

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

BÁRBARA FERREIRA DE JESUS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS CONVENCIONAIS E AVANÇADOS NA
EXTRAÇÃO DE ÓLEOS ESSENCIAIS DE FRUTAS CÍTRICAS

Uberlândia
2025

BÁRBARA FERREIRA DE JESUS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS CONVENCIONAIS E AVANÇADOS NA
EXTRAÇÃO DE ÓLEOS ESSENCIAIS DE FRUTAS CÍTRICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marina Seixas Pereira

Uberlândia

2025

BÁRBARA FERREIRA DE JESUS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS CONVENCIONAIS E AVANÇADOS NA
EXTRAÇÃO DE ÓLEOS ESSENCIAIS DE FRUTAS CÍTRICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marina Seixas Pereira

Uberlândia, 23 de setembro de 2025.

Prof.^a Dr.^a Marina Seixas Pereira
Orientadora – FEQUI/UFU

Prof.^a Dr.^a Sarah Arvelos Altino
FEQUI/UFU

Prof.^a Dr.^a Thamayne Valadares de Oliveira
FEQUI/UFU

RESUMO

Os óleos essenciais são ricos em substâncias ativas naturais, caracterizados pelo seu aroma e por suas diversas atividades fisiológicas, como antioxidante, anticancerígena e anti-inflamatória, podendo ser aplicados em diversas indústrias, como cosmética, farmacêutica, alimentícia e de produtos de limpeza. Nesse contexto, destaca-se a possibilidade de obtenção dos óleos essenciais a partir de resíduos gerados pelas indústrias, agregando valor a subprodutos e contribuindo para a redução do impacto ambiental. A extração desses óleos ocorre geralmente por hidrodestilação, destilação a vapor e por solvente orgânico, métodos estes que demandam alto consumo energético e longo tempo de operação. Dessa forma, torna-se necessária a aplicação de novas técnicas de extração, visando maior eficiência, qualidade e menor impacto ambiental. Assim, este trabalho visa identificar e comparar as vantagens e desvantagens da extração por fluido supercrítico e da extração assistida por micro-ondas – consideradas técnicas verdes de extração – em relação aos métodos convencionais. A comparação foi realizada a partir do princípio de funcionamento, da eficiência do processo, da qualidade do produto obtido e do impacto ambiental, a partir de estudos de caso da extração de óleos essenciais cítricos disponíveis na literatura. Ademais, buscou-se aprofundar o conhecimento sobre as aplicações dos óleos essenciais e avaliar o rendimento da extração por meio da utilização de técnicas analíticas. Para a realização dessa pesquisa, foi conduzida uma abrangente revisão bibliográfica, por meio de teses, dissertações, artigos e capítulos de livros, disponíveis em base de dados como *ScienceDirect*, *SciELO* e Banco de Teses e Dissertações. Em suma, este trabalho demonstrou que as técnicas verdes de extração superam os métodos tradicionais em eficiência e sustentabilidade. Elas preservam melhor os compostos bioativos e se alinham à crescente demanda por processos mais sustentáveis e seguros, apesar dos desafios de implementação em escala industrial.

Palavras-chave: extração verde; fluido supercrítico; micro-ondas; óleos essenciais; frutas cítricas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura química R-(-) Carvona e S-(+) Carvona.....	11
Figura 2: Estrutura química do limoneno, citral, eugenol, mentol e safrol	15
Figura 3: Hidrodestilação	16
Figura 4: Destilação por arraste a vapor.....	17
Figura 5: Extração por solvente.....	17
Figura 6: Aparelho Soxhlet.....	18
Figura 7: Diagrama de fases de uma substância pura.....	19
Figura 8: Sistema de SFE	21
Figura 9: Equipamento da extração assistida por micro-ondas	23
Figura 10: Hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD)	24
Figura 11: Extração por micro-ondas sem solvente	24
Figura 12: Cromatografia em Camada Delgada	30
Figura 13: CG-EM.....	31
Figura 14: CLAE-EM.....	31
Figura 15: Pervaporação por membrana.....	32
Figura 16: Diagrama esquemático do sistema de pirólise por micro-ondas.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplos de monoterpenos e sesquiterpenos.....	10
Tabela 2: Comparação das propriedades físicas dos gases, fluidos supercríticos e líquidos....	19
Tabela 3: Comparação entre os principais fluidos supercríticos	20
Tabela 4: Principais solventes utilizados na MAE	22
Tabela 5: Rendimento do óleo essencial a partir da casca de lima usando os métodos de Maceração e Soxhlet.....	26
Tabela 6: Composição química da <i>C. grandis</i> por hidrodestilação e extração supercrítica.....	33
Tabela 7: Rendimento de limoneno em diferentes tempos de extração	35
Tabela 8: Rendimento do limoneno em diferentes potências de extração.....	35
Tabela 9: Comparação entre o método de destilação a vapor e extração por micro-ondas	36
Tabela 10: Comparação entre os métodos de extração dos óleos essenciais.....	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. OBJETIVO GERAL	7
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2. METODOLOGIA.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1. ÓLEOS ESSENCIAIS.....	10
3.1.1. Composição química	10
3.1.2. Aplicação em cosméticos	11
3.1.3. Aplicação em perfumes	12
3.1.4. Aplicação em alimentos	12
3.1.5. Aplicação na saúde	13
3.1.6. Aplicação no controle de pragas.....	13
3.1.7. Aplicação na agricultura sustentável	14
3.1.8. Resíduos orgânicos e os óleos essenciais cítricos.....	14
3.2. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO	15
3.2.1. Hidrodestilação e destilação por arraste a vapor	16
3.2.2. Extração por solvente orgânico	17
3.2.3. Extração por fluido supercrítico	19
3.2.4. Extração assistida por micro-ondas	21
3.2.4.1. Hidrodestilação assistida por micro-ondas	23
3.2.4.2. Extração assistida por micro-ondas sem solvente	24
3.2.5. Influência dos parâmetros no processo.....	25
3.3. ANÁLISE DO PRODUTO DESEJADO	29
4. ESTUDOS DE CASO.....	33
4.1. FLUÍDO SUPERCRÍTICO VERSUS HIDRODESTILAÇÃO	33
4.2. MICRO-ONDAS VERSUS DESTILAÇÃO A VAPOR	34
4.3. MAHD E SFME VERSUS HIDRODESTILAÇÃO	36
5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO.....	38
6. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Os óleos essenciais (OE) podem ser extraídos de diferentes partes das plantas, como folhas, cascas e flores, e apresentam ampla aplicação nas indústrias alimentícias, farmacêuticas e de cosméticos. Os principais produtores mundiais incluem o Brasil, Índia, China e Indonésia, destacando-se o Brasil pela expressiva produção de OE cítricos, obtidos principalmente a partir de subprodutos gerados pelas indústrias de sucos (BIZZO; HOVELL; REZENDE, 2009).

Esses óleos são compostos ricos em substâncias ativas naturais, formados principalmente por terpenóides, compostos aromáticos e alifáticos, responsáveis por suas propriedades fisiológicas, aroma característico e pela sua preservação ao longo do tempo (FALLEH *et al.*, 2020). Tradicionalmente, a obtenção dos OE é realizada por métodos como hidrodestilação, destilação por arraste a vapor e extração por solventes orgânicos. Contudo, essas técnicas apresentam desvantagens relevantes, como elevado consumo energético, longos tempos de operação e o uso intensivo de solventes (SONG *et al.*, 2022). Nesse cenário, a extração por fluido supercrítico (*Supercritical fluid extraction* - SFE) e extração assistida por micro-ondas (*Microwave-assited extraction* - MAE) surgem como alternativas inovadoras, capazes de proporcionar maior rendimento, menor tempo de extração e menor custo energético (WANG *et al.*, 2024).

A qualidade dos óleos essenciais obtidos depende não apenas do método de extração, mas também de técnicas analíticas empregadas em sua caracterização, como a Cromatografia em Camada Delgada (CCD), Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) e Cromatografia Gasosa (CG). As duas últimas, quando acopladas à espectrometria de massas (CLAE-EM e CG-EM), possibilitam a separação e purificação mais precisa dos constituintes químicos (MARCOLINA, 2021).

Diante desse contexto, este trabalho visa identificar as aplicações dos óleos essenciais e comparar as vantagens e desvantagens da extração por fluido supercrítico e da extração assistida por micro-ondas em relação aos métodos convencionais, além de avaliar a qualidade final dos óleos obtidos. Busca-se, ainda, incentivar a adoção dos métodos avançados de extração, considerando seu potencial em termos de eficiência, qualidade do produto e redução dos impactos ambientais.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como principal objetivo fazer uma comparação entre os métodos de extração supercrítica e extração por micro-ondas em relação aos métodos de hidrodestilação,

destilação por arraste a vapor e destilação por solvente, visando analisar a eficiência da extração e a qualidade final do óleo essencial.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as principais aplicações dos óleos essenciais;
- Realizar uma revisão da literatura sobre os métodos de extração;
- Avaliar o impacto dos parâmetros de operação na eficiência do processo;
- Identificar as vantagens e desvantagens dos métodos;
- Destacar a importância de técnicas analíticas para separação e purificação do produto desejado;
- Comparar o rendimento da extração de óleos essenciais utilizando os diferentes métodos.

2. METODOLOGIA

A pesquisa desenvolvida possui caráter qualitativo e quantitativo, fundamentada em uma revisão bibliográfica de artigos científicos, teses, dissertações e capítulos de livros, disponíveis em base de dados como *Science Direct*, *Scielo*, Banco de teses e dissertações e *Google Scholar*. A partir desse levantamento, foi realizada uma análise comparativa entre métodos convencionais e avançados de extração de óleos essenciais, com o objetivo de identificar vantagens, limitações e impactos na qualidade do produto.

A análise comparativa foi elaborada considerando o princípio de funcionamento de cada técnica, a eficiência de extração, a qualidade final do óleo e os aspectos relacionados ao impacto ambiental. Adicionalmente, foram analisados estudos de casos envolvendo a extração de óleos essenciais a partir das cascas de frutas cítricas, permitindo compreender como a escolha do método influencia o rendimento e a composição química do produto.

A metodologia escolhida foi devido à sua relevância na fundamentação teórica acerca das técnicas verdes de extração. Esse procedimento possibilitou identificar e sintetizar os avanços tecnológicos e científicos associados ao tema, além de ampliar a compreensão dos benefícios ambientais e econômicos associados às técnicas de extração com fluidos supercríticos e da extração assistida por micro-ondas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ÓLEOS ESSENCIAIS

Os óleos essenciais podem ser extraídos a partir das raízes, lenhos, folhas, flores, frutos, sementes ou de toda a planta. Exemplos disso são o óleo de vetiver, de pau-rosa, de eucalipto, de laranja, de cravo e de lavanda, respectivamente (POVH, 2000).

3.1.1. Composição química

Quanto à composição química, os OE podem conter uma mistura de compostos aromáticos e alifáticos, que desempenham um papel significativo no aroma característico. Estes compostos podem ser terpenóides lipofílicos, fenilpropanóides ou derivados de hidrocarbonetos alifáticos (BAKKALI *et al.*, 2008).

Os componentes majoritários são os terpenóides e terpenos, sendo os primeiros moléculas oxigenadas e os segundos hidrocarbonetos puros. Quando separados, esses compostos contribuem para uma melhoria na qualidade final do produto, destacando-se as propriedades aromáticas complexas dos terpenóides e as características mais naturais dos terpenos. Os óleos essenciais são formados principalmente por monoterpenos e sesquiterpenos, que diferem em suas estruturas e propriedades. Os monoterpenos são compostos menores, constituídos por duas unidades de isopreno (10 carbonos), enquanto os sesquiterpenos são maiores, formados por três unidades de isopreno (15 carbonos). Ambos, podem ser divididos em acíclicos, monocíclicos e bicíclicos e podem ser classificados quanto à sua função em hidrocarbonetos insaturados, álcoois, aldeídos ou cetonas (BRUNETON, 1991; WANG *et al.*, 2024). A Tabela 1, abaixo, apresenta alguns exemplos de monoterpenos e sesquiterpenos, organizados quanto ao grupo funcional.

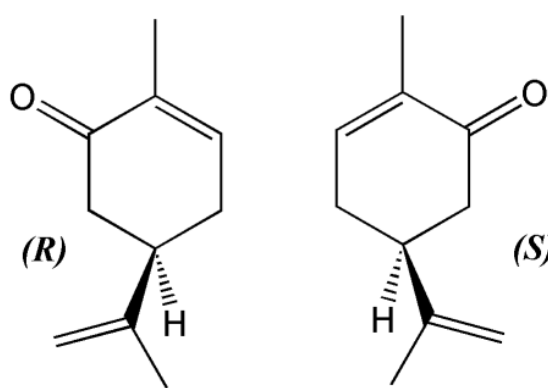
Tabela 1: Exemplos de monoterpenos e sesquiterpenos

Grupo Funcional	Classes	Compostos	Exemplos
Hidrocarbonetos insaturados	Monoterpenos	Limoneno	Óleo de bergamota
	Sesquiterpenos	β -cariofileno	Óleo de copaíba
Álcoois	Monoterpenos	Linalol	Óleo de toranja
	Sesquiterpenos	Cedrol	Óleo de cedro
Aldeídos ou cetonas	Monoterpenos	Citral	Óleo de capim-limão
	Sesquiterpenos	α -vetivona	Óleo de vetiver

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Margetts, 2005.

