

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Gestão e Tecnologias
Industriais

CARLOS ALBERTO TOSTA MACHADO

**UMA PROPOSTA DE MELHORIA DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE NA
DESTILAÇÃO DE ÓLEOS ESSENCIAIS BASEADA EM TECNOLOGIAS DIGITAIS
INTELIGENTES**

Salvador
2022

CARLOS ALBERTO TOSTA MACHADO

**UMA PROPOSTA DE MELHORIA DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE NA
DESTILAÇÃO DE ÓLEOS ESSENCIAIS BASEADA EM TECNOLOGIAS DIGITAIS
INTELIGENTES**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson.
Coorientadora: Prof^a Dr^a Bruna Aparecida Souza Machado.

Salvador

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

M149p Machado, Carlos Alberto Tosta

Uma proposta de melhoria de produtividade e qualidade na destilação de óleos essenciais baseada em tecnologias digitais inteligentes/ Carlos Alberto Tosta Machado. – Salvador, 2022.

153 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Bruna Aparecida Souza Machado.

Tese (Doutorado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2022.

Inclui referências.

1. Tecnologias digitais inteligentes. 2. Óleos essenciais. 3. Destilação. 4. Caminhos preferenciais de vapor. 5. Condensação. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Lepikson, Herman Augusto. III. Machado, Bruna Aparecida Souza. IV. Título.

CDD 660.2

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Doutorado em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Doutorado, intitulada “**Uma proposta de melhoria de produtividade e qualidade na destilação de óleos essenciais baseada em tecnologias digitais inteligentes**” apresentada no dia 21 de novembro de 2022, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:

Assinado eletronicamente por:
Herman Augusto Lepikson
CPF: ***.545.375-**
Data: 23/11/2022 08:26:43 -03:00



Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson
SENAI CIMATEC

Coorientadora:

Assinado eletronicamente por:
Bruna Machado
CPF: ***.830.795-**
Data: 27/11/2022 19:03:57 -03:00



Prof.^a Dr.^a Bruna Aparecida Souza Machado
SENAI CIMATEC

Membro Interno:

Assinado eletronicamente por:
Edna dos Santos Almeida
CPF: ***.903.998-**
Data: 23/11/2022 08:55:36 -03:00



Prof.^a Dr.^a Edna dos Santos Almeida
SENAI CIMATEC

Membro Interno:

Assinado eletronicamente por:
Fernando Luiz Pellegrini Pessoa
CPF: ***.470.585-**
Data: 23/11/2022 08:53:18 -03:00



Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa
SENAI CIMATEC

Membro Externo:

Assinado eletronicamente por:
Carmen Lucia Queiroga
CPF: ***.114.398-**
Data: 23/11/2022 14:35:46 -03:00



Prof.^a Dr.^a Carmen Lucia Queiroga
UNICAMP

Membro Externo:

Assinado eletronicamente por:
José Valentim dos Santos Filho
CPF: ***.755.404-**
Data: 23/11/2022 08:25:32 -03:00



Prof. Dr. José Valentim dos Santos Filho
UFRB

*Dedico este trabalho a
Mãe, trabalhadora incansável, sábia e exemplo de amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos filhos, Nathalia e Andrey, tão brilhantes. Aos meus pais, João e Antônia que, dentro da mais pura simplicidade, me ensinaram a ter fé em mim, alegria de viver, coragem e esperança em um futuro que eu mesmo teria que criar. À querida Magda, que durante todos estes anos manteve o espírito de união comigo, com nossos filhos e com minha mãe, em uma entrega e doçura cuja grandeza demorarei muito para entender e aprender. Aos meus tios Conceição e Joaquim pelo muito que fizeram por mim.

À querida Andreia que me incentivou a adentrar a trilha acadêmica na UFRB e na pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson, tão competente, tão motivador, tão inspirador, que conseguiu levar um engenheiro mecânico, com experiência corporativa industrial, até à conclusão de um doutorado. À minha coorientadora, Profa. Dra. Bruna Machado, que abriu portas, construiu pontes e mostrou caminhos em vários momentos difíceis da pesquisa.

Ao Matheus, jovem pesquisador, pelo convívio e cooperação no período das atividades experimentais, em Morro do Chapéu – BA. Ao Paulo, engenheiro mecânico, meu ex-aluno, que confeccionou partes mecânicas fundamentais para a pesquisa. Ao Adalicio e ao Jefferson que trabalharam na montagem da automação e programação do software de controle. Ao “Seu” Flamarion, de Morro, que nos auxiliou nas montagens, do alto dos seus 92 anos. À Dona Inezita, que preparava nossas refeições lá na fazenda.

À empresa Linax, nas pessoas de Nilson e José Roberto, verdadeiros amigos, que participaram com equipamentos e verbas para a pesquisa e discussões muito proveitosas. À Akã, nas pessoas de João, Eugênio e Ana, que disponibilizaram total acesso à empresa. À Limatec que confeccionou uma unidade de água gelada a preço de custo. Ao amigo Bima, que confeccionou a tampa nova do vaso extrator. À Srta. Mirra, do laboratório da UFMG que abriu as portas para as análises cromatográficas naquela Universidade.

À FAPESB que me concedeu a bolsa para cobrir os custos do doutorado. Gratidão ao Governo do Estado da Bahia.

O trabalho torna o tempo meu amigo.

C.A.T.M.

RESUMO

Os processos industriais para extração de óleos essenciais por destilação a vapor d'água apoiam-se em sistemas produtivos com significativo potencial de atualização tecnológica. Apresentam variações no ciclo extrativo, incertezas de rendimento mássico e energético e ocorrências operacionais indesejadas, não detectadas e, portanto, não corrigidas. Neste segmento, estudos sobre aplicação de tecnologia não são abundantes, o que oportunizou a presente pesquisa. Grande parte desta indústria é formada por pequenos e médios produtores, com instalações caracterizadas pela falta de instrumentação e sistemas de controle básicos. A presente tese tem por objetivo criar uma proposta para melhoria deste processo extrativo, através da adição de tecnologias digitais inteligentes, tornando-o flexível, adaptativo, autoconfigurável e com uma operação que resulte em melhores rendimentos e menor consumo de água, que gere produtos não degradados por prolongada exposição térmica e que tenha o tempo de extração e tecnicamente determinado. A etapa experimental, realizada em equipamento em escala piloto, na extração de capim-limão (*Cymbopogon citratus*), com capacidade aproximada para 10 kg de erva, obtiveram melhoria média superior a 24% no rendimento em massa, redução superior a 50% no tempo de processo e no consumo de energia. A qualidade do produto, evidenciada por análises cromatográficas, revelou aumento de até 10% no teor de Citral, componente de maior interesse neste óleo essencial. Sensores instalados de forma a obter dados de temperatura diretamente da massa vegetal, um sistema de processamento de imagem e o controle e monitoramento da condensação permitiram a detecção e correção de caminhos preferenciais de vapor, a finalização automática do processo no ponto econômico e a condensação de maiores teores de Citral, respectivamente. A etapa experimental permitiu um melhor entendimento do processo, possibilitando demonstrar significativos ganhos de produtividade e de melhoria da qualidade. Maiores rendimentos e melhor qualidade são ganhos potenciais para esta indústria com custos de produção reduzidos e maior valor.

Palavras-chave: tecnologias digitais inteligentes, óleos essenciais, destilação, caminhos preferenciais de vapor, duração econômica, controle, condensação.

ABSTRACT

A PROPOSAL FOR PRODUCTIVITY AND QUALITY IMPROVEMENTS IN ESSENTIAL OIL DISTILLATION BASED ON INTELLIGENT DIGITAL TECHNOLOGIES

Essential oil steam distillation extraction processes rely on production systems with significant potential for technological updating. They present variations in the extractive cycle, mass and energy yield uncertainties and undesired operational occurrences, not detected and therefore, not corrected. In this area, studies on the application of technology are not abundant, which provided the opportunity for this research. A large part of this industry is formed by small and medium size producers, with facilities characterized by the lack of instrumentation and basic control systems. The present thesis aims to create a proposal to improve this extractive process, through the addition of intelligent digital technologies, making it flexible, adaptive, self-configurable and that the operation results in better yields, less water consumption, which generates non-degraded products by prolonged thermal exposure and have the extraction time technically determined. The experimental activities, carried out in a pilot-scale equipment, having lemongrass (*Cymbopogon citratus*) as raw material, with an approximate capacity of 10 kg of green matrix, obtained an average improvement greater than 24% in mass yield, a reduction greater than 50% in process duration and energy consumption. The quality of the product, evidenced by chromatography, revealed an increase of up to 10% in the Citral content, a component of greatest interest in this essential oil. Sensors installed in order to obtain temperature data directly from the plant mass, an image processing system and the control and monitoring of condensation allowed the detection and correction of steam channels (channels) through the raw material, the automatic termination of the process at the economic point and the condensation of higher levels of Citral, respectively. The experimental phase allowed a better understanding of the process, making it possible to demonstrate significant gains in productivity and quality improvement. These higher yields and better quality are potential gains for this industry with reduced production costs and higher value.

Keywords: smart digital technologies, essential oils, steam distillation, channeling, economic duration, control, condensation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico da destilação a vapor d'água.	19
Figura 2. Curva de extração: fases de crescimento e estabilização de volume.	29
Figura 3. Touceria de capim-limão (<i>Cymbopogon citratus</i>).....	30
Figura 4. Processo básico: extração de OE por arraste a vapor d'água.	37
Figura 5. Princípios da extração sustentável.....	<u>4948</u>
Figura 6. Arquitetura de controle.	<u>5857</u>
Figura 7. Controle do rendimento de extração com processamento de imagem. .	<u>5958</u>
Figura 8. Interação entre os espaços: operacional físico e digital.	<u>6059</u>
Figura 9. Gêmeo digital: interação entre os meios real e virtual.....	<u>6160</u>
Figura 10. Caminhos preferenciais de vapor (<i>channeling</i>)	<u>6564</u>
Figura 11. Blocos da abordagem proposta.	<u>6665</u>
Figura 12. Visão da proposta da tese.....	<u>6766</u>
Figura 13. Fluxograma: sequência da pesquisa.....	<u>7068</u>
Figura 14. Esquema do arranjo físico original.	<u>7270</u>
Figura 15. Conjunto de destilação - planta piloto	<u>7270</u>
Figura 16. Sequência operacional no modo não-automático	<u>7371</u>
Figura 17. Processo extrativo básico em operação.....	<u>7471</u>
Figura 18. Diagrama de processo e instrumentação.....	<u>7472</u>
Figura 19. Fluxograma das bateladas com tecnologia embarcada.	<u>7573</u>
Figura 20. Conceito antigo e novo da tampa do vaso extrator.	<u>7674</u>
Figura 21. Arquitetura de controle de processo.....	<u>7876</u>
Figura 22. Tela principal do SCADA.....	<u>7977</u>
Figura 23. Unidade de água gelada (<i>chiller</i>).....	<u>8077</u>
Figura 24. Fluxograma de controle de temperatura em função do volume extraído	<u>8178</u>
Figura 25. Esquema e foto da montagem e ancoragem dos termopares, sem poço.	<u>8278</u>
Figura 26. Fluxograma: Detecção e correção do " <i>channeling</i> ".	<u>8279</u>
Figura 27. Sistema projetado para a detecção do nível de óleo e hidrolato.	<u>8481</u>
Figura 28. Curva de Extração: volume extraído versus tempo.....	<u>8582</u>
Figura 29. Duração econômica da extração.....	<u>8683</u>
Figura 30. Fluxograma otimização de parâmetros de processo.....	<u>8784</u>
Figura 31. Bateladas experimentais	<u>8784</u>
Figura 32. Primeira detecção do " <i>channeling</i> " – extração 11.....	<u>9288</u>
Figura 33. Melhoria do fluxo de vapor no vaso extrator.	<u>9490</u>
Figura 34. Fluxo com tampa original e modificada.	<u>9490</u>
Figura 35. Foto típica: momento final da extração.	<u>9692</u>
Figura 36. Momento final da extração experimental 18.....	<u>9894</u>

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Comparativo entre métodos de extração de óleos essenciais.	<u>3635</u>
Quadro 2. Palavras-chave utilizadas na pesquisa sistemática.....	<u>4544</u>
Quadro 3. Análise dos documentos de patentes para avaliar os patentes que aplicaram tecnologia na atualizações dos processos.....	<u>5453</u>
Quadro 4. Ganho de capacidade com redução do tempo de processo.	<u>105401</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados das pesquisas.....	<u>4645</u>
Tabela 2. Componentes químicos detectados	<u>10096</u>
Tabela 3. Resultados quantitativos	<u>10298</u>
Tabela 4. Médias dos rendimentos	<u>10399</u>

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Duração das extrações experimentais.....	<u>9692</u>
Gráfico 2. Volume da extração experimental 1.....	<u>9793</u>
Gráfico 3. Foto do volume final e gráfico da extração experimental 18.....	<u>9893</u>
Gráfico 4. Teor da extração experimental	<u>10197</u>
Gráfico 5. Rendimento das extrações experimentais	<u>10399</u>

LISTA DE SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IHM	Interface Homem Máquina
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MIC	Modelo Interno de Controle
OE	Óleos Essenciais
P&ID	<i>Piping And Instrumentation Diagram</i>
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
POP	Procedimentos Operacionais Padrão
SCADA	<i>Supervisory, Control and Data Acquisition</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
MDPI	<i>Multidisciplinary Digital Publishing Institute</i>
DWPI	<i>Derwent World Patents Index</i>
IPC	Classificação Internacional de Patentes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 Apresentação do Problema	18
1.3 Objetivo geral	22
1.3.1 Objetivos específicos.....	22
1.4 Relevância e Motivação da Pesquisa	23
1.5 Limites e Limitações	23
1.6 Aspectos Metodológicos	23
1.7 Organização da Tese	24
2 REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	26
2.1 Contextualização	26
2.1.1 Os óleos essenciais	26
2.1.2 Aspectos químico-biológico e fatores que afetam o rendimento extrativo.....	27
2.1.3 A erva utilizada na etapa experimental: o capim-limão	30
2.1.4 Mercado e aplicações dos OE.....	32
2.1.5 Métodos extrativos de óleos essenciais	33
2.1.6 O método de destilação a vapor d'água e as abordagens de controle de processo.....	36
2.2 Revisão de literatura e avaliação de anterioridade em portais de patentes	
<u>4443</u>	
2.2.1 Revisão de literatura	<u>4443</u>
2.2.2 Pesquisa em portais de patentes	<u>5251</u>
2.3 Tecnologias digitais inteligentes aplicáveis ao processo de arraste a vapor d'água	<u>5554</u>
2.3.1 Sensores e atuadores	<u>5554</u>
2.3.2 Controle e monitoramento de processos.....	<u>5756</u>
2.3.3 Processamento de imagem para detecção de volume extraído.....	<u>5857</u>
2.3.4 Gêmeo Digital.....	<u>5958</u>
2.4 Benefícios da gestão de tecnologia para a indústria de OE	<u>6160</u>
3 ABORDAGEM PROPOSTA	<u>6463</u>
3.1 Tecnologias propostas para melhoria do processo	<u>6765</u>
3.1.1 Sensores e atuadores	<u>6866</u>
3.1.2 Programação do Controle do processo.....	<u>6866</u>

3.1.3 Parâmetros de processo continuamente melhorados	6867
4 MATERIAIS E MÉTODOS	7068
4.1 Matéria-prima.....	7068
4.2 Arranjo físico	7169
4.2.1 Instalação convencional – base para comparações	7270
4.2.2 Instalação com tecnologia adicionada.....	7472
4.2.3 Alteração da geometria do topo do vaso extrator.....	7674
4.2.4 Sensores, atuadores, controladores e arquitetura de controle	7775
4.2.5 Controle da água de condensação.....	7977
4.2.6 Detecção e correção do “channeling”	8178
4.2.7 Duração econômica da destilação	8380
4.2.8 Parâmetros melhorados de processo através de análise de dados	8783
4.3 Planejamento das bateladas (extrações) experimentais	8784
4.4 Procedimento Analítico (Composição Química dos Óleos Essenciais)...	8885
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	9086
5.1 Preparação da matéria-prima	9086
5.2 Detecção e correção dos caminhos preferenciais de vapor (channeling)	
9187	
5.3 Determinação da duração economicamente viável da extração.....	9591
5.4 Melhoria do Processo de Condensação.....	9995
5.5 Resultados quantitativos das extrações	10298
5.6 Discussão sobre produtividade, capacidade produtiva e consumo	
energético	104100
6 CONCLUSÕES	107103
6.1 Produção acadêmica associada à pesquisa	Erro! Indicador não definido.104
6.2 Perspectivas para futuras pesquisas	108105
REFERÊNCIAS.....	111107
APÊNDICE A – RELATÓRIO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS	
EXPERIMENTOS.....	123120
ANEXO A – CERTIFICADOS DE ANÁLISE QUÍMICA FEITA PELA UFMG	16145

1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa destina-se à aplicação de tecnologias digitais à destilação de óleos essenciais (OE) por arraste a vapor d'água. Aborda uma proposta que visa trazer, aos processos extrativos, flexibilidade, adaptabilidade e configurabilidade autônoma, sob o enfoque da gestão de tecnologia para este segmento industrial.

Atualizações tecnológicas, trazidas neste trabalho, em uma planta piloto experimental, visaram comprovar benefícios como maiores rendimentos, maior eficiência energética e menor consumo de água, além de menor tempo de processo. No tocante à qualidade visaram reduzir perdas de componentes voláteis de interesse da indústria e aumentar seus teores.

Tratando-se de uma pesquisa de engenharia e tecnologia de processos, realizada no âmbito da gestão de tecnologia, tratou de buscar lacunas e demonstrar incrementos nos indicadores-chave desta indústria.

1.1 Contextualização

Óleos essenciais são produtos naturais extraídos de partes das plantas (flores, cascas, caule, folhas, raízes, frutas e sementes) com importantes aplicações na indústria. Quimicamente, são compostos por uma gama de frações, da família dos terpenóides, em mistura homogênea, desde as mais voláteis até as mais pesadas. Apresentam aroma pronunciado, muitas vezes agradável ao olfato humano. Têm, com raras exceções, densidade menor que a água, com coloração característica de cada espécie, variando em intensidade (CHÁVEZ, 2007, GUENTHER; ALTHAUSEN, 1948).

A *International Organization for Standardization* (ISO) define os OE como “produtos naturais obtidos de matérias primas vegetais [...] através de processos físicos” (ISO, 2013). Cerca de 3000 mil tipos são conhecidos e, destes, aproximadamente 300 são empregados em fragrâncias, essências alimentícias, cosméticos, produtos farmacêuticos, alimentos e bebidas (PREEDY, 2016). Também têm uso direto em aromaterapia, como conservantes e pesticidas.

Estas substâncias são identificadas e têm sua qualidade avaliada por cromatografia gasosa e espectrometria de massas (CHAMORRO *et al.*, 2012,

PREEDY, 2016). Sua composição pode variar de acordo com o método de extração, a geografia da plantação, a estação do ano, a pluviometria ou mesmo em função do ciclo circadiano das plantas (CERQUEIRA, 2009; CASSEL et al., 2009).

Relativamente ao método de extração, a destilação de OE por arraste a vapor d'água é classificada como convencional por Preedy (2016) que ainda salienta “uma aparente simplicidade”. Contudo, este mesmo autor menciona fatores complexos e críticos como a possibilidade de exposição prolongada a temperaturas demasiado altas, o que promove a degradação de componentes de interesse, bem como a grande variedade de espécies vegetais processadas, cada qual comportando-se de forma específica durante a extração, por exemplo, com tempos de extração específicos por colheita, o que configura elemento adicional à busca por um sistema produtivo operacionalmente flexível e autoconfigurável tanto para diferentes matérias-primas e até para uma mesma espécie provinda de condições de plantio diferenciadas.

Há amplo conhecimento sobre como produzir OE através do fluxo de vapor de água e posterior condensação. No entanto não houve mudança significativa no campo de monitoramento e controle do processo (CHÁVEZ, 2007, CASTILLO CASSTELLANOS; RODRÍGUEZ MURCIA, 2021), pontos importantes que levam ao cerne desta pesquisa. Thanh, Duc e Dung (2017) pontuam que, apesar da importância deste método extrativo, há carência de estudos sobre otimização dos fundamentos da destilação a vapor d'água, das práticas operacionais, do controle de processo e até do conceito das instalações industriais utilizadas.

Significativa parcela da indústria extrativa de óleos essenciais por arraste a vapor d'água está baseada em processos com potencial para desenvolvimento tecnológico, calcando-se em instalações ainda primárias e sem o efetivo uso de elementos tecnológicos, já disponíveis e aplicados em outros ramos industriais. Esse cenário requer atenção operacional constante, fazendo com que a mão-de-obra fique comprometida ao executar controles que poderiam ser realizados automaticamente (CASTILLO CASSTELLANOS; RODRÍGUEZ MUCIA, 2021).

Cabe ressaltar que as diferentes condições de solo, clima, tratamento do solo, fases de crescimento e mesmo intensidades pluviométricas e de insolação levam a comportamentos diferenciados no processo de extração (GUENTHER; ALTHAUSEN, 1948; BARBIERI, BORSOTTO, 2018). Durante o processo extrativo, tais diferenças, advindas tanto das várias ervas aromáticas processadas como de uma mesma

espécie obtida em condições de plantio e colheita diferenciados, precisam ser levadas em conta. O conteúdo de óleo essencial depende destas condições (SANTOS, 2016) e, com isso, os parâmetros do processo extrativo deveriam ser adaptados, mediante a especificidade de cada caso.

O tempo de processo é um destes importantes parâmetros. Thanh, Duc e Dung (2017), em seus experimentos, estabeleceram o tempo de extração em 180 minutos. Contudo, tempos de extração padronizados e fixados devem ser fortemente questionados, uma vez que a obtenção do conteúdo de óleo essencial varia de acordo com a espécie processada e da porção de erva utilizada, podendo atingir o nível econômico antes ou após este padrão estabelecido. Portanto, a ação correta seria basear a decisão de continuar ou interromper o processo extrativo em um monitoramento automático de rendimento. Isto, então, leva à busca de um processo eficiente e eficaz, com a adição de tecnologias adequadas que garantam a interrupção da extração no ponto economicamente mais interessante. (MACHADO et al. 2021).

Ainda sobre a duração da extração, quando estabelecida somente com base em observações históricas ou práticas e procedimentos fixos, deixa de respeitar as diferenças mencionadas, podendo ser curta ou longa em relação a um tempo economicamente viável. Se este tempo é curto, o processo deixa de extrair todo o conteúdo da matéria-prima, se longo expõem-na a altas temperaturas, além do tempo necessário, podendo causar degradação de frações de interesse e, obviamente, gastando mais energia, água e capacidade fabril (MACHADO et al., 2022).

Relativamente ao trabalho sobre controle de temperatura do vapor, realizado por Automatik e Minyak (2013), este ainda não lançou luz sobre a sua trajetória ou distribuição através do leito verde. Ainda neste estudo, a extração foi prolongada até 120 minutos, que foi além do tempo necessário para o atingimento do volume máximo, pois a curva de rendimento se estabiliza em um instante anterior, cerca de 80 minutos, no trabalho destes autores. A partir deste ponto já não houve aumento de rendimento e, assim, tanto o gasto energético, de tempo e de água foram improdutivos, além de expor a matéria-prima desnecessariamente às altas temperaturas. Então, por desconsiderar a singularidade de cada carga vegetal no vaso extrator, mesmo que da mesma erva aromática, tais pesquisas têm validade particular àquela porção de matéria-prima, naquela determinada condição de plantio e colheita.

