



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



LUCAS MACEDO SILVA

**EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO ASSISTIDA POR MICRO-
ONDAS: REVISÃO DA LITERATURA E TESTES EXPLORATÓRIOS**

UBERLÂNDIA - MG

Abril, 2025

LUCAS MACEDO SILVA

**EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO ASSISTIDA POR MICRO-
ONDAS: REVISÃO DA LITERATURA E TESTES EXPLORATÓRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos requisitos
necessários para aprovação na disciplina de Trabalho
de Conclusão de Curso.

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

UBERLÂNDIA - MG

Abril, 2025

LUCAS MACEDO SILVA

**EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO ASSISTIDA POR MICRO-
ONDAS: REVISÃO DA LITERATURA E TESTES EXPLORATÓRIOS**

Uberlândia, 17 de abril de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Marina Seixas Pereira
Orientadora – FEQUI/UFU

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva
FEQUI/UFU

Dr. Heitor Otacílio Nogueira Altino
Pós- Doutorando PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, meu coração se enche de gratidão a Deus, que tem sido minha luz e minha força em cada passo desta jornada. Sua presença constante me guiou nos momentos mais difíceis e me proporcionou a coragem necessária para continuar. Sou grato por todas as bênçãos que recebi, mesmo quando não percebia.

Aos meus pais, Amador e Tatiana, obrigado por serem meu porto seguro, sempre prontos a oferecer amor incondicional e apoio, mesmo quando as tempestades da vida pareciam invencíveis. Cada sacrifício, cada ensinamento e cada gesto de carinho moldaram quem sou hoje. Eu os amo mais do que posso expressar.

À minha irmã Rayssa, que sempre trouxe alegria aos meus dias. Você tornou minha vida mais leve e sempre me mostrou que a felicidade nos encontra, mesmo nas pequenas coisas. Obrigado por ser minha confidente e por me inspirar a ser a melhor versão de mim mesmo. Ao Luiz Fernando, meu cunhado, agradeço o companheirismo e apoio sincero ao longo dessa caminhada.

À minha avó Silvânia, seu exemplo de força e resiliência sempre foram uma inspiração para mim. Ver você preparar suas receitas de sabão despertou em mim a curiosidade e a paixão pela química, motivando-me a trilhar o caminho que trilho hoje. Sou eternamente grato por seus ensinamentos e por todo o amor que sempre ofereceu.

Aos meus tios, tias e primos, seus carinhos e apoios sempre foram um lembrete de que a família é um alicerce inabalável em minha vida. Obrigado por tanto amor.

Ao meu namorado Pedro, sou profundamente grato por ter aparecido em um momento de turbulência da vida. Seu amor e companheirismo me deram forças para seguir em frente, você me inspira e me motiva a cada dia, e sou eternamente grato por tudo que faz por nós. Sou grato também à sua família, que me acolheu com tanto carinho e amor.

Agradeço de coração às Anas, Ana Laura e Ana Gabriela, e à Marina Castro, por tornarem cada dia dessa jornada acadêmica mais leve e repleto de risadas e trocas. Vocês tornaram esta aventura inesquecível, e a amizade de vocês é um dos maiores tesouros que levo comigo.

Aos meus amigos de escola e infância, Gabriela Luiza, Beatriz Moraes, Higor Dias, Bruno Henrique e Ana Carolina, a trajetória ao lado de vocês foi e sempre será uma parte preciosa da minha vida. As memórias que criamos juntos sempre estarão guardadas com carinho em meu coração.

A todos os meus professores ao longo da vida, minha eterna gratidão. Cada um de vocês foi fundamental na minha formação, inspirando minha curiosidade e mostrando a importância do conhecimento. Suas palavras de incentivo e sabedoria moldaram meu caráter e minhas aspirações. Agradeço por acreditarem em mim e por despertarem em mim a paixão pelo aprendizado.

Minha orientadora, Marina Seixas, sua orientação foi um presente que levarei para a vida toda. Obrigado por acreditar em mim, por me guiar com tanta sabedoria e paciência e por sempre me inspirar.

Agradeço aos convidados para a composição da banca avaliadora, Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva e Dr. Heitor Otacílio Nogueira Altino, obrigado pela dedicação, contribuição e tempo disposto.

E, finalmente, a todos do PET Engenharia Química e da ConsultEQ, projetos ao qual tive o privilégio de pertencer, agradeço a oportunidade de aprender e crescer. Vocês foram fundamentais na realização deste sonho.

A todos vocês, meu mais sincero e emocionado obrigado. Este trabalho é uma homenagem a cada um que, de alguma forma, contribuiu para que eu chegasse até aqui. Sou eternamente grato por cada momento, por cada ensinamento e por cada amor. A realização deste sonho é nossa.

RESUMO

Diante do cenário mundial atual, o mercado de óleos essenciais apresenta um crescimento significativo. Esse avanço está intimamente ligado aos potenciais associados às propriedades dos respectivos componentes em questão, que perpassam desde a sua aplicação farmacológica, no setor de homeopatia e aromaterapia, até seu uso na complementação de produtos sanitizantes. Assim, tendo em vista a importância dos óleos essenciais e a sua exponente busca, se vê a necessidade de estudos acerca dos métodos extrativos que visem não somente o retorno econômico, mas também a redução dos impactos ambientais e consequentes consumos energéticos. Desse modo, o presente estudo objetiva avaliar a metodologia de extração de óleos essenciais de eucalipto assistida por micro-ondas (MAE), a fim de comparar a eficiência e a contribuição ambiental de tal técnica frente as convencionais existentes, tais como a hidrodestilação (HD) e a extração por solventes orgânicos, soxhlet. Assim, este estudo busca propor uma revisão bibliográfica sobre o processo de extração de óleo essencial de eucalipto via micro-ondas, e compilar alguns resultados encontrados na literatura, através de bancos informacionais, como “Periódicos CAPES”, “SciELO”, “Science Direct”, “Repositórios UFU” e “Google Acadêmico”, com foco em artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Foi feito o levantamento do rendimento da extração com uso de solventes, visando avaliar as metodologias emergentes, que apresentam a menor aplicação possível de solventes apolares, tendo em consideração a dificuldade no tratamento do pós-processo dessas matérias. Os resultados demonstram que a técnica assistida por micro-ondas apresenta potencial para reduzir o tempo de extração, o consumo de solventes e consequentemente os impactos ambientais associados, elevando o rendimento do produto e mantendo a qualidade do óleo essencial. Outrossim, combinações como baixas potências e longos tempos de processo evidenciaram maiores rendimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Óleo essencial de eucalipto, extração assistida por micro-ondas, hidrodestilação, soxhlet, sustentabilidade.

ABSTRACT

In light of the current global scenario, the essential oil market is experiencing significant growth. This progress is closely tied to the potential associated with the properties of the respective components, ranging from their pharmacological application in homeopathy and aromatherapy to their use in complementing sanitizing products. Thus, given the importance of essential oils and their increasing demand, there is a need for studies on extraction methods that aim not only at economic returns but also at reducing environmental impacts and energy consumption. This study aims to evaluate the microwave-assisted extraction (MAE) method for eucalyptus essential oils, comparing its efficiency and environmental contribution against conventional techniques such as hydrodistillation (HD) and organic solvent extraction, Soxhlet. The study provides a literature review on the microwave-assisted extraction process of eucalyptus essential oil and compiles some results found in informational databases, such as "Periódicos CAPES," "SciELO," "Science Direct," "Repositórios UFU," and "Google Scholar," focusing on scientific articles, master's dissertations, and doctoral theses. An evaluation of the extraction yield using solvents was conducted to assess emerging methodologies that minimize the use of non-polar solvents, considering the difficulty in processing post-extraction materials. The results show that the microwave-assisted technique has the potential to reduce extraction time, solvent consumption, and consequently the associated environmental impacts, while increasing product yield and maintaining the quality of the essential oil. Additionally, combinations of low power and long process times demonstrated higher yields.

KEYWORDS: Eucalyptus essential oil, microwave assisted extraction, hydrodistillation, soxhlet, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plantação de Eucalipto.	14
Figura 2. Fórmula estrutural plana da molécula predominantemente encontrada nos óleos essenciais de eucalipto - 1,8 – cineol (eucaliptol).	22
Figura 3. Esquema de uma destilaria de óleo essencial de eucalipto baseando-se no princípio de destilação a vapor.	23
Figura 4. Representação do sistema de Hidrodestilação com o uso do aparelho Clevenger.	26
Figura 5. Aparelho de Clevenger usado nos processos de hidrodestilação.	27
Figura 6. Processo de extração dos óleos essenciais por micro-ondas atuando em matrizes vegetais.	28
Figura 7. Cromatogramas obtidos por análise em GC-MS de óleos essenciais de <i>Eucalyptus</i> spp. Sendo d-limoneno (1), eucaliptol (2), 1- α -terpineol (3).	34
Figura 8. Determinação da umidade por dessecação da folha de eucalipto fresca e triturada.	36
Figura 9. Unidade experimental de extração de óleo essencial assistida por micro-ondas – FEQUI/UFU	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Os principais óleos essenciais presentes no mercado mundial.	19
Tabela 2. Condensação das unidades de isopreno na formação dos terpenóides.	20
Tabela 3. Propriedades medicinais dos óleos essenciais de eucalipto.	22
Tabela 4. Rendimentos do óleo essencial de eucalipto obtidos via hidrodestilação com base em cada espécie e sua aplicação no mercado.	24
Tabela 5. Principais aplicações do eucalipto no segmento comercial e industrial.	30
Tabela 6. Parâmetros físico-químicos para o óleo essencial de eucalipto rico em cineol.	33
Tabela 7. Rendimento da extração do OE de eucalipto obtidos através da metodologia de hidrodestilação para diferentes espécies encontradas na literatura.....	39
Tabela 8. Comparativo dos impactos ambientais e consumo energético frente aos dois métodos em análise para o rendimento de 1,8% do OE de <i>E. urophylla x globulus</i>	41
Tabela 9. Impactos da potência de micro-ondas e do tempo no processo de extração do OE de <i>Eucalyptus microtheca</i>	42
Tabela 10 . Efeitos da potência de micro-ondas e do tempo no processo de extração do OE de <i>Eucalyptus globulus</i> frente ao rendimento.....	43
Tabela 11. Síntese comparativa das técnicas de extração do óleo essencial de eucalipto	47

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

OE – Óleo essencial

E. – Eucalyptus

HD – Hidrodestilação

MAE – Microwave Assisted Extractation (Extração Assistida por Micro-ondas)

MP – Matéria-prima

GC-MS – Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	16
2. METODOLOGIA	16
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL PRELIMINAR	17
3.2.1. PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS	17
3.2.2. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA BIOMASSA	17
3. ÓLEOS ESSENCIAIS E TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO	18
4.1. Óleos Essenciais	18
4.2. Óleo Essencial de Eucalipto	21
4.3. Hidrodestilação	24
4.4. Extração de óleo essencial assistida por micro-ondas	27
4. CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO SUBSTRATO E ÓLEO ESSENCIAL	29
5.1. Matéria-prima: Eucalipto	29
5.2. Caracterização da matéria-prima	31
5.3. Caracterização do óleo essencial	32
5. TESTES EXPLORATÓRIOS	35
6.1. CARACTERIZAÇÃO DA UMIDADE DAS FOLHAS DE EUCALIPTO POR SECAGEM EM ESTUFA	35
6.2. EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS	36
6. ESTUDOS DE CASO	37
7.1. Extração de óleo essencial de eucalipto	37
7.2. Extração do óleo essencial de eucalipto via hidrodestilação (HD) e Soxhlet versus assistida por micro-ondas (MAE)	38

7. CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a história mundial, sabe-se que grande parte das tecnologias aplicadas na atualidade tiveram suas origens, ou mesmo seus propulsores, no palco dos principais conflitos mundiais presenciados pela humanidade, sendo estes a Primeira e a Segunda Guerra Mundial. Assim, conforme publicado por Coopermiti (2023), tem-se evidências de que a utilização das tecnologias baseadas em micro-ondas esteve presente, principalmente durante a II Grande Guerra Mundial, pois na década de 50, pequenos fornos eram utilizados para o aquecimento de alimentos, já na década de 80, estudiosos aplicavam essa energia em seus laboratórios de pesquisa.