Ademais, alguns terpenóides apresentam formas enantioméricas distintas, devido a presença de um ou mais centros quirais. Essas diferenças estruturais influenciam diretamente nas propriedades biológicas, como ações antibacterianas, antivirais, anti-inflamatórias e anticancerígenas (WANG *et al.*, 2024). Além disso, a mudança de quiralidade afeta o sabor e o odor dos óleos. Por exemplo, a S-(+) carvona apresenta um sabor característico e agradável, enquanto a R-(-) carvona é associada a um sabor de menta (Figura 1). Outro caso é o limoneno, que na forma (+) exibe um odor mais agradável em comparação com a forma (-) (LASKA & TEUBNER, 1999).

Figura 1: Estrutura química R-(-) Carvona e S-(+) Carvona



Fonte: Oigman, [s.d.].

Devido a sua versatilidade, os OE possuem aplicações em diferentes áreas, incluindo cosméticos, perfumes, alimentos, saúde, controle de pragas e agricultura sustentável, sendo valorizados por suas propriedades físico-químicas (BIZZO; HOVELL; REZENDE, 2009; JUNQUEIRA, 2021).

3.1.2. Aplicação em cosméticos

Segundo Sharmeen *et al.* (2021), as indústrias de cosméticos utilizam ácidos graxos, óleos e surfactantes na formulação de seus produtos, os quais podem gerar odores indesejáveis e comprometer a qualidade final. Para contornar esse desafio, as fragrâncias são fundamentais para aumentar a atratividade desses cosméticos, sendo os óleos essenciais a principal fonte utilizada.

Além de conferir fragrância, esses óleos também são importantes nas preparações cosméticas, atuando como conservantes naturais, devido às suas propriedades antimicrobianas, podendo ser utilizados de forma isolada ou combinados com outros conservantes, garantindo proteção contra fungos e bactérias (DREGER & WIELGUS, 2013). Essa proteção não apenas melhora as propriedades dermocosméticas do produto, mas também contribui para a sua

preservação ao longo do tempo (HERMAN *et al.*, 2013; MANOU *et al.*, 1998). Ademais, os óleos essenciais oferecem benefícios adicionais a pele, como propriedades antiacne, antienvelhecimento e de proteção solar (WONGSUKKASEM *et al.*, 2018; MISHRA; MISHRA; CHATTOPADHYAY, 2012).

3.1.3. Aplicação em perfumes

A indústria de perfumes destaca o uso de óleos essenciais em suas formulações, preferindo-os em relação aos produtos sintéticos (MASANGO, 2001). Conforme suas características olfativas, a taxa de difusão e a volatilidade, esses óleos são classificados em três categorias: notas de topo, de coração e de base (IRSHAD *et al.*, 2020).

As notas de topo, caracterizadas por sua alta volatilidade e aroma leve, são responsáveis pelas primeiras impressões e possuem duração máxima de 30 minutos, como exemplos estão os óleos de bergamota e canela. As notas do coração, por sua vez, apresentam aromas florais ou picantes que conferem corpo às misturas e permanecem por cerca de uma hora, como os óleos de lavanda e cravo. Já as notas de fundo, menos voláteis e capazes de durar horas, oferecem profundidade ao perfume, sendo representadas por óleos como os de baunilha e sândalo (IRSHAD *et al.*, 2020; VANKAR, 2004).

3.1.4. Aplicação em alimentos

O uso de aditivos alimentares é fundamental para a preservação dos alimentos. Todavia, os aditivos sintéticos são frequentemente vinculados a diversos problemas de saúde, como alergias e até mesmo riscos de desenvolvimento de câncer, o que reforça a necessidade de optar por matérias-primas naturais (IBARZ; AUGUSTO, 2017). Dessa forma, devido as propriedades biológicas dos óleos essenciais, como suas atividades antioxidante e antimicrobiana, a indústria alimentícia tem adotado o seu uso tanto nas formulações de produtos quanto na incorporação em embalagens (KUMAR; NARAIAN, 2019; BATIHA *et al.*, 2020).

A versatilidade dos óleos essenciais também é evidenciada pelas suas aplicações no setor alimentício. Eles atuam como conservantes naturais, graças à sua eficácia no combate à proliferação de microrganismos patogênicos; como aromatizantes e saborizantes, por proporcionarem aromas e sabores mais naturais aos produtos; e como aditivos funcionais, capazes de prolongar a vida útil dos alimentos ao retardar a oxidação de gorduras e óleos (SCAPINELLO *et al.*, 2023).

3.1.5. Aplicação na saúde

Os óleos essenciais são amplamente empregados em tratamentos de saúde, na prática da aromaterapia. Segundo Ebrahimi *et al.* (2022), o uso dos óleos de lavanda e camomila, em um ensaio com 183 participantes, demonstrou uma significativa redução nos níveis de estresse, ansiedade e depressão entre os envolvidos. Da mesma forma, o óleo de limão foi testado para avaliar seus efeitos na pressão arterial, revelando uma diminuição nas alterações sistólicas, na ansiedade e na frequência cardíaca de 100 pacientes com infarto agudo do miocárdio (RAMBOD *et al.*, 2020). Além disso, Mirhoseinni *et al.* (2021) realizaram um estudo sobre o impacto da massagem com óleo essencial de laranja na dor pós-operatória de cesarianas, envolvendo 80 mulheres, e os resultados indicaram uma redução satisfatória na dor e na ansiedade das pacientes.

Embora a aromaterapia tenha demonstrado eficácia em diversas aplicações, principalmente no controle do estresse e da ansiedade, estudos contínuos são fundamentais para segurança dos pacientes.

3.1.6. Aplicação no controle de pragas

Segundo a Organização Pan-Americana da Saúde, nas primeiras semanas de 2025, dos 238.659 casos de dengue da América, 87% ocorreram no Brasil. Este cenário evidencia a necessidade de implementar estratégias de prevenção e controle mais eficazes, incluindo a eliminação de criadouros e a adoção de tecnologias inovadoras, com o objetivo de reduzir a incidência da doença e proteger a saúde coletiva.

De acordo com Pereira *et al.* (2014), devido à resistência do mosquito *Aedes aegypti* L aos inseticidas convencionais, tornou-se necessária a busca por substâncias naturais para combater tanto o mosquito quanto suas larvas. Nesse sentido, o autor avaliou a eficácia da atividade larvicida de uma mistura dos óleos essenciais extraído das folhas da pimenta-da-jamaica (*Pimenta dioica* Lindl) e dos galhos do pau-rosa (*Aniba duckei* Kostermans). O estudo conclui que, em combinação com o eugenol e linalol, essa mistura demonstrou maior eficácia no controle do *Aedes aegypti* L, indicando seu potencial como alternativa aos químicos sintéticos.

Assim, é imprescindível investir em pesquisas relacionadas aos óleos essenciais para avaliar a sua eficácia no combate ao mosquito *Aedes aegypti* L., contribuindo para a redução de inseticidas sintéticos. Essa ação visa não apenas garantir a saúde e a segurança da população, mas também mitigar os danos ecológicos e minimizar a poluição ambiental.

3.1.7. Aplicação na agricultura sustentável

Após a Segunda Guerra Mundial, tornou-se necessário substituir os produtos naturais utilizados como defensivos agrícolas por alternativas sintéticas, devido a destruição das áreas de cultivo (SAITO & LUCCHINI, 1998). Embora essa mudança tenha impulsionado a produtividade e reduzido a necessidade de mão de obra, aumentado os lucros, seus efeitos negativos se tornaram evidentes rapidamente. Os agrotóxicos eliminavam não apenas as pragas, mas também insetos e microrganismos benéficos ao ambiente e à saúde humana (MARICONI, 1981). Além disso, ao longo do tempo, o uso desses produtos levou ao surgimento de resistências, demandando doses cada vez maiores e gerando impactos ambientais ainda mais significativos (SAITO & LUCCHINI, 1998).

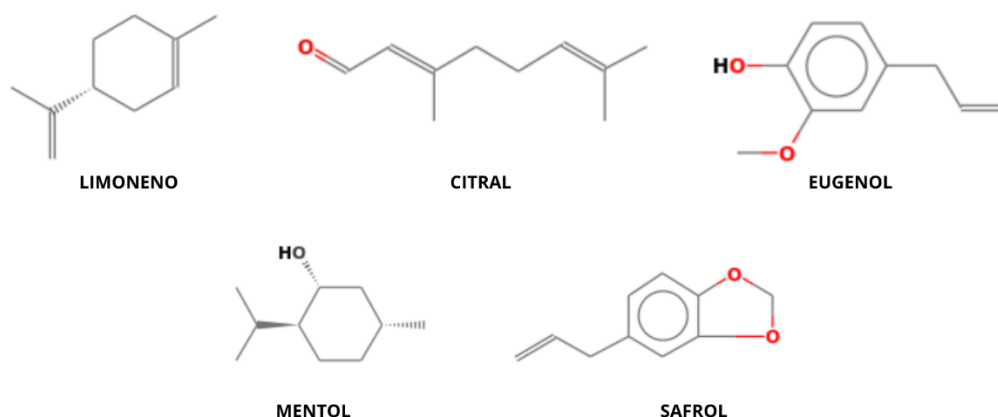
Diante desse cenário, a implementação de substâncias naturais para o controle de pragas e patógenos precisou ser resgatada. Nesse contexto, diversos estudos destacaram a atividade antifúngica dos óleos essenciais, como o extraído do capim-limão, realizado por Mishra & Dubey (1994), que apresentou elevada eficácia no controle de fitopatógenos. O uso de substâncias naturais reduziu a dependência de fungicidas sintéticos e contribuiu para a diminuição dos danos ao meio ambiente (MORAIS, 2009).

3.1.8. Resíduos orgânicos e os óleos essenciais cítricos

Conforme o Ministério do Meio Ambiente (2017), são gerados anualmente 800 milhões de toneladas de resíduos orgânicos advindos das atividades urbanas, agrossilvopastoris e industriais. A destinação incorreta desses resíduos resulta na formação de chorume e na liberação de metano na atmosfera, contribuindo para impactos ambientais significativos. Contudo, esses resíduos podem ser reaproveitados por meio da geração de subprodutos, o que promove não apenas a redução dos problemas ambientais, mas também efeitos econômicos positivos.

As cascas e as folhas de plantas cítricas, como as laranjeiras, tangerinas e os limoeiros, são amplamente utilizadas para a extração de óleos essenciais, tendo, mundialmente, um grande papel socioeconômico. A partir desse processo, pode-se obter substâncias purificadas como o limoneno, citral, eugenol, mentol e safrol, sendo estas empregadas nas indústrias de perfumaria, cosméticos e alimentos, devido as suas propriedades físico-químicas e biológicas (BORGES *et al.*, 2021). A Figura 2 mostra a estrutura química dessas substâncias.

Figura 2: Estrutura química do limoneno, citral, eugenol, mentol e safrol



Fonte: Elaborado pela autora a partir de NIST, 2025.

Segundo Simas *et al.* (2015), os óleos cítricos são compostos majoritariamente pelo monoterpene limoneno, que é caracterizado por ter uma nota cítrica, podendo ser utilizados em diferentes aplicações, como em alimentos, bebidas, fragrâncias e produtos de limpeza. De acordo com Junqueira (2021), o D-limoneno também apresenta atividade herbicida e inseticida, sendo empregado na medicina veterinária contra alguns parasitas externos, como piolhos, pulgas e mosquitos, além de pragas agrícolas e domésticas. A composição química dos óleos essenciais é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo condições fisiológicas, ambientais e genéticas (SALGUEIRO; MARTINS; CORREIA, 2010), além dos parâmetros associados à colheita, produção e ao método de extração adotado (DE GROOT & SCHMIDT, 2016).

Nesse contexto, a próxima seção abordará e comparará os diferentes métodos de extração, destacando suas particularidades e impactos na qualidade dos óleos essenciais.

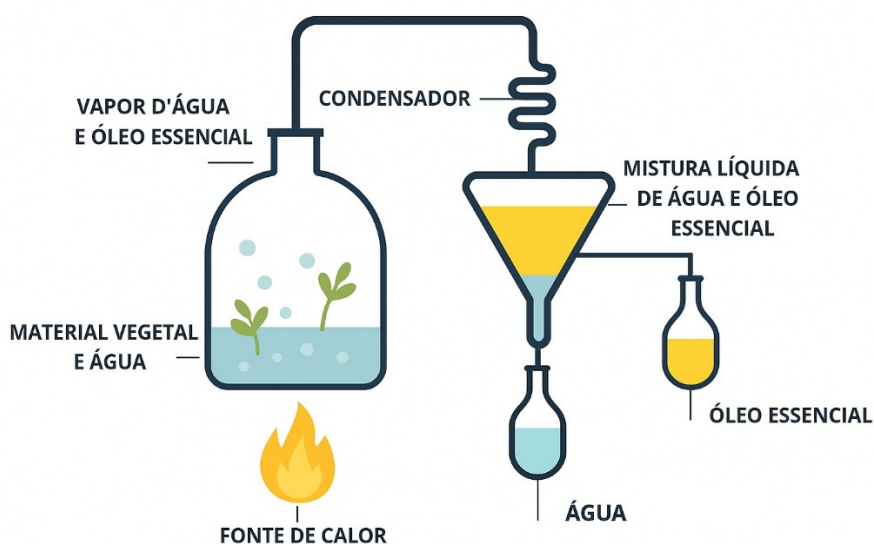
3.2. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

Entre as principais técnicas de extração estão a hidrodestilação, destilação a vapor e extração por solvente. Enquanto os processos de destilação se caracterizam pelo longo tempo e alto consumo de energia, a extração por solvente apresenta como principal desvantagem o uso de grandes volumes de compostos tóxicos e inflamáveis. Diante dessas limitações, a extração por fluido supercrítico e a extração assistida por micro-ondas surgem como alternativas verdes e eficientes (WANG *et al.*, 2024).