Relativamente ao processo, fatores que influenciam o rendimento extrativo, além do tempo de extração, são: temperatura, vazão e pressão do vapor, tamanho da partícula (preparação da matéria-prima). Yusoff et al. (2012) abordaram tais fatores tendo concentrado sua atenção no controle de temperatura do vapor.

Outro fator impactante no rendimento e na qualidade do óleo essencial é o fenômeno conhecido por “*channeling*”, intimamente ligado à anisotropia do meio vegetal. Trata-se da formação de caminhos preferenciais, formados pelo vapor através da massa de erva aromática, através dos espaços intersticiais naturais de um meio não isotrópico (BEIS, et al., 2000). Tal como o tempo muito longo de extração, este fenômeno expõe a matéria-prima a altas temperaturas por onde o fluxo de vapor é mais intenso e deixa de atingir o maior rendimento onde o caudal é menor. Segundo Machado et al. (2022), este desvio passa sequer sem ser detectado, portanto não corrigido.

O processo extrativo ideal seria, então, aquele autonomamente adaptável tanto às espécies como às variações dentro de uma mesma espécie. Os elementos tecnológicos trazidos pela quarta revolução industrial podem ser de grande importância para o segmento dos óleos essenciais, indústria que se encontra em um território de conhecimento próximo ao da agroindústria, já tão desenvolvida, entretanto sem ter sido abordada num mesmo nível e, portanto, ainda um desafio para inovação e modernização (WAHYUDI et al., 2020).

Este trabalho visa contribuir com uma proposta para aplicação de tecnologias digitais inteligentes na determinação do tempo economicamente viável de processo e correção do “*channeling*”. Também abordará as melhorias no processo de condensação e a busca por parâmetros continuamente melhorados para os processos.

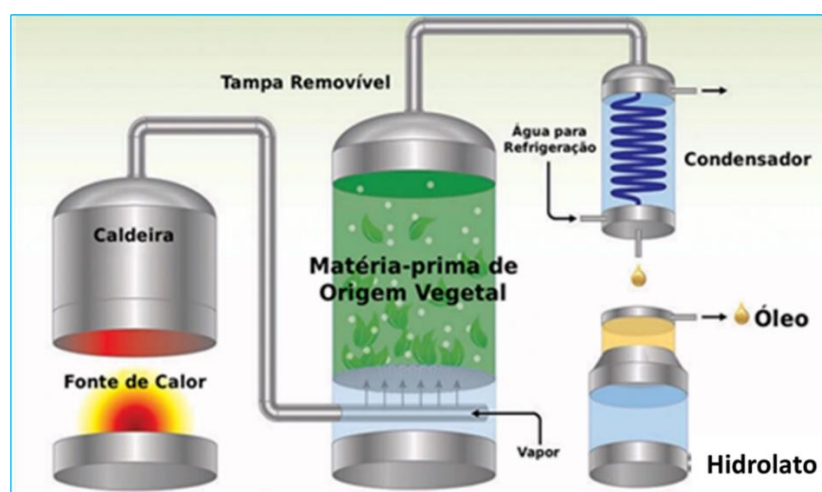
1.2 Apresentação do Problema

A indústria dos óleos essenciais emprega extensivamente o método de extração por arraste a vapor d’água, pela sua simplicidade e necessidade de investimentos iniciais menores, comparativamente àqueles requeridos por outros métodos, na mesma escala (KASUAN et. al., 2013, KUMORO et. al., 2021). Esta indústria possui um complexo portfólio de produtos e, portanto, uma grande variedade

de ervas aromáticas é processada, cada uma delas com seu comportamento específico durante o processo (UHLENBROCK et. al., 2018).

O processo consiste em fazer fluir vapor d'água por um leito de erva aromática. A energia do vapor aquece o leito vegetal e induz a liberação do óleo essencial que é carregado por este fluxo ascendente, em direção ao condensador. Vem, então, a etapa de condensação da mistura vapor-óleo essencial. O condensado é coletado e ocorre a separação do óleo essencial por diferença de densidades (KUMORO et. al. 2021). A Figura 1 traz um esquema para melhor visualização.

Figura 1. Esquema básico da destilação a vapor d'água.



Fonte: (MARTIN, 2017).

O Hidrolato (ou hidrosol ou água de cheiro) é uma suspensão coloidal, ou seja, a parte mais densa da condensação (TAVARES et al., 2022). Há raros casos de óleos essenciais mais pesados que o hidrolato.

O significativo potencial de atualização tecnológica, uma carência de fato, requer mão-de-obra intensiva, durante toda a duração da operação, com constante atuação de controle e monitoramento manuais (CHÁVEZ, 2007; PREEDY, 2016). Instrumentação, controles automáticos e monitoramento de processo seriam as ferramentas para alavancagem de melhores produtividade e qualidade (MACHADO; DE ANDRADE; LEPIKSON, 2019, JOHARI et al., 2020, MUHAMMAD et al. 2015, TAJJUDIN et al. 2012, KASUAN; TAIB; RAHIMAN, 2011).

As já mencionadas diferenças de comportamento durante o processo impõem a necessidade de ações de controle específicas (AUTOMATIK; MINYAK, 2013).

O fluxo homogêneo de vapor, através da matéria-prima, permite melhorias quantitativas e qualitativas, por não haver pontos estagnados ou degradados por sobre-exposição a altas temperaturas. (DOBRNJAC et al., 2017; ERMINAWATI et al., 2021). Fatores importantes, que determinam a distribuição homogênea ou não do vapor, são a anisotropia do meio vegetal e a forma como a erva aromática foi acomodada no interior do vaso destilador (com maior ou menor compressão, picada ou inteira, seca ou fresca). Isto faz com que o vapor encontre porções com menor resistência ao fluxo (menos compactadas) e venha a formar e manter caminhos preferenciais, (*channeling*) (BEIS et al. 2000; MALEKYDOZZADEH et al. 2012; Da Silva et al., 2021).

Assim, naquelas porções por onde fluxo de vapor for mais intenso (porções de menor resistência ao fluxo) pode ocorrer a degradação de alguns constituintes químicos do OE. Já por onde a vazão de vapor é menor (porções mais compactadas, com maior resistência ao fluxo) o rendimento da extração fica prejudicado (MACHADO et al., 2022).

Assim, o desenvolvimento de controladores (atuadores) automáticos para este processo, com foco na distribuição do vapor, visando a obtenção de maior rendimento e melhor qualidade do OE (TAJJUDIN et al. 2012), torna-se ponto importante desta pesquisa. A fragilidade, ou seja, a instabilidade das moléculas presentes nos óleos essenciais, quando em processos não controlados (em suas variáveis principais: temperatura e tempo de extração), acaba levando à degradação do produto (GUIMARÃES, 2007, KASUAN; TAIB; RAHIMAN, 2011). Ainda em decorrência deste conjunto de fatores citados, os resultados analíticos do OE, quando da ausência de sistemas de controle, poderão acusar degradação com consequente diminuição do valor de mercado (AUTOMATIK; MINYAK, 2013, KAYA et al., 2020).

A água, fluido de controle no processo de condensação, é utilizada comumente por esta indústria, à temperatura ambiente e sem controle acurado de vazão, pontos estes relevantes para o processo de condensação. Dias mais quentes ou mais frios do ano, ou mesmo diferentes horários de extração causam diferenças na condensação (PREEDY, 2016). Pode, então, ocorrer perda de frações voláteis do óleo essencial, por evaporação, quando a temperatura desta água, nas condições ambientes, não for capaz de condensá-las ou mantê-las condensadas (SHAGHALEH, et al.; 2018).

Nos processos extrativos por destilação a vapor, os consumos de água e energia, em geral, não são monitorados e, portanto, não controlados. A duração do processo segue procedimentos fixados para cada tipo de erva, sem maior atenção para a determinação do ponto final econômico da extração (MASANGO, 2005).

A questão a ser investigada cristaliza-se em torno deste cenário em que a apropriada aplicação de tecnologia seja a tônica da solução, levando à formulação da seguinte questão principal de pesquisa: Como o processo extrativo de óleos essenciais, por arraste a vapor d'água, pode ser aprimorado com a adição de tecnologias digitais inteligentes?

Esta questão abriu caminho para outros desdobramentos, que alimentaram a investigação em suas dimensões relevantes ao conhecimento do processo nesta indústria:

- Quais são as principais oportunidades de melhoria na destilação de OE? Como aproveitá-las incrementando rendimento e melhorando qualidade?
- Em que grau as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 podem trazer melhorias efetivas para a produção de óleos essenciais?
- Como a detecção e correção de caminhos preferenciais de vapor ("*channeling*"), a determinação do ponto econômico de conclusão da extração e o uso de água de condensação com temperatura controlada impactam no rendimento e na qualidade nos processos relativos à obtenção de óleos essenciais?

A relevância e o foco do trabalho, sem a pretensão de solucionar todos os problemas ou mesmo de aproveitar todas as oportunidades de melhoria possíveis no método de extração por arraste a vapor, chamam a atenção para a importância da tecnologia empregada, explorando configurações inovadoras de processo e automação.

Segundo a FORTUNE BUSINESS INSIGHTS (2021), o mercado global de óleos essenciais foi valorado em US\$ 6,03 bilhões em 2018 e US\$ 8,74 bilhões (todas as cifras em dólares americanos) em 2020. As projeções são de US\$ 9,62 bilhões e de US\$ 18,25 bilhões para 2021 e 2028, respectivamente. Um mercado promissor e importante, cuja relevância justifica o presente trabalho.

Realizada sob a égide da gestão de tecnologia, esta tese visa concretizar uma proposta, um elemento motivador e norteador ao avanço da indústria de óleos essenciais. Não há abundância de trabalhos acadêmicos a respeito deste tema – tecnologia aplicada aos processos extrativos de óleos essenciais por arraste a vapor d'água – o que reforça a oportunidade da pesquisa (CHÁVEZ, 2007, SARTOR, 2009; TAJJUDIN et al., 2012; KASUAN; TAIB; RAHIMAN, 2011, CHEMAT et al., 2019). Análise de anterioridade feita em bancos mundiais de patentes também detectou a oportunidade do tema (MACHADO et al., 2022), o que viabilizou depósito de patente da tecnologia desenvolvida.

1.3 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o de desenvolver uma proposta para a melhoria de produtividade e qualidade nos processos de destilação de óleos essenciais (arraste a vapor) baseada em tecnologias digitais inteligentes.

1.3.1 Objetivos específicos

- 1) Identificar os principais fatores que impactam no desempenho do processo extrativo de OE por destilação a vapor d'água.
- 2) Analisar o processo de destilação de OE, identificar variáveis relacionadas aos fatores identificados no item (1) e propor formas de monitorá-las e controlá-las, com uma de abordagem tecnológica apropriada.
- 3) Testar e mensurar resultados operacionais em extrações experimentais, com a tecnologia embarcada, em ambiente relevante, comparando-os aos resultados da instalação original, sem tecnologia embarcada.
- 4) Analisar os dados obtidos, com vistas à validação da proposta tecnológica de monitoração e controle e criar base para determinação de parâmetros aprimorados de processo.

1.4 Relevância e Motivação da Pesquisa

A abordagem tecnológica desta tese objetiva trazer, à indústria de destilação de óleos essenciais, melhores resultados de produtividade, qualidade, eficiência energética e gestão de capacidade produtiva. A busca por maiores rendimentos (*yield*) e eficiência energética, de melhoria de qualidade do produto, de tempo de processo e ainda um melhor desempenho ambiental são as principais justificativas para o desenvolvimento da pesquisa, ainda com maior propriedade em uma indústria que apresenta oportunidades de atualização tecnológica tão significativas.

Em um momento de profundas, abrangentes e rápidas mudanças tecnológicas, o atual ambiente de negócios, nacional e global, demanda processos em que monitoramento, controle e melhoria contínua sejam a tônica da indústria. A relação fornecedor-cliente neste cenário requer um patamar mais elevado, com maiores e melhores confiabilidade, pontualidade e qualidade de fornecimento, provindas de um processo produtivo que tome proveito de tecnologias disponíveis.

1.5 Limites e Limitações

A pesquisa fica delimitada pela extração de OE, por arraste a vapor d'água, em bateladas, na escala piloto. Os experimentos foram desenvolvidos com uma erva específica, porém, a presente proposta é generalizável e tem aplicação às demais ervas aromáticas, com as parametrizações cabíveis.

1.6 Aspectos Metodológicos

Para estabelecimento de uma rota metodológica, fez-se necessário o entendimento de alguns pontos básicos:

- Óleos Essenciais e sua contextualização química e biológica.
- Métodos extrativos: uma breve revisão dos diversos métodos.
- O método de extração por arraste a vapor d'água.
- As oportunidades detectadas, relativas à adição de tecnologia para este setor industrial.

- As tecnologias digitais propostas ao processo de destilação: a arquitetura de sensores, monitoramento e controle do processo; aprimoramento dos parâmetros de processo.

O plano experimental foi desenvolvido visando criar dados para análise em resposta ao problema de pesquisa. O levantamento de dados, a análise das deficiências e lacunas na operação, permitiram abordagens tecnológicas para o processo com a adoção de instrumentação, automação, obtenção e análise de dados e por parâmetros aprimorados.

Um equipamento em escala piloto e de uso comum na indústria, com capacidade aproximada para 10 kg de erva foi utilizado, sendo que as primeiras extrações foram executadas no modo manual, ou seja, com o processo no estado usual desta indústria, possibilitando o levantamento de dados para fins comparativos. Então, em fase posterior, foram instalados sensores, controladores e sistema para operar a abordagem inteligente proposta, visando a avaliação de pontos de interesse da sequência produtiva.

Os dados das extrações, sem e com tecnologia embarcada, foram levantados com a finalidade de permitir comparações, quantitativas e qualitativas, e viessem a dar corpo à afirmação de que a implementação tecnológica possibilita melhorias de produtividade, eficiência energética, além de propiciar melhor qualidade do produto.

1.7 Organização da Tese

Este trabalho contempla seis capítulos e está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Traz o contexto geral, o problema da pesquisa, os objetivos, sua relevância, limites e limitações, aspectos metodológicos e estrutura da tese;

Capítulo 2 – REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

Dedicado à revisão de literatura pertinente e à prospecção em portais de patentes, inicialmente oferece um panorama dos diversos métodos extrativos e aprofunda o entendimento do método de arraste a vapor d'água. Em seguida, explora o estado da arte e o panorama tecnológico que oportunizam a criação da proposta da tese.

Capítulo 3 – ABORDAGEM PROPOSTA

Fundamenta a base tecnológica da tese, a partir do apreendido no Capítulo 2.

Capítulo 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Expõe, de forma sistematizada, a seleção da matéria-prima e a especificação dos elementos componentes da configuração tecnológica da tese

Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Confronta resultados obtidos nos dois estados: anterior e posterior à introdução dos elementos tecnológicos propostos, e os respectivos avanços em seus indicadores operacionais quantitativos e qualitativos.

Capítulo 6 – CONCLUSÕES

Apresenta as conclusões, sua aplicabilidade acadêmica e industrial, produção acadêmica associada, além dos próximos passos sugeridos em continuidade a esta pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os aspectos relevantes da revisão de literatura e, também, da análise de anterioridade (prospecção em bases de patentes), tendo como pano de fundo o desenvolvimento tecnológico na destilação de OE e a aplicação destes avanços na melhoria da produtividade e qualidade.

A contextualização inicial permitirá melhor entendimento da relevância do tema e das oportunidades de pesquisa advindas destas buscas. Serão abordados os seguintes pontos:

- (1) Os óleos essenciais, o cenário de mercado e aplicações, os diversos métodos extrativos e o foco na extração por arraste a vapor d'água.
- (2) O estado da arte da destilação, através de revisão de literatura e de verificação de anterioridade.
- (3) Tecnologias com potencial aplicabilidade no processo de extração de óleos essenciais por arraste a vapor d'água.

2.1 Contextualização

O entendimento dos óleos essenciais em seus âmbitos químico-biológico, mercadológico e de aplicações trará ao leitor a base necessária para o desenvolvimento da tese, seguido de breve descrição da erva aromática utilizada na etapa experimental: o capim-limão ou capim santo. À continuação, serão descritos os diversos métodos extrativos e o aprofundamento na destilação por arraste a vapor d'água.

2.1.1 Os óleos essenciais

Há evidências históricas da utilização de óleos essenciais tanto na Grécia como na Roma antigas. Heródoto (484-425 a.C.), na Grécia, Plínio (23-79 d.C.) e Dioscórides (40-90 d.C.) em Roma, este último autor do tratado “De Matéria Medica” que dominou terapias por mais de 1500 anos. Nele é citado o óleo terebentina (óleo essencial de coníferas) e seu processo de obtenção. A primeira citação detalhada do

processo extrativo por destilação pertence a Arnald de Villanova (1237-1311), que utilizou outras ervas além das coníferas e pode ser atribuído a ele o reconhecimento da destilação nas terapias europeias da época (GUENTHER; ALTHAUSEN, 1948).

A composição química dos OE consiste, basicamente, de um grupo de compostos denominados terpenos que, por sua vez, são divididos em duas classes dominantes: os hidrocarbonetos terpênicos e os terpenóides, álcoois terpênicos simples, aldeídos, cetonas, fenóis, ésteres, peróxidos, furanos, ácidos orgânicos e cumarinas que são derivados de hidrocarbonetos que apresentam funções orgânicas como cetonas, álcoois, éteres, ésteres, aldeídos e fenóis (PREEDY, 2016; OLIVEIRA, 2017; AKHTAR; SWAMY; SINNIHAH, 2019).

Estes extratos são amplamente utilizados nas áreas farmacêutica, odontológica, de cosméticos, perfumaria, agrícola, sanitária, limpeza e alimentícia, pelas propriedades que lhe são características: antibacterianas, antifúngicas, antivirais, antiparasitárias, antidiabéticas, anticâncer (citotóxico), repelente de insetos, aromatizante, para uso em aromaterapia e antioxidante. (AKHTAR; SWAMY; SINNIHAH, 2019).

2.1.2 Aspectos químico-biológico e fatores que afetam o rendimento extrativo

Óleos essenciais são compostos voláteis que estão intimamente ligados às funções das plantas. Estudos demonstram suas variações quantitativas e qualitativas em função do estágio em que a colheita tenha sido realizada: anterior, durante ou posterior à floração, por exemplo (GUENTHER; ALTHAUSEN, 1948). São produtos do metabolismo secundário dos vegetais e estocados em estruturas histológicas especializadas. Enquanto o metabolismo primário produz macromoléculas (proteínas e polissacarídeos) para funções vitais básicas do organismo vegetal, no metabolismo secundário são produzidos compostos químicos como alcalóides, terpenóides, glicosídeos, que têm o papel de proteção contra patógenos, alelopatia¹ e/ou atração de agentes polinizadores (ROCHA, 2011, ROJAS et al., 2014, AKHTAR; SWAMY; SINNIHAH, 2019).

¹ Alelopatia é a capacidade de as plantas produzirem substâncias que, quando liberadas no ambiente, influenciam no seu próprio desenvolvimento (ALMEIDA-BEZERRA, 2020).

Tais metabólitos secundários, sintetizados em diferentes partes do organismo vegetal e armazenados em células secretoras, canais, células epidérmicas ou tricomas glandulares, atuam como mecanismos de proteção e resistência a fatores ambientais e têm ação antibacteriana, antifúngica, antiviral e de atração ou repulsão de insetos, a depender de sua utilidade ou nocividade ao organismo vegetal em questão, respectivamente. Atuam na comunicação planta-planta e protegem o organismo vegetal da perda de água e sobreaquecimento (SILVA et. al, 2019).

Assim, os OE têm vários papéis nos organismos vegetais, atuando como mensageiros internos e externos, como substâncias defensivas contra inimigos naturais e na atração de insetos polinizadores (BASER; BUCHBAUER, 2015).

Santos (2016), trabalhando a extração de espécies da família *Myrtaceae*, menciona os principais fatores que podem influenciar os metabólitos secundários obtidos: tipo de solo, sazonalidade, altitude, temperatura média da região, índice pluviométrico, irradiação luminosa, ataque de patógenos, idade do organismo vegetal, disponibilidade de água, micro e macronutrientes, tratamento pós-colheita e método de extração utilizado, além do ritmo circadiano. Lima et al. (2016) citam que o horário da colheita é um importante fator de influência, determinante para o teor de óleo a ser extraído da planta.

Ribeiro, Bonilla e Lucena (2018) estudaram o rendimento e a composição química de óleos essenciais sob a ótica do ciclo circadiano e sazonalidade, confirmando o impacto destes fatores, também estudados por Furlan et al. (2010) e por Galvão et al. (2021).

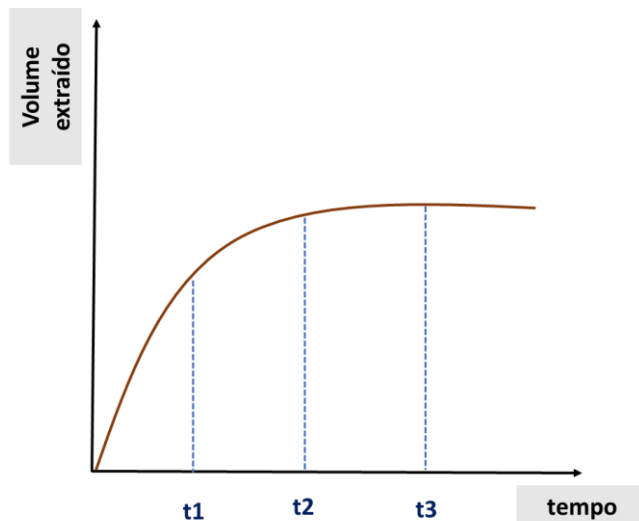
Fatores operacionais são trazidos como impactantes no rendimento das extrações. O tamanho da partícula da erva aromática, quando picada, a temperatura e o tempo da destilação são citados como fatores influentes sobre os teores obtidos (AKHIHIERO, AYODELE, AKPOJOTOR, 2013). O percentual de enchimento do volume útil do vaso extrator, a duração do processo extrativo e o tamanho da partícula da erva picada foram estudados por Kaya et al. (2020), tendo estes pesquisadores estabelecido 100%, 75 minutos e 20 mm, respectivamente, como parâmetros para obtenção dos melhores rendimentos naqueles experimentos.

Johari et al. (2020) focalizaram a destilação a vapor do capim-limão (*Cymbopogon citratus*), para obtenção de OE, com o desenvolvimento de um controle acurado de temperatura através de ação Proporcional, Integral e Derivativo (PID) com

Modelo Interno de Controle (MIC), o que reduziu significativamente o tempo de correção da temperatura. Perceberam, em seus experimentos, a influência, além da temperatura do processo, do tamanho da partícula e do tempo de processo. Estes autores fixaram quatro tempos de processo, 30, 60, 90 e 120 minutos. Cabe afirmar que, ao fixarem tais valores de tempo para a duração da extração, não observaram o crescimento do volume extraído, o que teria permitido finalizar a extração em um instante em que não mais houvesse aumento significativo de volume extraído.