Entende-se como micro-ondas, toda radiação que contempla a faixa de frequência de 300 MHz a 300 GHz, energia essa evidenciada nas grandes tecnologias e alvo de um enorme interesse científico. As aplicações dessa radiação eletromagnética no mundo moderno, apresentam os mais variados ramos. Destaca-se seu uso no setor de telecomunicações, doméstico, militar e no segmento industrial, quando o interesse se concentra nos processos de aquecimento, como em secagem, pirólise, sistemas catalíticos e até mesmo extrativos, tal qual visto por Zhai *et al.*, (2019).

Desse modo, segundo Barboza *et al.*, (2001), compreende-se que os mecanismos que norteiam os processos de aquecimento por micro-ondas estão centralizados em conceitos físico-químicos, como a temperatura, capacidade calorífica, tipos de interações/ligações químicas, estrutura molecular, momento de dipolo, polarização, constante dielétrica e outros. Logo, nas situações em que a radiação em questão é aplicada para fins de aquecimento, a elevação da temperatura do material que está submetido a essa aplicação energética dependerá exclusivamente de suas propriedades.

Dessarte, conforme explicitado acima, para que ocorra um aquecimento uniforme e eficiente por meio da aplicação das micro-ondas, o material empregado necessita ser um absorvedor dessa radiação, sendo este responsável pela transformação da energia eletromagnética em energia térmica. É notável que materiais não absorvedores são incapazes de realizar a conversão energética supracitada, o que por sua vez impossibilita a obtenção de altas temperaturas

conforme o almejado na aplicação desse tipo de energia (Jing *et al.*, 2020). Portanto, o estudo de materiais com capacidade absorptiva das micro-ondas é de suma importância, haja vista que na maioria das vezes, esses materiais são aplicados como elementos para a transferência de calor aos reais objetos de interesse através do mecanismo físico de condução térmica, como no caso da extração de óleos essenciais.

Os óleos essenciais podem ser compreendidos como sendo o material volátil presente em plantas, que em geral evidenciam em suas estruturas químicas uma mistura de terpenos (moléculas de hidrocarbonetos não solúveis em água e compostos não terpênicos) (Silva *et al.*, 2015). Tais componentes podem ser extraídos das folhas, raízes, sementes, frutos, flores e até mesmo dos troncos das plantas, e diferentemente dos óleos vegetais, existem inúmeras metodologias para a realização de tal extração, como prensagem a frio, destilações, aplicações de solventes e outras (eCycle, 2024).

O mercado dos óleos essenciais apresenta uma considerável crescente, e suas razões vão muito além das características organolépticas destes compostos, haja vista sua frequente atividade antimicrobiana, anti-inflamatória, fungicida, antioxidante, dentre outras, responsáveis pela sua consequente aplicação no setor da medicina alternativa, com holofotes para a aromaterapia. Atualmente, tais óleos são aplicados desde o setor farmacêutico e medicinal, até na síntese de produtos de limpeza, cosméticos e outros (Tsukui & Rezende, 2014)

Logo, em termos de aplicabilidade de óleos essenciais e versatilidade, temos destaque para o óleo extraído das folhas de eucalipto, planta essa que, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), é uma matéria vegetal do gênero *Eucalyptus*, de origem australiana, tasmaniana e de outras ilhas localizadas na Oceania. Atualmente existem mais de 700 espécies reconhecidas botanicamente, com diversas propriedades físico-químicas, o que evidencia aplicações para diversos fins, como carvão vegetal, lenha, celulose, chapas de fibras, geração energética, além de medicamentos, alimentos e cosméticos que apresentam como base o óleo essencial (Yvy Brasil, 2024). Outrossim, pode-se ressaltar a sua vasta obtenção na natureza brasileira devido ao seu emprego no reflorestamento nacional, assim como evidenciado na Figura 1, um exemplo de plantação de árvores de eucalipto de reflorestamento, além do encontro desta planta em outros países.

Figura 1. Plantação de Eucalipto.



Fonte: Tora Brasil (2024)

Para a extração dos óleos essenciais, como o óleo de eucalipto, são aplicados diversos métodos que consistem na retirada do material volátil dos tricomas glandulares de plantas aromáticas. Tais métodos são determinados conforme a necessidade e características específicas do produto almejado, como também as particularidades de cada óleo e os métodos disponíveis. Hoje, comumente, tem-se a aplicação de técnicas como hidrodestilação, extração por solventes orgânicos, destilação a vapor, extração por fluido supercrítico, prensagem a frio, técnica de *Soxhlet*, entre outras (Silva & Pereira, 2012).

Dos métodos convencionais, os principais aplicados hoje são aqueles em que os seus mecanismos são baseados nos princípios de arraste a vapor e técnicas com aplicação de solventes orgânicos, tendo como referências a hidrodestilação e a extração via *Soxhlet*. Na hidrodestilação, a matriz vegetal submersa em água é aquecida, o que faz com que os seus compostos voláteis entrem em ebulição e sejam arrastados pelo vapor d'água. Após a condensação da mistura, esses compostos são separados da água por diferença de densidade. Nesse processo, o principal equipamento utilizado é o aparato Clevenger e a água como solvente. Já na técnica *Soxhlet*, conta-se com a aplicação de solventes apolares, como Éter de Petróleo e Hexano, em que, ao contrário da hidrodestilação, a matriz vegetal não permanece submersa na região de aquecimento direto.

Assim, o solvente é aquecido até evaporar, condensa-se, goteja sobre a amostra sólida e solubiliza os compostos desejados por afinidade química (Silva & Pereira, 2012).

Assim, mediante as demandas socioambientais evidenciadas em nosso planeta, se faz necessário cada vez mais a aplicação, o aprimoramento e o desenvolvimento de técnicas e metodologias que objetivam reduzir os impactos ambientais. Destacam-se como principais impactos o alto consumo energético em técnicas como a HD (advindo do longo tempo de aquecimento demandado), o uso de solventes tóxicos e inflamáveis, e a geração de resíduos químicos. O tratamento desses solventes é complexo e o descarte inadequado pode contaminar solo e corpos d'água, como ocorre na técnica de Soxhlet (Santana & Rodrigues, 2019).

Desse modo, a extração de óleos essenciais pode ser substituída por métodos não convencionais, como a utilização de micro-ondas, para que seja reduzida, ou até mesmo anulada, a aplicação de solventes (como nas técnicas de *solvente-free*), e minimizado o gasto energético com as fontes de aquecimento. A motivação para a determinação dessas técnicas se concentra na grande problemática que norteia a carência de um grande volume de solventes, a consequente produção exacerbada de resíduos químicos, especialmente advinda dos solventes tóxicos e a dificuldade no tratamento e destinação posterior desses materiais. Além disso, a análise de técnicas extrativas é necessária para que assim possamos determinar as metodologias com melhores eficiências energéticas, menores consumos de solventes e maiores rendimentos de OE.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo central avaliar o potencial da extração assistida por micro-ondas (MAE) na obtenção do óleo essencial de eucalipto como alternativa sustentável frente às técnicas convencionais, a partir de uma revisão da literatura de caráter descritivo, com foco em eficiência do processo de aquecimento, rendimento e redução dos impactos ambientais.

2.2. Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Comparar os métodos aplicados na extração do óleo essencial de Eucalipto por meio das técnicas convencionais e através de micro-ondas;
- descrever o processo de caracterização da matéria-prima, como o seu pré-tratamento e a determinação das condições iniciais desta, previamente ao processo extrativo;
- analisar os principais parâmetros operacionais que impactam diretamente na qualidade do processo frente ao rendimento do produto, tais como razão sólido:solvente, tempo de extração e potência aplicada em micro-ondas;
- realizar testes exploratórios de extração de óleo essencial de eucalipto assistida por micro-ondas em pequena escala, a fim de compreender o comportamento do processo frente a influência dos parâmetros operacionais, com foco em rendimento e consumo energético.

3. METODOLOGIA

3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica através do uso de artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, disponibilizadas em plataformas digitais, como *Science Direct*, Google Acadêmico, Repositórios UFU, Portal Capes e outros, considerando a faixa de tempo de 2005 a 2025. Desse modo, para uma pesquisa mais assertiva, foram utilizadas palavras-chaves que evidenciassem relevância ao tema, como “óleos essenciais”, “extração de óleos essenciais de eucalipto”, “hidrodestilação”, além da pesquisa por termos em inglês, como “*solvent-free extraction*” e “*Microwave-assisted extraction – MAE*”

visando uma maior amplitude na pesquisa. Desse modo, com as buscas, almejou-se a obtenção de informações como as condições operacionais aplicadas nos ensaios, caracterizações dos substratos, rendimentos processuais, consumo energético e qualidade dos óleos essenciais obtidos.

3.2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

Além da revisão bibliográfica, foram conduzidos testes exploratórios com o objetivo de verificar, de forma preliminar, a viabilidade da extração assistida por micro-ondas (MAE) na obtenção de óleo essencial de eucalipto, bem como compreender o funcionamento processual. Além disso, realizou-se a caracterização da biomassa por meio da determinação de sua umidade.

3.2.1. PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS

Primeiramente, triturou-se a biomassa fresca em um triturador de alimentos manual, sendo utilizada uma massa de 100,95 g para o ensaio exploratório. Com a ajuda de um funil, o material foi inserido em um balão volumétrico de fundo redondo, com capacidade de 1000 mL, utilizando-se a razão sólido:solvente de 1:2.5, sendo empregada a água como solvente. O recipiente foi acoplado ao forno micro-ondas da marca Milestone, modelo NEOS-GR, operando a uma potência de 680 W por 63 minutos. O processo foi conduzido em sistema fechado com condensador acoplado para a coleta dos vapores condensados, sendo o óleo essencial separado do solvente por decantação.

3.2.2. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA BIOMASSA

A umidade das folhas de eucalipto aplicadas no processo de extração assistida por micro-ondas foi determinada pela técnica de secagem em estufa, aplicando-se o método 012/IV – Perda por dessecação -Secagem direta em estufa a 105 °C, descrito no Instituto Adolfo Lutz (2008, p.95). Foram pesadas, em cadinhos de porcelana, a amostra de 10,02 g de folhas de eucalipto frescas e

previamente trituradas através de um triturador de alimentos manual, e acondicionadas em estufa a 105 °C por 24 horas. Posterior ao processo de secagem, as amostras foram resfriadas em dessecador e novamente pesadas. Assim, a umidade foi determinada pelo cálculo de perda de massa, segundo a equação 1, tal qual evidenciado pelo método 012/IV do Instituto Adolfo Lutz (2008, p.95).

$$Umidade (\%) = \frac{(massa\ inicial - massa\ final)}{massa\ inicial} \times 100 \quad (1)$$

4. ÓLEOS ESSENCIAIS E TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO

4.1. Óleos Essenciais

De acordo com Serafini (2002), os óleos essenciais eram utilizados há mais de mil anos antes de Cristo para curar doenças, porém, somente a partir da Idade Média, e por meio do processo de destilação aprimorado pelos cientistas da época, que se iniciou a verdadeira comercialização deste componente, com relatos de aplicações até na Segunda Guerra Mundial para o tratamento de queimaduras. Entretanto, o termo “aromaterapia” foi empregado pelo químico francês M. Gattefossé na década de 1920 quando este ao se queimar durante um experimento, mergulhou suas mãos em um tanque com essência de alfazema. Assim, o cientista notou uma abrupta melhora em suas queimaduras, sem iminência de infecções ou cicatrizes, o instigando a pesquisar mais sobre os óleos essenciais e publicar o livro *Aromathérapie* (Serafini, 2002).

O mercado de óleos essenciais denota uma considerável crescente desde 1987, quando Pasquon & Zanderighi (1987) relataram que os setores industriais que demandam tal matéria-prima, como a perfumaria, movimentavam aproximadamente US\$ 4,5 bilhões de dólares/ano com destaque de 20% deste total para os óleos essenciais. Outrossim, sabe-se que o Brasil detém uma excelente tradição no cultivo de plantas aromáticas, se posicionando como o 3º maior exportador

do mundo, em que 91% de tais exportações são de cítricos (Souza *et al.*, 2010). Na Tabela 1 estão listados os principais óleos de maior interesse no mercado mundial.

Tabela 1. Os principais óleos essenciais presentes no mercado mundial.

