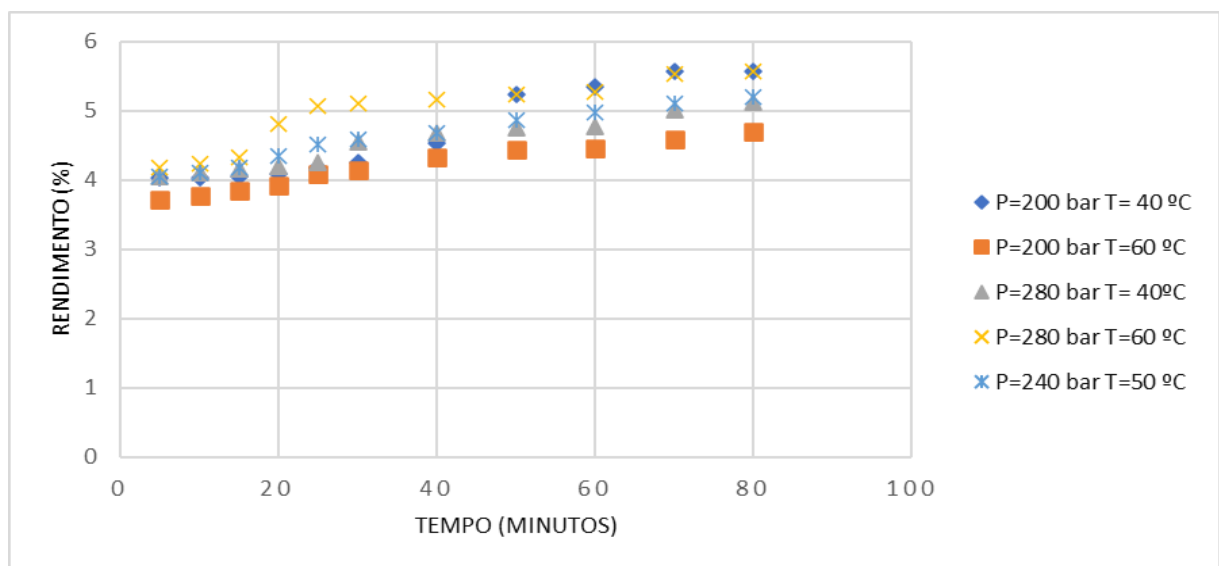
Tabela 2. Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de metabólitos da semente de grão-de-bico utilizando CO₂ supercrítico.

Teste	Temperatura	Pressão	Tempo	Rendimento
Semente de grão-de-bico				
	(°C)	(bar)	(min)	(%)
1	40	280	80	5,12
2	60	280	80	5,57
3	40	200	80	5,56
4	60	200	80	4,70
5-7	50	240	80	5.19 ± 0.14 ^a

^a Média ± desvio padrão (n =3).

Conforme é possível observar na tabela 2 o melhor rendimento foi alcançado com 60 °C de temperatura e 280 bar de pressão, no entanto ele foi apenas 0,18% maior que o rendimento do teste 3 que foi o segundo melhor rendimento apresentado nas condições de 40 °C e 200 bar, o teste 4 apresentou um rendimento 18% menor do que o teste de maior rendimento nos 80 minutos de extração, é possível identificar que a pressão foi a condição que mais influenciou no aumento do rendimento para o grão-de-bico.

Figura 9. Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações do grão-de-bico por CO₂ supercrítico.



Em 70 minutos é possível observar que boa parte do óleo do extrato já foi extraído, o teste 2 que apresentou maior rendimento tem um ligeiro aumento de rendimento após os 70 minutos e começa nos primeiros minutos com um rendimento superior a 4%.

5.2 Resultados gérmen de trigo

Os experimentos foram realizados com o gérmen de trigo. As condições experimentais como temperatura, pressão, tempo e o rendimento para extração por CO₂ supercrítico com vazão de (2,0 mL.min⁻¹) são apresentadas na Tabela 3. Os experimentos apresentaram um rendimento total que variou de 6,08 e 6,64%.