A Figura 2 mostra o comportamento típico de uma extração quanto ao volume obtido (MACHADO et al., 2021a; MACHADO et al., 2021b). Tempos fixados poderiam ser curtos (t_1) e outros longos (t_3) (ou seja, aquém e além do economicamente viável), deixando de extrair óleo essencial ou expondo a planta aromática ao risco de degradação, respectivamente. Esta é uma oportunidade de proposta de tecnologia para determinação do instante em que, na curva de extração, após a rampa inicial de maior coeficiente angular (t_1), atinge-se uma fase assintótica e uma estabilização (t_2), sendo este o ponto economicamente viável para a conclusão do processo.

Figura 2. Curva de extração: fases de crescimento e estabilização de volume.



Fonte: autoria própria (2021)

Fitri et al. (2017), através de experimentos com diferentes ervas e variações de tempos de extração, concluíram que a duração da extração é um fator a ser determinado caso a caso, o que, mais uma vez, confirma um caminho para a presente pesquisa.

A importância do processo de secagem, isto é, da redução parcial e controlada do teor de água livre da erva aromática, é justificada pela busca da redução do risco

de qualidade do produto, já que a umidade, se mantida prolongadamente, antes da extração, poderia levar à degradação do OE por ação enzimática. Por outro lado, o processo de secagem, com ar aquecido, pode também levar à perda de rendimento e degradação, por exposição excessiva a temperaturas altas (ROCHA, 2011, MAHARAJ; MCGAW 2020). Zaman, Jaffel e Abdelmageed (2022) testaram diversos tempo de secagem do capim-limão, chegando à conclusão de que o tempo de 48 horas foi o mais efetivo.

O tipo de matriz vegetal também influencia nos processos de extração. Esta questão é discutida a seguir para o capim-limão.

2.1.3 A matriz vegetal capim-limão

Um pré-requisito importante para obtenção de produtos uniformes reside na identificação assertiva da erva a ser utilizada, para que não haja mistura com ervas com aparência semelhante, que contaminariam os resultados da extração (BASER; BUCHBAUER, 2015). Para comparações experimentais plausíveis o suprimento da erva aromática, com origem controlada, ou seja, cultivada em uma mesma área e em condições de plantio similares, é de grande importância.

O capim-limão, também conhecido como capim-santo, capim-de-cheiro, capim-cidreira, dentre outras denominações regionais no Brasil, é uma espécie cuja denominação científica é *Cymbopogon citratus*. Trata-se de erva gramínea tropical perene, cultivada em países como Brasil, México, Índia e Vietnã e possui grande resistência climática e contra pragas. Cresce em moitas de folhas estreitas, com comprimento entre 0,6 e 1,0 m, ásperas e cortantes. A sua inflorescência é constituída por panículas amareladas. O rendimento do plantio está entre 50 e 60 toneladas por hectare. (AZAMBUJA, 2019). A fotografia da Figura 3 mostra uma touceira da planta.

Figura 3. Touceira de capim-limão (*Cymbopogon citratus*)



Fonte: (AZAMBUJA, 2019).

Além de seu óleo essencial, esta planta é também utilizada na medicina popular. Suas folhas, em infusão, têm propriedades febrífugas, sudoríficas, analgésicas, calmantes, antidepressivas, diuréticas e expectorantes, além de ser bactericida, protetora hepática, antiespasmódica, estimulante da circulação periférica, estimulante estomacal e da lactação. (AZAMBUJA, 2019).

O OE do capim-limão é composto por substâncias voláteis de coloração amarelada em diversas tonalidades e solúveis em solventes orgânicos. Trata-se de uma mistura complexa de monoterpenos, sesquiterpenos e seus derivados oxigenados: álcoois, aldeídos, ésteres, cetonas, fenóis e óxidos (AKHTAR; SWAMY; SINNIHAH, 2019, OLIVEIRA, 2017, SILVA, 2019).

O principal componente químico do óleo essencial de capim-limão é o citral que é uma mistura dos isômeros neral (cis-citral ou Zcitral) e geranial (trans-citral ou E-citral), (COSTA et al. 2005; LEWINSOHN, et al. 1998), apresentando ainda o mirceno como segundo componente, em termos quantitativos (GUIMARÃES et al., 2011). Outros constituintes presentes no óleo essencial são: 3-metil-2-heptanona, 6-metil-5-hepten-ona, metil-heptenol, α -pineno, canfeno, β -pineno, limoneno, mentol, citronelol, citronelal, linalol, óxido de linalol, acetato de geranila, isovaliraldeído, n-decilaaldeído, nerol, geraniol, farnesol e terpineol (SOUZA et al., 1991; MARTINAZZO et al., 2013).

Rocha (2011), em sua tese, menciona os riscos de volatilização e degradação dos óleos essenciais do capim-limão quando expostos prolongadamente a altas temperaturas, quer na secagem prévia, quando realizada através de ar quente, quer durante o processo de extração. Ainda sobre a degradação, Guimarães et al. (2011) estudaram-na sob os efeitos do tempo e da luz.

Thanh, Duc e Dung (2017) ao modelarem a cinética de extração do óleo essencial de *Ocymbopogon citratus* prepararam esta erva aromática de diversos modos: inteira e fresca, picada com 2 cm, moída (esmagada), seca, de forma natural, por 48 horas. O equipamento extrator tinha capacidade de 15 kg e o aquecimento foi realizado por uma resistência de 6 kW. Com uma carga de 8,5 a 9,5 kg (peso de erva fresca), processaram a destilação por 180 minutos. O rendimento foi calculado pelo quociente entre o volume de óleo extraído, em mililitros, e a massa de erva, em quilogramas. Os rendimentos obtidos por estes pesquisadores variaram de 1,68 mL/kg a 2,88 mL/kg, sendo o maior aquele obtido com a erva desidratada à sombra por 48 horas, picada com 2 cm de comprimento.

Mu'azu et al. (2019a, 2019b) abordaram o processo extrativo de óleo essencial de *Cymbopogon citratus* e *Eucalyptus citriodora* sob a ótica do que chamaram de intensificação de processo. Cronometraram etapas, mediram gastos energéticos, além de terem selecionado as melhores folhas para alimentar o extrator, com uma carga de 20 kg. Puderam perceber que grande parte do volume de óleo (superior a 90%) é extraído nos primeiros 60 minutos de processo. Essa observação também reforça a atenção da pesquisa sobre a determinação do tempo econômico de processo.

Este fato traz implicações relativas ao mercado e às aplicações do óleo extraído.

2.1.4 Mercado e aplicações dos OE

O crescente interesse por extratos naturais, em substituição aos aditivos sintéticos, tem gerado demanda incremental ao mercado de óleos essenciais (PERINO, CHEMAT, 2019). Seu uso vai de atender, como ingrediente, as indústrias alimentícias, de cosméticos, de limpeza e farmacêutica até o seu emprego direto, como na aromaterapia, por exemplo (PREEDY, 2016).

Ao olhar o mercado sob a ótica dos processos de manufatura, Božović et al. (2017) mencionaram o método da destilação por arraste a vapor como o mais difundido globalmente, com 93% do volume global.

Rocha (2011) também aborda a importância dos produtos naturais, dentre eles os extratos vegetais e os óleos essenciais, para as indústrias dos ramos farmacêutico, aditivos nutricionais, cosméticos, essências, dentre outros. Uhlenbrock et al. (2018) citaram os valores globais de alguns destes mercados atendidos pelas empresas que oferecem produtos naturais. À época da publicação o tamanho destes mercados era:

- Agroquímicos: US\$ 1 bilhão
- Cosméticos: US\$ 200 bilhões
- Aromas, essências e nutrição: US\$ 10 bilhões
- Farmacêutico: US\$ 107 bilhões

Outras fontes dimensionam o tamanho do mercado global de OE em US\$ 10,3 bilhões em 2021 e é esperado atingir US\$ 16,0 bilhões até 2026². O aumento do consumo de produtos naturais, devido a seus benefícios para a saúde, tem motivado os fabricantes a investir em OE's ao invés de usar substâncias artificiais em seus produtos cosméticos, farmacêuticos, alimentos e outros. Portanto, espera-se um crescimento contínuo no mercado de EO³.

2.1.5 Métodos extrativos de óleos essenciais

Uma breve descrição dos métodos extrativos de óleos essenciais trará o entendimento das vantagens e desvantagens de cada um deles e da ampla utilização da destilação a vapor d'água. De uma forma geral, tais vantagens e desvantagens do processo estão ligadas aos tempos de extração, mais ou menos longos, à possibilidade de degradação dos produtos e às possibilidades para a elevação daqueles métodos chamados alternativos à escala industrial (RICHA et al., 2020; SHARMEEN et al., 2021).

Dentre os diversos métodos utilizados para a extração, além da destilação por arraste a vapor, podem-se destacar aquela com solventes orgânicos e a prensagem a frio, denominadas convencionais. Os métodos de extração com o emprego de fluido supercrítico, extração assistida por ultrassom e por micro-ondas são classificadas como não tradicionais ou alternativos (PREEDY; STRATAKOS; KOIDIS, 2016, RICHA, et al., 2020, VALDERRAMA; RUIZ, 2018).

Justifica-se o interesse pela pesquisa da destilação através do emprego de vapor d'água por ser o mais difundido, com os já mencionados 93% do volume mundial produzido (MASANGO, 2005, PREEDY, 2016, PREEDY; STRATAKOS; KOIDIS, 2016).

A destilação e hidrodestilação são métodos próximos entre si que guardam algumas diferenças. Na hidrodestilação o material vegetal é imerso na água, que

² Essential Oils Market Essential Oils Market by Type (Orange, Lemon, Lime, Peppermint, Citronella, and Others), Application (Food & Beverage, Cosmetics & Toiletries, Aromatherapy, Home Care, Health Care), Method of Extraction, and Region—Global Forecast to 2026. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/essential-oil-market-119674487.html>. Acesso em 3. mar. 2022.

³ Grand View Research. Essential Oils Market Size, Industry Report, 2021–2028. 2021. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/essential-oils-market>. Acesso em 28. Fev.2022.

entrará em ebulição. Na destilação, o vapor fluirá de uma fonte externa (caldeira, resistência elétrica ou chama direta no fundo do vaso, sem contato direto da erva aromática com a água da qual será gerado o vapor) através da massa verde que estará assentada sobre uma placa perfurada para suportá-la e permitir a passagem do vapor, conforme mostrado anteriormente no esquema da Figura 1.

O fluido destilado será, então, condensado e passará por separação, pela diferença de densidades. O óleo essencial ficará sobrenadante, na parte superior, enquanto a chamada água de cheiro, hidrosol ou hidrolato é retirada pela parte inferior do separador.

A destilação por arraste a vapor é um processo amplamente empregado na indústria por requerer investimentos e custos operacionais mais baixos quando comparada a outros métodos, por exemplo, com a extração com fluido supercrítico (MASANGO, 2005, CASSEL; VARGAS, 2006, PREEDY, 2016; VALDERRAMA; RUIZ, 2018; KUMORO et al. (2021).

Outro processo de extração é o realizado por solventes, que é feito através de maceração em, por exemplo, hexano, benzeno, metanol, etanol, propanol, acetona, pentano e diversos solventes clorados. Geralmente tem-se preferência por solventes apolares. A erva aromática libera seu óleo essencial, requerendo processo posterior de separação, que pode ser a vácuo para remoção do solvente e destilação suave, obtendo-se os óleos essenciais. É um método aplicado aos casos em que altas temperaturas seriam indesejáveis, como pétalas, que perderiam suas propriedades aromáticas.

A seleção do solvente deve levar em conta a compatibilidade com o produto a ser obtido, para evitar contaminações, degradações por reatividade química, dificuldades de separação, além do custo do próprio solvente. Uma das dificuldades trazidas pelo emprego de solvente, além da necessidade de separação, é o arraste de ceras e pigmentos que são considerados contaminantes e quantidade residual do solvente poderá ser encontrada no produto (SILVEIRA et al., 2012, BURGER et al. 2019).

Já a prensagem a frio é amplamente utilizada para extração de óleos essenciais de cascas de frutas cítricas. Este método consiste em, após moagem da massa de cascas, prensá-la mecanicamente, centrifugá-la em duas fases: a primeira para retirada de sólidos e a segunda para que a emulsão resultante seja tratada e permita

que as frações mais leves sejam liberadas (BASER; BUCHBAUER, 2015, BURGER et al., 2019)

A extração por dióxido de carbono no estado supercrítico é caracterizada por utilizar tal fluido em um ponto de temperatura, acima do qual não possa ser liquefeito por compressão isotérmica: o chamado ponto crítico. O estado do gás, quando apresenta tanto pressão como temperaturas superiores aos valores críticos, é chamado de supercrítico, com baixa viscosidade e elevada densidade, condição necessária para extração. (SARTOR, 2009).

A utilização do gás carbônico supercrítico como solvente apresenta-se como um método extrativo aparentemente limpo e tecnologicamente eficiente, quando comparado aos convencionais. O CO₂ carrega consigo o extrato essencial e, posteriormente, com o ciclo fazendo o gás liquefeito retornar ao estado gasoso, deixa, em vaso separador, o óleo essencial. O ciclo é reiniciado com a compressão do gás carbônico. É um método em que os investimentos requeridos e custos operacionais podem ser altos, principalmente na escala industrial. O dito baixo impacto ambiental merece ser melhor avaliado, dado o requerimento energético para a obtenção do gás (SILVEIRA et al. 2012).

A utilização do ultrassom pode melhorar a velocidade, o rendimento e a qualidade dos óleos essenciais assim obtidos, além de buscar reduzir o consumo energético. O método consiste em criar borbulhamento na água que, ao colapsar por cavitação, dá lugar a micro jatos que destroem as estruturas onde o óleo essencial se encontra alojado no vegetal. A haste de geração do ultrassom deve ser cuidadosamente selecionada para evitar contaminação por metais. Importa saber que a escala de produção, os investimentos e custos operacionais são consideravelmente maiores que aqueles da destilação a vapor (LI; FABIANO-TIXIER; CHEMAT, 2014, BELWAL et al., 2020).

A extração realizada em um reator com micro-ondas, sem contato com a fonte de calor, pode ser adicionada como coadjuvante na geração de calor para a destilação convencional a vapor ou utilizada separadamente, o que diminui sobremaneira o tempo de extração. Quando utilizada separadamente da destilação convencional apresenta vantagens de tempos de processo reduzidos e facilidade de limpeza. No entanto, escalas industriais requerem investimento intensivo de capital inicial (LI; FABIANO-TIXIER; CHEMAT, 2014).

O quadro 1 expõe, resumidamente, a denominação, meio extrativo, vantagens e desvantagens destes métodos de extração.

Quadro 1. Comparativo entre métodos de extração de óleos essenciais.

MÉTODO DE EXTRAÇÃO	MEIO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> • Destilação a vapor • Vapor + hidro-destilação • Hidrodestilação 	Água fervente; vapor	Simplicidade, baixo investimento inicial	Tempos prolongados de processo, possível degradação de componentes.
<ul style="list-style-type: none"> • Solventes orgânicos 	Maceração em solventes orgânicos	Tende a evitar degradação química	Resíduos de solventes, Material residual perigoso, Inflamabilidade
<ul style="list-style-type: none"> • Prensagem a frio 	Prensagem mecânica	Simplicidade, especificidade para determinadas matérias-primas	Restrição de aplicação, normalmente para cítricos.
<ul style="list-style-type: none"> • Extração por fluido supercrítico EFSC (dióxido de carbono) 	Fluido em estado supercrítico	Fluido é inerte, não tóxico e não-inflamável	Altos investimentos e altos custos de manutenção
<ul style="list-style-type: none"> • Extração assistida por ultrassom 	Em combinação com vapor ou solventes orgânicos	Integridade dos OE, Menor investimento de comparado com EFSC	Equipamento de pequena escala, foco no ingrediente específico de interesse
<ul style="list-style-type: none"> • Extração assistida por micro-ondas 	Vapor, água ou sem solventes.	Tempo curto de processo, melhores propriedades sensoriais dos OE	Pequena escala industrial

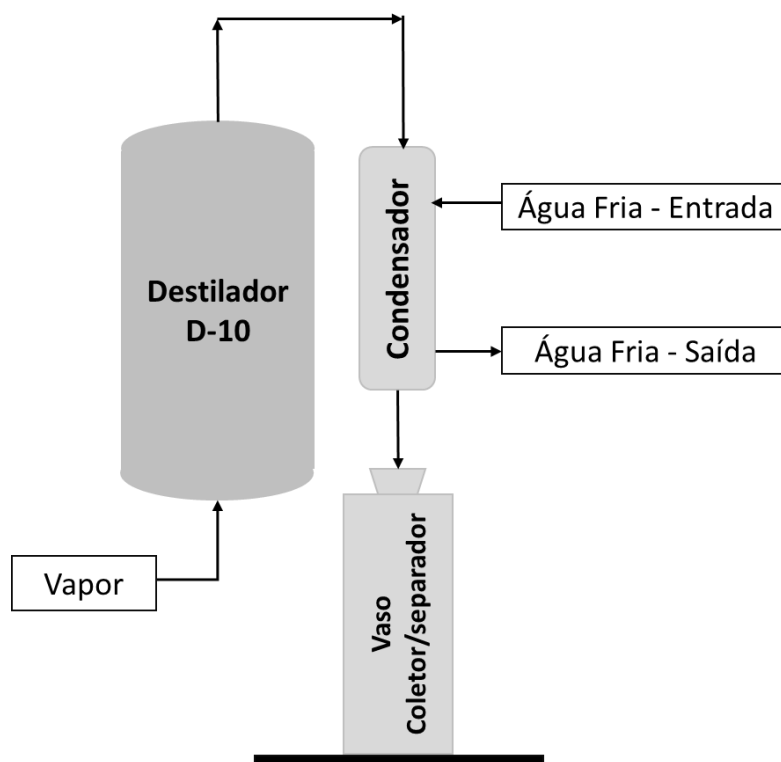
Fonte: Adaptado de Chemat, et al (2019) e Belwal (2020).

2.1.6 O método de destilação a vapor d'água e as abordagens de controle de processo

O método extrativo pelo arraste com vapor d'água é considerado tradicional. A Figura 4 mostra a sequência de processo em que o vapor d'água atravessa o leito vegetal, tendo duas funções principais: aquecimento da massa para promover a ruptura das estruturas celulares onde o OE é estocado no organismo vegetal e o carregamento até o condensador. O processo de condensação é realizado em trocador de calor (condensador). Água e OE, imiscíveis nas condições ambientes, separam-se após a liquefação,

A separação dos fluidos, por diferença de densidade ocorre em vaso receptor do líquido condensado: o sobrenadante é o OE e a parte mais densa é o hidrolato (também chamado hidrossol ou água de cheiro) (CHEMAT; BOUTEKEDJIRET, 2015, MAHARAJ; MCGAW, 2020).

Figura 4. Processo básico: extração de OE por arraste a vapor d'água.



Fonte: autoria própria.

O aprimoramento deste modo extrativo e as melhorias nos resultados operacionais traz uma promissora expectativa de melhoria de desempenho, tanto em tempo de extração, qualidade final dos produtos (composição e análise sensorial) e, principalmente, rendimento (*yield*) (CHÁVEZ, 2007). Kaya et al. (2020) estudaram o rendimento sob a influência de três fatores: ocupação volumétrica do vaso extrator, tamanho da partícula e duração da extração, obtendo os melhores resultados para 100%, 20 mm e 75 minutos, respectivamente.

O tema, destilação ou arraste a vapor, foi amplamente estudado. Diversas abordagens foram encontradas na literatura: modelagem para predição de teores e curvas de extração (rendimento versus tempo); estudos sobre definições e controles de temperatura e seus efeitos; determinações de tempos de processo e formas de acomodação da erva utilizada; efeito do tamanho de partícula. (FITRI et al., 2017; GUENTHER; ALTHAUSEN, 1948, CASSEL et al., 2009, WENG et al., 2015, MAIA et al., 2001, MAHARAJ; MCGAW, 2020). Cabe, no entanto, ressaltar que tanto a identificação dos caminhos preferenciais de vapor, sua correção ou atenuação, bem como a determinação do ponto ótimo (técnico e econômico) de finalização da extração não foram abordados.

A Importância deste método, por ser o mais difundido, traz o apelo para aprofundamento no tema e a busca de oportunidades de contribuição tecnológica para o desenvolvimento desta indústria (BASER, BUCHBAUER, 2015, MAHARAJ; MCGAW, 2020).

Entretanto, Chávez (2007), em sua tese, enfatiza a escassez de estudos sobre os fenômenos determinantes para o efetivo controle, simulação e otimização dos processos extrativos por destilação, aplicáveis à diversidade de ervas aromáticas empregadas. Este autor desenvolveu interessante trabalho de modelagem, cujas correlações demonstraram precisão de reprodução da realidade, para a predição da evolução da destilação e do rendimento final. Cabe, no entanto, a observação de que um modelo matemático como este objetiva a predição de rendimento de uma determinada extração, de uma determinada espécie vegetal, de uma colheita específica. A pesquisa de Chávez (2007) tem importante valor para a definição inicial de parâmetros operacionais de processo, contudo um posterior refinamento e redefinição, em termos práticos e específicos para cada matéria-prima e cada colheita se fazem necessários.

Maharaj e Mcgaw (2020) propuseram modelagem matemática para extração dos componentes de OE das folhas secas de manjeriço (*Ocimum basilicum*), através de três hipóteses básicas:

- (1) difusão do óleo até a superfície da folha;
- (2) vaporização do óleo que atingiu a superfície da folha;
- (3) Convecção e arraste do óleo pelo vapor.

Os resultados por eles obtidos atingiram correspondência precisa para os principais componentes químicos daquele óleo essencial.

Chávez (2007) menciona a aparente simplicidade do método de extração por arraste a vapor, sem deixar de ressaltar a complexidade que só é percebida quando se aprofunda no estudo: matérias-primas com teores diferentes; um amplo portfólio de produtos, com comportamentos diferenciados durante a extração; a degradação de componentes químicos dos óleos essenciais expostos a temperaturas excessivas prolongadamente, dentre outros. Tais colocações abrem espaço para propostas de tecnologias que habilitem os processos extrativos a se autoconfigurarem e poderem, então, trabalhar com a grande maioria das ervas aromáticas.

Dentre tantos autores que afirmam o efeito da sobre-exposição prolongada a altas temperaturas, também Kasuan et al. (2015) reforçam este ponto. Adnan et al., (2020) enfatizam a necessidade de controle acurado para a temperatura de vapor, visando a integridade do óleo essencial. Estes autores, entretanto, colocam atenção no controle da temperatura do vapor à entrada do processo, sem um aprofundamento na detecção das temperaturas no interior da massa vegetal.

Dentre tantos fatores influentes no rendimento da extração, Lourenço (2007) menciona a, chamada por ele, janela de colheita e a aplicação das boas práticas agrícolas. Este autor ainda cita a agressividade da colheita mecanizada, quando comparada à manual, e que este fator resultaria em perdas de rendimento. O mesmo autor discute sobre o comportamento dos óleos essenciais ao receberem energia do vapor d'água quando migram das estruturas histológicas onde estavam alojados para a superfície da folha. Daí advém a importância da distribuição eficiente do vapor quando flui pela massa vegetal, durante a destilação

Preedy (2016) menciona diversos fatores importantes ao desenvolvimento das plantas aromáticas e, portanto, incidentes sobre o volume extraído e a qualidade dos óleos essenciais. Fatores ambientais como temperatura, radiação, duração do dia, altitude, pluviometria, dentre outros. Fatores relativos à colheita no tocante à geografia, estação, idade da planta. Relativos ao solo, fertilizantes e preparo, além da apropriada seleção de cultivares. Tais fatores causais levam a erva aromática a teores variáveis. Assim, o processo de extração adequado seria aquele adaptável a estas variações naturais.