3.2.1. Hidrodestilação e destilação por arraste a vapor

A hidrodestilação, representada pela Figura 3, é um dos métodos convencionas da extração de óleos essenciais. Neste método, o material vegetal é imerso em água e aquecido até a ebulição. O vapor gerado arrasta os compostos voláteis, que são então condensados e coletados por diferença de densidade (PATEIRO *et al.*, 2018; TALATI, 2017). Apesar de ser um processo simples, sem o uso de solventes orgânicos, a hidrodestilação apresenta algumas desvantagens, como baixa eficiência, longo tempo de extração e risco de degradação térmica de compostos sensíveis (ASL *et al.*, 2018).

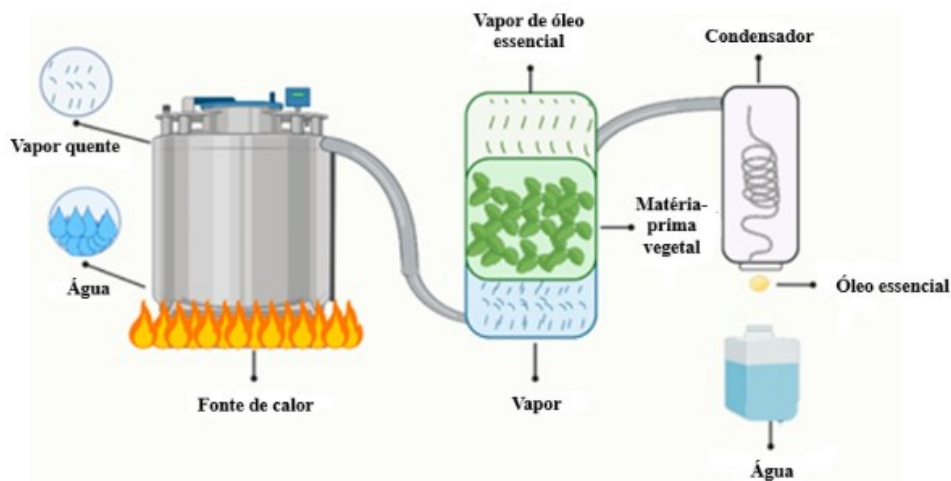
Figura 3: Hidrodestilação



Fonte: Adaptado de *Science of Essentials*, 2025.

No processo de destilação por arraste a vapor, Figura 4, ao contrário da hidrodestilação, não há contato direto entre a água líquida e a matéria-prima. Nesse método, o vapor d'água gerado externamente passa pelo material vegetal, promovendo a vaporização dos compostos voláteis. Então, o vapor resultante é condensado e coletado, permitindo a separação das fases óleo e água por meio da decantação. Trata-se de um processo que demanda longos tempos de operação e temperaturas relativamente altas, podendo levar a degradação térmica de alguns compostos. Além disso, em alguns casos, pode ser necessária a redistilação do óleo essencial, visando uma maior pureza (PATEIRO *et al.*, 2018; CERPA; MATO; COCERO, 2008).

Figura 4: Destilação por arraste a vapor



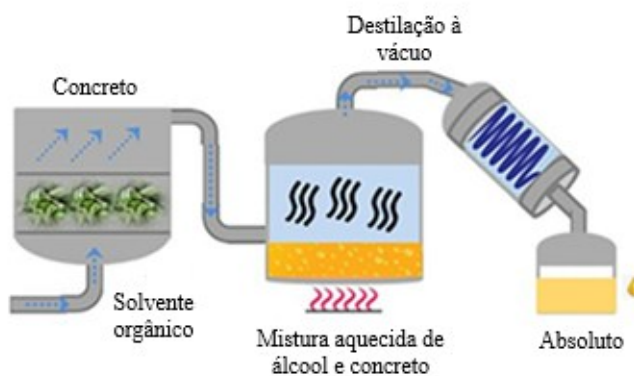
Fonte: Adaptado de Machado *et al.*, 2022.

3.2.2. Extração por solvente orgânico

A extração de óleo essencial por solventes orgânicos, como metanol, etanol e hexano, é uma técnica amplamente empregada para isolar óleos essenciais de plantas sensíveis ao calor ou que possuem baixa concentração de voláteis. Neste método, o solvente dissolve os compostos aromáticos e compostos lipossolúveis, formando um extrato bruto. Após a filtração para separar o resíduo sólido, o solvente é removido pela destilação à vácuo. O produto resultante, chamado de concreto, é submetido a uma segunda extração com outro solvente, geralmente álcool, que solubiliza as moléculas aromáticas, mas não as ceras e outros componentes menos voláteis. Por fim, realiza-se uma nova destilação à vácuo para remover o segundo solvente, obtendo-se uma forma mais pura do óleo essencial, conhecida como absoluto (LI *et al.*, 2009; PATEIRO *et al.*, 2018).

A Figura 5, abaixo, ilustra a extração por solvente.

Figura 5: Extração por solvente



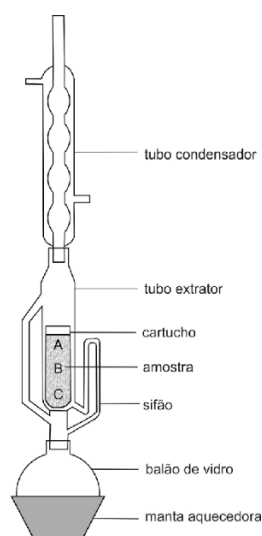
Fonte: Adaptado de Pateiro *et al.*, 2018.

Dentre os métodos que empregam este princípio, destacam-se a maceração e a extração em aparelho de Soxhlet.

A maceração é um método de extração que utiliza solventes para remover compostos aromáticos e bioativos presentes em materiais vegetais. O processo consiste em adicionar o material previamente cortado, triturado ou moído a um solvente em recipiente fechado, deixando a mistura em repouso por um período prolongado, geralmente em temperatura ambiente. O princípio fundamental da técnica é a difusão, onde os compostos solúveis migram da estrutura celular da planta para o solvente até que um estado de equilíbrio de concentração seja alcançado. Ao término da extração, o solvente é separado da fração sólida por meio da filtração, resultando em um extrato enriquecido com os constituintes do óleo essencial (NEW DIRECTIONS AROMATICS, 2017).

A extração por Soxhlet, Figura 6, é uma técnica de extração de sólido-líquido amplamente empregada para a obtenção de óleos essenciais presentes em matrizes vegetais. O processo inicia-se com a colocação da amostra em um cartucho poroso, denominado dedal, que é inserido no corpo do extrator. Em seguida, o solvente é adicionado a um balão de fundo redondo e aquecido até a ebulição. Os vapores gerados sobem por um tubo lateral e passam por um condensador, retornando ao estado líquido, o qual goteja sobre o material sólido, dissolvendo os compostos de interesse. Quando o nível do solvente atinge determinada altura no sifão lateral, a solução enriquecida retorna ao balão, reiniciando automaticamente o ciclo, que se repete até que o material esteja completamente exaurido. Concluída a extração, o solvente pode ser evaporado, obtendo-se assim o extrato puro (HIELSCHER ULTRASONICS, 2025).

Figura 6: Aparelho Soxhlet

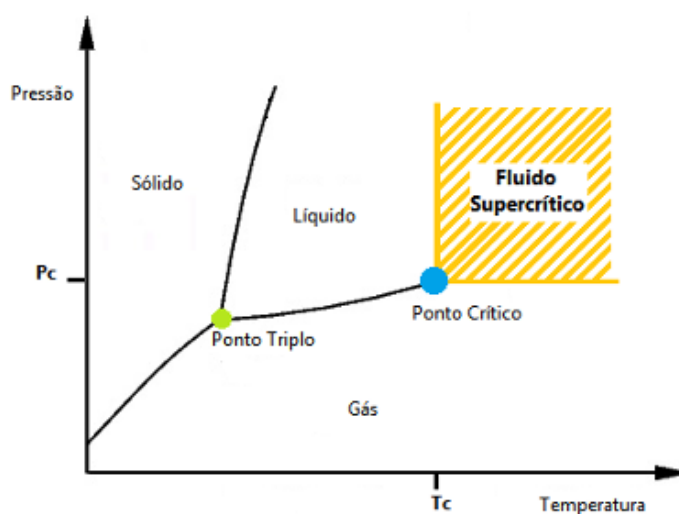


Fonte: Shinzato et.al., 2010.

3.2.3. Extração por fluido supercrítico

A extração por fluido supercrítico emprega fluidos com propriedades intermediárias entre as dos líquidos e dos gases, permitindo a remoção eficiente de analitos de matrizes sólidas, semissólidas e líquidas. Esses fluidos operam em condições acima da temperatura crítica (T_C) – a temperatura máxima que uma substância pode ser liquefeita com o aumento da pressão – e da pressão crítica (P_C), que é a pressão mínima necessária para que um gás se condense à temperatura crítica (TAYLOR, 1996), como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Diagrama de fases de uma substância pura



Fonte: Silva, 2014.

Os fluidos supercríticos possuem alto poder de solvatação, boa difusividade, baixa viscosidade e mínima tensão superficial, como apresentado na Tabela 2. Devido a sua densidade moderada, esses fluidos são capazes de dissolver moléculas de alta massa molar e baixa volatilidade. Outro aspecto relevante, é que essa densidade pode ser ajustada por meio da variação dos parâmetros de temperatura e pressão, conferindo alta seletividade do processo. Além disso, a elevada difusividade assegura rápida transferência de massa. Adicionalmente, a baixa viscosidade e mínima tensão superficial auxiliam na incorporação dos fluidos nas matrizes. Dessa forma, a SFE, quando comparada aos métodos tradicionais de extração, se destacam pelo menor tempo de operação, maior seletividade na extração dos óleos e facilidade de remoção do solvente (TAYLOR, 1996; PINTO, 2018).

Tabela 2: Comparação das propriedades físicas dos gases, fluidos supercríticos e líquidos

Propriedade	Gases	Líquidos	Fluidos Supercríticos
Densidade (g/mL)	Muito baixa (0,0006 – 0,002)	Elevada (0,6 – 1,6)	Moderada (0,2 – 0,5)

Propriedade	Gases	Líquidos	Fluidos Supercríticos
Viscosidade (g/cm*s)	Baixa (0,0001 – 0,003)	Maior (0,002 – 0,03)	Baixa (0,0001 – 0,0003)
Coefficiente de Difusão (cm ² /s)	Alto (0,1 – 0,4)	Baixo (0,000002 – 0,00002)	Intermediário (0,0007)
Tensão Superficial	Praticamente inexistente	Elevada	Ausente (ou mínima)

Fonte: Adaptado de Pinto, 2018.

Diversas substâncias podem ser empregadas como fluido supercrítico, como o metano, etano e o etileno. Entretanto, o dióxido de carbono (CO₂) se destaca como o solvente mais utilizado por não ser tóxico, nem inflamável, ser reciclável e de baixo custo (STEFFANI, 2003). A Tabela 3 compara os principais solventes supercríticos.

Tabela 3: Comparação entre os principais fluidos supercríticos

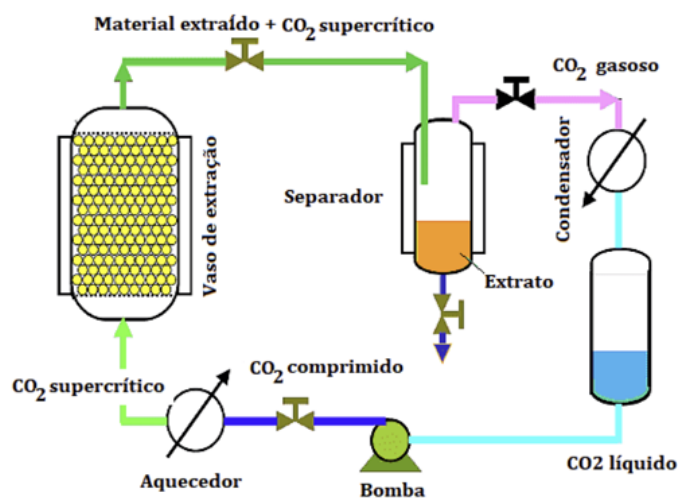
Solvente	T _C (°C)	P _C (bar)	Toxicidade	Inflamabilidade	Reciclabilidade
Metano (CH ₄)	-82,8	45,9	Baixa	Alta	Operacionalmente complexa
Etano (C ₂ H ₆)	32,2	48,8	Baixa	Alta	Operacionalmente complexa
Etileno (C ₂ H ₄)	9,2	50,4	Baixa	Alta	Operacionalmente complexa
Água (H ₂ O)	374,0	220,5	Não tóxico	Não inflamável	Possível, porém demanda sistemas de controle rígidos
Dióxido de Carbono (CO ₂)	31,1	73,8	Não tóxico	Não inflamável	Fácil reciclagem

Fonte: Elaborado pela autora a partir de CETESB, [s.d].

Embora o CO₂ seja o fluido supercrítico mais empregado, ele apresenta uma limitação importante. Por ser uma substância apolar, esse solvente não consegue dissolver eficientemente moléculas altamente polares e de maior peso molecular, como os açúcares e os taninos. Para superar essa restrição é comum a adição de um co-solvente, sendo os mais utilizados o metanol e o etanol (HAMBURGER; BAUMANN; ADLER, 2004).