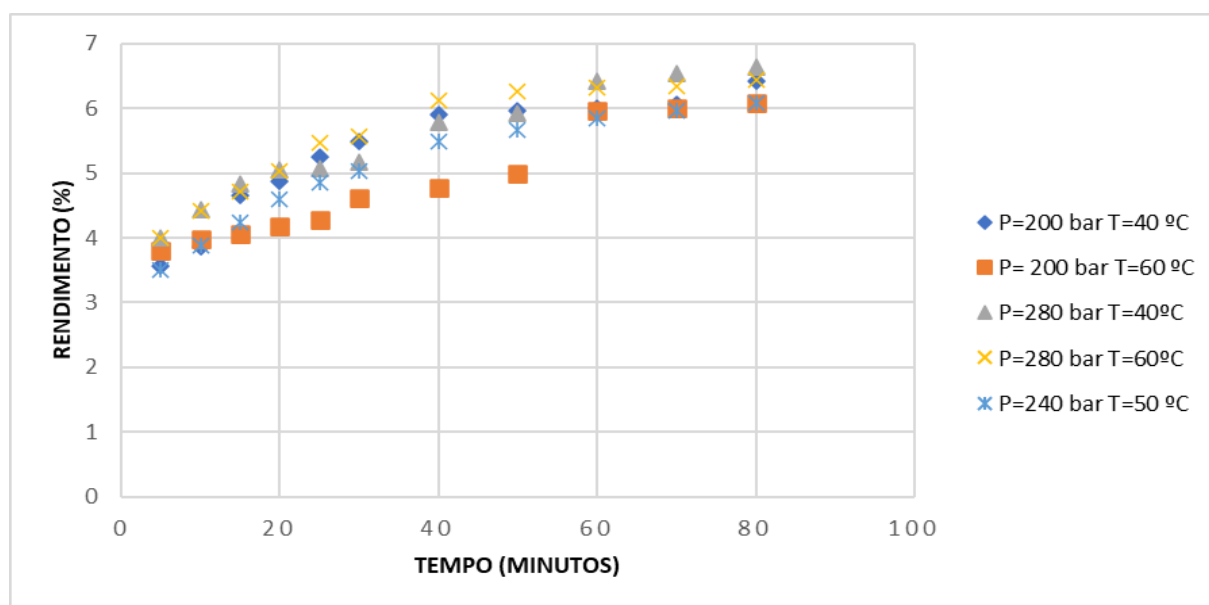
Tabela 3. Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de metabólitos do gérmen de trigo utilizando CO₂ supercrítico.

Teste	Temperatura	Pressão	Tempo	Rendimento
Semente de gérmen de trigo				
	(°C)	(bar)	(min)	(%)
1	40	280	80	6,64
2	60	280	80	6,45
3	40	200	80	6,43
4	60	200	80	6,08
5-7	50	240	80	6,08 ± 0.16 ^a

^a Média ± desvio padrão (n =3).

Conforme é possível observar na tabela 3 o teste 1 foi o que apresentou um rendimento maior de cerca de 6,64%, é possível observar que uma pressão maior influencia significativamente em um rendimento maior, os resultados apresentados dos testes 1 e 2 que utilizaram uma pressão de 280 bar são superiores aos resultados apresentados pelos testes 3 e 4 que foram realizados a uma pressão de 200 bar, também foi possível identificar que uma temperatura menor influenciou mais no aumento do rendimento, tanto o teste 4 como o resultado da média do ponto central obtiveram os menores rendimentos de 6,08%.

Figura 10. Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações do gérmen de trigo por CO₂ supercrítico.



A partir dos 60 minutos observa-se que boa parte do óleo do material já foi extraído, o teste 1 que apresentou o maior rendimento teve 98% do óleo extraído nos primeiros 60 minutos o que significa que dependendo do ponto de vista da viabilidade econômica não é interessante continuar o processo de extração já que boa parte do óleo foi extraído.

5.3 Resultados sansão do campo

Os experimentos foram realizados com o sansão do campo. As condições experimentais como temperatura, pressão, tempo e o rendimento para extração por CO₂ supercrítico com vazão de (2,0 mL.min⁻¹) são apresentadas na Tabela 4. Os experimentos apresentaram um rendimento total que variou de 3,9769 e 4,1499%.