Muñoz Lopez de Bustamante (1996) traz o impacto da logística de abastecimento como influente na eficácia dos processos extrativos. Chega mesmo a recomendar um raio de 40 km. Coloca ele, como bastante provável, que além desta distância do ponto de colheita, fatores como o tempo entre colheita e processamento, além das condições de transporte e estocagem sejam demandantes de atenção pelos produtores, pois podem afetar a matéria-prima. O pronto abastecimento, desde o ponto de colheita até o processo de extração, é, também condição para obtenção de teores similares e qualidade consistente.

Cannon et al. (2013) pesquisaram o rendimento e a composição obtidos a partir de diferentes tempos de processamento. A mensuração do tempo de extração é iniciada a partir do momento em que a primeira gota de condensado é produzida.

Mejri et al. (2014) ao estudarem a hidrodestilação, realizaram experimentos com ervas colhidas em diferentes épocas do ano, obtendo diferenças no rendimento. Neste estudo a duração de extração foi de 180 minutos. Nota-se, entretanto, ao analisar as curvas de rendimento destes autores que este tempo de processo foi além do necessário para o atingimento do rendimento máximo, já que as curvas levantadas atingiram o patamar de estabilização da extração em instante anterior. Assim, no intervalo de tempo adicional, pode ter ocorrido degradação de frações do óleo essencial extraído, por sobre-exposição a altas temperaturas e evaporação dos componentes voláteis daquele OE. Fatores como gasto energético e de água, além de uso do equipamento por tempo além do necessário, geram deficiências para a indústria em aspectos como gestão de capacidade e ambientais.

Dobrnjac et al. (2017) mencionam em seu trabalho a necessidade da distribuição homogênea de vapor pela massa vegetal, assim como, o que é decorrência desta afirmação, da homogeneidade de temperaturas. Ao inverter o fluxo de vapor, ou seja, fazendo-o fluir do topo para a base, estes autores demonstram impactos na qualidade, na quantidade e nos consumos de vapor e água de condensação, indicadores estes melhorados quando se obtém melhor uniformidade no fluxo de vapor. Os resultados analíticos obtidos por estes pesquisadores indicaram maior quantidade dos componentes químicos de interesse da indústria cliente deste setor, fator de competitividade. Também obtiveram menor consumo energético e menor duração da extração e mencionaram a degradação do OE por sobre-exposição a altas temperaturas por períodos além do necessário.

A modelagem proposta por Chávez (2007) adota, como hipótese simplificadora, a matéria-prima da extração homogeneamente porosa e sem deformação. No entanto, o leito vegetal comporta-se naturalmente como meio poroso anisotrópico e deforma-se, continuamente até um determinado limite de compactação provocada pela passagem do vapor.

Yusoff et al., (2012) dizem que, com o propósito de assegurar a qualidade do óleo essencial, um controle robusto de temperatura é aplicável com controlador proporcional, integral e derivativo (PID). Contudo, este controle é monitorado através de tomadas de temperatura na entrada do vapor e não no seio da massa vegetal.

Pesquisas realizadas em escala de laboratório, com quantidades diminutas de erva (CASSEL et al., 2009, CASSEL; VARGAS, 2006) (massa inferior a 500 g)

culminaram em propostas de modelos matemáticos para exprimir os teores obtidos. A extensão para escalas produtivas ou experimentais maiores foi proposta para estudos posteriores.

Busato et al. (2014), em revisão bibliográfica, realizaram um levantamento de diversas estratégias de modelagem aplicadas à extração de óleos essenciais por arraste a vapor: fenomenológica (teórica), empírica, híbrida, determinísticos (uma única resposta) ou estocásticos (uma distribuição de probabilidades). Estes autores compararam tais estratégias sem, contudo, indicarem aquela que apresentasse alguma vantagem sobre as demais. Salientaram, a partir das modelagens estudadas, alguns fenômenos que regem o processo de destilação a vapor d'água: vaporização instantânea do OE da superfície do material vegetal e o vapor ao redor, a transferência de para a fluxo do vapor e a exsudação do óleo dos tricomas glandulares, até a superficial do material

As hipóteses adotadas nas modelagens realizadas por Sartor et al. (2011) foram:

- (a) representar o óleo extraído como um único pseudo-componente e não uma mistura complexa;
- (b) o vapor d'água uniformemente distribuído nas seções radiais do extrator e com velocidade constante;
- (c) a porosidade do leito não afetada pela compactação;
- (d) o equilíbrio de fases dado por uma correlação linear da concentração de soluto;
- (e) as concentrações de óleo no fluido e no sólido dependendo do tempo de extração e da coordenada axial do extrator;
- (f) a dispersão axial foi negligenciada;
- (g) a temperatura e a pressão são consideradas constantes durante a extração.

Extrações em escalas maiores, sob tais simplificações, poderão ter a exatidão de sua representação comprometida.

Sartor (2009) ainda ressalta a natural diferença entre as extrações nas escalas de laboratório e industrial, pois no primeiro há uma seleção e preparação da erva o que proporciona melhores rendimentos.

Valderrama e Ruiz (2018) propuseram modelagem para melhoria de rendimento e consumo energético. Nesta abordagem os autores observaram a trajetória do vapor como fator determinante para o atingimento daqueles objetivos, sem, contudo, terem trazido modos de detecção e correção em caso de desvios. Estes autores aplicaram as seguintes hipóteses simplificadoras: sistema isotérmico e isobárico; o leito de folhas considerado uma batelada com porosidade e posição das folhas estáveis; a fase vapor no interior do vaso extrator foi considerada perfeitamente distribuída e constante; todo o óleo essencial contido na planta (matriz vegetal) considerado extraído no processo; condensado e óleo perfeitamente imiscíveis, dentre outras.

O controle robusto de temperatura de extração é, mais uma vez mencionado pelos autores: Automatik e Minyak (2013). Estes obtiveram qualidade dita superior em seus experimentos, devida ao processo com temperatura controlada, quando comparada àquela obtida em processo sem tal controle acurado. Contudo, a temperatura foi controlada, mais uma vez, à entrada do vapor e não no seio da matéria-prima, onde efetivamente ocorre a extração.

Božović et al., (2017) ao descreverem o processo de destilação, colocaram a possibilidade de se utilizar material das plantas fresco ou seco. Trouxeram dois pontos importantes para a obtenção da melhor composição: o melhor ponto de colheita e a duração ótima do processo extrativo já que, como mencionam, o aquecimento, responsável por manter a pressão de vapor do óleo essencial, se excessivo, pode vir a danificar o produto obtido.

Ainda segundo Chávez (2007), o conhecimento dos processos internos ao equipamento extrator possibilitaria a melhoria dos resultados obtidos, conforme já mencionado: quantidade, qualidade e tempos de processo, o que acarretaria consumos minorados de energia e demais utilidades de processo.

A destilação eficiente de diversas matérias-primas em um mesmo sistema produtivo somente seria viável mediante aplicação de tecnologia para controle operacional e predição de tendências de processo (MACHADO et al., 2021).

O interessante valor de mercado dos óleos essenciais, aliado a rendimentos materiais da ordem de poucos pontos percentuais e qualidade variável justificam a investigação e aplicação de tecnologias que possibilitem tanto a efetiva produção do teor economicamente viável contido na massa vegetal como evitar degradação de

componentes químicos pela sobre-exposição prolongada e desnecessária a altas temperaturas, isto é, além do ponto necessário para a extração com qualidade (PÉRINO-ISSARTIER, 2013).

Resumidamente, quando o vapor atinge a células da matéria-prima (erva) carrega o óleo essencial, sendo, portanto, fundamental, um eficiente contato entre o vapor e o leito vegetal. Embora haja influência de outros fatores como forma de colheita, fatores sazonais e geográficos, dentre outros, o atingimento da massa vegetal pelo vapor de forma uniforme é definitivo para a efetividade do processo (ERMINAWATI et al., 2021).

Uhlenbrock et al., (2018) enfatizam a importância de um projeto de processo robusto para garantir qualidade. Em uma ampla abordagem, também colocaram o aumento da área de contato, através de moagem, por exemplo, com o solvente como um fator de aumento de rendimento.

Todos estes aspectos do processo extrativo reforçam sua complexidade e a demanda por inovações neste campo, pontos estes que alimentaram a busca por trabalhos na área de adição de tecnologia a tal processo.

2.2 Revisão de literatura e avaliação de anterioridade em portais de patentes

As possibilidades de implementação de tecnologia na indústria de óleos essenciais foram as bases para estabelecer o espaço de pesquisa a ser explorado. Os progressos realizados até então, bojo da revisão de literatura e da avaliação de anterioridade em portais de patentes, demonstram haver caminho promissor para avanços neste ramo industrial, que se encontra em crescimento constante.

Como já citado, muitas pesquisas foram realizadas com foco em modelagens, tempos e condições gerais de extração, controles acurados de temperatura de vapor, busca por tamanho ótimo da erva picada, dentre outros, o que demonstra a relevância e oportunidade da presente pesquisa sobre aplicação de tecnologias ao processo de destilação por arraste a vapor d'água para torná-lo adaptável a cada matéria-prima e às variações de uma mesma erva aromática provinda de diferentes colheitas.

2.2.1 Revisão de literatura

As primeiras análises exploratórias contaram com direcionamentos, isto é, formulação de descritores iniciais, a partir de consultas a pesquisadores da área e indústrias deste ramo.

O Prof. Dr. Farid Chemat, da Universidade de Avignon (França), estudou a intensificação dos processos extrativos, com vistas à melhoria dos rendimentos e consumos energético e de água, além do foco na chamada "extração verde". Com a consulta a este pesquisador adveio o entendimento da importância das reduções destes consumos e outros insumos, intimamente conectados à duração do processo.

A Profa. Dra. Maria Angela Meireles, da Universidade Estadual de Campinas, trouxe a visão de métodos extrativos não convencionais e do impacto das altas temperaturas sobre a qualidade dos OE. Assim o controle da exposição a altas temperaturas e o controle da condensação foi integrado ao planejamento da pesquisa.

Já a contribuição do Prof. Dr. Martins Cerqueira, da Universidade Federal da Bahia, foi sobre os diversos fatores que impactam os volumes extraídos quando os organismos vegetais apresentam diferenças de condições gerais de plantio, manutenção e colheita, fazendo com que cada uma delas tenha um comportamento específico durante a extração.

Com mais uma contribuição importante, o Dr. Nilson Bolina, do Instituto Agrônomo de Campinas, trouxe a importância da distribuição homogênea do vapor e da sua trajetória através do leito vegetal. A anisotropia do meio acaba por provocar o aparecimento de canais preferenciais no fluxo de vapor (denominados *channeling*). Um promissor caminho de pesquisa se abriu para a confirmação, a detecção e a correção deste desvio.

A pesquisa por referencial teórico atualizado teve continuidade até agosto de 2022 através de acessos aos portais Google Acadêmico, IEEE, Scopus, Science Direct e CAPES.

Como critério para as buscas, foram considerados teses, dissertações e artigos, na língua inglesa (pois o resumo e palavras-chave são, na grande maioria das publicações, escritos nesta língua), publicadas no período compreendido entre 2017 e 2022, considerando qualquer parte do texto (título, resumo, palavras-chave e texto completo). O operador booleano “NOT” poderia ter sido utilizado para excluir aqueles trabalhos que abordaram outros métodos extrativos. Porém, foi bastante comum encontrar termos relativos a outros métodos em contextualizações introdutórias, o que levaria à perda de material importante.

A estratégia de busca criada se utilizou das seguintes palavras-chave, conforme o Quadro 2:

Quadro 2. Palavras-chave utilizadas na pesquisa sistemática

Descritores (português)	Descritores (inglês)
Óleo essencial	<i>Essential oil*</i>
Destilação a vapor	<i>Steam distillation</i>
Controle de processo	<i>Process control</i>
Tecnologia	<i>Technology</i>
Manufatura 4.0 OU indústria 4.0	<i>Manufacturing 4.0 OR industry 4.0</i>
Caminhos preferenciais de vapor	<i>Channeling</i>
Duração do processo ou tempo de destilação	<i>Process duration OR distillation time</i>

Fonte: autoria própria.

Descritores mais ajustados à pesquisa obtiveram um número pequeno de resultados. Um exemplo destes descritores seria o seguinte: “*essential oil*” AND “*steam distillation*” AND “*process control*” AND (*channeling* OR “*duration*” OR “*distillation time*”)

Então, para alargar o horizonte de busca e obter resultados que permitissem material para a pesquisa, foi criada a estratégia, mais abrangente, número (1) na Tabela 1. Ainda nesta tabela, outros descritores testados permitiram entender a baixa disponibilidade de trabalhos no tocante à aplicação de tecnologia neste tipo de extração, mostrados nas demais estratégias de busca.

Tabela 1. Resultados das pesquisas

Descritores	Google Acadêmico	IEEE Xplore	Scopus	Science Direct	CAPES
1. "essential oil*" AND "steam distillation" AND "process control"	159	18	36	25	18
2. "essential oil*" AND "steam distillation" AND "process control" AND technology AND (channeling OR "process duration" OR "distillation time")	27	0	1	4	2
3. "essential oil*" AND "steam distillation" AND "process control" AND ("manufacturing 4.0" OR industry 4.0)	10	0	0	0	1
4. "essential oil*" AND "steam distillation" AND "process control" AND (channeling OR "process duration" OR "distillation time")	30	0	1	6	1
5. "essential oil*" AND "steam distillation" AND "process control" AND (channeling OR "process duration" OR "distillation time") AND ("manufacturing 4.0" OR "industry 4.0")	35	0	1	0	1
6. "essential oil*" AND "steam distillation" AND (industry 4.0" OR manufacturing 4.0")	24	0	1	1	1

Fonte: autoria própria.

Os trabalhos obtidos nos demais portais de pesquisa foram repetições daqueles resultantes da pesquisa no Google Acadêmico. A estratégia de busca (1),

apesar de abrangente, resultou em apenas 159 trabalhos que, como já dito, continham os dos demais sites de busca. Estes foram verificados através de títulos e/ou resumos. A leitura completa foi realizada naqueles com potencial para aproveitamento.

Excetuando-se publicações deste autor (num total de 7, sendo 5 como autor e 2 como coautor), os demais trabalhos não abordaram o controle de processo na destilação de óleos essenciais, nem a detecção ou a correção do “*channeling*”, tampouco a determinação do ponto economicamente viável para finalização do processo.

Os achados ficaram assim distribuídos: 23 relacionados ao controle de temperatura do vapor; 20 relacionados a modelagens diversas; 15 com sustentabilidade; 15 com controle de qualidade ou qualidade assegurada; 11 para aplicação como agentes microbianos, bioativos, anti-inflamatórios; 7 relativos ao consumo de energia; 7 sobre o uso de micro-ondas; 6 abordaram otimização de processo convencional, sem implementação de tecnologia; 6 com aquecimento ultrassônico ou ôhmico; 5 sobre preparação da matéria-prima; 5 trabalhos com objetivos diversos (comunicação industrial, processo de extração contínuo, bebidas, uso de água subcrítica); 3 sobre fatores influentes na extração (tempo, pressão temperatura); 3 para proteção de alimentos e plantas; 2 sobre extração com fluido supercrítico; 24 trabalhos não estavam relacionados ao tema (terapias, perfumaria, etc.).

Desta pesquisa o que pôde ser depreendido é que há uma quantidade considerável de resultados tratando de modelagens e controles das condições do vapor, com maior concentração na variável temperatura. Porém, quando o descritor foi elaborado com foco específico à adição de tecnologias ao processo, os resultados foram reduzidos.

A seguir, no texto, serão destacados trabalhos cujos temas confirmaram as lacunas que a presente tese buscou preencher. Especificamente, a distribuição homogênea de vapor, com a detecção e minimização do “*channeling*”; a determinação do tempo economicamente viável de processo e a redução das perdas por evaporação pós condensação.

Shariff et al. (2021) reforçam a importância do controle de temperatura para garantir rendimento e qualidade (ao se evitar a degradação por sobre-exposição a altas temperaturas). Chegam a condicionar somente a este controle tais resultados de

processo. No entanto, estes autores deixam de observar que, no interior da massa de erva aromática, podem ocorrer porções por onde o fluxo de vapor é mais intenso (*channeling*).

Belwal et al. (2020) trazem seu aprendizado na busca por escalas industriais para os métodos extrativos chamados não-convencionais. Deste trabalho apreende-se a importância da adição de tecnologias aos processos extrativos, no que toca a obtenção de rendimentos e perfis analíticos melhores, também corroborado por Chávez (2007), em relação à destilação a vapor, quando salienta a necessidade de melhores monitoramento e controle de processo

Stashenko (2018) enfatiza a qualidade e custos de produção, fatores-chave de competitividade, como o temática fundamental para a busca de otimizações nos processos industriais deste setor.

Sartor (2009) cita a carência tecnológica como um dos fatores para não haver uma descrição precisa dos processos extrativos de óleos essenciais por arraste a vapor d'água. Enfatiza ainda a falta de dados experimentais sobre o comportamento da extração no seio da massa vegetal.

Cannon et al. (2013) exploraram o impacto da variável tempo (duração do processo) sobre os rendimentos materiais e composições dos óleos essenciais obtidos, em pequenas quantidades laboratoriais. Esta pesquisa chamou a atenção sobre possibilidades de otimização do rendimento energético quando o tempo de extração é controlado.

Segundo Tajjudin et al. (2012), pode ocorrer degradação do óleo essencial devida à excessiva exposição ao calor, durante a destilação com vapor. Este autor é mais um a propor o controle da temperatura do vapor e menciona a reduzida literatura disponível no tocante ao desenvolvimento de controles. Contudo, a trajetória do vapor, ou seja, o estudo da homogeneidade em sua distribuição e a eventual formação de caminhos preferenciais, não foi estudada. A não-uniformidade levaria porções da erva aromática a exposição prolongada e indesejada a altas temperaturas e em outras a carência de fluxo de vapor.

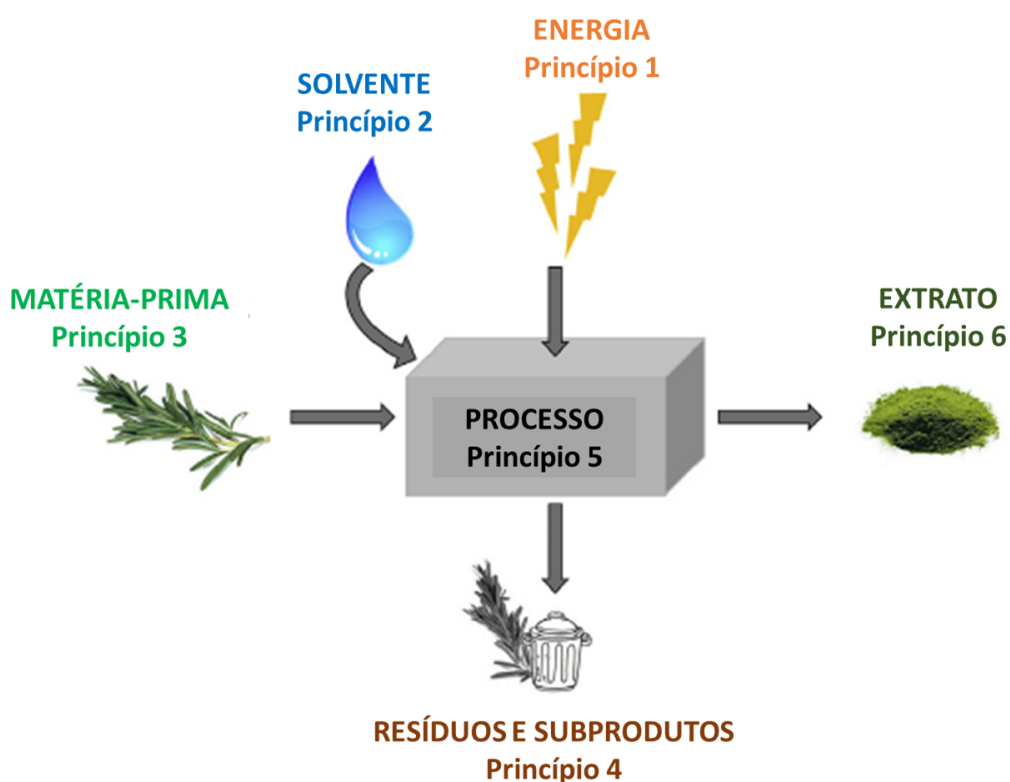
Diversos autores mencionaram essa possibilidade de degradação do produto em condições de processo, principalmente por falta de controle e duração excessiva, Belwal et al., (2020) dentre eles. A fragilidade das moléculas aromáticas dos óleos essenciais demanda controle das condições de processo com seus principais

parâmetros: temperatura, pressão, tempo de destilação, tamanho de partícula da erva e a quantidade de vapor utilizada (KASUAN; TAIB; RAHIMAN, 2011).

Wahyudi et al. (2020), ao tratar da baixa qualidade do óleo de citronela na Indonésia, salientam a simplicidade da tecnologia empregada e as limitações de capacidade. Tais restrições tecnológicas, quando resolvidas, poderiam trazer aumento de produtividade e melhoria da qualidade. Mencionam ainda a importância da informação de processo em tempo real, comunicação, internet das coisas e sistemas de sensores em sistemas fabris de fácil operação, rápidos e de baixo custo operacional.

Com os conceitos de intensificação de processos na indústria de extração, Chemat et al. (2019) reforçaram a necessidade de um movimento na direção de seu aprimoramento, com vistas à extração verde ou ambientalmente amigável. Ainda segundo eles, tais melhorias habilitam rendimentos melhorados e tempos de extração otimizados, com diretos impactos no desempenho desta indústria. A Figura 5 ilustra os princípios da extração verde preconizada por estes autores, que colocam o processo como ente central, dada a sua importância.

Figura 5. Princípios da extração sustentável



Fonte: adaptado de Chemat et al. (2019).

Embora estes autores abordem o tema de modo geral para processos extrativos, a aplicação dos princípios da extração verde ao caso do arraste por vapor d'água leva a considerar:

Princípio 1: Uso efetivo da energia: processos que evitem perdas e tenham a duração determinada pelo ponto economicamente viável do volume extraído;

Princípio 2: a utilização de água para geração de vapor e para condensação na vazão econômica e sem desperdícios;

Princípio 3: Matéria-prima preparada (moagem, secagem, picagem) de forma a gerar a maior quantidade de óleo essencial com a mesma quantidade de erva, com diretos efeitos na redução da área de plantio e consumo de insumos agrícolas;

Princípio 4: Como decorrência do princípio 3, visando à maximização da extração, este princípio leva à geração de menores quantidades de resíduos e subprodutos, para uma mesma quantidade de óleo essencial extraída.

Princípio 5: O processo é onde ocorre a extração, permitindo – se bem projetado - materializar melhores rendimentos material e energético, além de melhor qualidade dos produtos.

Princípio 6: O óleo essencial extraído, quando com qualidade superior, terá melhor aceitação no mercado, sem correr riscos de rejeição nas análises – o que significaria devoluções, retrabalhos ou mesmo disposição e tratamento como efluente.