A Figura 8 mostra o sistema de extração por fluido supercrítico.

Figura 8: Sistema de SFE



Fonte: SEBRAE, 2023.

Inicialmente, o material a ser processado é carregado em um extrator. Em seguida, o gás é pressurizado por uma bomba e aquecido por um trocador de calor, passando a atingir o estado supercrítico. O contato entre o fluido e a matriz pode ser de forma dinâmica – com fluxo contínuo através do material – ou estática, quando o fluido permanece um período dentro do vaso, permitindo uma interação mais prolongada. Posteriormente, a mistura do material extraído e do fluido é direcionada para uma válvula de expansão, onde ocorre a diminuição de pressão, o que leva à precipitação dos compostos extraídos e à gaseificação do fluido no separador. Assim, o extrato é coletado e o gás é recuperado e reutilizado no processo (PINTO, 2018).

3.2.4. Extração assistida por micro-ondas

A extração assistida por micro-ondas utiliza a radiação eletromagnética na faixa de frequência de 0,3 a 300 GHz, com comprimentos de onda que variam entre 1mm e 1m, para extrair compostos-alvo de matrizes vegetais (ZAMORANO *et al.*, 2019). Essa técnica fundamenta-se na elevada capacidade de absorção de energia de certos componentes do material, resultando em um aquecimento rápido, devido à conversão da radiação em calor, por meio da rotação dos dipolos e da condução iônica. O aumento abrupto da temperatura intensifica o movimento molecular, gerando elevação da pressão interna e a ruptura das paredes celulares. Esse processo favorece a liberação dos compostos voláteis, promovendo uma extração eficaz dos óleos essenciais (LI, 2015; FENG, 2012).

Além disso, a MAE depende da constante dielétrica tanto do solvente quanto do material empregado. Essa constante expressa a capacidade de um material em armazenar energia elétrica quando submetido a um campo eletromagnético. Assim, quanto maior a constante dielétrica

maior a interação do material com a radiação eletromagnética, resultando em uma absorção mais eficiente de energia, permitindo uma maior conversão em calor. Compostos polares, por apresentarem momentos dipolares permanentes, tendem a possuir constantes dielétricas elevadas, o que torna a utilização de micro-ondas eficaz na extração de substâncias a partir de matrizes sólidas com média ou alta polaridade. Este método de extração é considerado uma estratégia sustentável, pois permite realizar a extração em curto tempo e com baixo consumo energético, utilizando solventes não tóxicos e alcançando elevada eficiência (LETELLIER; BUDZINSKI; 1999; TADINI *et al.*, 2016).

A Tabela 4 apresenta os principais solventes utilizados na extração assistida por micro-ondas, suas respectivas constantes dielétricas, vantagens e desvantagens.

Tabela 4: Principais solventes utilizados na MAE

Solvente	Constante dielétrica – à 20°C (ϵ_r)	Vantagens	Desvantagens
Água	~78	Alta absorção de micro-ondas; abundante, barata e não tóxica; ideal para hidrodestilação assistida	Pouca afinidade com compostos apolares; baixa seletividade para óleos essenciais
Etanol	~24	Boa capacidade de aquecimento; extração eficiente de compostos voláteis e polares; solvente "verde"	Pode extrair compostos indesejáveis; inflamável
Mistura água-etanol	40-60 (variável)	Combina eficiência térmica com seletividade química ajustável; melhor desempenho para óleos	Exige padronização da proporção; pode precisar de etapas adicionais de purificação
Metanol	~33	Excelente eficiência dielétrica; boa extração de compostos com oxigênio (álcoois, ésteres)	Tóxico; menos aceito para aplicações em alimentos e cosméticos

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Mandal; Mohan; Hemalatha; 2007 e

Nitthiyah *et al.*, 2017.

O processo de extração assistida por micro-ondas inicia-se com a preparação da matriz vegetal, que envolve a coleta, secagem e trituração da matéria-prima. Em seguida, adiciona-se o solvente selecionado – como água, etanol ou suas misturas – ou realiza-se o processo sem solvente. A amostra é então submetida à irradiação por micro-ondas, Figura 9, em condições controladas de potência, tempo, temperatura e, em alguns casos, pressão. A energia absorvida pelas moléculas promove aquecimento interno rápido, resultando na ruptura das paredes celulares e na liberação do composto desejável. Fisicamente, o processo envolve a difusão do

solvente para o interior da matriz sólida, onde o soluto é dissolvido até atingir uma concentração limitada pelas características do material. A partir disso, a solução migra em direção à superfície, através da difusão efetiva e, por fim, é transferida para a solução em massa por convecção natural ou forçada (ANGIOLILLO; DEL NOBILE; CONTE, 2015; SONG *et al.*, 2022).

Figura 9: Equipamento da extração assistida por micro-ondas



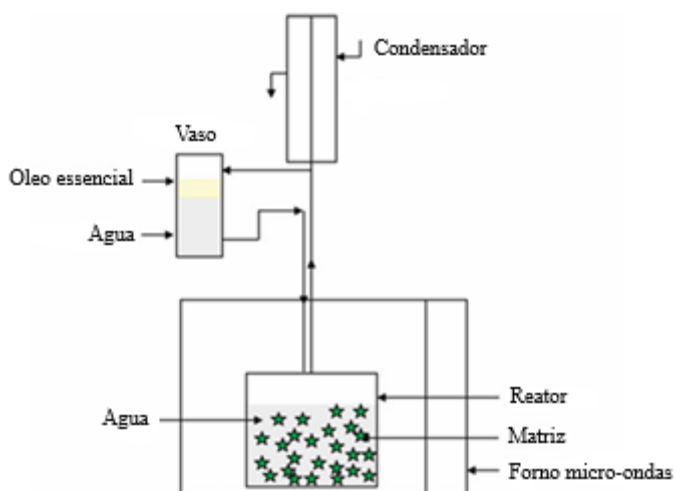
Fonte: Antiteck, 2024.

A versatilidade da MAE permitiu o desenvolvimento de variações da técnica, visando a otimização dos processos convencionais de extração. Entre elas, destacam-se a hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD) e a extração assistida por micro-ondas sem solvente (SFME).

3.2.4.1. Hidrodestilação assistida por micro-ondas

A hidrodestilação assistida por micro-ondas combina os princípios da hidrodestilação convencional com o aquecimento eficiente da radiação por micro-ondas. Nesse processo, a matriz vegetal é imersa em água, sendo então submetida à irradiação dentro do reator. Assim, devido à alta constante dielétrica da água, o aquecimento ocorre rapidamente, gerando vapor dentro e ao redor da matriz, o que provoca a ruptura das células e liberação dos óleos. Esse vapor, rico em compostos voláteis, é conduzido até um sistema de condensação, onde a mistura óleo-água pode ser separada por decantação e, o excesso de água retorna para o reator, o que permite a manutenção da taxa de umidade da matriz. A MAHD, Figura 10, apresenta vantagens em relação à hidrodestilação convencional, como redução significativa no tempo de extração, menor consumo de energia, melhor preservação de compostos termossensíveis e maior rendimento (NITTHIYAH *et al.*, 2017).

Figura 10: Hidrodestilação assistida por micro-ondas (MAHD)

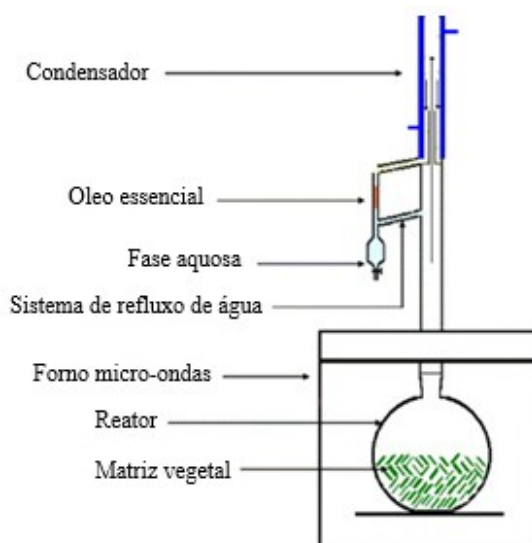


Fonte: Adaptado de Chemat *et al.*, 2013.

3.2.4.2. Extração assistida por micro-ondas sem solvente

Outra variação da técnica é a extração sem solvente, conhecida como *Solvent-Free Microwave Extraction* (SFME). Nessa técnica, ilustrada pela Figura 11, a extração ocorre sem a adição de solventes externos, aproveitando a umidade natural presente na matriz vegetal fresca como fonte de aquecimento interno. A radiação de micro-ondas promove o aquecimento das moléculas de água contidas no tecido vegetal, gerando vapor e pressão intracelular, o que leva à ruptura das estruturas celulares e a liberação dos óleos essenciais. Assim, semelhante a MAHD, os vapores são condensados e separados por decantação e, visando manter a umidade da matriz, o excesso de água retorna para o reator (CHEMAT *et al.*, 2013).

Figura 11: Extração por micro-ondas sem solvente



Fonte: Adaptado de Lucchesi; Chemat; Smadja, 2004.

3.2.5. Influência dos parâmetros no processo

A eficiência na extração de óleos essenciais está diretamente relacionada à escolha adequada dos parâmetros operacionais, como temperatura, pressão, tempo e potência, bem como das condições de preparo da matéria-prima e do solvente utilizado. Esses fatores influenciam diretamente o rendimento, a composição química e, conseqüentemente, a qualidade final do óleo.

Aruna *et al.* (2022) realizou um estudo acerca da extração de óleos essenciais de frutas cítricas por hidrodestilação, e ao se utilizar diferentes métodos de secagem, observou-se que o rendimento do óleo da secagem à sombra era superior ao da secagem ao sol e em estufa. Segundo os autores, isso pode estar relacionado à menor evaporação de compostos voláteis e à redução da degradação oxidativa, devido a temperaturas mais baixas e controladas da secagem à sombra. Além disso, avaliaram o efeito da temperatura no rendimento da extração, variando gradualmente a temperatura em 5°C de 75 a 100°C. Os resultados indicaram que a temperatura ótima foi de 95°C e que após isso houve uma diminuição do rendimento devido à rápida evaporação dos compostos voláteis e o aumento da oxidação de constituintes sensíveis. Em relação ao tempo de extração, testaram-se intervalos de 1 a 4 horas, com incrementos de 1 hora e, observou-se que a recuperação do óleo foi maior em 3h e que, posteriormente, não houve variações significativas nos valores obtidos. Por fim, testou-se diferentes relações de sólido-solvente e observou-se que a relação 1:10 (g de amostra/ml de água) foi a que apresentou maior rendimento.

Segundo Jurevičiūtė *et al.* (2019), o tempo da hidrodestilação é fundamental não apenas para a otimização do processo, mas também para o perfil químico do óleo obtido. O tempo prolongado leva a uma diminuição de monoterpenos e a um aumento de sesquiterpenos, que são moléculas mais pesadas e menos voláteis, alterando significativamente a fragrância do produto.

Na destilação por arraste a vapor, a temperatura é determinada pela pressão de operação. Desta forma, o controle da pressão e, conseqüentemente, da temperatura, é essencial para evitar a decomposição de compostos termolábeis presentes no óleo essencial (TALATI, 2017).

Além disso, Pinto (2022) realizou um estudo da destilação por arraste a vapor do limoneno da laranja doce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) e observou-se que ao aumentar a massa do leito de 150g para 200g, houve um aumento de 1% no rendimento. De acordo com a autora, esse aumento pode estar relacionado à uma diminuição das perdas de produto durante a extração, especialmente aquelas associadas à aderência do produto às paredes do equipamento

e às etapas de separação entre o óleo essencial e o hidrolato. Ademais, observou-se que a potência também tem um efeito positivo no rendimento da extração. O aumento de 160 W para 280 W resultou em um acréscimo de 1,08%. Esse comportamento pode ser atribuído a maior vazão de vapor d'água proporcionada pela elevação da potência, o que intensifica o contato com a matéria-prima e favorece a extração.

Os principais parâmetros operacionais da extração por solvente orgânico são o tipo e a quantidade de solvente, a temperatura, o tempo de extração e o tamanho das partículas da matéria-prima. A escolha do solvente utilizado deve ser feita considerando suas características de solubilidade, polaridade, seletividade, segurança e custo. Segundo o princípio da similaridade e miscibilidade, solventes com polaridade próxima à dos compostos-alvo tendem a aumentar a eficiência da extração (RAJE; LOKHANDE; MORE, 2019).

Além disso, o aumento da relação solvente-sólido, geralmente, leva a um aumento do rendimento, mas pode se tornar economicamente desvantajosa devido a um maior consumo de solvente e um maior tempo de operação. O controle de temperatura também é essencial, uma vez que, embora altas temperaturas possam aumentar a cinética da extração e favorecer a difusão, valores elevados podem causar perdas significativas de solvente, degradação de compostos termolábeis e a presença de impurezas indesejadas. O tempo de extração deve ser suficiente para atingir o equilíbrio de concentração de soluto entre a matriz vegetal e o solvente, sendo que, em escala industrial, técnicas como múltiplos ciclos de extração e extração contracorrente são utilizadas para otimizar o processo. Outro parâmetro relevante é o tamanho das partículas, visto que, quanto menores, mais fácil será a penetração do solvente e a difusão dos solutos, embora possam reter excesso de óleo e dificultar a filtração (ZHANG; LIN; YE, 2018).