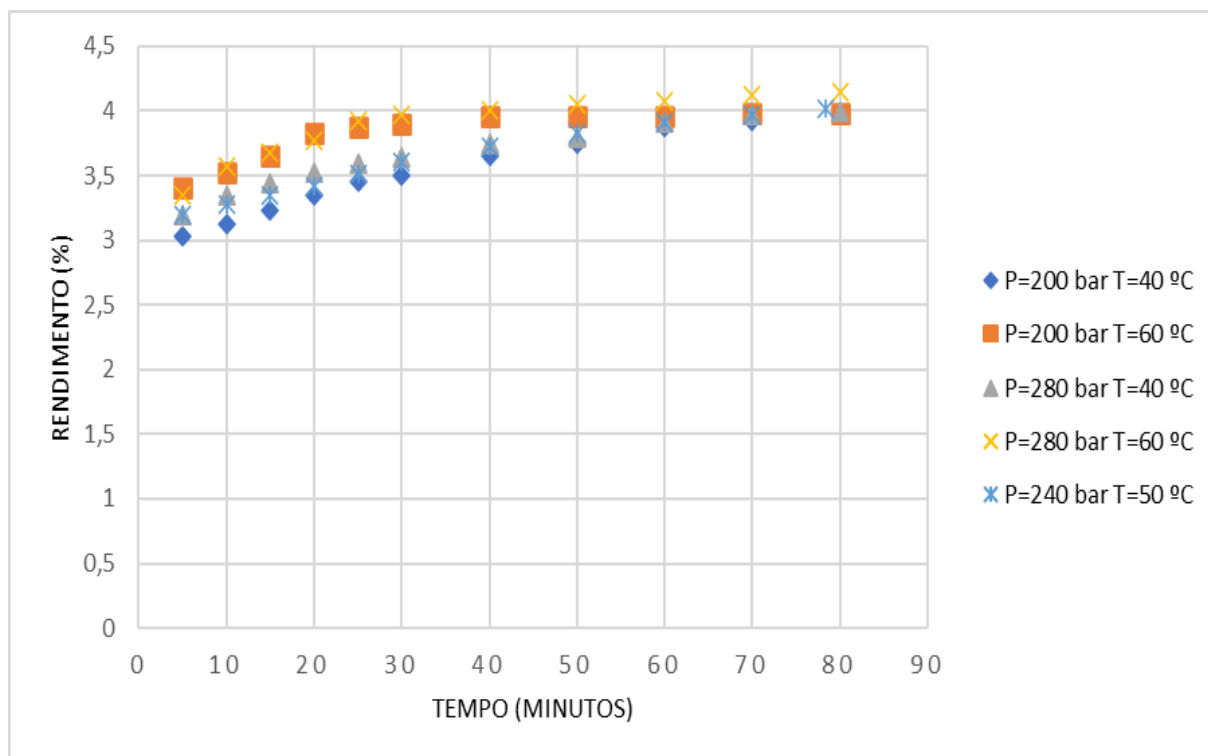
Tabela 4. Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de metabólitos do sansão do campo utilizando CO₂ supercrítico.

Teste	Temperatura	Pressão	Tempo	Rendimento
Semente de sansão do campo				
	(°C)	(bar)	(min)	(%)
1	40	280	80	3,9900
2	60	280	80	4,1500
3	40	200	80	3,9769
4	60	200	80	3,9799
5-7	50	240	80	4,02 ± 0.10 ^a

^a Média ± desvio padrão (n =3).

Conforme é possível observar na tabela 4 o teste 2 é o de maior rendimento cuja a temperatura é 60 °C e pressão 280 bar, se analisarmos o teste 1 e o teste 2 aonde a pressão é 280 bar, podemos identificar que o teste 2 que apresenta uma temperatura maior é o que também apresenta um maior rendimento, os testes 3 e 4 também apresentam o mesmo comportamento, tendo o teste 4 uma temperatura superior ao teste 3 e o mesmo se aplica ao seu rendimento, ao analisarmos os testes 1 e 3 aonde a temperatura é constante mas ocorre variação da pressão é possível identificar que o teste 1 que possui uma pressão superior ao teste 3 apresenta um rendimento maior, o mesmo se aplica aos testes 2 e 4 aonde o teste 2 que possui uma pressão maior também apresenta um rendimento superior, o segundo maior rendimento foi o da média do ponto central nas condições 50 °C e 240 bar, ele foi 3,2% menor do que o maior rendimento encontrado 60 °C e 280 bar.