Óleo essencial	Espécie
Cânfora	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) J. Presl.
Cedro (China)	<i>Chamaecyparis funebris</i> (Endl.) Franco
Cedro (EUA)	<i>Juniperus virginiana</i> L. e <i>J. ashei</i> Buchholz
Citronela	<i>Cymbopogon winterianus</i> Jowitt e <i>C. hardus</i> (L.) Rendle
Coentro	<i>Coriandrum sativum</i> L.
Cravo-da-índia	<i>Syzygium aromaticum</i> (L.) Merr. et L. M. Perry
Eucalipto (tipo cineol)	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill., <i>E. polybractea</i> R.T. Baker e <i>Eucalyptus</i> spp.
Eucalipto (tipo citriodora)	<i>Eucalyptus citriodora</i> Hook.
Grapefruit	<i>Citrus paradisi</i> Macfady
Hortelã-pimenta	<i>Mentha piperita</i> L.
Laranja (Brasil)	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck
Lavandin	<i>Lavandula intermedia</i> Emeric ex Loisel
Limão	<i>Citrus limon</i> (L.) N.L. Burm.
Limão destilado (Brasil)	<i>Citrus aurantiifolia</i> (Christm. & Panz.) Swingle
Menta japonesa (Índia)	<i>Mentha arvensis</i> L. f. <i>piperascens</i> Malinv. ex Holmes
Patchouli	<i>Pogostemon cablin</i> (Blanco) Benth.
Sassafrás (China)	<i>Cinnamomum micranthum</i> (Hayata) Hayata
Spearmint (nativa)	<i>Mentha spicata</i> L.

Fonte: Adaptado de Silveira *et al.*, (2012).

Conforme mencionado por Filippis (2001), os óleos essenciais evidenciam constituintes que variam desde hidrocarbonetos terpênicos, a compostos não terpênicos, como álcoois simples, aldeídos, cetonas, fenóis, ésteres, óxidos, peróxidos, furanos, ácidos orgânicos, lactonas, cumarinas e compostos com enxofre. Porém, é normal que em uma mistura, um dos compostos esteja em maior concentração, enquanto outros com baixos teores e alguns com quantidades bem pequenas, o que caracteriza o conceito de traços. Portanto, a maioria dos óleos essenciais são formados por terpenóides, que são substâncias derivadas de isopreno, formados pela condensação de um número variável de pentacarbonadas (isoprênicas), tal qual visto na Tabela 2.

Tabela 2. Condensação das unidades de isopreno na formação dos terpenóides.

Nº de Unidades	Nº átomos de carbono	Esqueletos carbonados dos terpenóides	Nome ou classe
1	5		Isopreno
2	10		Monoterpenóides
3	15		Sesquiterpenóides
4	20		Diterpenóides
5	25		Sesterpenos
6	30		Triterpenóides
8	40		Tetraterpenóides
n	5n		Polisoprenóides

Fonte: Adaptado de Filippis (2001).

Segundo Filippis (2001), os compostos terpênicos encontrados nos óleos essenciais são os monoterpenos, com 90% de constituição mássica, e, os sesquiterpenos. Já os diterpenos são obtidos em óleos vegetais extraídos com solventes orgânicos.

Além disso, Silveira & Brito (2003), evidenciaram em seu estudo acerca do óleo essencial de eucalipto, as características gerais que os óleos essenciais apresentam, sendo estas desde a sua classificação como óleos, devido a sua aparência oleosa em temperatura ambiente, aos seus sabores comumente ácidos e picantes, com aparências incolores ou amareladas e instáveis na presença de luz, ar, umidade, metais e calor.

De forma adicional, tais óleos são produzidos por diferentes estruturas vegetais das plantas, evidenciando particularidades a depender do óleo em questão, podendo estar contidos em uma

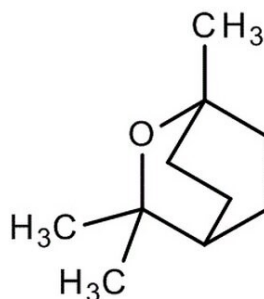
única estrutura ou por toda a matéria vegetal. Assim, temos o exemplo do óleo de rosa, em que seu óleo é encontrado nas flores, a laranja, com o óleo obtido pelo próprio fruto (especialmente através de sua casca), o sândalo, sendo encontrado na madeira, o eucalipto, capturado pelas folhas, dentre outros exemplos. Silveira & Brito (2003) salienta ainda que as plantas que oferecem óleos a partir de diferentes estruturas corporais, podem apresentar composições químicas e até mesmo odores distintos desses óleos extraídos.

4.2. Óleo Essencial de Eucalipto

Conforme publicado por Doran (1991), os óleos essenciais de eucalipto são produzidos por pequenas glândulas localizadas nas próprias folhas da planta, sendo este óleo, produto secundário do metabolismo vegetal, metabolismo esse que não traz para a planta característica de necessidade para a manutenção vital, como no caso do primário. Assim, esses constituintes agregam na possibilidade de elevação da capacidade de adaptação aos meios em que a espécie se encontra inserida. Portanto, tratando-se do eucalipto, o seu óleo apresenta funcionalidade para o material vegetal no sentido de defesa contra insetos, devido ao seu odor com capacidade de repelir as ameaças, aumento da resistência ao frio e redução da perda de água.

De acordo com Silveira & Brito (2003), para fins medicinais, o óleo essencial de eucalipto deve evidenciar em sua composição um teor de 70% de 1,8-cineol (eucaliptol), composto químico apresentado em sua fórmula estrutural plana pela Figura 2. A espécie de eucalipto brasileira com essa capacidade de concentração é a *Eucalyptus Globulus*, pois assim, ele poderá ser destinado à produção farmacêutica de produtos como estimulantes de secreção nasal, inaladores, saborizantes de creme dental, e outros. Para aplicação industrial, prioriza-se a composição predominante de felandreno, devido sua aplicação na produção de sanitizantes e desinfetantes, a piperitona para a produção do timol, utilizado como conservante de alimentos e o mentol, aplicado no sistema de aromatização de balas e doces, mas destaca-se a presença de constituintes como os monoterpenos d-limoneno e eucaliptol.

Figura 2. Fórmula estrutural plana da molécula predominantemente encontrada nos óleos essenciais de eucalipto - 1,8 – cineol (eucaliptol).



Fonte: Merck Millipore (2024)

Ainda em termos medicinais, Moura *et al.*, (2022), menciona em seu artigo a utilização do monoterpeneo 1,8-cineol por parte dos aborígenes australianos no tratamento e cura de tosse, problemas gastrointestinais, machucados e repelentes de insetos. Portanto, pode-se ressaltar que o óleo essencial de eucalipto denota grandes propriedades medicinais, evidenciadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades medicinais dos óleos essenciais de eucalipto.

Expectorante	Auxilia no desprendimento das secreções pulmonares proporcionando o alívio da congestão nasal.
Descongestionante Nasal	Facilita a respiração devido ao aroma liberado pelo óleo, descongestionando as vias aéreas.
Antisséptica e antimicrobiana	Ajuda na prevenção e/ou combate às infecções fúngicas, virais e bacterianas que afetam o trato respiratório.
Anti-inflamatória	Reduz a inflamação nos pulmões e trato nasal.
Relaxante	Proporciona sensação de relaxamento devido ao seu odor agradável.

Fonte: Borges *et al.*, (2023).

Em termos industriais e em larga escala, a extração do óleo essencial (OE) de eucalipto é realizada em destilarias, constituídas de caldeiras, condensadores, dornas, separadores e coletores

de óleo, tal qual esquematizado na Figura 3 apresentada por Essence Flora (2023), baseando-se também no princípio de arraste a vapor. Assim, a caldeira é a responsável pela geração do vapor utilizado na extração do óleo essencial, através do aquecimento do solvente condicionado no interior de suas tubulações, sendo muito utilizado nesses sistemas a água devido os modelos de caldeiras aquatubulares. Após a geração de vapor, há o direcionamento deste até as dornas, onde ficam armazenadas as folhas da matriz vegetal a ser extraída por arraste, sendo alimentadas mecanica ou manualmente, que posteriormente serão utilizadas como fonte de energia para a própria caldeira devido a sua característica de “bagaço”.

Figura 3. Esquema de uma destilaria de óleo essencial de eucalipto baseando-se no princípio de destilação a vapor.



Fonte: Adaptado de Essence Flora (2023).

Na região inferior das dornas, conta-se com um formato cônico e uma grelha que permite a segregação da matéria-prima para com o vapor e a drenagem da água condensada, enquanto na região superior há um fecho hidráulico a fim de evitar possíveis perdas dos óleos essenciais extraídos. Dessa forma, o vapor atinge a base da dorna, percorre pelas folhas e arrasta o material volátil, óleo essencial, na direção do condensador, sendo comumente utilizados condensadores casco e tubo, em que os vapores percorrem os tubos e no casco água fria. Após a condensação, há o direcionamento da mistura condensada, água e óleo, para o separador, em que por diferença de densidade, o óleo, componente sobrenadante, é separado da água e segue para o coletor, local onde realiza-se a pesagem e o devido encaminhamento para a secagem. No processo de secagem, aplica-

se frequentemente sulfato de sódio anidro seco (Na_2SO_4), composto altamente higroscópico, que após a sua saturação é removido por filtração ou decantação, por fim, há o armazenamento do produto extraído.

Cabe salientar que o rendimento do OE de eucalipto pode variar com diversos fatores além dos parâmetros aplicados na extração, tais como a sua própria espécie, idade das folhas, variabilidade genética, condições ambientais de plantio e crescimento e outros. Assim, pela tabela 4, adaptada de Ramos (2016), é possível perceber a variação deste rendimento perante a aplicação da técnica de hidrodestilação.

Tabela 4. Rendimentos do óleo essencial de eucalipto obtidos via hidrodestilação com base em cada espécie e sua aplicação no mercado.

Espécie	Componente principal		Rendimento da Extração (%)
	Nome	Teor (%)	
Aplicação medicinal			
<i>E. camaldulensis</i>	1,8-cineol	80 - 90	0,3 – 2,8
<i>E. globulus</i>	1,8-cineol	60 – 85	0,7 – 2,4
<i>E.cneorifolia</i>	1,8-cineol	40 -90	2,0
<i>E. viridis</i>	1,8-cineol	70 - 80	1,0 – 1,5
Aplicação industrial			
<i>E. dives (var. felandreno)</i>	Felandreno	60 – 80	1,5 – 5,0
<i>E. dives (var. piperitona)</i>	Piperitino	40 – 56	3,0 – 6,5
<i>E. radiata subesp. Radiata</i>	Felandreno	35 - 40	3,0 – 4,5

Fonte: Adaptado de Ramos, (2016).

4.3. Hidrodestilação

Sabe-se que o método de extração dos óleos essenciais pode impactar diretamente na qualidade do produto, como também em suas propriedades físico-químicas, o que reduz consequentemente não somente o seu valor agregado final, como também a sua confiabilidade e aplicabilidade para determinados fins (Bertolazzi *et al.*, 2005). Desse modo, a escolha de um bom

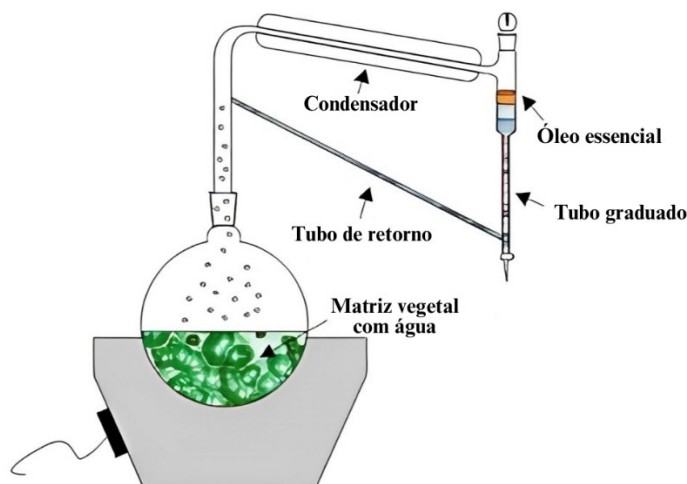
método extrativo é de suma importância para que assim se obtenha resultados satisfatórios nesse processo.