Hasibuan & Gultom (2021) realizaram um estudo sobre o efeito do método de extração, do tipo de solvente e do tempo de processamento no rendimento do óleo essencial obtido da casca de lima (*Citrus aurantifolia*). Para a comparação, foram empregados métodos de maceração e Soxhlet, utilizando-se hexano, etanol e água destilada como solventes, além de tempos de extração de 6, 9 e 12 horas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Rendimento do óleo essencial a partir da casca de lima usando os métodos de Maceração e Soxhlet

		Rendimento (%)		
Método	Solvente	6h	9h	12h
Maceração	Hexano	4,93	5,13	5,24
	Etanol	3,69	4,20	4,07
	Água destilada	1,51	1,59	1,67

Método	Solvente	Rendimento (%)		
		6h	9h	12h
Soxhlet	Hexano	5,79	5,97	6,15
	Etanol	4,41	4,64	4,89
	Água destilada	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Hasibuan & Gultom, 2021.

No método de maceração, o aumento do tempo de extração resultou em um maior rendimento do óleo, exceto para a extração realizada com etanol, que teve um rendimento inferior em 12 horas. Isso pode ocorrer porque a extração, provavelmente, já atingiu o ponto de equilíbrio em 9 horas. Além disso, a redução observada pode estar associada à extração de impurezas adicionais, à degradação de compostos voláteis ou à readesão parcial do óleo à matriz sólida. Já no método de Soxhlet, o aumento do tempo de extração resultou em um aumento do rendimento tanto para a extração com hexano quanto com etanol. Observa-se também, que a extração utilizando água como solvente não foi realizada, visto que, devido ao alto ponto de ebulição e à densidade da água, o ciclo de refluxo do método não se estabelece corretamente, comprometendo a eficiência do processo (HASIBUAN & GULTOM, 2021).

Na extração com fluido supercrítico, a escolha adequada do tamanho da partícula, da temperatura, da pressão e do tempo de extração são fundamentais para a eficiência do processo.

Xiong e Chen (2020) fizeram um estudo da influência dos parâmetros operacionais na extração de óleo essencial da casca de tangerina utilizando dióxido de carbono supercrítico. Os autores estudaram partículas de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; e 1,0 mm, temperaturas de 35 a 55°C, pressões de 10 a 30 MPa, com incrementos de 5°C e 5 MPa, respectivamente, e tempos de 0 a 180 min.

Segundo os autores o tamanho da partícula afeta a área de contato e a difusão do solvente, sendo que partículas menores favorecem a extração até certo limite. Os resultados do experimento indicaram que o tamanho ótimo da casca foi de 0,4 mm e ao diminuir para 0,2 mm, houve uma diminuição do rendimento, visto que o extrato pode se reabsorver na superfície da casca, diminuindo a taxa de difusão para o fluido e, consequentemente, a eficiência. Além disso, observaram que a taxa de difusão do extrato aumenta com o incremento de temperatura, o que resulta em uma maior rendimento do óleo. Entretanto, o aumento de temperatura resulta em uma redução da densidade do fluido supercrítico e em uma diminuição da solubilidade do extrato no fluido, reduzindo o rendimento da extração. A pressão, por sua vez, eleva a densidade e o poder de solubilização do CO₂ até 15 MPa, mas pressões excessivas podem reduzir o rendimento e comprometer a qualidade do óleo. Por fim, o tempo de extração é diretamente proporcional ao rendimento dela. Contudo, ao atingir o tempo ótimo de extração, as variações do rendimento são pouco significativas (XIONG; CHEN, 2020).

Na extração assistida por micro-ondas a potência, o tempo, o solvente, a razão sólido-solvente e a matriz vegetal são parâmetros essenciais para o rendimento do processo. O aumento da potência favorece o aumento da temperatura e, conseqüentemente, o rendimento da extração. Todavia, valores excessivos podem degradar compostos termossensíveis, comprometendo a qualidade do óleo obtido. De modo semelhante, o tempo de extração deve ser otimizado, pois períodos curtos não garantem a extração completa e períodos longos podem comprometer a qualidade do óleo. A escolha do solvente depende da sua capacidade em armazenar energia elétrica quando submetido a um campo eletromagnético, além da interação com a matriz e o analito. Em relação a razão sólido-solvente é necessário utilizar um volume que permita que as partículas fiquem completamente imersas. Contudo, grandes volumes podem levar a baixos rendimentos, devido ao aquecimento insuficiente do solvente, necessitando de uma maior potência do micro-ondas e de um maior período de extração. A eficiência do processo também é afetada pelo tamanho e teor de umidade das partículas, visto que quanto menor elas forem e quanto maior o teor de umidade, melhor será a interação com as micro-ondas, aumentando a superfície de contato, o aquecimento interno e a liberação do óleo (RIBEIRO, 2018; VEGGI; MARTINEZ; MEIRELES, 2013).

Qadariyah *et al.* (2017) realizaram um estudo sobre a extração assistida por micro-ondas sem solvente do óleo essencial da casca de laranja, com o intuito de avaliar a influência das condições operacionais no rendimento e na qualidade final do produto. Para verificar o efeito da potência aplicada, foram utilizadas as intensidades de 100, 264, 400 e 600 Watts como variáveis experimentais. Os resultados demonstraram que o aumento da potência está associado a maiores rendimentos de extração. No entanto, quando esta é excessivamente elevada, pode ocorrer degradação térmica do óleo, reduzindo a eficiência do processo. Assim, os autores determinaram como potências ótimas 400W para a casca fresca e de 264W para a casca seca, sendo esta última mais suscetível à degradação em função do menor teor de umidade.

A influência da razão massa/volume de destilado e do tamanho da partícula também foi avaliada. Testaram-se as proporções de 0,1; 0,2; 0,3; e 0,4 g/ml, associadas as partículas com tamanhos de 0,5; 2; 3,5 e 5 cm. Para a casca de laranja fresca, observou-se que o rendimento diminuiu à medida que a proporção aumentava. Em relação ao tamanho das partículas, verificou-se que as cascas de 0,5 cm apresentaram menor rendimento, devido à maior facilidade de degradação, à baixa disponibilidade de água e à elevada potência do micro-ondas. Por outro lado, partículas de 3,5 cm, ricas em água *in situ*, quando submetidas a 400W, mantiveram a capacidade de liberar o óleo essencial, resultando no maior rendimento. Entretanto, esse valor reduziu para as partículas de 5 cm, visto que quanto maior o tamanho do material, menor a área

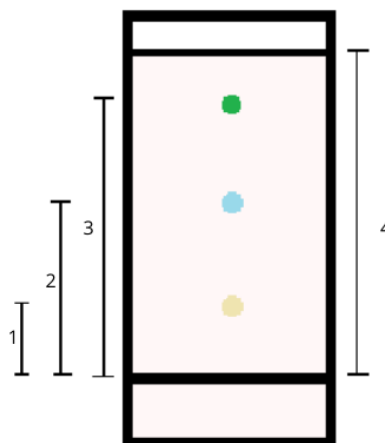
de contato com as micro-ondas, elevando a resistência à transferência de massa e dificultando a extração. Para as cascas secas, na potência de 264W, a melhor condição foi obtida com a razão de 0,3 g/ml, enquanto a tendência em relação ao tamanho do material seguiu a mesma observada para as cascas frescas, sendo que as partículas de 2 cm apresentaram melhor desempenho, com posterior redução do rendimento nas de 3,5 cm (QADARIYAH *et al.*, 2017).

3.3 ANÁLISE DO PRODUTO DESEJADO

O rendimento e a qualidade do óleo essencial obtido não estão relacionados apenas com os métodos de extração, mas também com os processos de separação e purificação dos componentes. O extrato bruto, frequentemente uma mistura complexa de compostos voláteis e não voláteis, exige técnicas sofisticadas para isolar os componentes de interesse e eliminar as impurezas. Entre as principais técnicas está a cromatografia, que se baseia nas diferentes características físico-químicas das substâncias para separá-las em uma matriz, permitindo a qualificação e quantificação detalhada dos componentes que definem o perfil aromático e as propriedades biológicas do óleo (CAPUTO *et al.*, 2022).

A Cromatografia em Camada Delgada (CCD) possui um procedimento simples e rápido. Esta técnica tem como fase estacionária uma placa de vidro ou plástico e uma fase móvel composta por uma mistura de solventes. Ao aplicar a amostra com um tubo capilar na placa e adicioná-la na fase móvel, é possível observar a separação dos componentes presentes naquele óleo (MARCOLINA, 2021). Por ser um método simples, a CCD permite analisar de forma rápida quantos componentes existem em uma mistura. Além disso, a técnica é útil na identificação de compostos, uma vez que o valor do fator de retenção (R_f) obtido pode ser comparado com o de substâncias de referência previamente conhecidas (HARBORNE, 1998). O R_f consiste na razão entre a distância percorrida pelo composto e a distância percorrida pelo solvente na placa cromatográfica, variando entre 0 e 1. Valores próximos de 0 indicam que o composto tem maior afinidade pela fase estacionária, ficando retidos, e valores próximos de 1 indicam maior afinidade pela fase móvel, eluindo sobre a placa (ENGEL *et al.*, 2012). A Figura 12 apresenta a CCD de forma ilustrativa, sendo 1, 2 e 3 as distâncias percorridas pelos compostos de uma amostra e 4 a distância percorrida pelo solvente.

Figura 12: Cromatografia em Camada Delgada



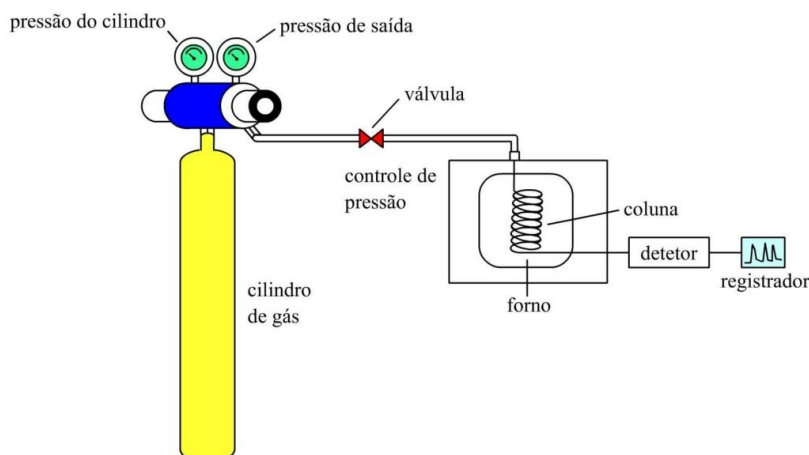
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A figura ilustrativa evidencia que o composto 1 apresenta maior afinidade com a fase estacionária, enquanto o composto 3 interage preferencialmente com a fase móvel. O composto 2, por sua vez, demonstra afinidade intermediária entre ambas as fases.

A técnica de bioautografia combina a cromatografia com ensaios biológicos. Nesse método, após a separação por CCD, os componentes são expostos a microrganismos ou reagentes específicos que indicam a presença de atividade biológica. Essa exposição pode ser realizada adicionando o microrganismo diretamente na placa, por contato direto com uma placa de ágar inoculada ou por sobreposição de ágar, em que o meio é aplicado sobre a placa. Dessa forma, é possível localizar e caracterizar rapidamente os componentes responsáveis por atividades antimicrobianas, antioxidantes ou outras propriedades biológicas (HAMBURGER & CORDELL, 1987).

Há também a Cromatografia Gasosa (CG), que devido a sua alta capacidade de separação de compostos voláteis destaca-se entre os métodos. Geralmente, o sistema é acoplado ao espectrômetro de massas (CG-EM), Figura 13, que possibilita a determinação da massa molecular e a identificação estrutural das substâncias. O equipamento é composto por um cilindro de gás de arraste, manômetros para controle das pressões interna e de saída dos gases, um injetor para a vaporização da amostra, uma coluna cromatográfica responsável pela separação dos componentes e, por fim, um detector acoplado a um sistema computacional que registra e processa os dados obtidos (HSE QUÍMICA, 2024). Após a vaporização, a amostra é transportada pelo gás inerte – denominado fase móvel – através de uma coluna cromatográfica, onde ocorre a separação dos compostos de acordo com sua interação com a fase estacionária, que pode ser líquida ou sólida (MARCOLINA, 2021).

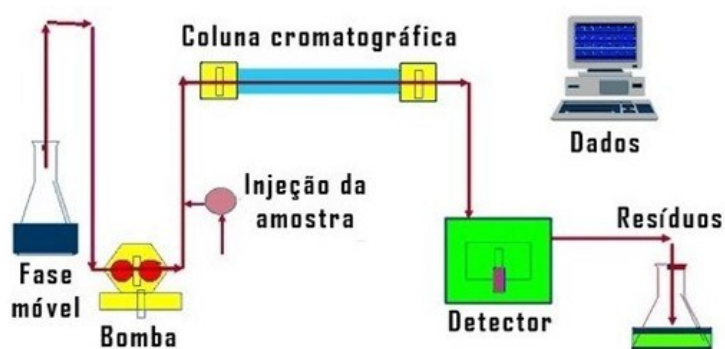
Figura 13: CG-EM



Fonte: HSE QUÍMICA, 2024.