Figura 11. Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações do sansão do campo por CO₂ supercrítico.



Como é possível observar a partir dos 40 minutos uma parte significativa do material é extraído, cerca de 96,25% do óleo foi extraído nos primeiros 40 minutos para o teste 2 cuja a temperatura é 60 °C e pressão 280 bar.

5.4 Discussões Gerais

Como é possível observar o estágio inicial da extração supercrítica ocorre com o aumento de rendimento proveniente da extração de óleo do extrato que é extraído com uma maior facilidade, nos primeiros minutos ocorre um aumento significativo do rendimento, um dos fatores que influenciam durante esse período é a solubilidade do soluto no solvente, após isso a taxa de extração diminui, a curva de extração torna-se quase linear.

O tempo de 80 minutos não foi o suficiente para conseguir extrair todo o material lipídico das oleaginosas, não ocorrendo estabilização total das curvas cinéticas, a vazão baixa de CO₂ é um dos fatores que influenciam e esse valor é escolhido por causa das limitações técnicas dos equipamentos utilizados no laboratório devido as suas dimensões.

As sementes de grão-de-bico, gérmen de trigo e sansão do campo possuem pouco conteúdo de referência na literatura, não sendo possível encontrar dados comparativos de rendimentos para ambas as sementes, a quantidade de massa de apenas 0,4g de material que foram utilizados para extração devido ao fato de que 80 minutos que é o tempo de funcionamento máximo do sistema seriam insuficientes para extrair o óleo das sementes com um bom rendimento para massas de valores superior à 0,4g de material.

Na maioria das extrações supercríticas a maior parte do óleo dos extratos foram retirados nos primeiros 60 minutos, após esse período a taxa de extração foi diminuindo significativamente, durante esse período inicial os mecanismos convectivos retiram os extratos de fácil acesso em uma velocidade maior, e à medida que o material lipídico é removido os mecanismos difusivos retiram os materiais de difícil remoção.

6. CONCLUSÕES

Na extração do óleo das sementes do grão-de-bico por CO₂ supercrítico indicou que o fator de maior relevância na extração é a pressão pois o melhor rendimento ocorreu na pressão de 280 bar independente da temperatura utilizada na extração. A extração do óleo do gérmen de trigo por CO₂ supercrítico indicou que o fator de maior relevância na extração também foi a pressão pois o melhor rendimento ocorreu na pressão de 280 bar independente da temperatura utilizada na extração, pois o teste 1 apresentou o maior rendimento seguido do teste 2. Na extração do óleo das sementes de sansão do campo também foi possível identificar que os maiores rendimentos foram com pressão de 280 bar e 240 bar e que diferente das outras demais sementes a temperatura influenciou nos rendimentos, é possível identificar que o teste 1 foi o que apresentou melhor rendimento seguido pelo teste da média do ponto central, a vazão do CO₂ influencia significativamente no rendimento e é possível chegar a conclusão que a temperatura e pressão ideal para conseguir se obter os melhores rendimentos varia da oleaginosa utilizada, o gérmen de trigo foi a oleaginosa que obteve o maior rendimento cerca de 6,64%, seguidos do grão-de-bico 5,57% e sansão do campo 4,15%, ambas as oleaginosas obtiveram valores significativamente baixos se comparado com outras demais sementes utilizadas para produção de biodiesel.