Como visto, os óleos essenciais são compostos que vaporizam com facilidade mediante o aumento da temperatura, fator associado à sua grande volatilidade. Assim, é justamente com base nesse princípio que a destilação foi aplicada para a extração desses componentes das plantas. No âmbito da Engenharia Química, destilação se trata da separação de componentes de uma mistura graças à diferença da pressão de vapor dos constituintes, fator totalmente dependente da temperatura (Silva & Pereira, 2012).

Desse modo, temos que as matérias que compõem os óleos essenciais da matriz vegetal, ao entrar em contato com a água aquecida, passarão a receber pressão das moléculas de vapor d'água, o que ocasionará suas respectivas ebulições e assim, em seus estados voláteis, esses constituintes irão se condensar e posteriormente serão separados da água (Biasi & Deschamps, 2009).

O método da Hidrodestilação é antigo e versátil, e se concentra no fato de que o material vegetal permanece em contato com a água em ebulição e o vapor deste fluido força a abertura das paredes celulares da planta, o que provoca a evaporação dos óleos que estão entre as células vegetais. Assim, temos que o vapor gerado constituído por uma mistura apolar de óleo e água, passa por um condensador, a fim de que ocorra o resfriamento dos componentes, originando duas fases líquidas graças às suas imiscibilidades, o que permite sua fácil separação, posteriormente (Silva & Pereira, 2012). Tal metodologia pode ser observada pela Figura 4.

Figura 4. Representação do sistema de Hidrodestilação com o uso do aparelho Clevenger.

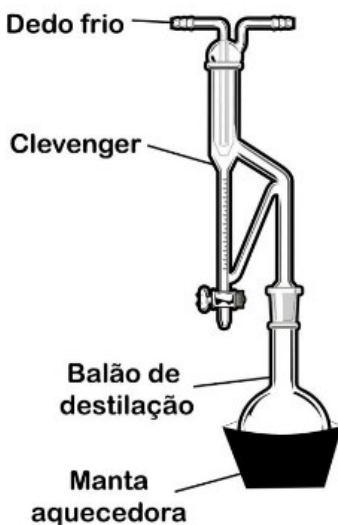


Fonte: Neplame (2023).

Um método muito aplicado para a produção em laboratórios e pequenas escalas, consiste na utilização de um aparelho do tipo Clevenger (Figura 5), e sua importância se dá pelo fato de que todas as informações coletadas no processo de extração servem de embasamento para o desenvolvimento e modelagem dos processos industriais, todavia, tal método evidencia, como ponto negativo, a capacidade de degradação de alguns componentes dos óleos essenciais devido o contato direto da matéria-prima com a água durante longos períodos (Silva & Pereira, 2012).

Como é possível observar, e segundo descrito por Biasi & Deschamps (2009), os aparelhos do tipo Clevenger são constituídos por um balão de vidro com volume ajustável, aquecido por uma manta elétrica controlada por termostato, e conectado a um condensador por um dispositivo de vidro. As dimensões desse conjunto devem ser compatíveis com a densidade do óleo essencial, a fim de maximizar a eficiência do processo de extração.

Figura 5. Aparelho de Clevenger usado nos processos de hidrodestilação.



Fonte: Mogi Glass (2023).

4.4. Extração de óleo essencial assistida por micro-ondas

Micro-ondas são radiações eletromagnéticas com frequências situadas na faixa de 300 MHz a 300 GHz, o que corresponde ao comprimento de ondas de 1 mm a 1 m, sendo essa uma energia não ionizante, isto é, não detém capacidade de afetar ligações químicas e/ou até mesmo causar alterações moleculares por meio da remoção de elétrons. De um modo físico, temos que as radiações eletromagnéticas contidas nas micro-ondas são frutos de dois campos com atuação perpendicular: o campo elétrico e o magnético e atuam aos materiais expostos por meio da rotação bipolar e condução iônica, que são responsáveis pelo aquecimento do material através da conversão da energia eletromagnética em calor (Ribeiro, 2018).

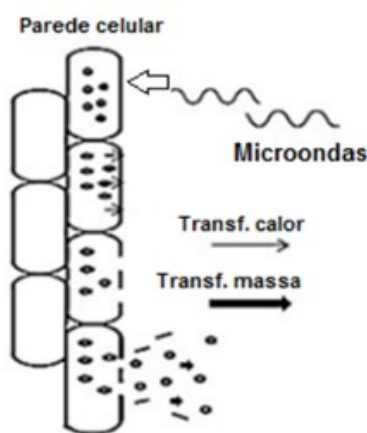
Portanto, o aquecimento por micro-ondas, ou aquecimento dielétrico como também é nomeado, tem-se a geração de calor mais uniforme no interior da matriz com um direcionamento para a superfície deste material. Assim, na extração assistida por micro-ondas, temos que a energia eletromagnética que passou pela conversão de calor provoca um aumento na temperatura interna das células que compõem a matriz, por conta do aquecimento e evaporação da umidade presente, o que leva ao aumento da pressão interna, rompimento das membranas e consequente liberação

dos óleos essenciais, conforme observado na Figura 6, semelhante ao evidenciado pela hidrodestilação (Ribeiro, 2018).

Assim, os principais fatores que influenciam a extração assistida por micro-ondas se concentram na potência do equipamento, tempo de extração, tipo de solvente aplicado, condição da matriz vegetal e razão entre sólido e solvente (Chemat *et al.*, 2017). De acordo com Kusuma & Mahfud (2017), a potência do micro-ondas é como uma força motriz que ocasiona o rompimento da estrutura da membrana celular da matriz vegetal a fim de permitir a difusão do óleo essencial no solvente em questão, o que evidencia uma relação direta para com o aumento da temperatura do composto vegetal e seu consequente alcance do ponto de ebulição.

Logo, altas temperaturas podem contribuir para o aumento do rendimento e consequente eficiência de extração, contudo, podem ocasionar degradação dos compostos termossensíveis. Kusuma & Mahfud (2017) estudaram o efeito da potência de 400 e 600 W no rendimento de óleos essenciais de patchouli, e segundo os estudiosos, 600 W proporciona maior taxa de aumento de temperatura e maior rendimento de óleo. Porém, Chen, Zu e Yang (2015) estudaram valores de 385, 543 e 700 W na extração de óleos essenciais de magnólia e concluíram que a potência ideal seria de aproximadamente 500 W. Essa diferença de potência ideal para a extração de óleos essenciais de diferentes substratos está intimamente relacionada às suas características físico-químicas específicas de cada biomassa, como teor de umidade e espessura da parede celular (Chemat *et al.*, 2017).

Figura 6. Processo de extração dos óleos essenciais por micro-ondas atuando em matrizes vegetais.



Fonte: Ribeiro (2018).

Já em relação ao tempo de extração, há de se cuidar, pois tempos curtos demais podem apresentar nenhuma extração, e longos demais, a degradação dos componentes, como citado acima. Bustamante *et al.*, (2016) estudaram intervalos de tempo de extração de óleos das cascas de alguns cítricos, entre 14 e 45 minutos, e constataram que o tempo afeta sim o rendimento e que o maior tempo elevou a quantidade de produto almejado. Além disso, a qualidade da extração assistida por micro-ondas é fortemente influenciada pela escolha do solvente, sendo os solventes polares preferidos devido à sua elevada constante dielétrica em comparação aos apolares. Solventes com maior constante dielétrica absorvem mais eficientemente a radiação de micro-ondas, promovendo um aquecimento mais rápido e homogêneo do sistema. Nesse contexto, a água é amplamente utilizada por apresentar alta constante dielétrica, além de ser um solvente ambientalmente seguro, de baixa toxicidade, facilmente recuperável e com baixo potencial de contaminação (Ribeiro, 2018).

5. CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO SUBSTRATO E ÓLEO ESSENCIAL

Este capítulo elucida as principais características apresentadas pelo substrato eucalipto, bem como as metodologias encontradas em literatura acerca de seu preparo prévio para o processo extrativo. Além disso, também contempla as técnicas aplicadas no processo de caracterização do óleo essencial de eucalipto extraído por micro-ondas, especialmente voltadas para suas características físico-químicas.

5.1. Matéria-prima: Eucalipto

O eucalipto, da espécie *Eucalyptus*, é uma planta de origem australiana, indonesiana e de outras ilhas do continente oceânico que apresenta grande valor comercial e industrial para o mundo, em especial, para o Brasil. Estima-se que tal material vegetal foi introduzido em solo brasileiro por volta de 1868, todavia, seus objetivos comerciais evidenciaram-se por volta de 1904, com o objetivo de fornecer lenha para a geração de energia das locomotivas das ferrovias brasileiras.

Assim, atualmente, o eucalipto denota uma excelente capacidade de suprimento na reposição contínua de matéria-prima para o setor industrial, haja vista sua excelente capacidade de adaptação aos solos e resistência. (Lima *et al.*, 2010).

Estima-se a existência de aproximadamente 730 espécies de eucalipto espalhadas pelo mundo, porém, cerca de 20 delas são utilizadas para fins comerciais, sendo as mais utilizadas *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus dunnii*. Conforme supracitado, o eucalipto vem sendo utilizado devido a diversos fatores, como sua rápida capacidade de crescimento, alta produtividade, haja vista sua capacidade de alcançar alturas de aproximadamente 5 metros em apenas um ano. Ressalta-se também sua grande adaptabilidade e o aroma agradável expelido pelas suas folhas devido à síntese dos óleos essenciais desenvolvidas pela sua morfologia vegetal, e, segundo o EMBRAPA, corresponde há cerca de 76,5% da área total de plantios florestais brasileiro. Portanto, é possível salientar que hoje, o eucalipto pode ser destinado para inúmeras finalidades, sendo alguma delas evidenciadas pela Tabela 5:

Tabela 5. Principais aplicações do eucalipto no segmento comercial e industrial.

Fins Madeireiros	Produção de madeira sólida, como compensados e lâminas, reconstituídos como MDF e polpas para a indústria de papel e celulose.
Fins Energéticos	Síntese de biocombustíveis, briquete, carvão e lenha.
Fins medicinais e sanitizantes	Extração dos óleos essenciais para a síntese de medicamentos e sanitizantes.

FONTE: Adaptado de Santora, Penteado e Goulart (2014)

Além disso, Ribeiro *et al.*, (2020), ao avaliarem as possibilidades do aproveitamento dos resíduos florestais brasileiros, evidenciaram que resíduos como folhas, galhos e cascas de eucalipto são frequentemente descartados pela indústria florestal, apesar de seu grande potencial de aproveitamento, com destaque para a extração de seu óleo essencial. Logo, conforme supracitado,

devido a grande quantidade de florestas de eucalipto existentes mundialmente e a sua geração de resíduos, a carência de estratégias para o aproveitamento dos constituintes rejeitados caracteriza-se como um fator motivacional para a exploração de técnicas que visem a extração do óleo essencial, produto de grande interesse comercial.

Portanto, mediante a versatilidade apresentada pelo eucalipto, além das contribuições para o comércio e indústria, há aportes para o setor socioambiental, haja vista que as florestas, quando corretas, denotam participação significativa na melhoria da qualidade e conservação do solo, atenuação de efeitos climáticos, manutenção da biodiversidade, captura de carbono, além da geração de emprego para o setor extrativista e rural (Santora, Penteado e Goulart, 2014).

5.2. Caracterização da matéria-prima

A fim de conservar a matéria-prima pós-colheita, considera-se armazenar as folhas em sacos de polietileno em um refrigerador, na temperatura de 8°C, sem contato com a luz (Ribeiro, 2018). Além disso, outra metodologia proposta por Brum, Pianesso e Rodrigues, em 2007, para a preservação da matéria-prima até o momento de sua utilização, consistiu no armazenamento das folhas de eucalipto em papel pardo em bancada, com proteção contra a luz e calor até o momento do processo extrativo, a fim de evitar a perda de umidade, em que a extração ocorreu após dois dias.

Desse modo, para a aplicação da extração, autores como Chemat & Cravotto (2013), e Franco-Vega *et al.*, (2016), apresentaram uma trituração prévia da amostra a fim de aumentar a sua área superficial e facilitar o processo de transferência de calor e massa, tendo em vista que de acordo com os pesquisadores mencionados, o tamanho da partícula, como também agitação do meio, detém influência direta perante o rendimento extrativo, devido a promoção da dissipação de calor.