Tais princípios, na realidade da indústria de OE, refletem o movimento em direção à intensificação de todos os processos, desde o plantio e suprimento das matérias-primas, destilação e destinação de produtos e efluentes.

Donelian et al. (2009) realizaram estudo comparativo entre a destilação a vapor d'água e a extração com dióxido de carbono supercrítico e corroboraram a sobre-exposição às altas temperaturas como fator de degradação do OE. As contribuições da chamada onda 4.0 para a indústria, trazidas por Dalenogare et al. (2018), quando propostas para o cenário tecnológico do segmento de óleos essenciais, oportunizam a proposta desta tese.

Pequenas e médias empresas, típicas e maioria no mercado de OE, com baixo faturamento e força de trabalho de até 80 empregados, carecem de acesso a

conhecimento já disponível e, conseqüentemente, de investimentos efetivos, que atinjam o objetivo de atualização tecnológica (UHLENBROCK, et al., 2018).

A quase total dependência de ação manual para controle do processo aliada a procedimentos baseados em práticas costumeiras (e formalizadas, porém sem evidência experimental) de cada indústria, levam à perda de oportunidades importantes. Tempos de processo curtos ou longos, baseados tão-somente em práticas historicamente estabelecidas, impedem o atingimento dos rendimentos materiais otimizados ou desperdiçam recursos energéticos, água e tempo de equipamento, respectivamente, além do risco de degradação de componentes por sobre-exposição a altas temperaturas (MACHADO et al. 2021c).

Ocorrências de processo indesejáveis passam sem ser detectadas, e, portanto, não corrigidas. Assim, elas afetam negativamente o rendimento e a qualidade do produto. O rendimento obtido é um indicador crucial para a determinação dos custos produtivos e, portanto, da competitividade da indústria de O.E (CHAKRAVARTY, PARMAR, MANDAVGANE, 2021).

Pela aparente simplicidade do processo, tecnologias adequadas e cabíveis não têm sido empregadas, deixando uma lacuna a ser explorada na gestão de tecnologia industrial e também no âmbito acadêmico. O método de extração de óleos essenciais por destilação a vapor d'água requer longo tempo de processo, na maioria dos casos de uma a duas horas, segundo a espécie e as práticas específicas de cada indústria, e necessita de constante monitoramento humano. O operador é, em grande parte desta indústria, o único ente de controle, necessário para verificar e corrigir o andamento do processo (JOHARI et al., 2020).

A produção de extratos vegetais, dentre eles os óleos essenciais, tem por base as técnicas produtivas tradicionais. Características desta indústria, a natural variabilidade das espécies vegetais e a extensa gama de produtos compondo seu portfólio justificam a discussão de abordagens de manufatura inovadoras, processos adaptáveis, visando enfrentar os desafios de um mercado mais demandante por qualidade e aspectos regulatórios cada vez mais exigentes (UHLENBROCK, et al., 2018).

Dalenogare et al. (2018) enfatizam a contribuição da chamada indústria 4.0, com uma manufatura flexível, que gera custos otimizados, confiabilidade e qualidade consistente. Lamentam, ainda, a perda de oportunidade no Brasil, quando a reposição

de equipamentos e sistemas produtivos não aproveita os avanços desta onda 4.0. Estes autores mencionam a carência de ferramentas que possibilitem o avanço tecnológico em termos de prospecção e atualização.

Tais comentários são cabíveis à indústria de óleos essenciais no Brasil, uma vez que se faz “muito do mesmo”, mesmo em novos investimentos, o que permitiria afirmar que a indústria brasileira de óleos essenciais ainda vive nas eras 2.0 ou, no máximo, 3.0, caracterizadas por produção organizada e automação básica, respectivamente (DALENOGARE et al. 2018).

2.2.2 Pesquisa em portais de patentes

A prospecção em portais de patentes fundamentou o artigo “Steam Distillation for Essential Oil Extraction: *“An Evaluation of Technological Advances Based on an Analysis of Patent Documents”* publicado no periódico *Sustainability Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI) e que serviu de referência para a sequência desta seção da tese (MACHADO et al., 2022).

Esta prospecção, realizada em 30 de novembro de 2021, usou o banco de dados *Derwent World Patents Index* (DWPI), Thomson Innovation© (Toronto, ON, Canadá), licenciado pelo Centro Universitário SENAI CIMATEC (Salvador, Brasil).

Inicialmente, foi construída uma tabela-escopo contendo as diferentes estratégias avaliadas e o número de documentos de patentes recuperados. Essa avaliação incluiu uma busca por documentos de patentes sobre atualizações tecnológicas, como tecnologias digitais aplicáveis ao método de destilação a vapor para extração de OE. No entanto, quando os descritores incluíam palavras-chave associadas com a busca específica desta tese, como “tecnologias digitais” aplicadas à “destilação” de “óleos essenciais”, ou relacionada a conceitos da indústria 4.0 aplicados à destilação de OE, nenhum documento foi recuperado.

Então, para acessar documentos relacionados ao assunto, uma estratégia mais abrangente foi adotada. Os documentos de patentes recuperados foram analisados para avaliar se qualquer tecnologia ou outros tipos de controles de processo estariam em seu escopo. As seguintes palavras-chave foram utilizadas: “*essential oil* AND extraction AND steam distillation.*”

A busca foi realizada nos campos de títulos, resumos e reivindicações dos documentos de patentes, sem restrição quanto ao período de coleta de dados. Foram avaliados os seguintes indicadores: ano de publicação e ano de expiração, principais requerentes, principais inventores, principais países e os principais códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) utilizados na classificação do documento.

A busca de patentes relativas ao método de destilação a vapor de extração de OE encontrou 490 documentos. Entre estes, 294 (60%) documentos estavam ativos, enquanto 187 (~38,16%) documentos haviam expirado e outros 9 (~1,83%) documentos tinham validade jurídica indeterminada.

Os primeiros documentos foram publicados em 1997. A partir deste ano, houve um crescimento no depósito e publicação de documentos de patente relacionados à aplicação do método de destilação a vapor de extração de OE. O pico de publicações ocorreu no ano de 2020 com 81 publicações. Já em 2021, houve redução, com 62 publicações. É cabível explicar que após o depósito do pedido de patente há um período de sigilo, imediatamente anterior à publicação, cuja duração depende de cada escritório de patentes. Na maioria dos países a patente é publicada em cerca de 18 meses após a data do primeiro depósito. Portanto, documentos do último período podem não ter sido recuperados nesta busca de patentes.

Outro indicador importante foram os dados de expiração dos documento de patente, análise esta que permite acessar tecnologias previamente protegidas, disponibilizando-as ao domínio público e fornecendo informações técnicas e científicas que poderiam ser usadas por outras empresas para melhorar seu processo de destilação de OE, ou aplicado a outros tipos de processos.

Dos documentos analisados, 41 deles expiraram em 2021 e suas tecnologias caíram em domínio público. Isso significa que as informações contidas nesses documentos poderiam ser exploradas por pesquisadores e empresas, com o objetivo de extrair alguns indicadores importantes. Além disso, patentes expiradas podem levar a novas oportunidades de negócios e pode ser usado em benefício do público. O Quadro 3 mostra a análise dos 490 documentos recuperados e analisados.

Quadro 3. Análise dos documentos de patentes para avaliar os patentes que aplicaram tecnologia na atualizações dos processos

Item	Classificação	N. de Documentos
1	Saúde humana e animal; cosméticos; repelente; melhora do paladar; desinfetante; agente esterilizante; acaricida; cuidados com a pele e acne; aroma de tabaco; aditivo para bebidas; purificador de ar; conservante de alimentos; perfume de lavanderia.	320
2	Preparação da matéria-prima e pós-tratamento do produto (membrana; purificação; fracionamento; ultrassom; fermentação; concentração; expressão mecânica).	33
3	Extração com solventes orgânicos; uso de tensoativos; vácuo; solução salina.	29
4	Destilador mecanicamente melhorado; melhoria do fluxo; procedimentos otimizados.	27
5	Destilação a vapor multiuso com solventes ou pré-tratamento com ultrassom.	25
6	Concentre-se em matérias-primas (por exemplo, pistache; tangerina; alho; chá verde; casca de carvalho; maracujá; canela; lavanda; cardamomo; angélica; cânfora).	20
7	CO ₂ em estado supercrítico e água em estado subcrítico.	12
8	Foco em hidrosol e água de cheiro.	5
9	Outros foram os seguintes: aditivo de papel; retardante de fogo; purificador de ar (bactericida); aditivo de combustível; corante natural; fertilizante; aditivo de borracha de silicone.	14
10	Pré-tratamento microbiano para melhorar o rendimento.	2
11	Extrato seco.	1
12	Controle da pressão do vapor d'água.	1
13	Método analítico.	1

Fonte: Autoria própria (2022)

A maioria dos documentos (320) estava relacionada a formulações visando cuidados de saúde e cosméticos. Em seguida, com 33 documentos, estavam aqueles relacionados à preparação das matérias-primas e especificidades tratamento pós-extração dos OE. Sobre o uso de outros métodos de extração, em conjunto com destilação a vapor, 29 documentos foram encontrados. Sobre destiladores mecanicamente melhorados e otimização de fluxo 27 patentes. Destilação a vapor multipropósito com solventes e/ou pré-tratamento ultrassônico 25, aqueles com foco na própria matéria-prima 20, o uso de outros métodos de extração como CO₂ supercrítico ou água subcrítica 12, e outros temas, 14.

De fato, o subgrupo 4 foi o único que apresentou algumas patentes relativas a melhorias de processo, visando aumento de rendimento e qualidade com base em melhorias mecânicas e otimização do fluxo de vapor. No entanto, nenhum trabalho abordou a aplicação de tecnologias digitais, principalmente para detecção e correção dos caminhos preferenciais de vapor ou determinação do ponto de conclusão economicamente viável da extração (MACHADO et al., 2022), assim reforçando a oportunidade e relevância desta pesquisa.

2.3 Tecnologias digitais inteligentes aplicáveis ao processo de arraste a vapor d'água

Aqui serão abordados elementos de tecnologia apropriados à extração de OE com vistas à melhoria de rendimentos e qualidade, quer por inovação no modo de aplicação ao processo ou por adaptação de outros setores industriais.

Tratando da indústria alimentícia, Režek Jambrak et al., (2021) trouxeram pontos relevantes, com plena aplicabilidade à indústria de óleos essenciais, no tocante ao uso de elementos tecnológicos para melhoria de desempenho operacional. Dentre eles os autores abordaram o controle inteligente e monitoramento dos processos, a otimização a partir de análise de banco de dados e ressaltaram aspectos de sustentabilidade. É por eles trazida a importante contribuição da aplicação de tecnologia para redução de ineficiências através, por exemplo, dos sensores inteligentes. Salientam, ainda, o positivo impacto na relação da eficácia nas operações da cadeia de suprimentos com o atendimento e serviço aos clientes.

A seguir, alguns elementos com potencial aplicabilidade à atualização tecnológica da destilação a vapor, serão abordados.

2.3.1 Sensores e atuadores

Schütze e Helwig (2018) afirmam que a instrumentação e a ciência da medição como basilares para a chamada indústria 4.0, além da necessária flexibilidade e características de autoconfiguração de processos.

Serão elencados alguns elementos convencionais que, se aplicados de acordo com um conceito de processo adequado e inovador, poderão trazer benefícios interessantes.

(1) Elementos sensores de temperatura:

Assim como outros autores, já mencionados neste texto, Dobrnjac et al. (2017) e Valderrama e Ruiz (2018) também enfatizam a importância da distribuição homogênea de temperaturas e, em consequência, do vapor.

No entanto, os estudos pesquisados utilizaram sensores de temperatura instalados de forma a monitorar o vapor na entrada do vaso extrator. Não foi abordada a inserção de tais sensores diretamente do seio da matéria-prima. Uma estrutura de termopares, por exemplo, em uma instalação multiponto distribuídos no seio da massa vegetal daria uma perspectiva da distribuição do vapor durante o processo de extração. Assim, a instalação destes elementos de medição, expostos diretamente ao processo – por onde flui o vapor no interior da massa vegetal -, isto é, sem os usuais poços termométricos, permitiria a obtenção de dados de temperatura com menor inércia de transmissão. Tal forma de instalação, daria maior agilidade de acesso aos dados, visando detectar as indesejadas diferenças de temperatura, que refletem a distribuição não homogênea do vapor.

Muitas hipóteses simplificadoras, adotadas por diversos autores, colaboram para entendimento de algumas partes do processo. Hipóteses como: o uso de escala de laboratório, diminuta, com folhas selecionadas; a isotropia do meio; o fluxo de vapor perfeitamente distribuído radial e axialmente, ou seja, uma distribuição homogênea de vapor; a inexistência de correntes preferenciais de vapor através de determinadas porções da erva; a consideração de que o óleo essencial extraído se comporta como uma só substância e não como uma mistura complexa de componentes químicos, dentre outras. (ROMDHANE; TIZAOUI, 2005, HUANG, 2015, CASSEL; VARGAS, 2006, CASSEL, et al., 2009, XAVIER et al., 2011, MEZIANE et al., 2019, MAHARAJ; MCGAW, 2020).

(2) O motor de passo como atuador de processo:

Motores de passo, elementos necessários quando requeridos movimentos de rotação precisos, permitem posicionar o seu eixo em qualquer ângulo, variar ainda velocidade, torque e sentido. (ATHOS ELECTRONICS, 2021).

Como um atuador, o motor de passo assume a função de posicionar um elemento rotativo, um eixo acoplado ou um dispositivo que requeira precisão posicional (KIM; CHO, 2018). Fonseca et al., (2017) utilizaram motor de passo como atuador no controle de turbidez de corrente de água para fins de potabilidade, por exemplo.

(3) Sensores de vazão e massa

Os sensores de vazão e massa podem ser aplicados como medidores no processo de extração. Em um sistema de condensação, em conjunto com sensores de temperatura, atuam na determinação do desempenho térmico do sistema.

Um sensor de vazão muito utilizado é o tipo turbina e tem uma teoria de operação relativamente simples: o fluido passa pelo medidor, impele as lâminas da turbina que giram com velocidade angular proporcional à velocidade do fluido. (EMERSON ELECTRIC, 2021).

Balanças de processo, também conhecidas como células de carga, permitem instalação com flexibilidade da aplicação e indicam peso instantâneo através de transmissão de dados a um controlador lógico de processo, por exemplo. Estes dados instantâneos de massa podem ser processados para obtenção de informação sobre o fluxo de massa.

2.3.2 Controle e monitoramento de processos

A arquitetura de controle e monitoramento de processos é desenhada para atender especificamente a necessidade da aplicação e tem sua importância para a acuracidade do controle das variáveis críticas relacionadas com segurança, qualidade e eficiência do processo: quanto mais robusta, melhor será o desempenho do processo (UHLENBROCK et al., 2018).

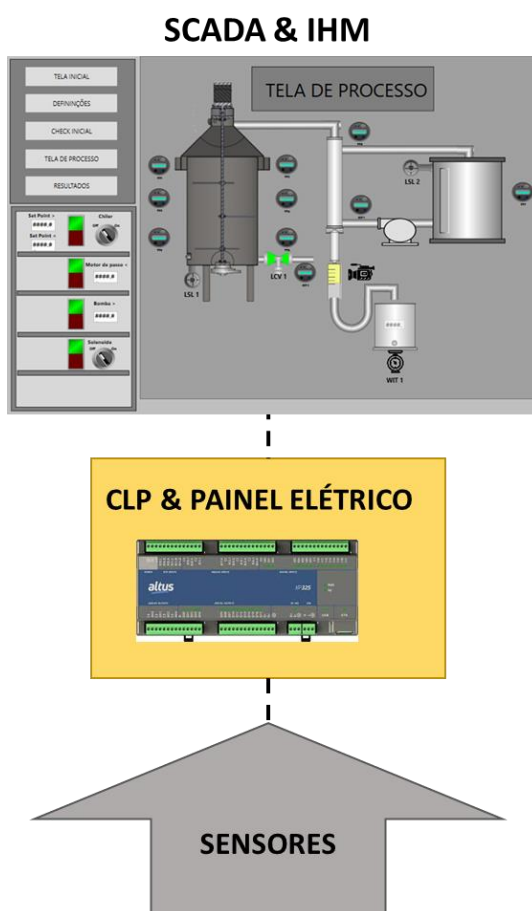
Nicola et al., (2017) enfatizam a importância do sistema supervisor, de controle e de aquisição de dados denominado em inglês "*Supervisory, Control and Data Acquisition*" (SCADA). Sua adaptabilidade aos mais diferenciados processos, expansibilidade, controles gráficos e amigável interface homem-máquina tornam-no de grande utilidade à indústria.

O Controlador Lógico Programável - CLP realiza o papel de controlador das variáveis digitais e analógicas, em malhas abertas ou fechadas, com possibilidades amplas de adaptação a quaisquer processos. Jaimand et al., (2020) utilizaram SCADA e CLP para otimização da extração de óleo essencial de alecrim. Os autores descreveram o CLP como um computador industrial que continuamente controla e

monitora as entradas e saídas de processo, ações estas baseadas em um programa customizado caso a caso.

A Figura 6 mostra um exemplo de arquitetura de controle, aplicada - com menor complexidade – a um processo de extração de óleos essenciais. Compõem-na o SCADA, o CLP e os sensores e atuadores do chão-de-fábrica. O IHM é elemento integrante do SCADA e serve como Interface Homem-Máquina.

Figura 6. Arquitetura de controle.



Fonte: autoria própria.

2.3.3 Processamento de imagem para detecção de volume extraído

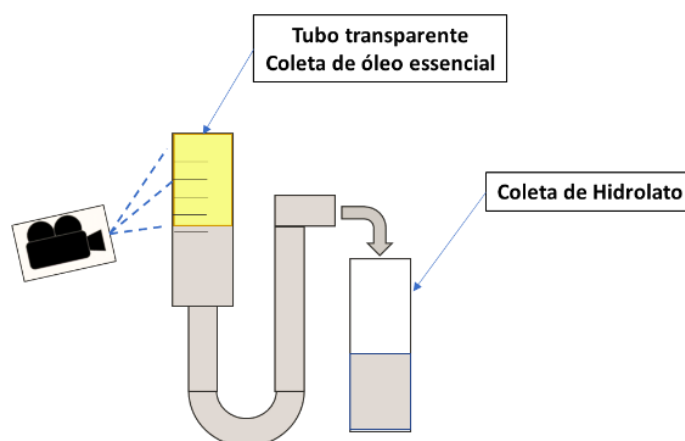
Chen et al., (2020) aplicaram um sistema de processamento de imagem para medição de nível com o intuito de um acompanhamento frequente desta variável e da busca por não dependência de mão-de-obra, apresentando boa precisão. DU, Li e Meng (2017), ao estudarem tecnologias de processamento de imagem, aplicaram-nas

na detecção das bordas de ondas e mencionaram sua ampla aplicabilidade na detecção da interface do líquido com o meio que o circunda.

Gonçalves et al., (2015) aplicaram esta tecnologia na aquisição e controle de características da produção de fios (massa e distúrbios na superfície) com positivo impacto na qualidade do produto têxtil.

O processamento de imagem, aplicado à extração de óleos essenciais, pode trazer os benefícios obtidos por estes autores, acima mencionados, com a vantagem de acompanhar continuamente o progresso da operação até o atingimento do ponto economicamente viável. A Figura 7 mostra, esquematicamente, o avanço da extração e seu volume extraído, acompanhado pelo sistema de processamento de imagem.

Figura 7. Controle do rendimento de extração com processamento de imagem.



Fonte: autoria própria

2.3.4 Gêmeo Digital

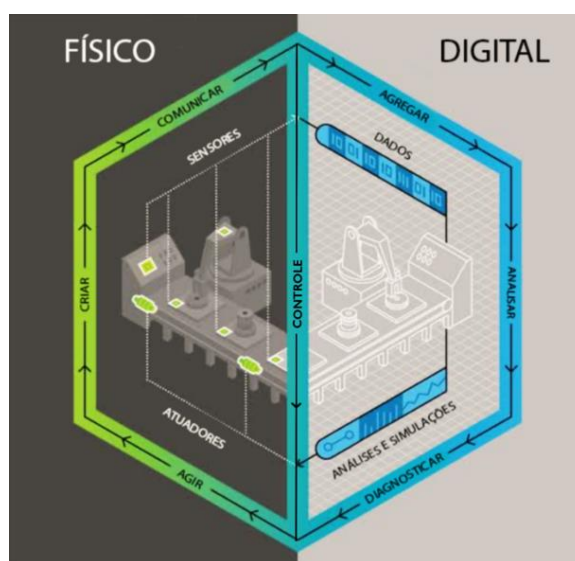
O gêmeo digital é uma ferramenta de modelagem virtual de um sistema, processo ou serviço e, para tanto, necessita de seu gêmeo físico para aquisição de dados. Reflete o desempenho e permite programar atividades com base no comportamento do ambiente operacional (MADNI; MADNI; LUCERO, 2019). Seria uma ferramenta poderosa para a previsão e modelagem em processos extrativos de OE.

Parrott e Warshaw (2017) definiram o gêmeo digital de forma bastante interessante: “Um gêmeo digital pode ser definido, fundamentalmente, como a evolução digital do perfil histórico e do comportamento atual de um objeto físico, que

contribui para otimizar o desempenho dos negócios” (PARROTT; WARSHAW, 2017, Tradução nossa).

A Figura 8 mostra a interação entre o produto ou operação real e sua representação virtual. Desde a aquisição de dados, com a operação ou uso do produto, até tratamento e análise destes dados, o gêmeo digital habilita avaliação de simulações para obtenção de melhores parâmetros e alimenta o processo ou produto real com estes valores ou parâmetros aprimorados para ajustes necessários.

Figura 8. Interação entre os espaços: operacional físico e digital.



Fonte: Adaptado de Parrott e Warshaw, (2017).

No âmbito fabril, a incorporação de sensores para obtenção de dados do processo físico, permite o acesso do modelo virtual à realidade física, integrando-os e habilitando o monitoramento e análise de dados em tempo real e percepções sobre o comportamento do sistema (XIA et al., 2020).

Xia et al. (2020) adentram na manufatura baseada em tecnologias digitais inteligentes com o aprendizado de máquina e o gêmeo digital. A abordagem baseada em dados, como representação da manufatura, permite progressiva melhoria, de forma adaptativa, do meio fabril. A comunicação entre um meio digital e uma fábrica - que possua uma arquitetura de controle e monitoramento instalada- habilita o acesso aos dados de operação, assim ocorrendo a conexão entre a automação física e a automação cognitiva.

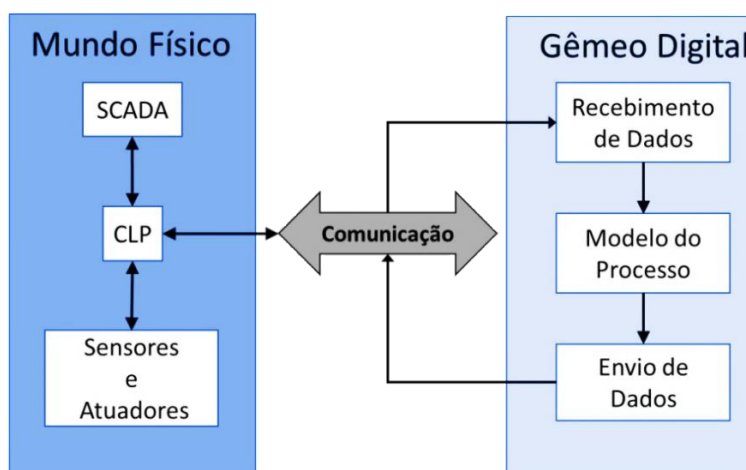
A integração dos sistemas virtuais e físicos abre novas portas para a chamada manufatura inteligente, baseada em dados para representar e simular células de

manufatura e controlar, de forma adaptativa, as variáveis manipuladas (XIA et al., 2020).