7. REFERÊNCIAS

- [1] GRÃO-DE-BICO. Ciência Rural. 1992. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/kPbJW5xDhdGQ5NsDvctyZkz/abstract/?lang=pt>. Acesso em 14 Nov. 2022.
- [2] COMO REALIZAR O CULTIVO DE GRÃO DE BICO: DA SEMEADURA À COLHEITA. Instituto Agro. 2022. Disponível em: <https://institutoagro.com.br/grao-de-bico/#:~:text=S%C3%A3o%20bastante%20escassos%20os%20relatos,o%20M%C3%A9xico%20e%20a%20Argentina>. Acesso em 15 Nov. 2022.
- [3] Área com grão-de-bico cresce 1.000% no Brasil, diz Embrapa. Canal Rural. 2019. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/programas/informacao/rural-noticias/area-grao-de-bico-cresce-mil/>. Acesso em 15 Nov. 2022.
- [4] Grão-de-bico, uma oportunidade no mercado internacional. CNA BRASIL. 2020. Disponível em: [https://cnabrasil.org.br/cna-pulses/page8.html#:~:text=Pertencente%20C%C3%A0%20esp%C3%A9cie%20Cicer%20arietinum,toneladas%20\(FAO%2C%202018\)](https://cnabrasil.org.br/cna-pulses/page8.html#:~:text=Pertencente%20C%C3%A0%20esp%C3%A9cie%20Cicer%20arietinum,toneladas%20(FAO%2C%202018)). Acesso em 17 Nov. 2022.
- [5] ARTIAGA, Osmar Pereira et al. Avaliação de genótipos de grão de bico em cultivo de sequeiro nas condições de Cerrado. Revista Brasileira de ciências agrárias, v. 10, n. 1, p. 102-109, 2015.
- [6] MARIANO, Letícia Alves. O grão-de bico (*Cicer arietinum* L.) como oportunidade de diversificação produtiva em Cristalina, Goiás. 2020.
- [7] Trigo - Análise mensal - abril 2022. Conab. 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-trigo/item/download/42566_7ad80f7d42c9a16dfe1dc926d4abeb75#:~:text=MERCADO%20INTERNACIONAL&text=No%20que%20se%20refere%20aos,%2C3%25%20da%20safra%20anterior.%20Acesso%20em%2017%20Nov.%202022. Acesso em 17 Nov. 2022.
- [8] TRIGO: PRODUÇÃO E MERCADOS. Banco do Nordeste. 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1057/1/2021_CDS_203.pdf. Acesso em 17 Nov. 2022.
- [9] GAIARDO, Gabrieli et al. Aproveitamento do subproduto gérmen de trigo no desenvolvimento de produtos alimentícios. In: 5º Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT). 2016.
- [10] ANSOLIN, Marina et al. Extração de óleo de gérmen de trigo com solventes alcoólicos. Journal of Health Sciences, v. 17, n. 4, 2015.

- [11] DE OLIVEIRA GONÇALVES¹, Elzimar et al. Crescimento de mudas de sansão-do-campo (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) sob diferentes doses de macronutrientes Growth of sansão-do-campo (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) seedlings under different macronutrients doses.
- [12] BARROS, Welluma Teixeira et al. QUALIDADE FISIOLÓGICA DA SEMENTE DE SABIÁ (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE MATURAÇÃO. Semana de Agronomia da UESB (SEAGRUS)-ISSN 2526-8406, v. 1, n. 1, 2017.
- [13] FADEL, Rossala. Desempenho e características quantitativas e qualitativas da carcaça de ovinos Santa Inês alimentados com a leguminosa Sansão do Campo (*mimosa caesalpiniaefolia* benth) e infectados com *trichostrongylus colubriformis*. 2011.
- [14] Sansão Do Campo. Instituto Brasileiro de Florestas. 2020. Disponível em: <https://www.ibflorestas.org.br/lista-de-especies-nativas/sansao-do-campo#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%3A%20O%20sans%C3%A3o%20do%20campo,3%2D8%20cm%20de%20comprimento>. Acesso em 17 nov. 2022.
- [15] CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. Sabiá-*Mimosa caesalpiniaefolia*. 2007.
- [16] LEITE, R. P. et al. Qualidade fisiológica de sementes de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth) tratadas com extratos vegetais. *Scientia Plena*, v. 8, n. 4 (b), 2012.
- [18] MARTINS, Marcelo da Silva. Quebra de dormência sementes de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth): eficiência de óleos essenciais. 2021.
- [19] MOFIJUR, M. et al. Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources-A mini-review. *Chemosphere*, v. 270, p. 128642, 2021.
- [20] REZANIA, Shahabaldin et al. Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. *Energy Conversion and Management*, v. 201, p. 112155, 2019.
- [21] AKRAM, Fatima et al. Current trends in biodiesel production technologies and future progressions: A possible displacement of the petro-diesel. *Journal of Cleaner Production*, p. 133479, 2022.
- [22] ZAVARISE, Julio Pansiere et al. PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DA TRANSESTERIFICAÇÃO ENZIMÁTICA DE RESÍDUOS OLEOSOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DE 2001 A 2021. *Revista Acta Ambiental Catarinense*, v. 19, n. 1, p. 01-21, 2022.