Além disso, alguns autores como Zhao & Zhang (2014), promoveram um pré-tratamento térmico na amostra a ser extraída, através de uma secagem natural em ambiente ventilado por 2 dias. Em termos de pré-tratamento, David & Boaro (2009) propuseram a secagem da amostra em estufa com circulação forçada de ar em temperatura entre 60 e 70°C, ambos com o objetivo de avaliar a extração de óleos essenciais em base seca. Contudo, autores como Letellier & Budzinski

(1999) e Chemat & Cravotto (2013), realizaram a extração em base úmida justamente para evitar perdas de óleo essencial ao longo do processo de tratamento térmico. De acordo com os autores mencionados, a extração em base úmida atua como uma forma de redução de gasto energéticos. Assim, se aproveita a própria umidade contida na matéria vegetal como solvente, passando pelo processo de aquecimento, evaporação e elevação da pressão interna da parede celular, tal qual visto na sistemática da hidrodestilação.

Por fim, em termos de caracterização da matéria, Zhao & Zhang (2014), após a determinação do teor de umidade por secagem em estufa, realizaram a trituração da amostra seca em um moedor de facas e o peneiramento dessa amostra com um sistema de peneiras vibratórias (modelo EFK2000/2, Endecotts Ltd., Londres, Inglaterra). No estudo mencionado, os autores selecionaram para a extração partículas de diâmetros menores que 400 μm .

5.3. Caracterização do óleo essencial

Silveira & Brito (2003) em seu trabalho intitulado “Óleo Essencial de Eucalipto”, evidenciam a importância da caracterização dos óleos essenciais para a obtenção de produtos com alta qualidade, e assim, com o uso, obter o cumprimento de suas funcionalidades como esperado. Desse modo, os principais ensaios necessários e recomendados pela International Standard Organization (ISO) se concentram na determinação de parâmetros como: rotação óptica, densidade, solubilidade em álcool etílico, índice de refração e componente químico principal. Assim, com base na Tabela 6 abaixo adaptada de Silveira & Brito (2003), tem-se os principais parâmetros com base na ISO 770 – 1980 e ISO 3065 – 1974.

Conforme publicado por Silveira & Lazzarotto (2021), as principais técnicas aplicadas no processo de análise caracterizante dos OE se baseiam na determinação das características térmicas e da composição química do produto obtido. Assim, as análises térmicas proporcionam um estudo avançado acerca do comportamento do material em função da variação da temperatura. Desse modo, se faz possível avaliar conceitos importantes, principalmente para o âmbito farmacêutico e químico, como ponto de fusão, ponto de ebulição, transições vítreas, variação de massa, perda de água ligada e livre, estabilidade térmica e grau de pureza. Os métodos aplicados para essas avaliações consistem nas técnicas de termogravimetria (TGA), ensaio que mede a variação da

massa da amostra em função da variação de temperatura aplicada no material. Logo, neste caso, sendo o analito o óleo essencial, a análise permite avaliar os efeitos que o aquecimento pode gerar na matéria. Portanto, a TGA torna possível avaliar a faixa de temperatura em que a composição permanecerá fixa, a temperatura responsável pelo início da decomposição térmica, faixas de desidratação, combustão, oxidação e outros, propriedades de suma importância para a segurança comercial, haja vista a grande aplicabilidade que os óleos essenciais podem ter (Afinko Polímeros, 2024).

Tabela 6. Parâmetros físico-químicos para o óleo essencial de eucalipto rico em cineol.

Parâmetros	ISO 770 – 1980	ISO 3065 - 1974
Densidade relativa (20 °C)	0,906 – 0,925	0,918 – 0,928
Índice de refração (20° C)	1,4590 – 1,4670	1,4580 – 1,4650
Rotação óptica (20 °C)	0 a +10	-2 a +2
Solubilidade em etanol 70% v/v (20 °C)	1 vol em 5 vols	1 vol em 3 vols
Teor de cineol	Mínimo 70%	80 – 85%

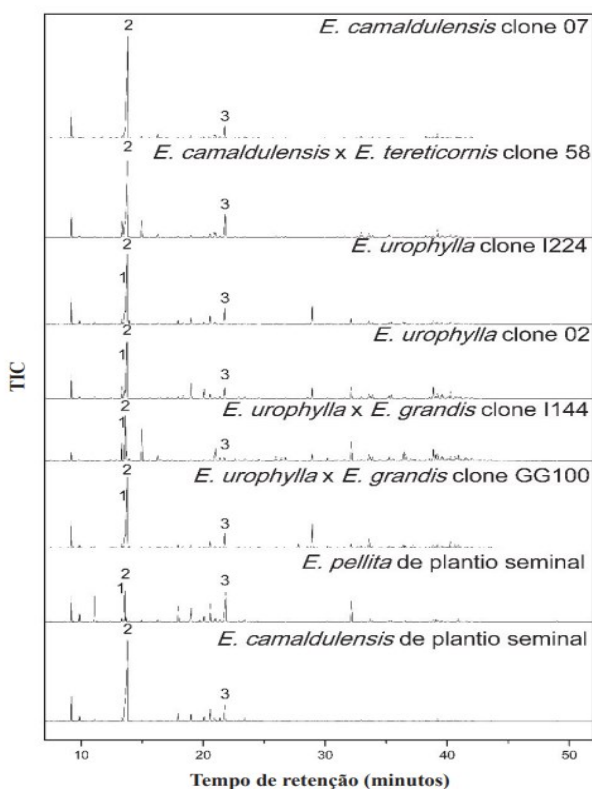
Fonte: Adaptado de Silveira & Brito (2003)

Silveira & Lazzarotto (2021) mencionam em seu estudo a utilização da metodologia de análise térmica diferencial (DTA) associada ao TGA para avaliar as variações energéticas nas perdas de massas baseadas nas gráficas obtidas com a termogravimetria. Assim, pela DTA se torna possível a obtenção mais assertiva e precisa da faixa de temperatura em que as ocorrências de perda de massa e massa constante acontecem. Portanto, em termos de resultados experimentais, Silveira & Lazzarotto (2021) apresentam que os OE de *E. urophyla*, por exemplo, evidenciou dois grandes eventos nas curvas de DTA, sendo o primeiro com temperatura inicial de 120 °C e final de 132 °C e o segundo evento com temperatura inicial de 165 °C e final de 184 °C, com perda total de massa ocorrendo entre as temperaturas de 168 °C e 175 °C.

Em termos de composição química, a cromatografia gasosa (GC) é a técnica mais aplicada para sua determinação, pois permite a análise dos óleos quanto a sua composição química por meio da associação ao sistema de espectrometria de massas (MS). Assim, em questões estruturais, temos o uso de um equipamento que conta com um cromatógrafo e um espectrômetro de massas com

câmara de ionização e detector de massas. Logo, Silveira & Lazzarotto (2021) mencionam a alta concentração dos constituintes monoterpênicos nos óleos essenciais de eucalipto, como α -pineno e d-limoneno, e oxigenados, como 1,8-cineol e l- α -terpineol. Ademais, destaca-se a grande concentração do monoterpénóide oxigenado 1,8-cineol, assim como pode ser visto nos cromatogramas obtidos por Silveira & Lazzarotto (2021) evidentes na Figura 8.

Figura 7. Cromatogramas obtidos por análise em GC-MS de óleos essenciais de *Eucalyptus* spp. Sendo d-limoneno (1), eucaliptol (2), l- α -terpineol (3).



Fonte: Adaptado de Silveira & Lazzarotto (2021).

Além da qualidade do OE em termos de bioativos, o rendimento em relação a quantidade de substrato também é comumente avaliado. Para a determinação do rendimento do óleo essencial, o método expresso em grande parte dos ensaios, especialmente o trabalho publicado por Barbosa (2021), baseia-se na determinação por base seca, isto é, determinado pela equação 2, em que:

$$\text{rendimento (\%)} = \frac{\text{Volume de óleo extraído (mL)} \times 100}{\text{massa de amostra (g)} - \text{massa da amostra (g)} \times \text{umidade (\%)}} \quad (2)$$

6. TESTES EXPLORATÓRIOS

6.1. CARACTERIZAÇÃO DA UMIDADE DAS FOLHAS DE EUCALIPTO POR SECAGEM EM ESTUFA

A determinação da umidade da matriz vegetal é de suma importância para o processo de extração de óleos essenciais, pois, através dessa caracterização, se torna possível expressar o rendimento do óleo essencial em base seca, ao descontar o teor de água do substrato. Assim, conforme visto pela equação 2, considera-se para a determinação do rendimento do OE uma base livre de umidade, a fim padronizar as análises e comparações (Santos, et al., 2004).

De forma exploratória, foi determinado o teor de umidade da matriz vegetal de eucalipto pela técnica de secagem em estufa, no Laboratório Prof. Carlos Henrique Ataíde, da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU). Foi aplicado o método 012/IV – Perda por dessecação -Secagem direta em estufa a 105 °C, descrito no Instituto Adolfo Lutz (2008, p.95). Assim, avaliou-se o teor de umidade das folhas frescas e previamente trituradas. Logo, através de um triturador de alimentos manual, triturou-se as folhas frescas de eucalipto, utilizando-se 10,01 g de amostra. Assim, após 24 horas de secagem em estufa, alcançou-se uma massa final de 2,85 g, conforme evidenciado na Figura 7. O teor de umidade obtido foi determinado pela equação 1, sendo o resultado alcançado de 69,26%.

Figura 8. Determinação da umidade por dessecação da folha de eucalipto fresca e triturada.



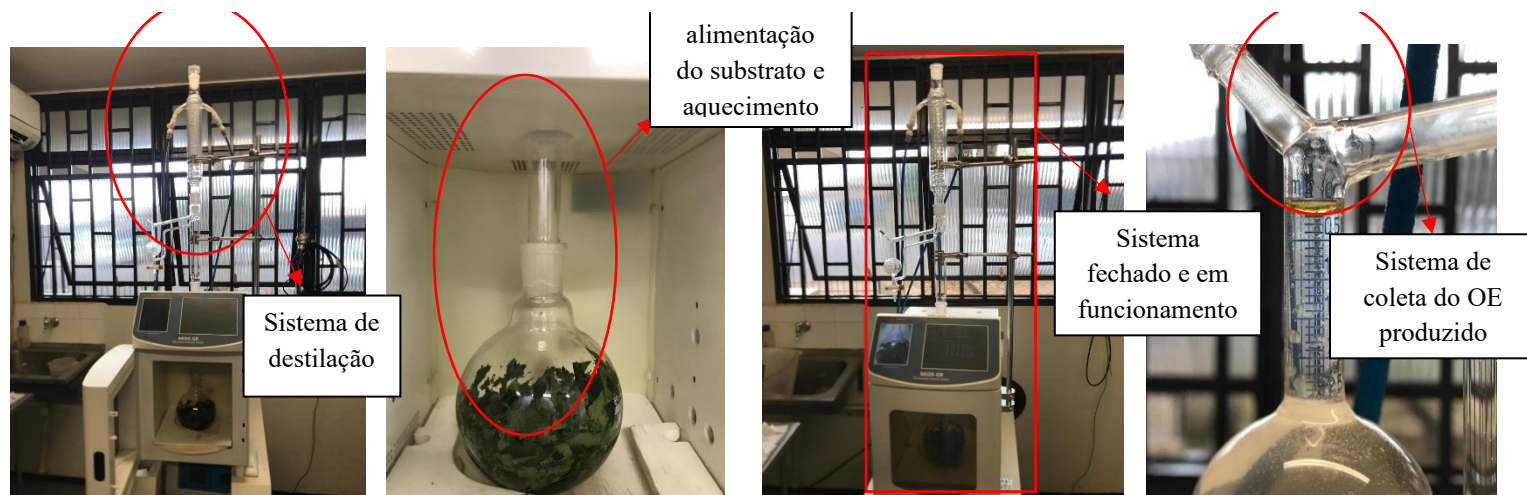
Fonte. O autor

Ribeiro (2018), ao aplicar a mesma metodologia para a determinação da umidade das folhas de eucalipto da espécie *E. urophylla*, alcançou como teor de umidade 70,4%. Logo, observa-se que o resultado de teor de umidade alcançado se mostrou próximo ao obtido por Ribeiro (2018) para a espécie em questão.