Outra técnica utilizada é Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE), que é empregada na separação de substâncias não voláteis ou instáveis quando expostos ao calor. Essa técnica também pode ser acoplada ao espectrômetro de massas (CLAE-EM), mas diferentemente da CG, utiliza uma fase móvel líquida e uma fase estacionária sólida (MARCOLINA, 2021). O equipamento, Figura 14, é constituído por um reservatório para os solventes que compõem a fase móvel, uma bomba que impulsiona os solventes pela coluna, um injetor responsável pela introdução controlada da amostra no fluxo, uma coluna cromatográfica que permite a separação dos analitos, um detector para registrar os compostos eluídos e, por fim, um sistema de aquisição de dados que processa e apresenta os resultados (HSE QUÍMICA, 2024).

Figura 14: CLAE-EM

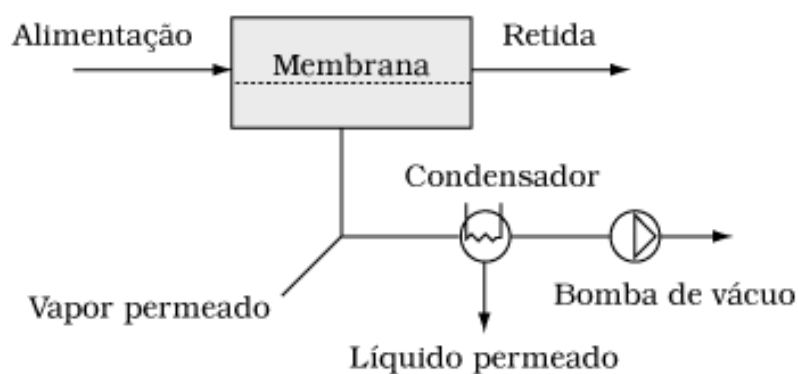


Fonte: MATRIX LCMS, 2024.

Outro método relevante para purificação dos óleos essenciais é a pervaporação (PV), que se baseia na utilização de membranas altamente seletivas, capazes de purificar substâncias

sensíveis à degradação térmica. Para promover a separação e a concentração dos componentes desejados, aplica-se um vácuo do lado oposto à alimentação da membrana, favorecendo a evaporação das moléculas que a atravessam e estabelecendo um gradiente de concentração. Após esta etapa, o permeado, obtido na fase vapor, é condensado (DAWIEC-LIŚNIEWSKA *et al.*, 2018; SAHIN, 2010; VAN DER BRUGGEN & LUIS, 2014). A Figura 15 ilustra esse processo.

Figura 15: Pervaporação por membrana



Fonte: Assis *et al.*, 2007.

Dessa forma, observa-se que a caracterização e a purificação dos óleos essenciais dependem da aplicação de técnicas analíticas e de separação complementares. A integração dessas ferramentas aos métodos de extração garante não apenas a análise detalhada da composição química, mas também a avaliação da qualidade e do potencial biológico dos óleos.

4. ESTUDOS DE CASO

Após a apresentação dos principais métodos de extração e das técnicas utilizadas para a análise e purificação dos óleos essenciais, torna-se relevante avaliar, na prática, a eficiência desses processos. Nesse sentido, os estudos de caso abaixo permitem comparar os diferentes métodos de extração de óleos essenciais de frutas cítricas, considerando aspectos como rendimento e qualidade do produto obtido.

4.1. FLUÍDO SUPERCRÍTICO VERSUS HIDRODESTILAÇÃO

Mai *et al.* (2022) conduziram um estudo sobre a extração do óleo essencial da casca de toranja (*Citrus grandis*) utilizando fluido supercrítico. Para efeito comparativo e com o objetivo de comprovar a maior eficiência do método, os autores realizaram a extração por hidrodestilação.

Para o estudo da extração com fluido supercrítico, 500 g de cascas foram inseridas em um recipiente de alta pressão com capacidade de 2000 mL, acoplado a um separador capaz de operar até 200 bar. O processo foi conduzido a 40°C e 100 bar, com fluxo de CO₂ supercrítico de 0,5 g/min. Ao final da extração, a redução da pressão promoveu a separação entre o gás e o óleo essencial. Para a extração por hidrodestilação, 100 g de cascas foram adicionados a um balão contendo 500 mL de água destilada e submetidos ao aquecimento até a ebulição. O vapor liberado foi então condensado, permitindo a separação do óleo essencial, que posteriormente foi seco com sulfato de sódio anidro (Na₂SO₄).

Os componentes químicos do óleo foram determinados a partir da cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas. Os resultados estão na Tabela 6, abaixo.

Tabela 6: Composição química da *C. grandis* por hidrodestilação e extração supercrítica

Compostos	%CG	
	HD	SFE
α -Pineno	0,90	-
β -Pineno	1,51	-
α -Felandreno	1,13	-
o-Cimeno	0,46	-
D-limoneno	87,60	95,66
(Z)-Linalol óxido	2,30	-
(E)-Linalol óxido	0,94	-
Linalol	1,39	-
4-Terpineol	0,38	-
α -Terpineol	1,92	-
β -Cariofileno	0,31	-
γ -Cariofileno	0,10	-

Fonte: Adaptado de Mai *et al.*, 2022.

Observa-se que na hidrodestilação foram identificadas 12 substâncias, sendo o D-limoneno o composto majoritário (87,60%). Por outro lado, na extração supercrítica identificou-se apenas o D-limoneno (95,66%). A presença desse composto no óleo essencial de *C. grandis* garante diversas atividades biológicas, como antibacterianas, anti-inflamatórias e citotóxicas, podendo ser utilizadas na indústria de cosméticos e farmacêutica (MAHANTA & KHANIKOR, 2021). Assim, a extração por fluido supercrítico é eficaz para a obtenção do D-limoneno puro, garantindo as propriedades biológicas do óleo.

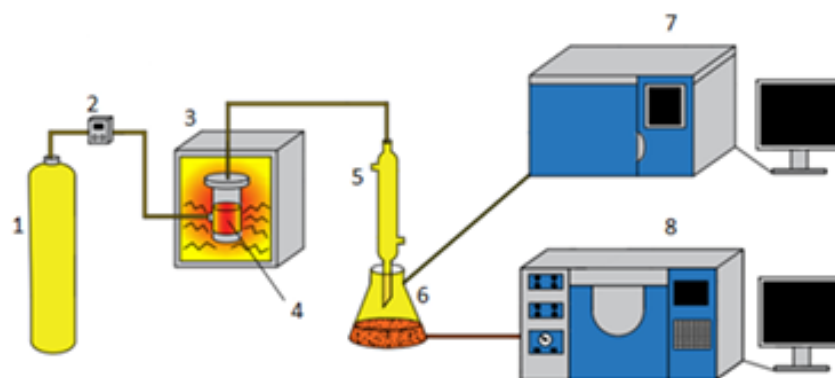
4.2. MICRO-ONDAS VERSUS DESTILAÇÃO A VAPOR

Com o objetivo de demonstrar a importância da utilização da técnica de extração assistida por micro-ondas, será apresentado abaixo um estudo de caso realizado por Song *et al.* (2022), que visa obter as melhores condições de operação – tempo e potência – e o rendimento da extração do limoneno da casca de frutas cítricas.

As cascas foram submetidas a um processo de secagem por 5 horas, em temperatura constante de 50°C, até atingir um teor de umidade de 15%. Esse procedimento visou prevenir a corrosão e a deterioração delas durante o período de armazenamento.

A Figura 16 apresenta o sistema experimental utilizado para extração por micro-ondas.

Figura 16: Diagrama esquemático do sistema de pirólise por micro-ondas



Fonte: Song et al. (2022)

Sendo,

1. Cilindro de gás;
2. Medidor de vazão;
3. Forno micro-ondas;
4. Reator de quartzo;
5. Tubo de condensação;
6. Frasco de filtro de sucção;
7. Analisador de gás de refino;
8. CG-EM.

Para cada experimento, utilizou-se cerca de 30 g de casca, que foram colocadas uniformemente no fundo do reator. Posteriormente, alimentou-se nitrogênio (N_2) no reator até que o ar dentro dele fosse completamente substituído. Realizou-se o procedimento para as potências de 270, 450 e 720 W, em tempos de pirólise entre 5 e 15 minutos. Após isso, o vapor de óleo gerado pelo micro-ondas passa pelo condensador, tornando-se uma mistura óleo-água, e é coletado pelo frasco. O gás restante sai pela abertura lateral do frasco e é coletado com um saco de ar na extremidade. Continua-se a purga de N_2 até que o resíduo sólido fique a temperatura ambiente. Finalmente, pesa-se a massa do resíduo sólido e do líquido e, fazendo a diferença com a massa inicial da amostra, tem-se a quantidade de produto gasoso.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 7: Rendimento de limoneno em diferentes tempos de extração

Composto	Limoneno		
Tempo (min)	7,5	10	12,5
Rendimento (%)	35,53	36,83	33,34

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Song *et al.*, 2022.

Tabela 8: Rendimento do limoneno em diferentes potências de extração

Composto	Limoneno		
Potência (W)	270	450	720
Rendimento (%)	53,78	37,82	29,00

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Song *et al.*, 2022.

Ao analisar os resultados obtidos, observa-se que ao aumentar o tempo de 7,5 para 10 minutos, ocorre um aumento de 1,3% no rendimento do limoneno. Entretanto, ao aumentar de 10 para 12,5 minutos ocorre uma redução de 3,49%. Além disso, o aumento da potência do micro-ondas levou a uma redução significativa no rendimento do limoneno, que pode ser justificado pelas alterações que ocorrem em sua estrutura molecular. Com base nesses dados, definiu-se o tempo de 10 minutos e a potência de 450W como condições ideais para o processo.

Assim, a análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas revelou um rendimento de 29,22% de produto líquido, contendo 37,82% de limoneno, indicando boa eficiência do método. Para as mesmas condições de tempo e potência, os gases produzidos na reação foram compostos por 86% dióxido de carbono (CO_2) e 14% monóxido de carbono (CO), enquanto os sólidos são majoritariamente matéria volátil (61,35%) e carbono (34,04%).

Visando provar a eficiência do método de extração por micro-ondas, fez-se uma análise comparativa com o método de destilação a vapor. Os resultados obtidos pelo experimento estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Comparação entre o método de destilação a vapor e extração por micro-ondas

	Destilação a vapor	Extração por micro-ondas
Tempo (min)	150	12,5
Potência (W)	500	500
Consumo de energia (KWh/kg)	41,67	3,47
Rendimento de limoneno (%)	2,02	3,10
Rendimento por unidade de energia consumida (%/KWh)	0,048	0,893

Fonte: Adaptado de Song *et al.*, 2022.

Pelos resultados obtidos, observa-se que, em um tempo significativamente menor, o rendimento de limoneno foi 1,08% superior ao obtido por destilação a vapor, além de apresentar menor consumo energético. Dessa forma, os dados deste estudo indicam que a extração por micro-ondas é mais eficiente para a obtenção de óleos essenciais em comparação ao método tradicional, fato este que pode ser explicado pela elevada taxa de aquecimento proporcionada pelas micro-ondas.

4.3. MAHD E SFME VERSUS HIDRODESTILAÇÃO

Golmakani & Moayyedi (2015) realizaram um estudo comparativo da hidrodestilação convencional com as técnicas de hidrodestilação assistida por micro-ondas e de extração por micro-ondas sem solvente, para obtenção dos óleos essenciais das cascas de limão siciliano (*Citrus limon*).

Inicialmente, parte das cascas foram mantidas em condições ambientes por três dias para o processo de secagem. Em seguida, os teores de umidade das cascas frescas e secas foram medidos, apresentando valores de aproximadamente 84,8% e 5,3%, respectivamente.

Na MAHD, 50 g de casca seca de *C. limon* foram adicionadas a 450 mL de água destilada no reator e submetidos à irradiação por micro-ondas com potência de 1200 W durante 15 minutos. No caso da SFME, embora não se utilize solvente para a extração, os autores empregaram uma proporção de cascas frescas e água de 1:1 – em contraste com a razão de casca e água de 1:9 utilizada na MAHD – com o objetivo de evitar a carbonização das cascas e garantir a umidade necessária ao processo. Em ambos os casos, a cada intervalo de 5 minutos, o óleo essencial formado na mistura óleo-água foi decantado e coletado. Na HD, utilizaram-se a mesma razão entre casca e água da MAHD, substituindo o forno micro-ondas por um

aquecedor. O óleo foi extraído em intervalos de 30 minutos, por 120 minutos. Ao final do processo os OE obtidos pelos três métodos foram secos com Na_2SO_4 e armazenados a 4°C para posterior análise.

Ao analisar os resultados, os autores verificaram que a temperatura de extração em todos os métodos foi de 100°C . No entanto, essa condição foi atingida em um tempo consideravelmente inferior para a MAHD e a SFME, o que pode ser justificado pela combinação de três mecanismos de transferência de calor presentes nesses métodos – irradiação, condução e convecção – em contraste com a HD, que se baseia apenas na condução e convecção (GOLMAKANI & REZAEI, 2008).

O rendimento em função do tempo também evidenciou diferenças relevantes entre as técnicas. A HD necessitou de 120 minutos para alcançar aproximadamente 1,22%, enquanto a MAHD e a SFME atingiram valor próximos (1,18% e 1,36%, respectivamente) em apenas 15 minutos. Em relação ao consumo energético, a HD demandou 0,67 kWh e a MAHD e a SFME consumiram apenas 0,30 kWh. Por outro lado, a análise da composição química dos OE de *C. Limon* por CG-EM indicou perfil semelhantes entre as três técnicas. O limoneno foi identificado como composto majoritário em todos os casos, representando aproximadamente 63% no óleo obtido por HD, 61% por MAHD e 58% por SFME.