- [23] DA SYLVIO VIEIRA, Alexandre Sylvio Vieira et al. Análise técnico-social da produção de biodiesel no Brasil e no desenvolvimento agrícola do norte de Minas Gerais. DRd-Desenvolvimento Regional em debate, v. 10, p. 789-809, 2020.
- [24] AGHBASHLO, Mortaza et al. Machine learning technology in biodiesel research: A review. Progress in Energy and Combustion Science, v. 85, p. 100904, 2021.
- [25] <https://www.todamateria.com.br/transesterificacao/>
- [26] DO TEOR, D. E.; COMBUSTÍVEL, BIODIESEL EM ÓLEO DIESEL. UFRJ.
- [27] CAVALCANTE FILHO, Pedro Gilberto; BUAINAIN, Antônio Márcio; CUNHA, Marcelo Pereira da. Avaliação dos impactos socioeconômicos da cadeia produtiva do Biodiesel na agricultura familiar brasileira. Estudos Econômicos (São Paulo), v. 51, p. 493-527, 2021.
- [28] <https://abiove.org.br/estatisticas/>
- [29] <https://abiove.org.br/estatisticas/biodiesel-producao-por-tipo-de-materia-prima/>
- [30] DE FREITAS, Ingrid Dias; ROSA, Michele Jackeline Andressa; DALFOVO, Wylmor Constantino Tives. Influência da produção de biodiesel no preço da soja no Brasil.
- [31] RIBEIRO, Vinícius Souza; DA ROCHA SILVA, Mônica Aparecida. Política pública do biodiesel no Brasil: uma análise na perspectiva do ciclo das políticas públicas. DRd-Desenvolvimento Regional em debate, v. 10, p. 833-861, 2020.
- [32] MWAURAH, Peter Waboi et al. Novel oil extraction technologies: Process conditions, quality parameters, and optimization. Comprehensive reviews in food science and food safety, v. 19, n. 1, p. 3-20, 2020.
- [33] Puertolas, E., Alvarez-Sabatel, S., & Cruz, Z. (2016). Pulsed electric field: Groundbreaking technology for improving olive oil extraction. Inform, 27(3), 12– 14.
- [34] SILVA, Marcela Cristina. Óleos essenciais: caracterização, aplicações e métodos de extração. 2018.
- [35] SANTOS, A. S. et al. Descrição de sistema e de métodos de extração de óleos essenciais e determinação de umidade de biomassa em laboratório. Embrapa Amazônia Oriental-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2004.
- [36] TIWARI, Brijesh K. Ultrasound: A clean, green extraction technology. TrAC Trends in Analytical Chemistry, v. 71, p. 100-109, 2015.
- [37] AYDENIZ, Buket; GÜNEŞER, Onur; YILMAZ, Emin. Physico-chemical, sensory and aromatic properties of cold press produced safflower oil. Journal of the American Oil Chemists' Society, v. 91, n. 1, p. 99-110, 2014.