6.2. EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS

Abaixo, na figura 9, temos a exemplificação de uma unidade experimental de extração de óleo essencial assistida por micro-ondas, localizada nas instalações físicas do Laboratório Prof. Carlos Henrique Ataíde, da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU), sendo o equipamento de micro-ondas da marca Milestone, modelo NEOS-GR. Foi realizada uma avaliação experimental preliminar na unidade em questão, utilizando-se a razão sólido:solvente de 1:2.5, sendo empregada a água como solvente. A extração foi conduzida sob potência de 680 W, com duração de 63 minutos. Neste teste, obteve-se 5 minutos como tempo de indução, isto é, tempo necessário para o solvente atingir o ponto de bolha e iniciar o processo extrativo, e um rendimento de 0,87%, considerando-se a massa inicial da matriz vegetal, que foi de 100,95 g, com umidade determinada conforme descrito no Tópico 6.1.

Figura 9. Unidade experimental de extração de óleo essencial assistida por micro-ondas – FEQUI/UFU



Fonte. Elaboração própria.

7. ESTUDOS DE CASO

Neste capítulo, serão explorados os principais ensaios encontrados na literatura sobre o processo de extração do óleo essencial de eucalipto, tanto por metodologias convencionais (hidrodestilação e Soxhlet), quanto pela metodologia emergente de extração assistida por micro-ondas (MAE). Dessa forma, será avaliada a influência de parâmetros operacionais como temperatura, tempo de processo e potência do equipamento aplicados na técnica MAE, além de serem comparados os rendimentos obtidos pelas diferentes metodologias mencionadas.

7.1. Extração de óleo essencial de eucalipto

Em termos industriais, o óleo essencial de eucalipto sofre os mesmos processos extrativos que os demais óleos presentes no mercado, padecendo da influência da predominância das metodologias convencionais, como a própria hidrodestilação. Tendo conhecimento acerca dos inúmeros benefícios que este óleo traz para os diversos nichos do mercado globalizado, como

também a vasta disponibilidade de matéria-prima para sua extração, é de suma importância a determinação de técnicas que, assim como descrito nos objetivos deste trabalho, apresentem a máxima redução possível de solventes, o maior rendimento e eficiência energética para o processo.

7.2. Extração do óleo essencial de eucalipto via hidrodestilação (HD) e Soxhlet versus assistida por micro-ondas (MAE)

Ribeiro (2018) em sua dissertação avaliou a extração de três espécies de eucalipto, sendo elas *E. saligna*, *E. urophylla* e *E. urophylla x globulus*, e utilizou como metodologia para a extração via hidrodestilação o método 503/IV proposto pelo Instituto Adolf Lutz (2008). Logo, pesou-se de 200 g de folha de eucalipto em balanças semianalíticas e adicionou-as em balões volumétricos de fundo redondo com 500 mL de água destilada, sendo a razão de sólido:solvente de 1:2,5, mantendo assim o processo de extração por 6 horas. Após o procedimento, foi coletado o óleo e seco com sulfato de sódio anidro e determinado o rendimento por meio da equação 2. Logo, a autora obteve os respectivos resultados de rendimento em base seca para as espécies supracitadas: 0,59%, 0,70% e 2,16%, o que evidencia que no ensaio em questão a espécie *E. urophylla x globulus* apresentou o maior rendimento.

Em um artigo publicado por Cheng et. al., (2009), baseado na avaliação das ações larvicidas dos óleos essenciais de eucalipto, foi realizada a extração do óleo essencial da espécie *E. urophylla* por meio da hidrodestilação, através de 200 g de folhas frescas, e o resultado obtido no processo foi um rendimento de 2,19%, valor superior ao encontrado por Ribeiro (2018). Porém, sabe-se que inúmeros fatores podem influenciar no rendimento do óleo essencial de mesmas espécies, como idade da folha, manejo florestal e as condições experimentais aplicadas. Já Lucia et al., (2008), ao avaliar a bioatividade dos óleos essenciais de 12 espécies de eucalipto frente ao combate do *Aedes aegypti*, encontrou como rendimento para o OE de *E. globulus*, via hidrodestilação (HD), o resultado de 2,25%. Assim, em termos comparativos, Ribeiro (2018) apresentou uma análise dos resultados obtidos em seu estudo frente aos dados encontrados na literatura, conforme demonstrado na Tabela 7 a seguir. Logo, é possível observar que o rendimento obtido pela autora para a espécie de *E. urophylla*, se mostrou inferior quando comparado com o alcançado por Cheng et al., (2009). Fator elucidado pela pesquisadora acerca da possível relação

com a diferença entre fatores relevantes para o rendimento do processo, como o tipo de manejo florestal, condições experimentais aplicadas, idade da folha. Além disso, quando se avalia o rendimento do óleo essencial obtido pela espécie *E. saligna*, é notável a sua proximidade com os rendimentos alcançados por Zini (2002) e Estanislau *et al.*, (2009).

Tabela 7. Rendimento da extração do OE de eucalipto obtidos através da metodologia de hidrodestilação para diferentes espécies encontradas na literatura

Espécie	Rendimento OE (%)				
	Ribeiro (2018)	Zini (2002)	Estanislau <i>et al.</i> , (2001)	Cheng <i>et al.</i> , (2009)	Lucia <i>et al.</i> , (2008)
<i>E. saligna</i>	0,59	0,3 – 0,6	0,5	-	0,36
<i>E. urophylla</i>	0,70	-	-	2,19	-
<i>E. urophylla x globulus</i>	2,19	-	-	-	-
<i>E. globulus</i>	-	-	-	-	2,25

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018)

Para a técnica de MAE, Ribeiro (2018) adaptou um forno micro-ondas doméstico da marca Consul, modelo CMS30ABHNA, com capacidade de 25 L e frequência 2.450 MHz e potência máxima de 1.700 W, de modo a inserir uma junta cônica para acoplagem de um balão de fundo redondo de 1000 mL, um aparelho Clevenger para o refluxo de óleo e um condensador de bolas. Logo, a pesquisadora utilizou a combinação três razões sólidos:solventes, sendo elas 1:1, 1:1,5 e 1:2, três tempos de extração, sendo estes 20, 40 e 60 minutos e três potências, sendo tais 680, 850 e 1020 W. Assim, as amostras foram previamente trituradas e adicionadas aos balões volumétricos com suas respectivas condições sólido:solvente, sendo o solvente também a água destilada.

Assim, foi observado que o tempo de indução obtido nos ensaios de extração por micro-ondas reduziram de uma média de 22 minutos (tempo de indução obtido pelo método convencional via HD) para 6,28 minutos, o que evidencia a eficiência do aquecimento que a metodologia assistida por micro-ondas proporciona. Outrossim, em termos de potências aplicadas, a autora menciona que potências menores que 680 W evidenciaram aquecimentos ineficientes, enquanto

potências superiores a 1200 W denotaram sinais de superaquecimento e até perdas de compostos voláteis devido às limitações de resfriamento por parte do condensador aplicado.

Em relação a razão sólido:solvente, Ribeiro (2018) apresenta como resultados que o aumento da quantidade de solvente na extração resulta em um maior rendimento do OE *E. urophylla x globulus*, ponto avaliado por Tahkker, Parikh e Desai (2016), que mencionam em sua publicação a relação da água apresentar alta constante dielétrica e este parâmetro ser preponderante para a facilitação do aquecimento em sistemas submetidos ao aquecimento por micro-ondas. Já em termos da relação entre tempo:potência, foi observado que a combinação de baixa potência para tempos maiores de extração resultaram em maiores rendimentos do produto, fator demonstrado no trabalho publicado por Kusuma *et al.*, (2017). Assim, segundo os autores, as altas potências promovem o aumento do rendimento dos OE's devido a maior taxa de aumento da temperatura, porém com maiores riscos de perda de matéria, e, potências menores carecem de maiores tempos de exposição dos materiais vegetais, logo, maiores tempos de extração.

Portanto, Ribeiro (2018) conclui em sua dissertação, que as condições que maximizaram o rendimento do OE de *E. urophylla x globulus* foram as que aplicaram uma potência de 680 W, razão sólido:solvente 1:2 e tempo de extração 60 minutos, o que promoveu um rendimento de 1,8%. É notável que o rendimento máximo obtido na metodologia emergente foi 67% menor que o máximo rendimento obtido na metodologia convencional, de 2,7%, todavia, o tempo para obtenção de 1,8% de óleo essencial na técnica MAE foi 57% menor que na técnica HD, haja vista que pela hidrodestilação, o rendimento de 1,8% foi obtido em 140 minutos de processo, o que demonstra a alta eficiência de aquecimento que as micro-ondas apresentam ao promover o mesmo rendimento que a hidrodestilação em um tempo menor de processo.

Em última análise, Ribeiro (2018) apresenta os impactos ambientais e a análise energética que a técnica MAE traz consigo frente ao método HD. Assim, o consumo energético foi calculado utilizando a equação 3, em que P é a potência em W e t é o tempo de extração em horas, enquanto para a determinação da emissão de CO₂, considerou-se que 1 KWh proveniente de energia fóssil seja capaz de liberar 800 g de CO₂, assim como presente em literatura.

$$\text{Consumo energético} = \frac{P \times t}{1000} \quad (3)$$

Logo, para o método HD, a potência a ser considerada se trata da própria potência da manta de aquecimento do sistema de extração, enquanto que no método MAE, a potência é a definida no processo, assim, Ribeiro (2018) obteve o seguinte comparativo de resultados para o tempo de extração de 60min pela técnica MAE, presentes na Tabela 8, haja vista a possibilidade de comparação de rendimentos iguais:

Tabela 8. Comparativo dos impactos ambientais e consumo energético frente aos dois métodos em análise para o rendimento de 1,8% do OE de *E. urophylla x gobulus*

Parâmetros	Metodologia aplicada	
	HD	MAE
Rendimento (%)	1,8	1,8
Consumo energético (kWh)	1,12	0,68
Emissão de CO ₂ (g)	896	544

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018)

Por conseguinte, pelos dados apresentados na Tabela 8, nota-se que, quando comparado o método emergente frente ao método convencional, o emergente denota um consumo energético de 61% do consumo energético do convencional, o que consequentemente evidencia uma menor liberação de CO₂ para a atmosfera, o qual reitera a contribuição ambiental que a extração assistida por micro-ondas proporciona.

Além disso, Hashemi-Moghaddam *et al.*, (2013) em seu artigo acerca da avaliação da extração do óleo essencial de *Eucalyptus microtheca* e a comparação com o método convencional por hidrodestilação, apresentou a análise de 4 níveis de potências em um forno micro-ondas da marca Samsung, sendo essas 900 W, 700 W, 500 W e 300 W, e dois tempos de extração, 10 min e 20 min. Os autores utilizaram uma amostra de 50g de folhas frescas de eucalipto e realizaram a hidratação das folhas com 500 mL de água destilada em temperatura ambiente (25 °C) por 1 hora, após isso, drenaram o excesso de água, acondicionaram o material combinado ao equipamento Clevenger e após a extração, desidratou o fluido com sulfato de sódio e arquivou o composto em

frasco de cor âmbar na temperatura de 4 °C. Já para o método HD, foram utilizadas 50 g de amostra e 500 mL de água destilada até que não houvesse mais evidência de rendimento, sendo este, 180 min. Desse modo, os pesquisadores avaliaram o efeito da potência frente ao rendimento do óleo essencial, em que o rendimento foi expresso levando em consideração o volume de óleo coletado por massa de material vegetal original, sendo os resultados expressos pela Tabela 9.

Tabela 9. Impactos da potência de micro-ondas e do tempo no processo de extração do OE de *Eucalyptus microtheca*.

Método	Potência (W)	Rendimento (%)		
		Tempo (min)		
		10	20	180
HD	-	-	-	0,29
MAE	300	1,72	1,44	-
	500	1,10	1,10	-
	700	0,66	0,20	-
	900	0,20	-	-

Fonte: Adaptado de Hashemi-Moghaddam *et al.*, (2013).