A Figura 9 representa a interação entre os mundos físico e virtual, ou seja, entre o gêmeo físico e o digital. Nela, os sensores mandam sinais para o Controlador Lógico Programável (CLP) e este os processa, no ambiente físico. A inteligência artificial realiza análise destes dados e os “*outputs*”, parâmetros aprimorados, são enviados ao gêmeo real. O software SCADA atua como supervisor e Interface Homem Máquina (IHM), coleta dados e informa o operador visualmente ou através de relatórios (DE ANDRADE; LEPIKSON; MACHADO, 2021 a e b).

Andrade (2021) explora esta temática em seu trabalho, com um método para criação de gêmeos digitais, desenvolvido para um sistema extrativo de óleos essenciais.

Figura 9. Gêmeo digital: interação entre os meios real e virtual.



Fonte: adaptado de Andrade, Lepikson e Machado (2021).

2.4 Benefícios da gestão de tecnologia para a indústria de OE

A gestão de tecnologia, para as atividades de manufatura, é fator determinante da competitividade dos negócios de uma empresa. Fatores chave como custo geral de fabricação, prontidão para atendimento ou superação das expectativas dos clientes, confiabilidade operacional, qualidade de produto (aderência aos padrões e especificações), segurança, saúde ocupacional e desempenho ambiental, são consequências de escolhas e decisões realizadas quando do projeto de implantação.

Qian, Zhong e Du (2017) fundamentam a importância da introdução de tecnologias inteligentes nas indústrias de processo ao mencionarem as palavras alta-

eficiência, segurança, qualidade, otimização energética, sustentabilidade, atendimento ao cliente, dentre outras.

Migdadi (2020) enfatiza a gestão do conhecimento através de sua importância na gestão da relação com os clientes, o que permitiu a colocação: as inovações trazidas pela introdução de tecnologia levam a atividades empresariais mais eficientes.

A indústria de óleos essenciais não é exceção a essas demandas de mercado e competitividade. Seu desempenho tem íntima correlação com as escolhas tecnológicas aplicadas nas instalações e, também, ao nível de excelência operacional que a organização da manufatura conseguirá atingir e manter. Assim, tanto o desempenho imediato como a perenidade do negócio estão intimamente conectados às análises de viabilidade do projeto, ou seja, das premissas tecnológicas estabelecidas. (MACHADO et al., 2020).

As boas práticas de manufatura são componentes de competitividade. Metodologias e ferramentas de gestão da manufatura são o elo entre um projeto cujas decisões tecnologicamente bem embasadas e o efetivo atingimento dos objetivos operacionais (MAHMOOD; ABDULLAH, 2015).

Apoiada em muitas atividades manuais ou semiautomáticas, com carência de sensoriamento de processo e sistemas de controles automáticos, apropriados e atualizados, a indústria de OE apresenta oportunidades nos âmbitos previsibilidade, repetibilidade e rastreabilidade das atividades de manufatura (MOREIRA; RAU, 2014).

Menores custos de fabricação serão obtidos quando a qualidade da matéria-prima (erva) possibilitar maiores rendimentos, quando o tempo de processo e a quantidade de energia forem administrados apropriadamente e os recursos de fabricação forem consumidos na medida exata. Também a capacidade produtiva será aumentada, com tempos de processo menores, redução ou eliminação de tempos mortos entre bateladas, ações corretivas de processo, realizadas automaticamente, independentemente de ação humana (MACHADO et al. 2021a).

A qualidade do produto está intimamente ligada à detecção e correção de desvios no processo. Para os OE a degradação é um dos maiores problemas, quando o vapor é mal distribuído ou o tempo de processamento vai além do necessário, causando a degradação do óleo essencial.

A intensificação de processos, ou seja, a constante busca por aprimoramento das operações extrativas, buscará maximização de eficiências energéticas, de rendimentos, de espaço e de tempo (ANASTAS; ZIMMERMAN, 2003, CHEMAT, et al., 2019, PERINO; CHEMAT, 2019).

De modo geral, possibilidades de aprimoramento da cadeia de valor na produção de OE foram trazidas por Uhlenbrock et al. (2018) que menciona a aplicação de atualização tecnológica.

Abordagens interessantes, tais como um robusto controle de temperatura do vapor, trazido por Automatik e Minyak (2013) e Johari et al. (2020), ainda não lançaram luz sobre o curso ou distribuição do vapor através do leito verde. Tampouco a duração da extração foi abordada sob a ótica de tecnologias que habilitassem sua determinação automaticamente.

3 ABORDAGEM PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada a abordagem tecnológica deste trabalho, em resposta à questão de pesquisa e aos objetivos da tese e a ser comprovada na etapa experimental.

A partir da revisão de literatura e da prospecção em portais de patentes foram detectadas lacunas que deram base à criação do conceito tecnológico aplicado à destilação de OE. Este conceito foi materializado nas seguintes propostas: a determinação do ponto ótimo para conclusão da extração; a ação para reduzir a perda de componentes químicos voláteis do OE, com o uso de água de condensação controlada; a detecção e correção (atenuação) dos caminhos preferenciais de vapor. Ainda a proposta se apoia no aprimoramento de parâmetros de processo baseado em tecnologias digitais.

A exposição prolongada a altas temperaturas tem como fatores influentes a própria temperatura do vapor e o tempo de processo. Comumente, nestas operações, a duração da extração é baseada somente em práticas históricas, com tempos fixos de processo, sem acompanhamento (manual ou automático) do progresso da extração, ou seja, do volume extraído. Porém, existe um ponto a partir do qual torna-se improdutivo a continuidade do processo, vide Figura 2, pois não há incremento significativo do volume obtido.

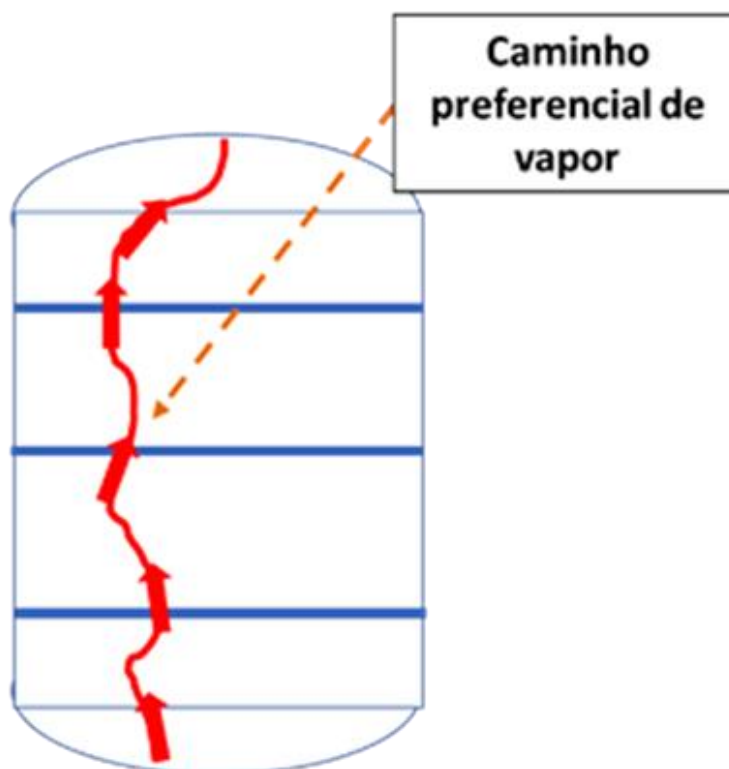
Ao ultrapassar esse instante, a extração terá prosseguido além do ponto ótimo, expondo a erva aromática, desnecessariamente, a altas temperaturas, desperdiçando energia e tempo de processo (capacidade produtiva), além de degradar a qualidade do produto obtido. Tanto na revisão de literatura como na análise de anterioridade em portais de patentes, não foram encontrados trabalhos que propusessem um sistema para detecção do volume extraído e a determinação do ponto econômico para finalização da extração.

Ponto importante a se salientar é que os OE, das diversas ervas aromáticas, apresentam densidades diferentes, portanto um sistema de detecção de volume deve ser adaptável a todos eles. A coluna de OE extraído fica sobrenadante sobre a coluna de hidrolato, em um tubo “U”, (vasos comunicantes) e, então, ocorrem contínuas variações das colunas hidrostáticas, fato que demanda um sistema adaptativo e

inteligente, capaz de monitorar o nível de óleo extraído apesar das flutuações da coluna de óleo essencial.

Com relação ao “*channeling*”, estes também expõem a erva aromática a altas temperaturas naquelas porções através das quais tenham se formado os caminhos preferenciais de vapor, ao passo que as demais porções do leito vegetal ficam pobremente atingidas pelo vapor, pela sua distribuição não homogênea. Risco de degradação por um lado e rendimento abaixo do possível do outro são as consequências. Esta ocorrência de processo é mencionada por diversos autores, porém não há trabalhos sobre a detecção e remediação ou atenuação deste indesejado fenômeno. A ocorrência do caminho preferencial de vapor é representada, esquematicamente, na Figura 10.

Figura 10. Caminhos preferenciais de vapor (*channeling*)



Fonte: autoria própria

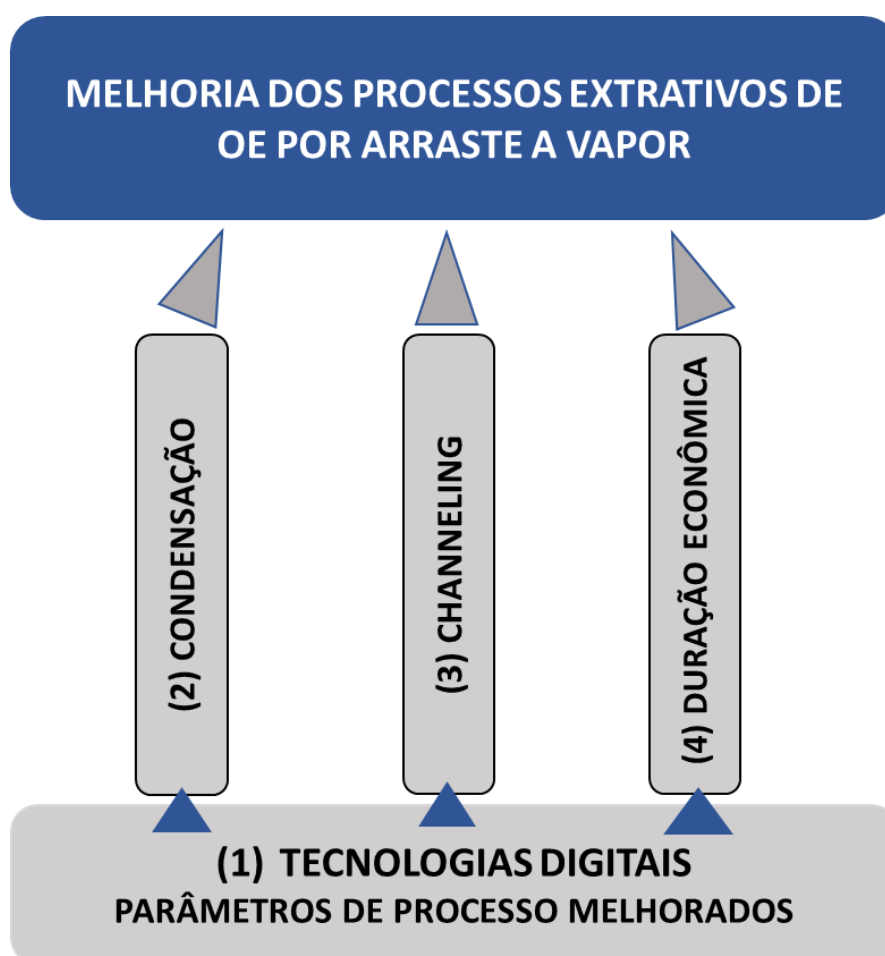
A proposta, portanto, conterà uma abordagem para acompanhar o progresso da extração (volume extraído com o tempo de processo) e determinar o ponto econômico para finalização do processo, e a detecção e correção dos caminhos preferenciais.

Terceiro ponto da proposta, a condensação da mistura vapor d'água / óleo essencial buscará melhorar esta parte crítica do processo. Na indústria de OE, a

temperatura do fluido de controle (água de condensação) é, comumente, a ambiente, provinda de tanque de armazenagem ou, no melhor dos casos, de torre de refrigeração. Assim, nos dias mais quentes ou mais frios, o comportamento da condensação varia em função da variação da temperatura da água de condensação.

A temperatura ambiente, nos dias mais quentes, possibilitará a perda de frações voláteis do óleo essencial impactando a qualidade do produto e os volumes extraídos. Assim, a abordagem proposta nesta tese, criada a partir das lacunas encontradas, apoia-se em quatro blocos fundamentais: 1 - busca por parâmetros de processos melhorados; 2 - controle da temperatura da água de condensação; 3 - detecção e correção do *channeling*; 4 – determinação da duração economicamente viável do processo, (Figura 11).

Figura 11. Blocos da abordagem proposta.



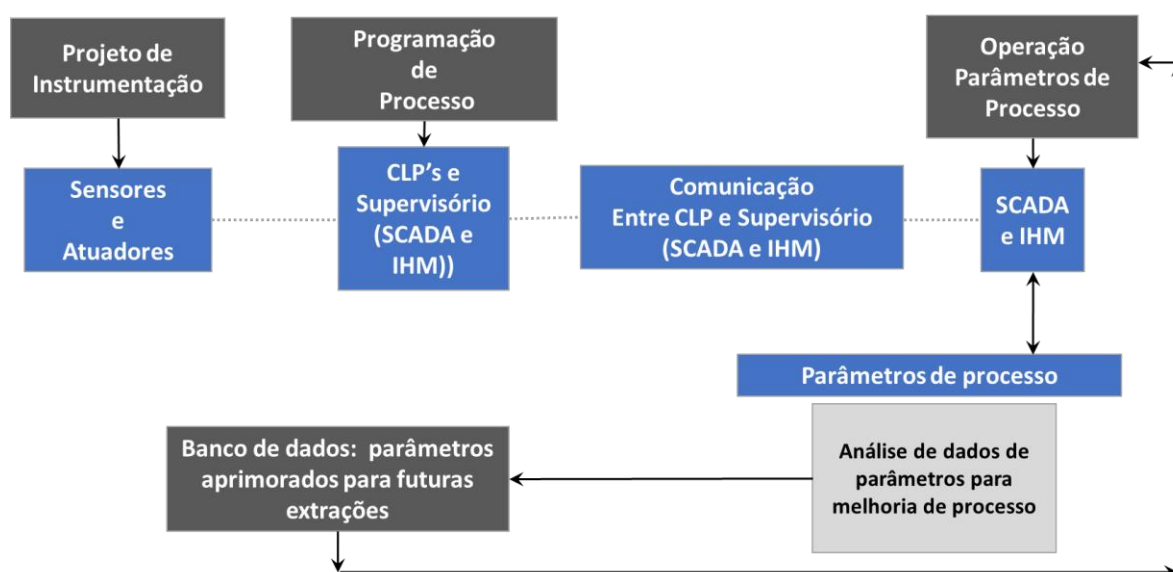
Fonte: autoria própria

3.1 Tecnologias propostas para melhoria do processo

A proposta desta tese não tem a pretensão de esgotar as possibilidades de adição de tecnologia aos processos de extração por destilação a vapor d'água. É, antes, uma abordagem que propicia melhorias da extração e abre caminho para futuros progressos.

A Figura 12 mostra o arcabouço da proposta tecnológica: partindo do projeto de instrumentação e da programação do controle de processos, com os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) passando pelo sistema supervisor, de controle e de aquisição de dados de processo *Supervisory, control and data acquisition system*; interface homem-máquina (SCADA-IHM) e culminando com a alimentação de dados aprimorados para as futuras extrações.

Figura 12. Visão da proposta da tese



Fonte: autoria própria (2021)

Nesta proposta, o ambiente físico consiste dos elementos básicos do processo extrativo dos óleos essenciais (vaso extrator, condensador e separador), com a adição de sensores, atuadores e controladores lógicos programáveis. O sistema supervisorio SCADA e a IHM, no topo desta arquitetura de controle de processos, adquire dados e cria um histórico.

3.1.1 Sensores e atuadores

Os sensores propostos, elementos comuns disponíveis no mercado, foram os seguintes:

- (1) Sensores de Temperatura
- (2) Sensores de Vazão
- (3) Sensor de imagem
- (4) Atuadores (motor de passo)

3.1.2 Programação do Controle do processo

(1) CLP's – Controladores Lógicos Programáveis

Controladores lógicos programáveis foram os elementos empregados para a programação da rotina de controle do processo. Estes controladores têm a capacidade de processar a sequência operacional, atendendo à programação no tocante a segurança, qualidade, controle direto de parâmetros operacionais, com programa desenvolvido especificamente para a finalidade da pesquisa.

(2) SCADA – Sistema supervisório e de aquisição de dados

O SCADA permitiu realizar operações de aquisição e remessa de dados de e para as áreas de memória de dados. Tem ainda o papel de interface entre o operador e controle de processo, servindo também, dentro deste papel, como sinótico, ou seja, informação visual, do processo.

3.1.3 Parâmetros de processo continuamente melhorados

O aprimoramento dos parâmetros de processo requer, em primeiro lugar, uma instalação que conte com sensores e atuadores, controladores lógicos e softwares supervisórios, projetados e instalados e que permitam a criação de banco de dados, para cada uma das ervas aromáticas, e, então, através da busca por correlações e tendências, estabelecem-se novos valores para as variáveis de processo que ainda poderão ser aprimoradas e servirão de valores iniciais para as próximas extrações.

Dois momentos importantes da extração devem ser demarcados ao se programar o sistema de controle e definir critérios para a análise de dados:

- (1) Início do processo, demarcado pelo acionamento da resistência de aquecimento;
- (2) Iniciado o processo, entre o momento do acionamento da resistência e a efetiva geração de vapor e início da condensação, decorre um intervalo de tempo.

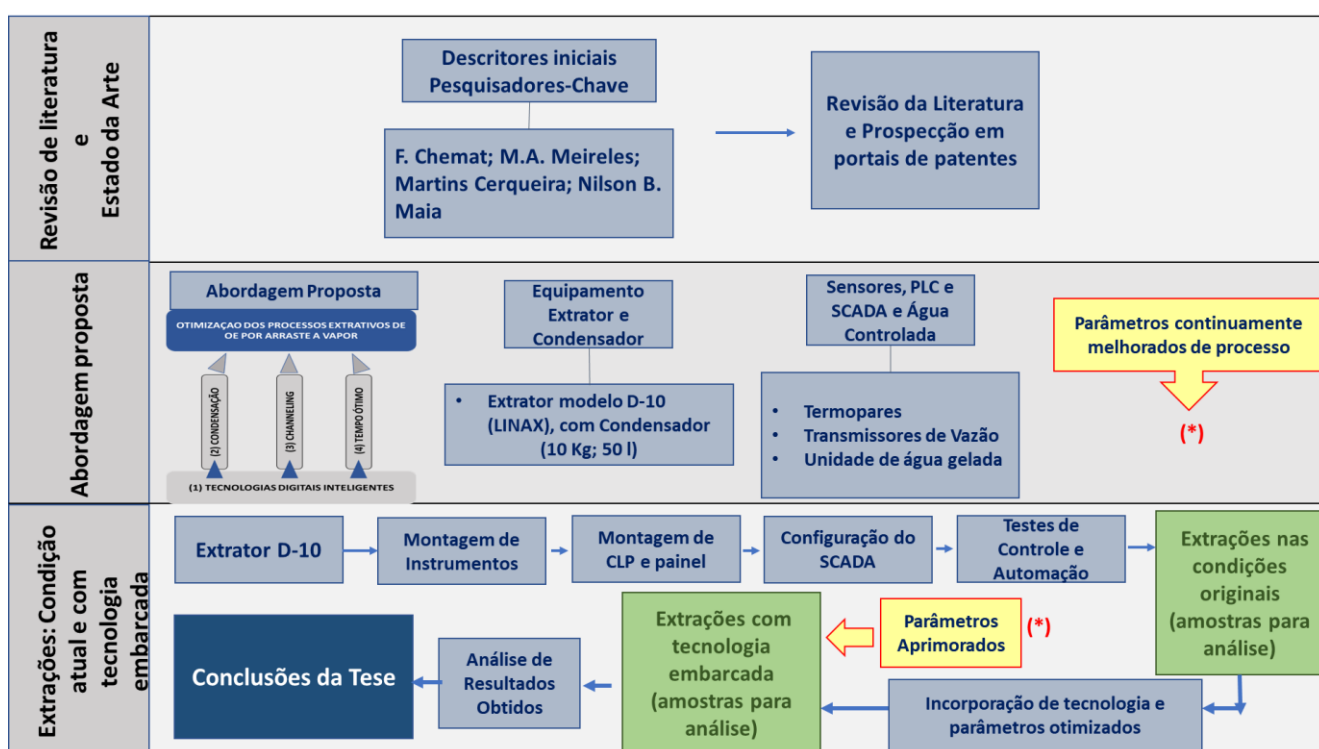
O ponto inicial de contagem do tempo de destilação é o ponto da primeira gota de condensado (ZHELJAZKOV et al., 2013; DAO et al. 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta foi validada em um conjunto de experimentos realizados na Fazenda da empresa Akã – Óleos Essenciais, situada no município de Morro do Chapéu – BA.

A sequência da pesquisa é mostrada na Figura 13, a partir da revisão de literatura e estado da arte até a conclusão da tese, como perspectiva para fundamentar a abordagem e a concepção da planta piloto com tecnologia embarcada.

Figura 13. Fluxograma: sequência da pesquisa



Fonte: autoria própria (2021)

4.1 Matéria-prima

Para a realização da etapa experimental, o suprimento de matéria-prima em quantidade suficiente e qualidade constante é fator definitivo. Esta condição praticamente obrigou a realização dos experimentos na área agrícola. O local de realização dos experimentos, contíguo à área de plantio (distância inferior a 300 metros), eliminou os indesejados fatores logísticos, já que entre a colheita e a extração não houve necessidade de transporte, estocagem, operações de carga e descarga,

que poderiam afetar as características da planta aromática. Além da influência logística citada, a utilização de uma mesma área de plantio minimiza outros fatores, que poderiam afetar a comparação de resultados.

A definição da espécie *Ocymbopogon citratus* (capim-limão) deu-se em função da plena disponibilidade na fazenda onde os experimentos foram realizados. A preparação da matéria-prima é importante fator, tanto para o teor obtido como para o tempo da extração. No caso do capim-limão (também válido para algumas outras ervas), a operação de picar objetiva reduzir o fator anisotropia, pois o material particulado ocupa de forma mais eficiente o volume do vaso extrator.