- [38] SHAAH, Marwan Abdul Hakim et al. A review on non-edible oil as a potential feedstock for biodiesel: physicochemical properties and production technologies. *RSC advances*, v. 11, n. 40, p. 25018-25037, 2021.
- [39] NDE, Divine Bup; FONCHA, Anuanwen Claris. Optimization methods for the extraction of vegetable oils: a review. *Processes*, v. 8, n. 2, p. 209, 2020.
- [40] GAI, Qing-Yan et al. Microwave-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from *Isatis indigotica* seeds and its evaluation of physicochemical properties, fatty acid compositions and antioxidant activities. *Industrial Crops and Products*, v. 45, p. 303-311, 2013.
- [41] GOULA, Athanasia M. et al. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pomegranate seeds. *Waste and Biomass Valorization*, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2018.
- [42] KONOPKA, Iwona et al. Optimization of pumpkin oil recovery by using aqueous enzymatic extraction and comparison of the quality of the obtained oil with the quality of cold-pressed oil. *Food Technology and Biotechnology*, v. 54, n. 4, p. 413-420, 2016.
- [43] BAKHSHABADI, Hamid et al. The influence of pulsed electric fields and microwave pretreatments on some selected physicochemical properties of oil extracted from black cumin seed. *Food science & nutrition*, v. 6, n. 1, p. 111-118, 2018.
- [44] HU, Bin et al. Optimization of microwave-assisted extraction of oil from tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) and its quality evaluation. *Industrial Crops and Products*, v. 115, p. 290-297, 2018.
- [45] ESCLAPEZ, M. D. et al. Ultrasound-assisted extraction of natural products. *Food Engineering Reviews*, v. 3, n. 2, p. 108-120, 2011.
- [46] PICO, Yolanda. Ultrasound-assisted extraction for food and environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 43, p. 84-99, 2013.
- [47] ABENOZA, M. et al. Effects of pulsed electric field on yield extraction and quality of olive oil. *Food and Bioprocess Technology*, v. 6, n. 6, p. 1367-1373, 2013.
- [48] BOZINO, Eleni et al. Pulsed electric field extraction and antioxidant activity determination of *Moringa oleifera* dry leaves: A comparative study with other extraction techniques. *Beverages*, v. 5, n. 1, p. 8, 2019.
- [49] ZHOU, Jianjun et al. The application of supercritical fluids technology to recover healthy valuable compounds from marine and agricultural food processing by-products: A review. *Processes*, v. 9, n. 2, p. 357, 2021.
- [50] AMEER, Kashif; SHAHBAZ, Hafiz Muhammad; KWON, Joong-Ho. Green extraction methods for polyphenols from plant matrices and their byproducts: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 16, n. 2, p. 295-315, 2017.

- [51] GALLEGO, Rocío; BUENO, Mónica; HERRERO, Miguel. Sub-and supercritical fluid extraction of bioactive compounds from plants, food-by-products, seaweeds and microalgae—An update. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 116, p. 198-213, 2019.
- [52] PIMENTEL-MORAL, Sandra et al. Supercritical CO₂ extraction of bioactive compounds from *Hibiscus sabdariffa*. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 147, p. 213-221, 2019.
- [53] PEREIRA, Camila G.; MEIRELES, M. Angela A. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds: fundamentals, applications and economic perspectives. *Food and Bioprocess Technology*, v. 3, n. 3, p. 340-372, 2010.
- [54] WRONA, Olga et al. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds from plant materials. *Journal of AOAC International*, v. 100, n. 6, p. 1624-1635, 2017.
- [55] DA SILVA, Rui PFF; ROCHA-SANTOS, Teresa AP; DUARTE, Armando C. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 76, p. 40-51, 2016.
- [56] BRUNNER, Gerd. Supercritical fluids: technology and application to food processing. *Journal of food engineering*, v. 67, n. 1-2, p. 21-33, 2005.
- [57] SOH, Soon Hong et al. Techno-economic and profitability analysis of extraction of patchouli oil using supercritical carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, v. 297, p. 126661, 2021.
- [58] SOLDAN, Ana Carolina Fornereto et al. Supercritical fluid extraction of oleoresin from *Capsicum annum* industrial waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 297, p. 126593, 2021.
- [59] BERGER, Camila et al. Extração supercrítica para obtenção de compostos químicos antioxidantes a partir da casca de *Acacia mearnsii* de Wild. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.
- [60] DE ALENCAR IRIZAWA, Ian; MARTINS, Tiago Dias; VEGGI, Priscilla Carvalho. MODELAGEM DA CINÉTICA DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA DE ARTEMISININA VIA REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS. *REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA*, v. 13, n. 2, 2021.
- [61] “Fotos de Grão de bico” Depositphotos. Disponível em: <https://br.depositphotos.com/stock-photos/gr%C3%A3o-de-bico.html>. Acesso em: 5 dez 2022.
- [62] “Fotos de gérmen de trigo” Depositphotos. Disponível em: <https://br.depositphotos.com/stock-photos/g%C3%A9rmen-de-trigo.html>. Acesso em: 5 dez 2022.

[63] “Fotos de sansão do campo” Depositphotos. Disponível em: <https://br.depositphotos.com/stock-photos/sans%C3%A3o-do-campo-semente.html>. Acesso em: 5 dez 2022.