Dessa forma, os resultados desse estudo evidenciam a superioridade dos métodos avançados quando comparados aos métodos convencionais de extração em termos de eficiência de tempo e energia, sem causar alterações consideráveis na composição química dos óleos.

5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

A avaliação conjunta dos métodos de extração é essencial para identificar suas potencialidades e limitações. Nesse sentido, a Tabela 10, abaixo, apresenta as principais vantagens e desvantagens dos métodos estudados, possibilitando uma visão comparativa entre as técnicas.

Tabela 10: Comparação entre os métodos de extração dos óleos essenciais

Método	Vantagens	Desvantagens
Hidrodestilação / Destilação por arraste a vapor	Fácil operação, baixo custo, não tóxico, alta reprodutibilidade	Longo tempo de operação e alta perda de aroma
Extração por solvente orgânico	Maior rendimento, baixo custo, escalável em processos industriais, flexibilidade de condições operacionais	Uso de solventes tóxicos e inflamáveis e dificuldade de separar o solvente do soluto e reciclar o mesmo, podendo trazer efeitos negativos para a saúde humana
Extração por fluido supercrítico	Velocidade de extração mais rápida, maior rendimento, menor perda de ingredientes ativos, não deixa resíduos de solventes, baixa temperatura e pressão crítica	Alto custo de equipamentos, controle rigoroso de pressão e temperatura, escalabilidade industrial complexa e potencial risco à segurança
Extração assistida por micro-ondas	Alta taxa de extração, menor tempo de operação, menor consumo de solvente, maior rendimento de compostos-alvo	Alto custo de equipamentos e dificuldade de aplicar em processos industriais de grande escala
Hidrodestilação assistida por micro-ondas	Em relação à hidrodestilação convencional, demanda menor tempo de extração, menor consumo de energia, melhor preservação de compostos termossensíveis e maior rendimento	Dificuldade de aplicação em escala industrial, equipamentos mais caros que a hidrodestilação convencional, possibilidade de hidrólise parcial de compostos sensíveis
Extração assistida por micro-ondas sem solvente	Não utiliza solvente e nem água adicionada, reduz a degradação térmica, menor tempo de extração e menor geração de resíduos	Requer matéria-prima com alto teor de umidade, alto custo de equipamento, demanda alto controle de parâmetros operacionais, limitações em escala industrial

Fonte: Adaptado de Zhou, 2023.

Conforme apresentado na Tabela 10, os métodos convencionais de extração, como a hidrodestilação, destilação por arraste a vapor e a extração por solventes orgânicos, embora ainda sejam amplamente utilizados devido à simplicidade operacional e ao baixo custo, apresentam limitações significativas, como longos tempos de extração, maior degradação de compostos termossensíveis e o uso de solventes tóxicos. Em contrapartida, as técnicas verdes

de extração, como a extração por fluido supercrítico e a extração assistida por micro-ondas, oferecem vantagens expressivas, como maior eficiência, menores perdas de compostos bioativos, redução do tempo de operação e ausência de resíduos de solventes. Apesar das barreiras associadas à aplicação em escala industrial, esses métodos são alternativas promissoras e alinhadas às demandas atuais por processos mais sustentáveis, seguros e capazes de preservar a qualidade dos óleos essenciais extraídos

6. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou analisar comparativamente os métodos convencionais e avançados da extração de óleos essenciais de frutas cítricas, abordando aplicações, influência dos parâmetros na eficiência do processo, vantagens e desvantagens e técnicas analíticas de separação e purificação. Ao longo da pesquisa, verificou-se que, embora os métodos tradicionais, como hidrodestilação, destilação por arraste a vapor e extração por solventes orgânicos, ainda sejam amplamente empregados devido à simplicidade operacional e ao baixo custo, eles apresentam limitações quanto à eficiência da extração, seletividade e impacto ambiental.

Por outro lado, técnicas modernas como a extração por fluido supercrítico, extração assistida por micro-ondas e a combinação entre as técnicas convencionais e avançadas – como a hidrodestilação assistida por micro-ondas e a extração assistida por micro-ondas sem solvente – demonstraram maior eficiência, seletividade e redução no tempo de processamento, além de se mostrarem mais sustentáveis. Ademais, o estudo buscou enfatizar a importância da aplicação de técnicas analíticas para o processo de separação e purificação dos componentes, visto que elas possuem influência direta na qualidade do produto gerado.

Assim, conclui-se que a modernização dos processos de extração representa não apenas um avanço tecnológico, mas também uma estratégia alinhada às demandas atuais de sustentabilidade e de geração de subprodutos a partir dos resíduos gerados pelos processos industriais. O estudo reforça a necessidade de investimentos em tecnologias verdes e eficientes, capazes de conciliar qualidade e responsabilidade ambiental.

Como limitação, ressalta-se o elevado custo dos equipamentos associados aos métodos avançados, bem como a necessidade de controle rigoroso dos parâmetros operacionais, fatores estes que ainda dificultam a aplicação em escala industrial. Nesse sentido, recomenda-se que pesquisas futuras avancem na realização de análises técnico-econômicas e estudos de avaliação de riscos, de modo a verificar a viabilidade prática da adoção dessas tecnologias e identificar estratégias que tornem sua implementação mais acessível e segura.

REFERÊNCIAS

- ANTITECK. **Sistema de extração de microondas.** Disponível em: <https://antiteck.com/pt/sistema-de-extra%C3%A7%C3%A3o-de-microondas-2/>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- ANGIOLILLO, L.; DEL NOBILE, M. A.; CONTE, A. **The extraction of bioactive compounds from food residues using microwaves.** Current Opinion in Food Science, Elsevier Ltd, 1 out. 2015.
- ARUNA, T. *et al.* **Hydrodistillation and Soxhlet Method of Extraction and Analyses of Chemical Composition of Citrus Peel Essential Oil.** Madras Agricultural Journal, v. 109, n. Special, 2022.
- ASL, R. M. Z.; NIAKOUSARI, M.; GAHRUIE, H. H.; SAHARKHIZ, M. J.; KHANEGHAH, A. M. **Study of two-stage ohmic hydro-extraction of essential oil from Artemisia aucheri Boiss.: Antioxidant and antimicrobial characteristics.** Food Research International, v. 107, p. 462-469, maio 2018.
- ASSIS, A. V. R. *et al.* **Recuperação e concentração de componentes do aroma de caju (Anacardium occidentale L.) por pervaporação.** 2007.
- BAKKALI, F.; AVERBECK, S.; AVERBECK, D.; IDAOMAR, M. **Biological effects of essential oils—A review.** Food and Chemical Toxicology., v. 46, p. 446–475, 2008.
- BATIHA, G. E. S.; BESHBIHY, A. M.; WASEF, L. G.; ELEWA, Y. H. A.; AL-SAGAN, A. A.; ABD EL-HACK, M. E.; TAHA, A. E.; ABD-ELHAKIM, Y.; DEVKATO, H. P. **Chemical Constituents and Pharmacological Activities of Garlic (Allium sativum L.): A Review.** Nutrients, v. 12, n. 3, p. 1–21, 2020. <https://doi.org/10.3390/nu12030872>.
- BIZZO, H. R.; HOVELL, A. M. C.; REZENDE, C. M. **Óleos essenciais no Brasil: aspectos gerais, desenvolvimento e perspectivas.** Química Nova, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 588-594, 2009.
- BORGES, G. B. V.; MACHADO, A. M. R.; GOMES, F. C. O. GARCIA, C. F. **Extração, caracterização e avaliação microbiológica de óleos essenciais de rejeitos de frutas cítricas comerciais.** Research, Society and Development, v. 10, n. 7, p. e1110716126, 11 jun. 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Gestão de Resíduos Orgânicos.** Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADuos-org%C3%A2nicos.html>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- BRUNETON, J. **Elementos de Fitoquímica y de Farmacognosia.** Zaragoza: Editorial Acribia, 1991.
- CAPUTO, L.; AMATO, G.; DE BARTOLOMEIS, P.; DE MARTINO, L.; MANNA, F.; NAZZARO, F.; DE FEO, V.; BARBA, A. A. **Impact of drying methods on the yield and chemistry of Origanum vulgare L. essential oil.** Sci. Rep., v. 12, 3845, 2022.

CERPA, M. G.; MATO, R. B.; COCERO, M. J. **Modeling steam distillation of essential oils: Application to lavandin super oil.** *AIChE Journal*, v. 54, n. 4, p. 909–917, abr. 2008. <https://doi.org/10.1002/aic.11438>

CETESB. **Ficha de Informação de Produto Químico.** Disponível em: <https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 21 out. 2025.

CHEMAT, F.; ABERT-VIAN, M.; FERNANDEZ, X. **Microwave-assisted extraction of essential oils and aromas.** In: *Food Engineering Series*. New York: Springer, 2013. p. 53–68.

DAWIEC-LIŚNIEWSKA, A.; SZUMNY, A.; PODSTAWCZYK, D.; WITEK-KROWIAK, A. **Concentration of natural aroma compounds from fruit juice hydrolates by pervaporation in laboratory and semi-technical scale. Part 1.** Base study. *Food Chemistry*, v. 258, p. 63–70, 2018.

DE GROOT, A. C.; SCHMIDT, E. **Essential oils, part IV: Contact allergy.** *Dermatitis*, v. 27, p. 170–175, 2016.

DREGER, M.; WIELGUS, K. **Application of essential oils as natural cosmetic preservatives.** *Herba Pol.*, v. 59, p. 142–156, 2013.

EBRAHIMI, H.; MARDANI, A.; BASIRINEZHAD, M. H.; HAMIDZADEH, A.; ESKANDARI, F. **The effects of Lavender and Chamomile essential oil inhalation aromatherapy on depression, anxiety and stress in older community-dwelling people: A randomized controlled trial.** *Explore (NY)*, v. 18, n. 3, p. 272–278, maio–jun. 2022. DOI:10.1016/j.explore.2020.12.012

ENGEL, R. G.; KRIZ, G. S.; LAMPMAN, G. M.; PAVIA, D. L. **Química orgânica experimental: técnicas de escala pequena.** 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

FALLEH, H. *et al.* **Essential oils: A promising eco-friendly food preservative.** *Food Chemistry*, Elsevier Ltd, 15 nov. 2020.

FENG, L. **Microwave extraction technology and its application in food chemistry.** *Chemical Engineering & Equipment*, n. 11, p. 145–147, 2012.

GOLMAKANI, M. T.; MOAYYEDI, M. **Comparison of heat and mass transfer of different microwave-assisted extraction methods of essential oil from *Citrus limon* (Lisbon variety) peel.** *Food Science & Nutrition*, Hoboken, v. 3, n. 6, p. 506–518, jun. 2015. DOI: 10.1002/fsn3.240.

GOLMAKANI, M. T.; REZAEI, K. **Comparison of microwave-assisted hydrodistillation with the traditional hydrodistillation method in the extraction of essential oils from *Thymus vulgaris* L.** *Food Chemistry*, v. 109, p. 925–930, 2008.

HAMBURGER, M.; BAUMANN, D.; ADLER, S. **Supercritical carbon dioxide extraction of selected medicinal plants: effects of high pressure and added ethanol on yield of extracted substances.** *Phytochemical Analysis*, v. 15, p. 46–54, 2004.

HAMBURGER, M.; CORDELL, G. A. **A direct bioautographic TLC assay for compounds possessing antibacterial activity.** *Journal of Natural Products*, v. 50, p. 19–22, 1987.

HARBORNE, J. B. **Phytochemical Methods: A guide to modern techniques of plant analysis.** 2. ed. v. 3. Germany: Chapman and Hall Publishers, Springer, 1998.

HASIBUAN, R.; GULTOM, E. **The effect of method, type of solvent and extraction time towards the yield of oil on essential oil extraction from lime peel (*Citrus aurantifolia*).** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1122, n. 1, p. 012108, 1 mar. 2021.

HERMAN, A.; HERMAN, A.P.; DOMAGALSKA, B.W.; MŁYNARCZYK, A. **Essential oils and herbal extracts as antimicrobial agents in cosmetic emulsion.** *Indian J. Microbiol.* 2013, 53, 232–237.

HIELSCHER ULTRASONICS. **Extração Soxhlet – O que é? Como é que funciona?.** Disponível em: <https://www.hielscher.com/pt/soxhlet-extraction-setup-and-function.htm>. Acesso em: 6 set. 2025.

HSE QUÍMICA. **A Técnica básica de cromatografia gasosa.** Disponível em: <https://hsequimica.com.br/a-tecnica-basica-de-cromatografia-gasosa/>. Acesso em: 30 ago. 2025.

IBARZ, A.; AUGUSTO, P. E. D. **Principles of unit operations in food processing.** In: SANT'ANA, A. de S. **Quantitative Microbiology in Food Processing: Modeling the Microbial Ecology.** New Jersey: John Wiley & Sons, p. 68–83, 2017.

IRSHAD, M.; SUBHANI, M. A.; ALI, S.; HUSSAIN, A. **Biological Importance of Essential Oils.** In: EL-SHEMY, H. A. **Essential Oils—Oils of Nature.** 2020.

JUNQUEIRA, P. **D-limoneno, inseticida natural.** Disponível em: https://parasitipedia.net/index.php?option=com_content&view=article&id=3660&Itemid=169. Acesso em: 01 abr. 2025.