Assim, mediante a Tabela 9, é notável que o método emergente denota resultados de rendimentos significativamente maiores quando comparado com o método convencional, além de evidenciar a possibilidade de se alcançar maiores volumes com tempos de extração menores, haja vista que, com 10 min de extração e em baixa potência, obteve-se um rendimento 86% maior que o alcançado pela hidrodestilação. Outrossim, os autores enfatizam em seu ensaio que o baixo rendimento para altas potências podem estar associado a perda de alguns compostos voláteis ao longo do processo de extração. Em relação à qualidade do óleo essencial (OE), Hashemi-Moghaddam *et al.*, (2013), por meio da cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), identificaram 18 compostos no OE extraído via hidrodestilação, o que representa 94,04% da composição total do óleo, sendo os majoritários: 1,8-cineol (48,51%), aromadendreno (18,31%) e α -pineno (9,47%). Para o OE obtido por extração assistida por micro-ondas (MAE), foram identificados 34 compostos, o que caracteriza 89,07% da total composição do óleo, com destaque para 1,8-cineol (42,10%), aromadendreno (19,5%) e all-o-aromadendreno (5,41%),

sendo o α -pineno o quinto mais abundante (3,67%). Os autores concluem que a composição obtida por ambos os métodos apresenta grande similaridade, indicando que a qualidade do óleo é preservada na técnica emergente. Ademais, a quantidade de componentes identificados via GC-MS no óleo extraído pela técnica MAE foi maior quando comparado com o extraído via HD, fator associado pelos autores à eficiência no processo de aquecimento que as micro-ondas apresentam. Assim, o aquecimento proporcionado pela técnica de micro-ondas é mais rápido e eficiente, o que facilita a liberação dos compostos voláteis e reduz as chances de perdas ou degradação térmica desses componentes, como pode ocorrer em processos mais longos, a exemplo da hidrodestilação

Tran *et al.*, (2020), em um estudo acerca da otimização da extração do óleo essencial de *Eucalyptus globulus* via micro-ondas, também investigaram o efeito das variáveis tempo e potência frente ao rendimento do OE. Os autores utilizaram um aparelho micro-ondas doméstico adaptado com um Clevenger, alimentado com material vegetal fresco triturado e de água como solvente, em uma proporção de 3:1 (mL de água destilada / g de material vegetal fresco). Foram analisados 7 tempos de extração diferentes para uma potência fixa de 450 W, e 5 potências distintas para um tempo fixo de 60 min, conforme evidenciado na Tabela 10.

Tabela 10 . Efeitos da potência de micro-ondas e do tempo no processo de extração do OE de *Eucalyptus globulus* frente ao rendimento.

Potência (W)	Tempo (min)						
	20	30	40	50	60	70	80
100	-	-	-	-	1,4	-	-
200	-	-	-	-	1,9	-	-
300	-	-	-	-	2,3	-	-
450	1	1,2	1,4	2,5	2,65	2,6	2,5
600		--	-	-	2,4	-	-

Fonte: Adaptado de Tran *et al.*, (2020)

Desse modo, com base nos resultados expostos acima, quanto ao tempo de extração, nota-se que o aumento do tempo proporcionou uma elevação gradual do rendimento do óleo essencial para a potência de 450 W, porém, quando ultrapassada a casa dos 60 minutos, observa-se uma

redução. Os autores citam que essa queda pode ser justificada pela possível degradação dos compostos voláteis após um excessivo tempo de exposição ao calor. Já em termos do efeito da potência, nota-se também o aumento do rendimento com a progressão de tal variável, porém, quando se ultrapassa os 450 W, há uma redução, fato que os autores associam, assim como Hashemi-Moghaddam *et al.*, (2013), a possível degradação e decomposição dos compostos voláteis. Desse modo, os autores concluíram que as melhores condições para o rendimento do OE de *Eucalyptus globulus* na razão de sólido:solvente 3:1 é 450 W de potência e o tempo de extração de 60 min. Acerca da composição do produto extraído via MAE, Tran *et al.*, (2020), através do uso da GC-MS, conseguiu quantificar 35 compostos, 99,86% de sua composição total, e obteve como principais constituintes 1,8-cineol (38,77%), α -pineno (14,94%) e α -Terpineol (6,35%). Assim, observa-se que o 1,8-cineol (eucaliptol) segue sendo o principal componente químico, além de seus percentuais representativos estarem próximos aos encontrados por outros autores, como Hashemi-Moghaddam *et al.*, (2013).

Mais ainda, Chamali *et al.*, (2019), propuseram em seu estudo baseado na avaliação de um novo processo para a extração “verde” do óleo essencial de eucalipto, a comparação entre o rendimento, custo e consumo energético do OE de eucalipto da Tunísia extraído via HD versus MAE. Assim, os pesquisadores utilizaram as folhas de eucalipto trituradas e peneiradas, com tamanho médio de partículas de 1,5 mm, para suas análises. Desse modo, para o método da hidrodestilação, utilizou-se um aparelho Clevenger com 50 g de amostra, 600 mL de água e um tempo processual de 90 min. Já na extração assistida por micro-ondas, fez uso de um forno micro-ondas doméstico em potências variadas, como 300 W, 450 W, 600 W, 700 W e 800 W, a fim de determinar aquela potência que evidenciasse o melhor rendimento no menor tempo de extração.

Por conseguinte, Chamali *et al.*, (2019), apesar de não apresentarem os valores obtidos de rendimento, citam que observaram que com o aumento da potência se fez possível obter a redução do tempo de extração. Logo, as melhores condições encontradas foram a potência de 600 W e o tempo de extração de 25 min, parâmetros determinados com base na obtenção de um rendimento semelhante ao encontrado nos 90 min de extração por hidrodestilação. Assim, os autores citam que as primeiras gotículas obtidas de OE pelo método MAE se deram em 10 min de extração, enquanto, para a técnica HD, esta foi obtida 19 min após o início do processo. Desta maneira, fica evidente que o método MAE foi 3 vezes mais rápido que o método HD, justamente devido a

eficiência da transferência energética que a metodologia emergente oferece para o solvente utilizado, a água, e para a matriz vegetal, o eucalipto. Os autores avaliaram também a composição química do OE através da GC-MS. Para a metodologia convencional, foram identificados 30 componentes, e para a emergente, 28, o que representa 99,97% e 99,98%, respectivamente, da composição total do óleo. Assim, o constituinte majoritário seguiu sendo 1,8-cineol, sendo sua composição para a técnica HD 15,31% e para a técnica MAE 25,65%. Portanto, os autores mencionam que a extração por micro-ondas apresentou um óleo essencial de melhor qualidade quando comparado com o obtido pela hidrodestilação, pois promoveu maior concentração do componente principal e de maior valor comercial, o 1,8-cineol.

Para fins comparativos, em termos da utilização de solventes orgânicos no processo de extração do óleo essencial, Perez & Rosa (2012), ao pesquisarem sobre a influência da temperatura do ar de secagem no rendimento do óleo essencial da folha de eucalipto, obtiveram o rendimento do OE em base úmida de 3,69%. A extração foi realizada em *Soxhlet*, utilizando hexano como solvente durante 8 horas de processo até que se obtivesse rendimento constante. Assim, mediante os resultados expressos acima de extrações realizadas via micro-ondas, nota-se a vantagem da técnica emergente sem o uso de solventes apolares, pois como o próprio resultado apresentado por TRAN *et al.*, (2020), com 1/8 do tempo de processo aplicado por Perez & Rosa (2012), se fez possível alcançar 71,8% do rendimento obtido pelo método que fez uso de hexano.

Em 2015, Machado & Nascimento, estudaram a extração de óleo essencial e de compostos bioativos das folhas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*), ao realizar a extração do óleo essencial de *Eucalyptus citriodora* via *Soxhlet*, também utilizando hexano como solvente. Desse modo, pesou-se 10 g de amostra seca, que, após depositada no tubo extrator, recebeu 200 mL de solvente. A extração ocorreu por 2 h até que se obtivesse rendimento constante, e, posteriormente, foi seca em rotoevaporador e colocada em estufa por 30 min para a remoção dos traços de solventes. Em termos de resultados, Machado & Nascimento (2015), alcançaram o valor de 3,16% em base úmida, resultado próximo alcançado por Perez & Rosa (2012), porém, com ¼ do tempo de extração aplicado. Apesar disso, com base nas melhores condições de processos expostas acima, nota-se a possibilidade de se obter pela técnica MAE, aproximadamente 83% do rendimento obtido via *Soxhlet*, empregando metade do tempo e solventes como a água, que não apresentará impactos ambientais e ecológicos, após os processos extrativos.

Por fim, salienta-se que, conforme supracitado, a progressão da potência pode promover sim o aumento do rendimento do óleo essencial, não somente devido ao aumento da energia térmica obtido pela irradiação das micro-ondas, mas também devido a melhora na transferência de massa, todavia, a alta potência nem sempre será sinônimo e garantia de alto rendimento. Outrossim, em relação ao tempo de processo, observa-se que longos tempos processuais podem proporcionar melhores rendimentos, desde que não estejam combinados com altas potências, devido ao risco de superaquecimento da matriz vegetal e degradação de compostos voláteis. Assim, a combinação de baixas potências e maiores tempos de extração promovem um aquecimento mais assertivo e uniforme, o que pode acarretar um maior rendimento. Porém, assim como mencionado pelos autores acima, há de se cuidar para que esse tempo não seja longo demais, haja vista o risco de perda de compostos voláteis. Já em termos da razão sólido:solvente, ao utilizar a água como solvente, devido a sua alta constante dielétrica e consequente afinidade pelas micro-ondas, e como resultado, promove um aquecimento mais homogêneo e eficiente, tem-se o aumento do rendimento do OE com o aumento da razão.

Além disso, é notável o quanto a metodologia emergente denota eficácia, especialmente quando comparada com as técnicas que fazem o uso de solventes apolares. Assim, pela tabela 11, é possível notar os benefícios que a extração assistida por micro-ondas apresenta frente as demais técnicas, sendo ecologicamente mais responsável, mais eficiente em termos de aquecimento, além de garantir a ótima qualidade do óleo quando comparada com a extração por hidrodestilação.

Tabela 11. Síntese comparativa das principais técnicas de extração de óleo essencial de eucalipto

Característica	Soxhlet	Hidrodestilação	Micro-ondas
Princípio	Extração por refluxo de solvente	Arraste a vapor	Aquecimento por micro-ondas
Tipo de Solvente	Orgânico (Hexano, etanol e outros)	Água	Aplicável com ou sem solventes
Material Vegetal	Seco	Fresco ou seco	Fresco ou seco
Qualidade do Óleo	-	1,8 – cineol ~31,91%	1,8 – cineol ~35,25%
Tempo de Extração	Longo	Moderado	Muito rápido
Eficiência	Alta, a depender do solvente	Moderada	Alta
Consumo Energético	Alto	Alto	Baixo
Degradação Térmica	Possível	Possível	Baixa
Sustentabilidade	Baixa (devido ao uso de solventes tóxicos e alto consumo energético)	Média (devido ao alto consumo energético)	Alta (devido ao menor uso de solventes e menor consumo energético)

Fonte: Elaboração própria com base em Ribeiro (2018), Hashemi-Moghaddam *et al.*, (2013), Tran *et al.*, (2020), Chamali *et al.*, (2019), Perez & Rosa (2012) e Machado & Nascimento (2015)

8. CONCLUSÃO

Após a realização de uma detalhada revisão acerca do processo de extração de óleo essencial de eucalipto e a aplicação da técnica assistida por micro-ondas, se faz possível perceber a notável existência de diversos fatores que impactam diretamente não somente o rendimento do óleo essencial, como também suas características e qualidades. Identificar os melhores parâmetros de processos se torna de suma importância para o progresso dessa área em crescimento mundial, assim, avaliar as melhores condições de potência, tempo de extração e razão sólido:solvente são indispensáveis.

O estudo promoveu uma exploração sobre a comparação entre as técnicas convencionais aplicadas para a extração dos óleos essenciais, sendo estas a hidrodestilação e a *soxhlet*, e a técnica emergente, extração assistida por micro-ondas, o que em linhas gerais, permite a conclusão de que

o método MAE promove um processo de aquecimento assertivo e eficiente, especialmente quando avaliada a redução do tempo de indução entre as técnicas. Outrossim, ressalta-se que devido a eficiência supracitada, o rendimento da extração do óleo essencial de eucalipto pode ser obtido de forma mais rápida através das micro-ondas quando comparada com o método HD ou com o uso de solventes apolares, o que influencia os casos de planejamento para produções em larga escala e industriais. Além disso, cabe salientar que a técnica MAE demonstra a possibilidade de redução significativa nos impactos ambientais, haja vista a oportunidade de se extrair o óleo essencial sem o uso de solventes orgânicos que afetam o meio ambiente no pós-tratamento e o gasto energético para que o processo ocorra. Ressalta-se também que a metodologia emergente garante a qualidade do óleo essencial, especialmente quando comparada com a técnica de hidrodestilação, conservando o seu constituinte majoritário, 1,8-cineol.