A secagem à sombra por 48 horas permitiu a perda parcial da água do material, ação que facilita a migração do óleo essencial até a superfície das folhas. As folhas, após secagem e antes da picagem, passaram por processo de limpeza: retirada de impurezas, tais como torrões de terra, verificação da presença de insetos e eventual presença de restos de outras ervas.

4.2 Arranjo físico

O arranjo físico, projetado e construído para a etapa experimental, partiu de uma montagem convencional onde foram idealizados experimentos iniciais para a obtenção de dados em condição comumente encontradas nas indústrias e que serviram de base para comparação.

Sobre esta instalação original foi então desenhada a proposta tecnológica, com a adição dos sensores e atuadores, dos elementos de controle, de monitoramento, e a lógica utilizada para comando do processo. Ainda a geometria do topo do vaso extrator foi alterada tendo como principal propósito a instalação destes elementos, porém já favorecendo um fluxo mais suave de saída do vapor.

O projeto desta instalação é considerado resultado da pesquisa, já que se constituiu fator habilitador dos resultados operacionais. Porém, está detalhado neste capítulo para a consolidação de materiais e equipamentos em um só espaço do texto. A instalação concebida visou a comprovação da abordagem proposta no Capítulo 3:

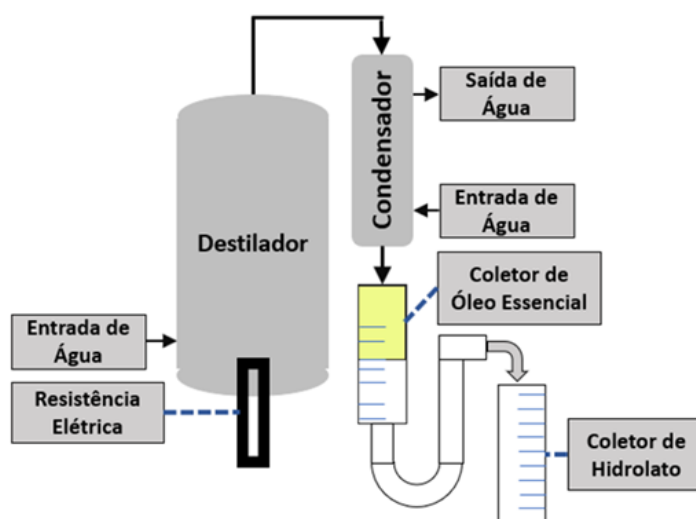
- parâmetros e processo aprimorados pela análise do banco de dados
- a efetividade do controle da temperatura da água de condensação
- a detecção e correção do “channeling”,

- a determinação do ponto econômico para a duração do processo extrativo,

4.2.1 Instalação convencional – base para comparações

A instalação básica de processo, convencional de mercado, (vaso extrator, condensador e vaso separador), sem a adição dos elementos tecnológicos desta tese, foi fabricada pela empresa Linax Indústria e Comércio de Óleos Essenciais Ltda., (Votuporanga – SP). Nela foram gerados os resultados no modo operacional manual, conforme a Figura 14.

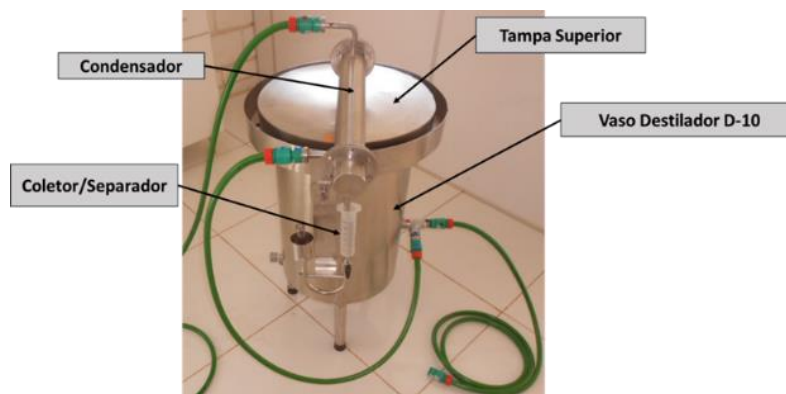
Figura 14. Esquema do arranjo físico original.



Fonte: autoria própria (2021).

O conjunto destilador em sua configuração original, mostrado na montagem da Figura 15.

Figura 15. Conjunto de destilação - planta piloto



Fonte: autoria própria

Tal arranjo é utilizado para destilação de pequenos volumes de plantas aromáticas, porém já com dimensão piloto ou industrial de pequeno porte. É formado pelo vaso destilador (denominado D-10 na Figura), condensador e separador.

O funcionamento básico deste sistema é o seguinte:

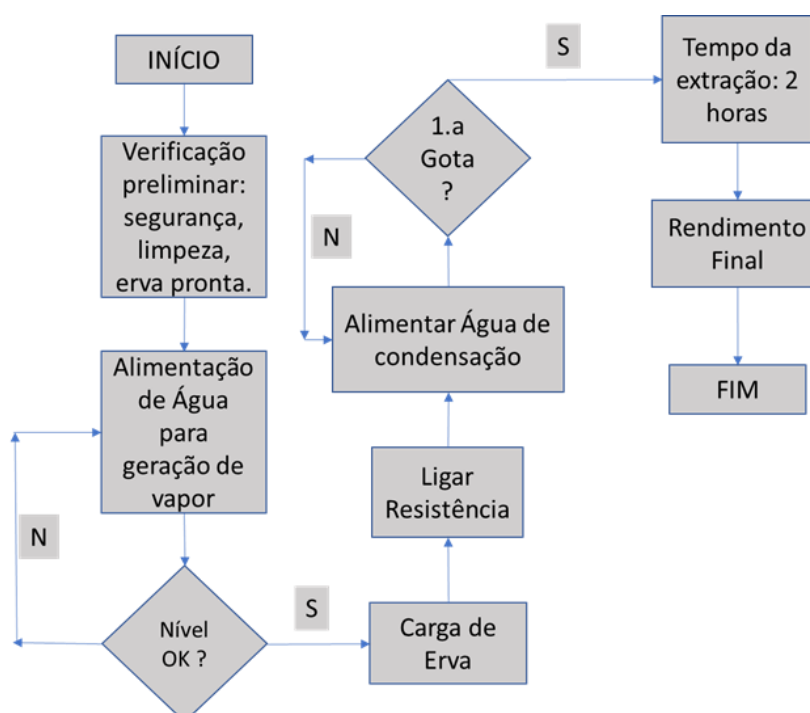
- alimentar água ao extrator D-10, localizado na porção inferior deste vaso cilíndrico.
- acionamento da resistência de aquecimento para geração de vapor.
- vapor carreando óleo essencial passará pelo condensador.
- coleta e a separação, por diferença de densidade, entre óleo essencial e hidrolato ou hidrosol, dada a imiscibilidade destes dois produtos nas condições ambientes.

Estas extrações tiveram seus dados coletados manualmente, ações manuais de controle operacional e obedecendo os tempos de processo usuais nesta indústria.

O fluxograma da Figura 16 mostra a sequência operacional nesta condição e reflete a simplicidade da realidade operacional nesta indústria.

O evento que define o início da contagem do tempo de extração é a primeira gota de condensado.

Figura 16. Sequência operacional no modo não-automático



Fonte: autoria própria (2021)

A Figura 17 ilustra o processo em andamento.

Figura 17. Processo extrativo básico em operação.

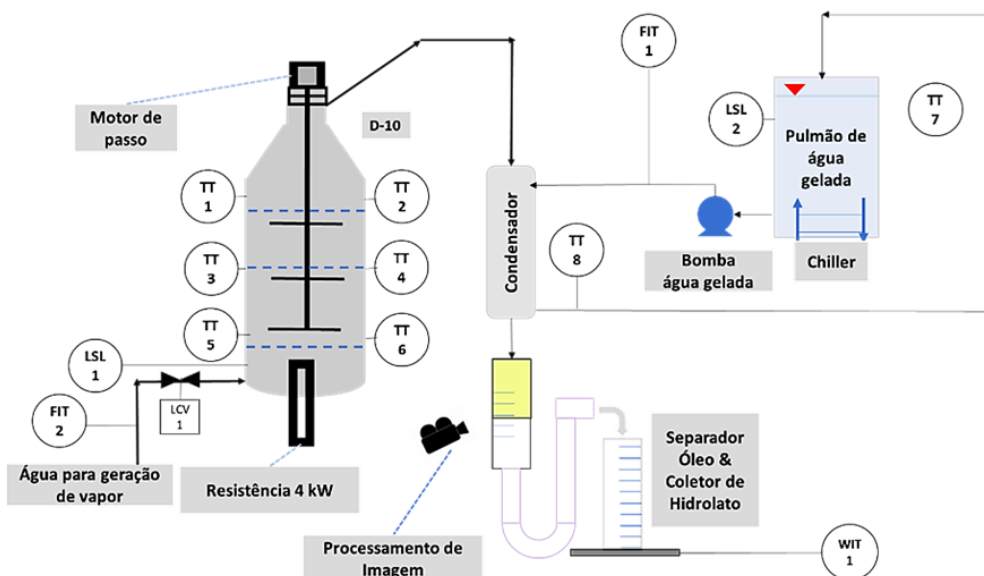


Fonte: autoria própria (2021).

4.2.2 Instalação com tecnologia adicionada

O processo com a adição dos elementos tecnológicos é mostrado na Figura 18 pelo diagrama de tubulação e instrumentos, denominado comumente na indústria de *Piping and Instrumentation Diagram* (PID). A simbologia empregada obedece à norma ANSI/ISA-S5.1. Dados gerados com esta instalação visaram análise comparativa quantitativa e qualitativamente.

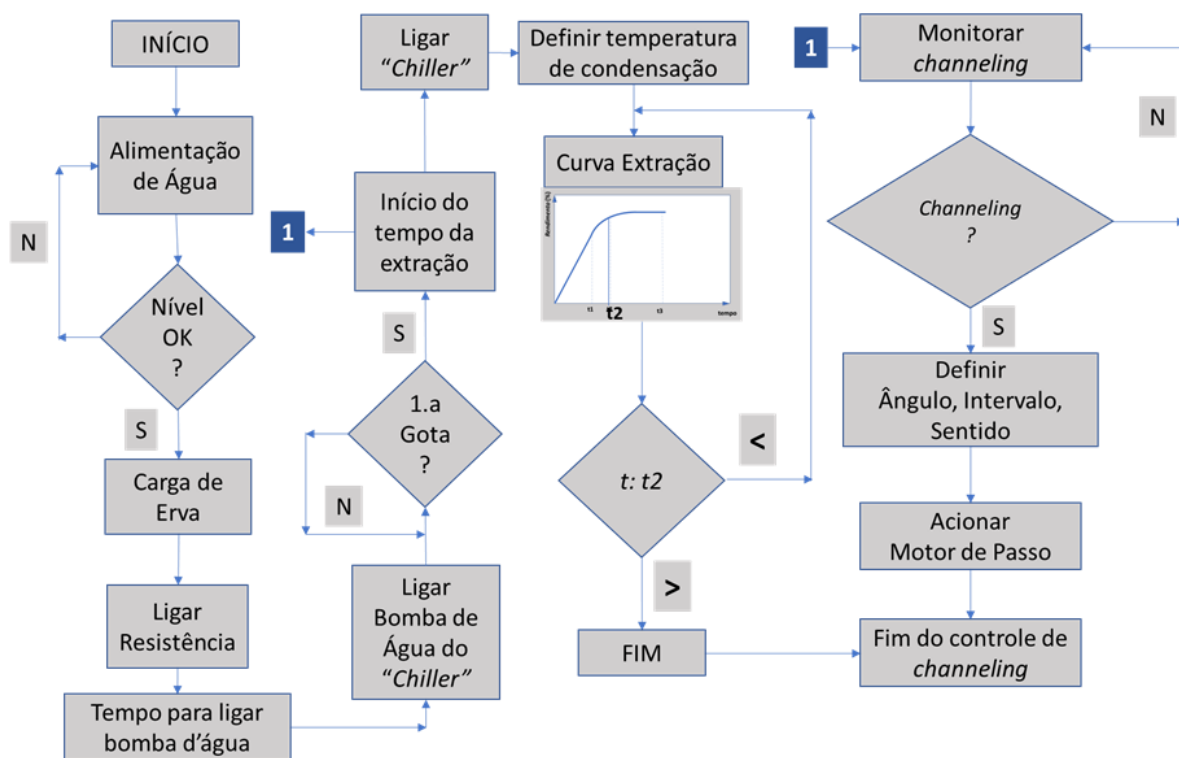
Figura 18. Diagrama de processo e instrumentação.



Fonte: autoria própria (2021).

O fluxograma da Figura 19 demonstra a sequência de operação e controle neste conceito de instalação.

Figura 19. Fluxograma das bateladas com tecnologia embarcada.



Fonte: autoria própria (2021).

A sequência de processo, nesta configuração, terá menor dependência de mão-de-obra e requererá do operador apenas verificações visuais das condições de segurança e limpeza, prévias ao início do processo e a carga de erva. Uma vez dado início ao processo, ocorre a alimentação de água até atingir o nível mínimo de segurança, o que permitirá a ligação da resistência de aquecimento. O tempo decorrido entre a ligação da resistência e o início da circulação de água pelo condensador terá seu valor definido inicialmente pelo operador e, posteriormente, será continuamente aprimorado pela análise de dados das bateladas anteriores.

Uma vez iniciada a circulação de água, o momento ideal para ligar o compressor do "chiller" será anterior à primeira gota de condensado. Este tempo, portanto, também necessitará de aprendizado através dos dados das extrações anteriores. Quando a primeira gota de condensado for detectada pelo sistema de

processamento de imagem, terá início a contagem do tempo de extração. O processo de detecção e controle do “*channeling*” é programado para acontecer durante todo o tempo de extração a partir da primeira gota até a finalização da extração.

A finalização será determinada pelo processamento de imagem, quando o volume extraído não mais viabilizar a continuidade (valor do OE versus os custos gerais de fabricação para obtê-lo).

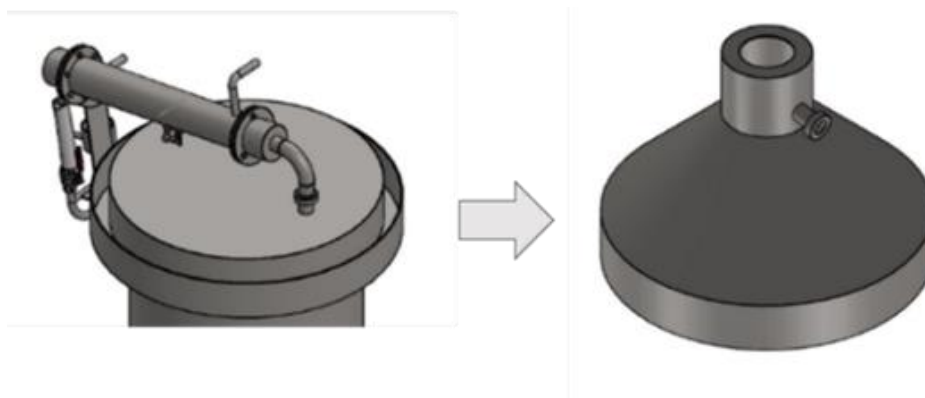
4.2.3 Alteração da geometria do topo do vaso extrator

A geometria da parte superior do vaso extrator foi reestudada para acomodar o motor de passo. O novo topo cônico propicia uma saída menos turbulenta do vapor, reduzindo vórtices em direção ao condensador. A conexão do motor de passo através de flange requereu tal alteração já que, conforme originalmente produzida, era plana e possuía a saída do vapor (entrada do condensador) descentralizada.

Aquela geometria original em nada facilitava o fluxo suave à entrada do trocador de calor, gerando vórtices e perda de carga que diminuía a eficiência do transporte de massa.

A superfície cônica foi projetada para instalação do motor de passo e verificada com o “*Computational Fluid Dynamics*” (CFD) (Dinâmica de Fluidos Computacional) contido no software SOLIDWORKS 2021 (*Flow simulation* – simulação de fluxo). Foram simulados velocidade, pressão, temperatura e vazão mássica. Portanto, não se trata da geometria otimizada e sim melhorada e vale mencionar que ainda há espaço para futuros aprimoramentos no sistema de fluxo. Na Figura 20 a nova geometria é mostrada em comparação com a original.

Figura 20. Conceito antigo e novo da tampa do vaso extrator.



Fonte: autoria própria

4.2.4 Sensores, atuadores, controladores e arquitetura de controle

Elementos de instrumentação, controle e monitoramento foram adicionados ao vaso extrator com o topo modificado:

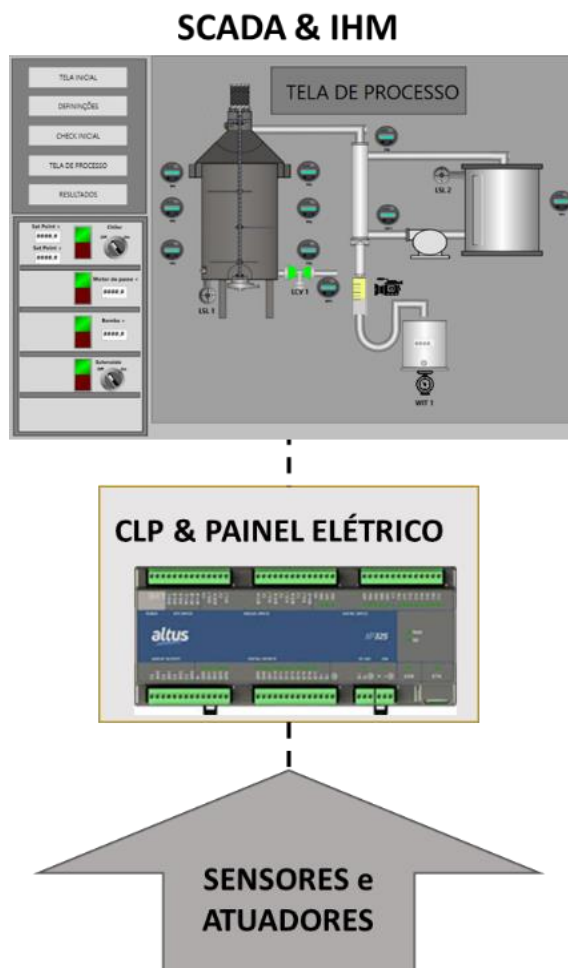
- Sensores e transmissores de temperatura para o fluido de controle (água de condensação), termopares tipo “J”, com transmissores convencionais, 4 a 20 mA.
- Sensores de temperatura (imersos diretamente na massa vegetal, sem poço termométrico) para detectar diferenças de temperatura, que indicassem caminhos preferenciais do vapor. Foram utilizados termopares do tipo “J”, com transmissores convencionais (4 a 20 mA).
- Sistema de processamento de imagem para acompanhamento do volume de óleo essencial extraído e determinação do ponto final econômico da operação, detalhado posteriormente no texto. Foi utilizado um controlador Raspberry Pi 3 Model B+ e uma câmera module V2 acoplada a um tripé.
- Motor de passo (atuador), para acomodação da erva no leito do vaso extrator, visando debelar os caminhos preferenciais de vapor, marca Tecmaf, NEMA 34, torque de 120 kgf.cm, com driver e placa controladora.
- Controladores lógicos programáveis, para automatizar e sistematizar a rotina operacional, marca Altus, modelos Nexto Xpress XP340 e XP 315.
- Software supervisório (SCADA) que adquire, salva e cria historiador de dados de processo, marca Altus, modelo Blueplant, versão de 2018.

A arquitetura de controle e monitoramento foi projetada para controlar e permitir visualização do processo, além de redução significativa da dependência de ação manual.

A Figura 21 traz uma representação esquemática, bastante simplificada, desde os sensores e transmissores de temperatura, de vazão, de massa, processamento de imagem e do elemento de controle direto (CLP's). Um nível acima está o SCADA ou

somente sistema supervisorio, que também tem o papel de IHM. O banco de dados criado permitiu a otimização de parâmetros de processo.

Figura 21. Arquitetura de controle de processo

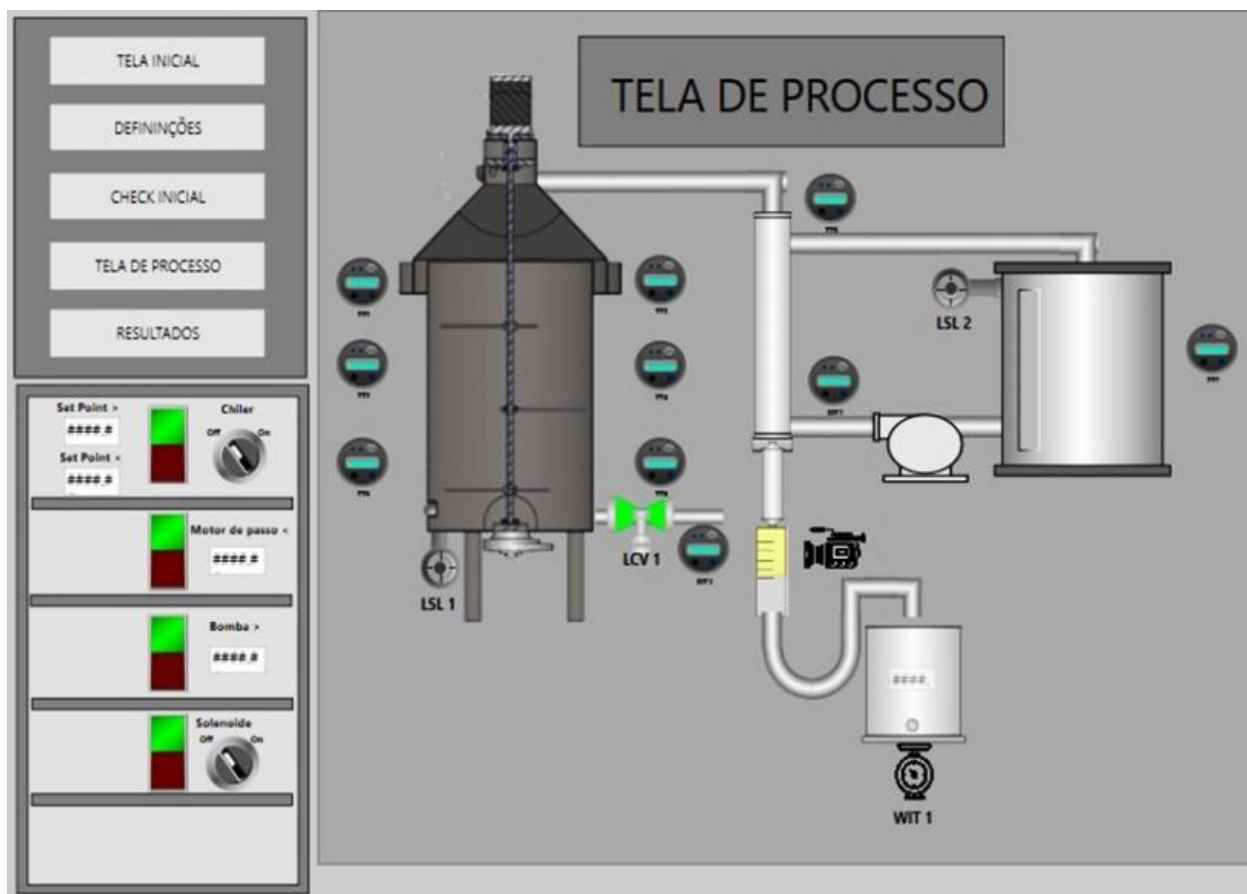


Fonte: autoria própria (2021).