JUREVIČIŪTĖ, R.; LOŽIENĖ, K.; BRUNO, M.; MAGGIO, A.; ROSSELLI, S. **Composition of essential oil of lemon thyme (*Thymus citriodorus*) at different hydrodistillation times.** *Natural Product Research*, v. 33, p. 80–88, 2019.

KUMAR, A.; NARAIAN, R. **Producers of Bioactive Compounds.** In: GUPTA, V. K.; PANDEY, A. (orgs.) **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering.** Amsterdam: Elsevier, p. 205–221, 2019.

LASKA, M.; TEUBNER, P. **Olfactory discrimination ability of human subjects for ten pairs of enantiomers.** *Chem. Senses*, v. 24, p. 161–170, 1999.

LETELLIER, M.; BUDZINSKI, H. **Microwave assisted extraction of organic compounds.** *Analisis*, v. 27, p. 259–271, 1999.

LI, X. M.; TIAN, S. L.; PANG, Z. C.; SHI, J. Y.; FENG, Z. S.; ZHANG, Y. M. **Extraction of *Cuminum cyminum* essential oil by combination technology of organic solvent with low boiling point and steam distillation.** *Food Chem.*, v. 115, p. 1114–1119, 2009.

LI, Y. **Explore microwave extraction technology and its application in food chemistry.** Food Safety Guide, 2015, p. 55–56.

LUCCHESI, M. E.; CHEMAT, F.; SMADJA, J. **Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: Comparison with conventional hydro-distillation.** Journal of Chromatography A, v. 1043, n. 2, p. 323–327, 23 jul. 2004.

MACHADO, C. A. *et al.* **Steam Distillation for Essential Oil Extraction: An Evaluation of Technological Advances Based on an Analysis of Patent Documents.** Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 12, 1 jun. 2022.

MAI, T. C. *et al.* **Supercritical CO₂ assisted extraction of essential oil and naringin from Citrus grandis peel: in vitro antimicrobial activity and docking study.** RSC Advances, v. 12, n. 40, p. 25962–25976, 13 set. 2022.

MAHANTA, S.; KHANIKOR, B. **Mosquitocidal activity of twenty-eight plant essential oils and their binary mixtures against Culex quinquefasciatus (Diptera: Culicidae).** Heliyon, v. 7, n. 2, 1 fev. 2021.

MANDAL, V.; MOHAN, Y.; HEMALATHA, S. **Microwave assisted extraction – An innovative and promising extraction tool for medicinal plant research.** Pharmacognosy Reviews, v. 1, n. 1, p. 7-18, 2007.

MANOU, I.; BOUILLARD, L.; DEVLEESCHOUWER, M.; BAREL, A. **Evaluation of the preservative properties of Thymus vulgaris essential oil in topically applied formulations under a challenge test.** J. Appl. Microbiol., v. 84, p. 368–376, 1998.

MARCOLINA, M. **Óleos essenciais: estudo de extração e atividade antimicrobiana.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

MARGETTS, J. **Aroma Chemicals V: Natural Aroma Chemicals.** In: ROWE, D. (ed.). 1^o Ed. Chemistry and Technology of Flavours and Fragrances. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2005. Ch. 8, p. 175.

MARICONI, F. A. M. **Inseticidas e seu Emprego no Combate às Pragas.** v. 1. Defensivos. 5. ed. São Paulo: Nobel, 1981.

MASANGO, P. **Towards Understanding Steam Distillation of Essential Oils by Differential Quantification of Principal Components Using Capillary Gas Chromatography.** Ph.D. Thesis, University of Surrey, Guildford, UK, 2001.

MATRIX LCMS. **A história da cromatografia – parte 2.** Disponível em: <https://www.matrixlcms.com.br/m/blog/6697cd95ad3b6a644e0dbae1/a-historia-da-cromatografia-parte-2>. Acesso em: 30 ago. 2025.

MIRHOSEINI, S.; ABBASI, A.; NOROUZI, N.; MOBARAKI, F.; BASIRINEZHAD, M. H.; MOHAMMADPOURHODKI, R. **Effect of aromatherapy massage with orange essential oil on postoperative pain after cesarean section: a randomized controlled trial.** Journal of Complementary and Integrative Medicine, v. 18, n. 3, p. 579-583, 2021.

MISHRA, A. K.; DUBEY, N. K. **Evaluation of some essential oils for their toxicity against fungi causing deterioration of stored food commodities.** Applied and Environmental Microbiology, v. 60, p. 1101–1105, 1994.

MISHRA, A. K.; MISHRA, A.; CHATTOPADHYAY, P. **Assessment of in vitro sun protection factor of *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) essential oil formulation.** J. Young Pharm., v. 4, p. 17–21, 2012.

MORAIS, L. A. S. de. **Óleos Essenciais no Controle Fitossanitário.** [S.l.: S.n.].

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Search for Species Data by Chemical Name.** Disponível em: <https://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

NEW DIRECTIONS AROMATICS. **Desbravando o poder da natureza: Métodos de extração de óleos essenciais.** Disponível em: <https://www.newdirectionsaromatics.com/blog/untapping-the-power-of-nature-essential-oil-extraction-methods/>. Acesso em: 06 set. 2025.

NITTHIYAH, J. *et al.* **Hydrodistillation-An Overview of Mechanism and Heating Properties.** Australian Journal of Basic and Applied Sciences, p. 22–29, 2017.

OIGMAN, S. S. **Carvona, C₁₀H₁₄O.** Disponível em: https://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarMolecula.php?id=y7ZVfqyK3SeCT4lgg_v3co5_YV3lKM-0BfzkwwuAWLRa8lIC9yjdJEKX8vEee5ObnSwd1LpfzWpg0vwPHfUQA==. Acesso em: 12 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **OPAS alerta para risco de surtos de dengue devido à circulação do sorotipo DENV-3 nas Américas.** Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/10-2-2025-opas-alerta-para-risco-surtos-dengue-devido-circulacao-do-sorotipo-denv-3-nas>. Acesso em: 07 abr. 2025.

PATEIRO, M. *et al.* **Essential oils as natural additives to prevent oxidation reactions in meat and meat products: A review.** Food Research International, v. 113, p. 156–166, 1 nov. 2018.

PEREIRA, A. I. S.; PEREIRA, A. G. S.; SOBRINHO, O. P. L.; CANTANHEDE, E. K. P.; SIQUEIRA, L. F. S. **Atividade antimicrobiana no combate as larvas do mosquito *Aedes aegypti*: Homogeneização dos óleos essenciais do linalol e eugenol.** Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas, v. 45, n. 3, p. 69-73, 2014.

PINTO, B. R. **Otimização da destilação por arraste a vapor do limoneno de *Citrus sinensis* (L.) Osbeck e as suas aplicações.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2022.

Pinto, G. M. F. **Extração com fluido supercrítico.** Revista ChemKeys, Campinas, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2018.

POVH, N. P. **Obtenção do Óleo Essencial da Camomila (*Matricaria recutita* [L] Rauschert) por Diferentes Métodos: Destilação por Arraste a Vapor, Extração com Solventes Orgânicos e Extração com CO₂ Supercrítico.** out. 2000.

QADARIYAH, L. et al. **Extraction of orange peel's essential oil by solvent-free microwave extraction.** In: American Institute of Physics Inc., 24 maio 2017.

RAJE, V. N.; LOKHANDE, S. S.; MORE, S. S. **Techniques for Extraction and Isolation of Natural Products: A Comprehensive Review.** International Journal of Research in Engineering, Science and Management, v. 2, n. 10, out. 2019.

RAMBOD, M.; RAKHSHAN, M.; TOHIDINIK, S.; NIKOO, M. H. **The effect of lemon inhalation aromatherapy on blood pressure, electrocardiogram changes, and anxiety in acute myocardial infarction patients: a clinical, multi-centered, assessor-blinded trial design.** Complementary Therapies in Clinical Practice, v. 39, art. 101155, maio 2020. DOI: 10.1016/j.ctcp.2020.101155.

RIBEIRO, L. G. **Extração assistida por micro-ondas de óleo essencial de folhas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *globulus*).** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SAHIN, S. **Principles of pervaporation for the recovery of aroma compounds and applications in the food and beverage industries.** In: Separation, extraction and concentration processes in the food, beverage and nutraceutical industries. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2010. p. 219–240.

SAITO, M. L.; LUCCHINI, F. **Substâncias Obtidas de Plantas e a Procura por Praguicidas Eficientes e Seguros ao Meio Ambiente.** Jaguariúna: Embrapa/CNPMA, 1998.

SALGUEIRO, L.; MARTINS, A.; CORREIA, H. **Raw materials: The importance of quality and safety. A review.** *Flavour Fragr. J.* 2010, 25, 253–271.

SCAPINELLO, J.; SOUZA, M. A.; PARIS, A.; MORGAN, L. V. **Aplicação de óleos essenciais em alimentos: uma revisão sobre desafios e perspectivas.** *Revista Acta Ambiental Catarinense*, Chapecó, v. 21, n. 1, 2023. DOI: 10.24021/raac.v21i1.7740.

SCIENCE OF ESSENTIALS. Steam distillation of essentials oil, how essential oil are made, science of Essentials. Disponível em: <<https://pin.it/56LaZKhfI>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SEBRAE. **CO₂ supercrítico acentua pureza de extratos.** Sebrae – Portal Sebrae, 26 abr. 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/co2-supercritico-acentua-pureza-de-extratos,16fe57a0d6837810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 6 jun. 2025.

SHARMEEN, J. B. *et al.* **Essential oils as natural sources of fragrance compounds for cosmetics and cosmeceuticals.** *Molecules*, MDPI AG, 1 fev. 2021.

SHINZATO, M. C.; HYPOLITO, R.; BARBIERI, A. J.; CARVALHO, F. M. S. **Alteração experimental de rochas carbonáticas, Caverna das Pérolas, Iporanga (SP).** *Revista do instituto Geológico*, São Paulo, v. 31, n. 1-2, p. 19-32, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20100002>.

SIMAS, D. L. R. *et al.* **Characterization of essential oils of citrus fruits.** Citrus Research Technology, v. 36, n. 1, 2015.

SILVA, G. F. da. **Extração supercrítica de *Lycopodium clavatum* L.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SONG, Z.; WEI, X.; XIE, M.; ZHAO, X.; SUN, J.; MAO, Y.; WANG, X.; WANG, W. **Study on the microwave extraction process and product distribution of essential oils from citrus peel.** Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, v. 171, p. 108–118, 1 jan. 2022. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108118.

STEFFANI, E. **Modelagem matemática do processo de extração supercrítica de óleo essencial de Ho-Sho (*Cinnamomum camphora* Nees & Eberm var. *linaloolifera* Fujita) utilizando CO₂.** 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. de A.; PESSOA FILHO, P. de A.; ZAPATA NOREÑA, C.; PICONE, C. S. F.; PACHECO, C. R. de F.; DITCHFIELD, C.; PERRECHIL, F. de A.; MENEGALLI, F. C.; TELIS ROMERO, J.; GUT, J. A. W.; PAIVA, J. L. de; VIGANÓ, J.; MATSUI, K. N.; MOSER, P.; CUNHA, R. L. da; SONG, T. W. **Operações unitárias na indústria de alimentos.** 2 v. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

TALATI, A. **Extraction methods of natural essential oils.** 2017.

TAYLOR, L. T. **Supercritical Fluid Extraction.** New York: Wiley, 1996.

VANKAR, P. S. **Essential oils and fragrances from natural sources.** Resonance, v. 9, p. 30–41, 2004.

VAN DER BRUGGEN, B.; LUIS, P. **Pervaporation as a tool in chemical engineering: A new era?** Current Opinion in Chemical Engineering, v. 4, p. 47–53, 2014.

VEGGI, P. C.; MARTINEZ, J.; MEIRELES, M. A. A. **Fundamentals of microwave extraction.** In: Food Engineering Series. [S.l.]: Springer, 2013. p. 15–52.

WANG, Y. *et al.* **Recent progress in the extraction of terpenoids from essential oils and separation of the enantiomers by GC–MS.** Journal of Chromatography A, Elsevier B.V., 16 ago. 2024.

WONGSUKKASEM, N.; SOYNARK, O.; SUTHAKITMANUS, M.; CHONGDILOET, E.; CHAIRATTANAPITUK, C.; VATTANIKITSIRI, P.; HONGRATANAWORAKIT, T.; TADTONG, S. **Antiacne-causing Bacteria, Antioxidant, Anti-Tyrosinase, Anti-Elastase and Anti-Collagenase Activities of Blend Essential Oil comprising Rose, Bergamot and Patchouli Oils.** Nat. Prod. Commun., v. 13, p. 639–642, 2018.

XIONG, K.; CHEN, Y. **Supercritical carbon dioxide extraction of essential oil from tangerine peel: Experimental optimization and kinetics modelling.** Chemical Engineering Research and Design, v. 164, p. 412–423, 1 dez. 2020.

ZHANG, Q. W.; LIN, L. G.; YE, W. C. **Techniques for extraction and isolation of natural products: A comprehensive review**. Chinese Medicine (United Kingdom), v. 13, n. 1, p. 1–26, 2018.

ZHOU, W. et al. **Research Progress on Extraction, Separation, and Purification Methods of Plant Essential Oils**. Separations, MDPI, 1 dez. 2023.

ZAMORANO U. R.; SANTIAGO, M. G. H.; VILLEGAS, V. **The Interaction of Microwaves with Materials of Different Properties**. In: Electromagnetic Fields and Waves, 2019; IntechOpen, London, pp. 1–29.