Por fim, nota-se ainda a carência de estudos acerca da extração do OE de eucalipto, especialmente com a aplicação de micro-ondas, a fim de elucidar questões acerca da melhor combinação de parâmetros operacionais que maximizem o rendimento e minimizem, a qualidade do óleo e o consumo energético. Tal cenário contrasta com a vasta disponibilidade dessa planta em solo brasileiro e as poucas destinações que as folhas, consideradas resíduos agroindustriais apresentam, o que com as pesquisas podem agregar valor à matriz vegetal em questão. Ademais, ressalta-se a necessidade de aprimoramento dos ensaios a fim de determinar a melhor combinação de parâmetros operacionais, como também a definição acerca de possíveis melhoramentos no rendimento através de pré-tratamentos aplicados à matéria-prima, como a realização de análises granulométricas, análises de metodologias sem a aplicação de solventes, e, a avaliação da viabilidade econômica do processo de extração assistida por micro-ondas em escala industrial. Assim, mediante o supracitado, reforça-se a necessidade de maiores investimentos para explorar as diversas possibilidades de avanço que a extração assistida por micro-ondas pode promover para a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A HISTÓRIA DO MICRO-ONDAS - Coopermiti. Disponível em:

<https://coopermiti.com.br/museu/a-historia-do-micro-ondas/>. Acesso em: 26 jul. 2023.

AFIN KO POLÍMEROS. **O que é o ensaio de termogravimetria (TGA)**. Disponível em:

<https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-termogravimetria-tga/>. Acesso em: 03 out. 2024.

SANTOS, Alberdan Silva; ALVES, Sérgio de Mello; FIGUEIRÊDO, Francisco José Câmara; NETO, Olinto Gomes da Rocha. **Descrição de sistema e de métodos de extração de óleos essenciais e determinação de umidade de biomassa em laboratório**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004.

BARBOZA, A. C. R. N. et al. **Aquecimento em forno de microondas / desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais**. Química Nova, v. 24, n. 6, p. 901–904, nov. 2001.

BERTOLAZZI, M.; SANTOS, A. C. A. dos; ROSSATO, M.

Influência do processo de extração na composição química de óleos essenciais de *Schinus molle* L. e *Schinus terebinthifolius* Raddi. In: XIII Encontro de Jovens Pesquisadores da UCS, 2005, Caxias do Sul. *Resumos dos Trabalhos*. Caxias do Sul: EDUCS, 2005. v. 1, p. 270.

BIASI, L. A.; DESCHAMPS, C. **Plantas aromáticas: do cultivo à produção de óleo essencial**. Curitiba: Layer Studio Gráfico e Editora Ltda, 2009.

BRITO BARBOSA, V. **Caracterização físico-química do óleo essencial de sete espécies de Piper e revisão bibliográfica sobre o potencial biopesticida dessas espécies**. 2021.

BUSTAMANTE, J. et al. **Microwave assisted hydro-distillation of essential oils from wet citrus peel waste**. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 598-605, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.108.

Chamali, Saousan et al., **A new process for green extraction of essential oil from Eucalyptus oleosa: Microwave-assisted hydro distillation**. 10.48347/IMIST.PRSM/ajmap-v5i3.18666, 2019.

CHEMAT, F.; CRAVOTTO, G. **Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds.** [s.l: s.n.].

CHEMAT, F. et al. **Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction.** Innovative Food Science and Emerging Technologies, [S.l.], v. 41, p. 357–377, 2017.

CHEN, F.; ZU, Y.; YANG, L. **A novel approach for isolation of essential oil from fresh leaves of *Magnolia sieboldii* using microwave-assisted simultaneous distillation and extraction.** Separation and Purification Technology, v. 154, p. 271-280, 2015.

CHENG, S. et al. **Chemical compositions and larvicidal activities of leaf essential oils from two eucalyptus species.** Bioresource Technology, v. 100, p. 452-456, 2009.

DAVID, E. F. S.; BOARO, C. S. F. **Translocação orgânica, produtividade e rendimento de óleo essencial de *Mentha piperita* L. cultivada em solução nutritiva com variação dos níveis de N, P, K e Mg.** Rev. Bras. Pl. Med., p. 236–246, 13 maio 2009.

DORAN, J. C. **Commercial sources, uses, formation, and biology.** In: BOLAND, D. J.; BROPHY, J. J.; HOUSE, A. P. N. Eucalyptus leaf oils, use, chemistry, distillation and marketing. Melbourne: Inkata, 1991. p. 11-28.

ESSENCE FLORA. **Óleo essencial.** 2023. Disponível em: <https://essenceflora.com.br/oleo-essencial>. Acesso em: 03 fev. 2025.

E-CYCLE. **Óleos essenciais.** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/oleos-essenciais/>. Acesso em: 12 fev. 2024.

FERNANDO WENTZ BRUM; TIAGO PIANESSO; VERA MARIA RODRIGUES. **Extração do óleo essencial de eucalipto.** V Simpósio de Alimentos, 25 set. 2007.

FILIPPIS, F. M. de. **Extração com CO₂ supercrítico de óleos essenciais de Hon-sho e Ho-sho: experimentos e modelagem.** lume.ufrgs.br, 2001.

GOUVEIA RIBEIRO, L. **Extração assistida por micro-ondas de óleo essencial de folhas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *globulus*)**. Porto Alegre, RS: [s.n.], 2018.

HASHEMI-MOGHADDAM, H. *et al.* **Microwave accelerated distillation of essential oils from the leaves of *Eucalyptus microtheca*: optimization and comparison with conventional hydrodistillation.** *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, v. 16, n. 4, p. 506–512, 2013.

INSTITUTO ADOLF LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolf Lutz, 2008.

JING, X. *et al.* **Heating strategies for the system of PP and Spherical Activated Carbon during microwave cracking for obtaining value-added products.** *Fuel Processing Technology*, v. 199, p. 106265, mar. 2020.

KUSUMA *et al.*, H. S.; MAHFUD, M. **The extraction of essential oils from patchouli leaves (*Pogostemon cablin* Benth) using a microwave air-hydrodistillation method as a new green technique.** *RSC Advances*, v. 7, p. 1336-1347, 2017.

KUSUMA, H. S. *et al.* **Extraction of essential oil from fresh basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) using solvent-free microwave extraction method: Extraction parameter optimization, electric consumption, and CO₂ emission study.** *Food and Humanity*, v. 1, p. 1055–1063, dez. 2023.

LETELLIER, M.; BUDZINSKI, H. **Microwave assisted extraction of organic compounds.** Available from: <http://dx.doi.org/10.1051/analusis:1999116>, v. 27, 1 abr. 1999.

LIMA, C. G. da R. *et al.* **Atributos físico-químicos de um Latossolo do Cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 1, p. 163–173, 2010.

LUCIA, A. *et al.* **Yield, chemical composition, and bioactivity of essential oils from 12 species of *Eucalyptus* on *Aedes aegypti* larvae.** *Entomologia Experimentalis et Applicata*, v. 129, p. 107-114, 2008.

MACHADO, L. M. M.; NASCIMENTO, R. S.; ROSA, G. S. **Estudo da extração de óleo essencial e de compostos bioativos das folhas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*)**. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 754-24158-171746, fev. 2015.

MILLIPORE. **1,8-Cineole**. Disponível em: https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/18-Cineole,MDA_CHEM-843788. Acesso em: 17 out. 2024.

MOGI GLASS. **Aparelho de Clevenger completo**. 2023. Disponível em: <https://vidrarias.mogiglass.com.br/geral-vidrarias-de-laboratorio/aparelho-de-clevenger-completo>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MOURA, et al., **Propriedades, extração e usos do óleo essencial do eucalipto: uma análise bibliométrica**. 9º Congresso Florestal Brasileiro, v. 1, n. 1, p. 203–206, 2022. DOI: 10.55592/CFB.2022.7587762

PASQUON, I.; ZANDERIGHI, L. **La Chimica Verdi**. Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1987.

RIBEIRO, D. S.; PAIVA, G. M.; BESSA, A. M. D.; SILVA, D. L. **Resíduos florestais: panorama e possibilidades de aproveitamento no Brasil**. Research, Society and Development, v. 9, n. 11, p. e12191110775, 2020.

RICARDO, Larissa Perez; ROSA, Gabriela Silveira da. **Influência da temperatura do ar de secagem no rendimento do óleo essencial da folha de eucalipto**. *Universidade Federal do Pampa*, Bagé, RS, 2012.

RAMOS, André Santos Ferreira Tavares. **Estudo da moagem e impacto da torrefação em resíduos da indústria de Eucalipto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

SANTANA, A. L.; RODRIGUES, A. M. C. **Sustentabilidade na extração de óleos essenciais: uma abordagem sobre técnicas convencionais e alternativas**. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, v. 21, n. 2, p. 171–179, 2019.

SANTORA, E.; PENTEADO, J. F. JUNIOR; GOULART, I. C. G. R. **Transferência de Tecnologia Florestal**. 1a ed. Colombo, PR - Brasil: Embrapa, 2014.

SARTOR, R. B. **Modelagem, Simulação e Otimização de uma Unidade Industrial de Extração de Óleos Essenciais por Arraste a Vapor**. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SERAFINI, Luciana Atti et al. **Extrações e aplicações de óleos essenciais de plantas aromáticas e medicinais**. Caxias do Sul: Educs, 2002.

SILVA, A. M.; PEREIRA, J. R. **Levantamento e análise de dados em ciências exatas e da terra**. In: **ENCONTRO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA**, 2012, São Paulo. Anais... São Paulo: Conhecer, 2012.

SILVA, J. P.; OLIVEIRA, L. A. A.; COSTA, M. R. **Caracterização e Análise de Propriedades de Catalisadores em Reações de Polimerização**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA**, 2015, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2015. p. 334-339.

SILVEIRA, A. C; LAZZAROTTO, M. **Óleos essenciais de espécies de eucaliptos. O eucalipto e a Embrapa: Quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**, p. 723–750, 2021.

SILVEIRA, A.; JOSÉ, V.; BRITO, O. **Óleo essencial de eucalipto**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo. Documentos florestais – ISSN 0103-4715, 2003.

SOUZA, S. A. M.; MEIRA, M. R.; FIGUEIREDO, L. S.; MARTINS, E. R. **Óleos essenciais: aspectos econômicos e sustentáveis**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 6, n. 10, p. 1-11, 2010.

THAKKER, M. R.; PARIKH, J. K.; DESAI, M. A. **Microwave assisted extraction of essential oil from the leaves of Palmarosa: multi-response optimization and predictive modelling**. Industrial Crops and Products, v. 86, p. 311-319, 2016.

TORA BRASIL. **O eucalipto**. Disponível em: <https://torabras.com.br/o-eucalipto>. Acesso em: 03 out. 2024.

TRAN, T.H. et al., **Optimization of Microwave-assisted extraction and compositional determination of essential oil from leaves of Eucalyptus globulus**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 736. 022040. 10.1088/1757-899X/736/2/022040, 2020.

TSUKUI, A.; REZENDE, C. M. **Extração assistida por micro-ondas e química verde**. Revista Virtual de Química, v. 6, n. 6, p. 1713–1725, 10 nov. 2014.

YVY BRASIL. **O que são óleos essenciais? Entenda os benefícios desse produto**. Disponível em: <https://vyvbrasil.com/blog/o-que-sao-oleos-essenciais-entenda-os-beneficios-desse-produto/>. Acesso em: 30 ago. 2024.

ZHAI, Di et al. **Dynamic absorption efficiency of paracetamol powder in microwave drying. High Temperature Materials and Processes**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 715–725, 2019. DOI: 10.1515/htmp-2019-0015.

ZHAO, S.; ZHANG, D. **Supercritical CO₂ extraction of Eucalyptus leaves oil and comparison with Soxhlet extraction and hydro-distillation methods**. Separation and Purification Technology, v. 133, p. 443–451, 8 set. 2014.