O software supervisorio, SCADA, tem sua tela principal representada na Figura 22 traz a indicação das temperaturas transmitidas pelos seis termopares inseridos na massa vegetal, pelos dois termopares de entrada e saída da água de condensação, sinaliza se o nível de água está seguro (para não afetar a resistência por falta de água) e o peso de hidrolato.

Além disso, serve como interface para que o operador insira os pontos de controle (*setpoints*) para a água de condensação e ação do motor de passo. Uma função importante do SCADA é o de armazenar um histórico de dados da batelada para posterior análise e aprimoramento de parâmetros de processo.

Figura 22. Tela principal do SCADA.



Fonte: autoria própria (2021).

4.2.5 Controle da água de condensação

A temperatura da água de condensação teve seu controle através de água gelada obtida de uma unidade de refrigeração (*chiller*) com o objetivo de condensar a maior quantidade possível de vapor + OE, evitando perdas por volatilidade deste último.

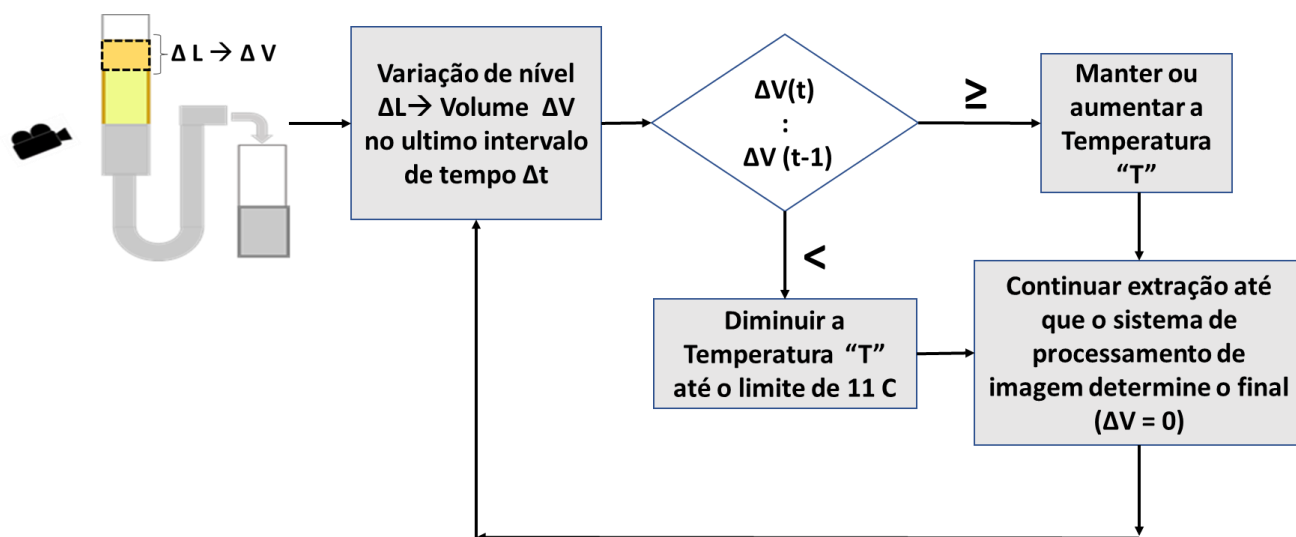
A capacidade térmica desta unidade foi calculada para atender à demanda gerada pela resistência de aquecimento e contou com um pequeno tanque para servir de pulmão e absorver eventuais variações e demandas instantâneas. A Figura 23 mostra a unidade utilizada.

Figura 23. Unidade de água gelada (*chiller*).

Fonte: autoria própria (2021)

O controle de temperatura da água de condensação é realizado a partir de sensores (sinais de temperatura de entrada e saída do “*chiller*”), processados e controlados pelo CLP. O fluxograma da Figura 24 mostra o fluxograma da sequência de controle da temperatura de condensação em função do volume extraído. Um incremento no nível de óleo essencial extraído ΔL significa um aumento do volume ΔV . Este volume pode ser comparado com aquele obtido no intervalo anterior e o sistema poderá propor o abaixamento ou a manutenção do ponto de controle de temperatura da água gelada (*setpoint*) visando aumentar o volume de condensados (óleo e hidrolato), até um limite possível de “T”, estabelecido em 11 C.

Figura 24. Fluxograma de controle de temperatura em função do volume extraído



Fonte: autoria própria (2022)

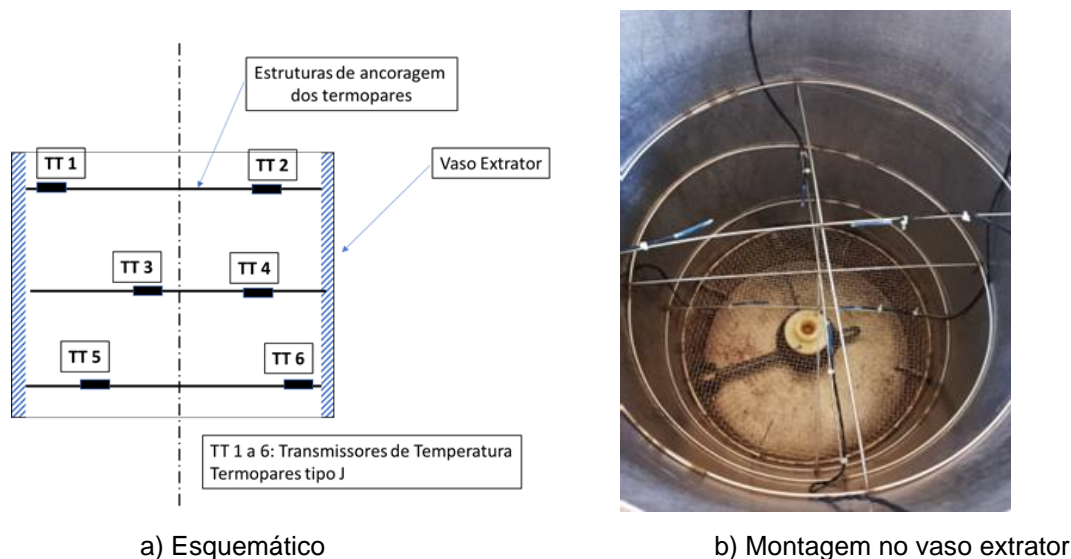
4.2.6 Detecção e correção do “channeling”

A detecção e correção dos caminhos preferenciais de vapor (*channeling*) visou identificar diferenças de temperaturas entre sinais dos termopares (sensores) internos ao vaso extrator (TT1 a TT6). O atuador (motor de passo), foi o elemento de controle.

O detalhe da instalação dos termopares objetivou obter dados de temperatura diretamente nos pontos internos à massa vegetal, sem a barreira dos poços de termopares (usuais na indústria) que significariam uma inércia adicional na transmissão destes valores.

A ancoragem dos termopares, conforme mostrado na Figura 25, permitiu ajuste de suas posições. Delgadas armações de arame, em aço inoxidável, foram utilizadas para fixação dos termopares.

Figura 25. Esquema e foto da montagem e ancoragem dos termopares, sem poço.

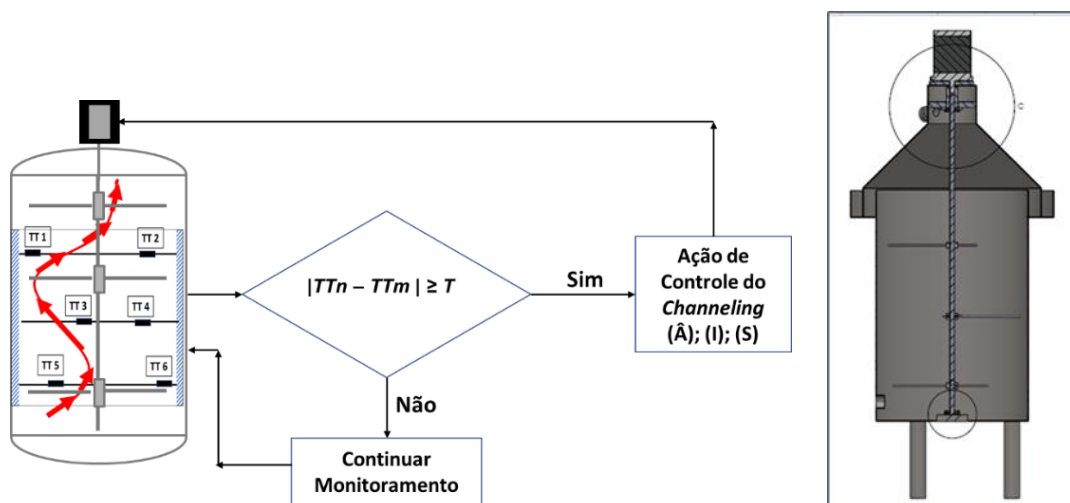


Fonte: autoria própria (2021).

A detecção do “channeling” é realizada através do módulo das diferenças de temperatura entre termopares situados no mesmo nível do vaso extrator (TT1 e TT2; TT3 e TT4; TT5 e TT6). As indicações destas temperaturas deveriam ser as mesmas ou muito próximas. Ao se detectar uma diferença de temperatura, tal fato seria a indicação da ocorrência de caminho preferencial do vapor.

A correção proposta foi através do acionamento do motor de passo, que poderia girar um determinado ângulo (\hat{A}), num intervalo entre cada pulso (I) e sentido (S) para reacomodar a matéria-prima em seu leito. A Figura 26 ilustra o ciclo de detecção e correção do *channeling*.

Figura 26. Fluxograma: Detecção e correção do “channeling”.



Fonte: autoria própria (2021).

A ação do motor de passo, como atuador na correção dos caminhos preferenciais, foi definida por duas lógicas de controle, aplicadas em períodos diferentes do processo. Primeiramente, na fase de elevação da temperatura do processo, quando o vapor inicia seu fluxo ascendente em direção ao condensador, o “*channeling*” se manifesta e se estabelece. Tem início a ação do motor de passo segundo o que está definido no fluxograma da Figura 26, ou seja, o módulo das diferenças de temperatura dispara tal ação de controle.

Posteriormente, em função da condução e da convecção do calor, no meio formado pelas folhas já umedificadas pelo vapor, as temperaturas acabam por se equalizar. Então, a partir desse ponto, a ação do motor de passo sofre uma alteração em lógica e passa a ocorrer por intervalos de tempo definidos e regulares, com ângulos definidos.

O valor “T” é a referência (*setpoint*) para o módulo das diferenças de temperatura. Atingida a diferença “T”, isto indicará a ocorrência do caminho preferencial do vapor no período de aquecimento. O valor inicial de “T” é alimentado manualmente pelo operador e a apuração deste parâmetro acontecerá por iterações sendo, então, um valor continuamente melhorado.

4.2.7 Duração econômica da destilação

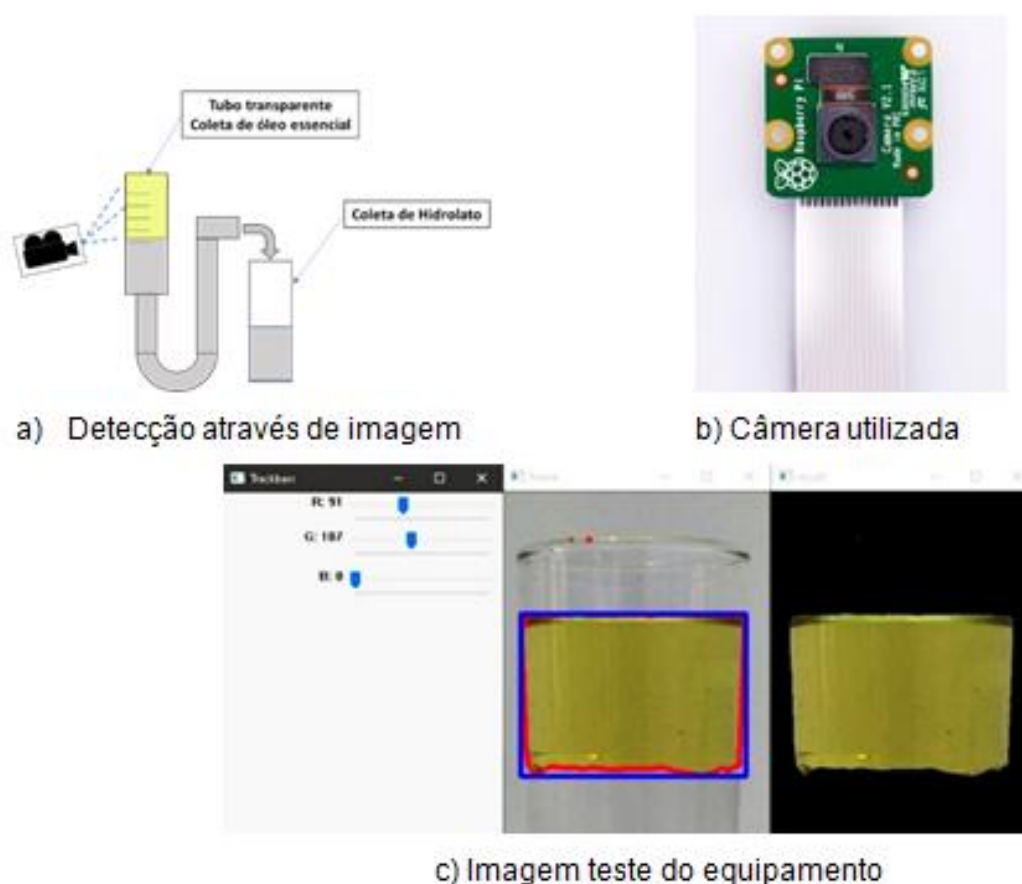
O tempo de destilação economicamente viável é definido pelo ponto a partir do qual o volume extraído diminui de modo a não se mostrar mais viável, face aos gastos com energia e demais insumos, além do tempo consumido, ou seja, capacidade de fabricação.

O sistema proposto para a detecção do volume produzido, e conseqüente determinação do ponto final do processo, foi o processamento de imagem. A câmera é utilizada para identificar os meniscos da coluna de óleo, ou seja, aquelas interfaces entre o óleo essencial e o hidrolato (menisco inferior) e entre óleo essencial e o ar atmosférico (menisco superior). O óleo essencial é colhido em tubo transparente, com capacidade suficiente para receber o volume estimado de OE contido na massa de erva. A dinâmica do comportamento destas colunas hidrostáticas requer um sistema

inteligente, capaz de detectar reposicionamentos da coluna de OE sobrenadante à coluna de hidrolato.

A diversidade de matérias-primas envolvidas no portfólio da indústria de óleos essenciais, cada uma com seu comportamento durante a extração e densidades diferentes, requer sistemas flexíveis e autônomos. O tubo de coleta, em forma de “U” (vasos comunicantes) permite a contínua saída do hidrolato e mantém o óleo essencial sobrenadante, assim a interface (menisco) óleo/hidrolato varia, a depender das colunas hidrostáticas de equilíbrio (em função da densidade do óleo e do hidrolato sendo produzidos). Daí a oportunidade do processamento de imagem, conforme esquematizado na Figura 27, que mostra a detecção do nível de óleo essencial desde o menisco da interface óleo-hidrolato até o topo da coluna.

Figura 27. Sistema projetado para a detecção do nível de óleo e hidrolato.

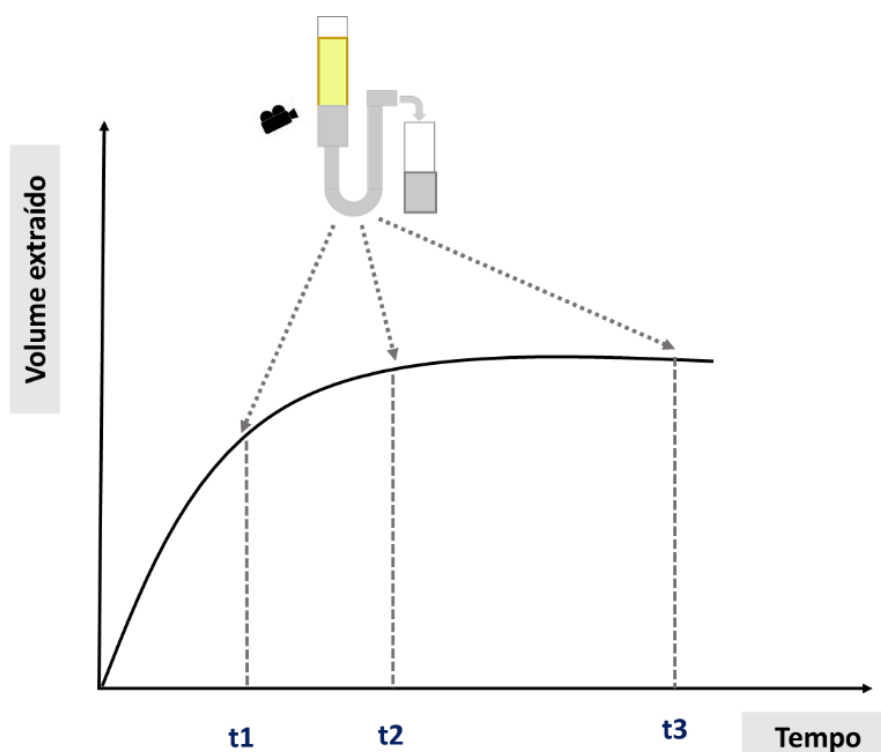


Fonte: autoria própria (2021).

O algoritmo, desenvolvido em linguagem Python, utilizando a biblioteca de visão computacional OpenCV, fez a detecção de pixels correspondentes à cor do óleo que está sendo destilado. A Figura 27 mostra a aquisição do nível de óleo, com o traçado do contorno referente à coluna de OE. O contorno em vermelho representa o volume extraído e o retângulo em azul ao redor do contorno vermelho tem a mesma altura da coluna de óleo em pixels. Uma escala de pixels por milímetro possibilita determinar a altura da coluna e conseqüentemente a quantidade de óleo produzida.

O avanço da extração, ou seja, o crescimento do nível de óleo essencial, tem os seus dados capturados pelo software supervisorio, *Supervisory, Control and Data Acquisition* (SCADA) através do sistema de processamento de imagem, ação representada na Figura 28, tendo nas ordenadas o volume acumulado e nas abscissas o tempo de processo.

Figura 28. Curva de Extração: volume extraído versus tempo.



Fonte: autoria própria (2021).

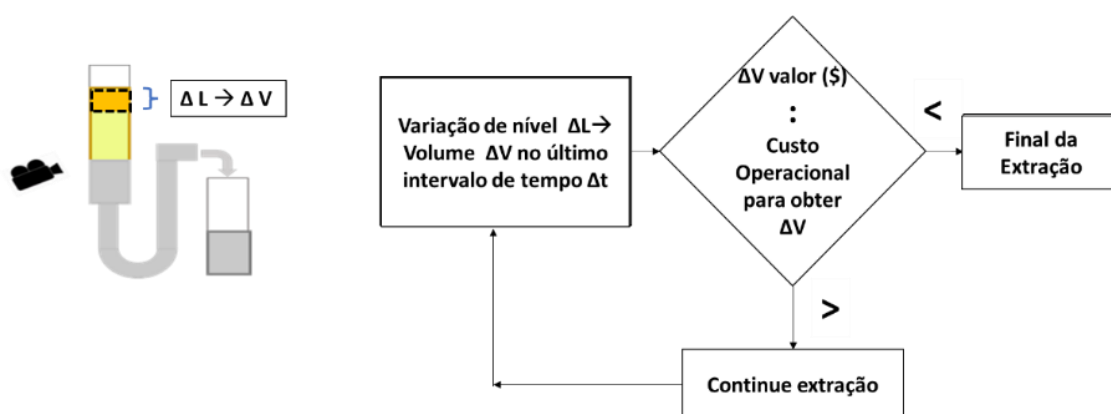
O ponto de finalização é definido pelo programa de controle, por exemplo, com a comparação do valor comercial do produto obtido com o custo da energia e outros insumos utilizados para tal extração. O tempo de fabricação impactará no valor da

depreciação lançada contabilmente no preço do produto, além de impactar no planejamento de capacidade.

O instante t_1 é o final da rampa de maior declividade na curva de extração onde o processo apresenta a maior taxa de geração de OE. O instante t_2 representa o início do curto período assintótico, a partir do qual o controle inteligente comparará o valor do teor produzido com os gastos gerais de fabricação inerentes. O instante t_3 representa o tempo usual na indústria, que comumente estende a extração até algumas horas, somente baseando-se em práticas e procedimentos fixos. O intervalo t_3-t_2 representa desperdício de tempo, energia e demais gastos de fabricação envolvidos, além de permitir um intervalo onde pode ocorrer evaporação do OE.

Ao se iniciar a estabilização do volume, na parte assintótica da curva, o sistema determinará o ponto de viabilidade econômica do progresso da extração. O fluxograma da Figura 29 mostra a sequência deste processo decisório. Nesta Figura o volume gerado tem seu valor comparado com o valor da energia, porém, é cabível seja comparado com os gastos gerais de fabricação específicos envolvidos naquele período adicional. Assim, a lógica determinou que, se houver repetição de valores extraídos em períodos subsequentes, o processo poderá ser encerrado. O algoritmo acompanha o crescimento do volume e propõe a decisão de encerrar o processo assim que a curva de extração inicie sua inflexão rumo ao período em que se horizontalize.

Figura 29. Duração econômica da extração.

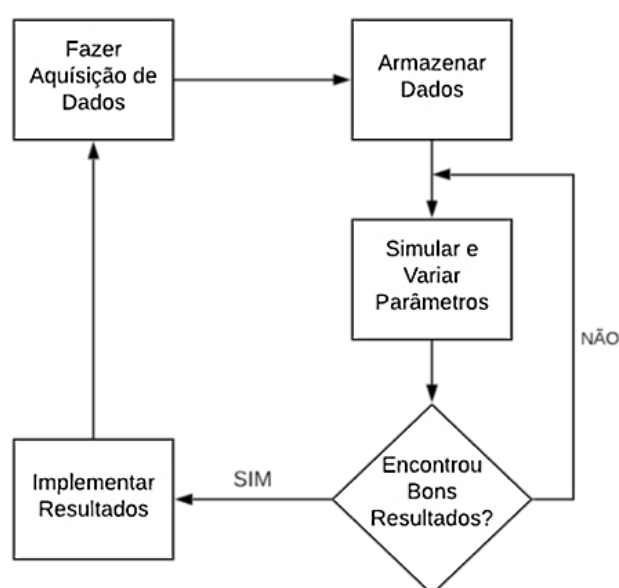


Fonte: autoria própria (2021).

4.2.8 Parâmetros melhorados de processo através de análise de dados

O fluxograma da Figura 30 representa, basicamente, a partir da aquisição de dados de processo, a sequência até a determinação de parâmetros melhorados. Estes parâmetros são base para as extrações subsequentes e, quando alimentados aos softwares de controle CLP e SCADA, operarão como parâmetros iniciais, habilitando novos e melhorados valores.

Figura 30. Fluxograma otimização de parâmetros de processo.



Fonte: autoria própria (2021).

4.3 Planejamento das bateladas (extrações) experimentais

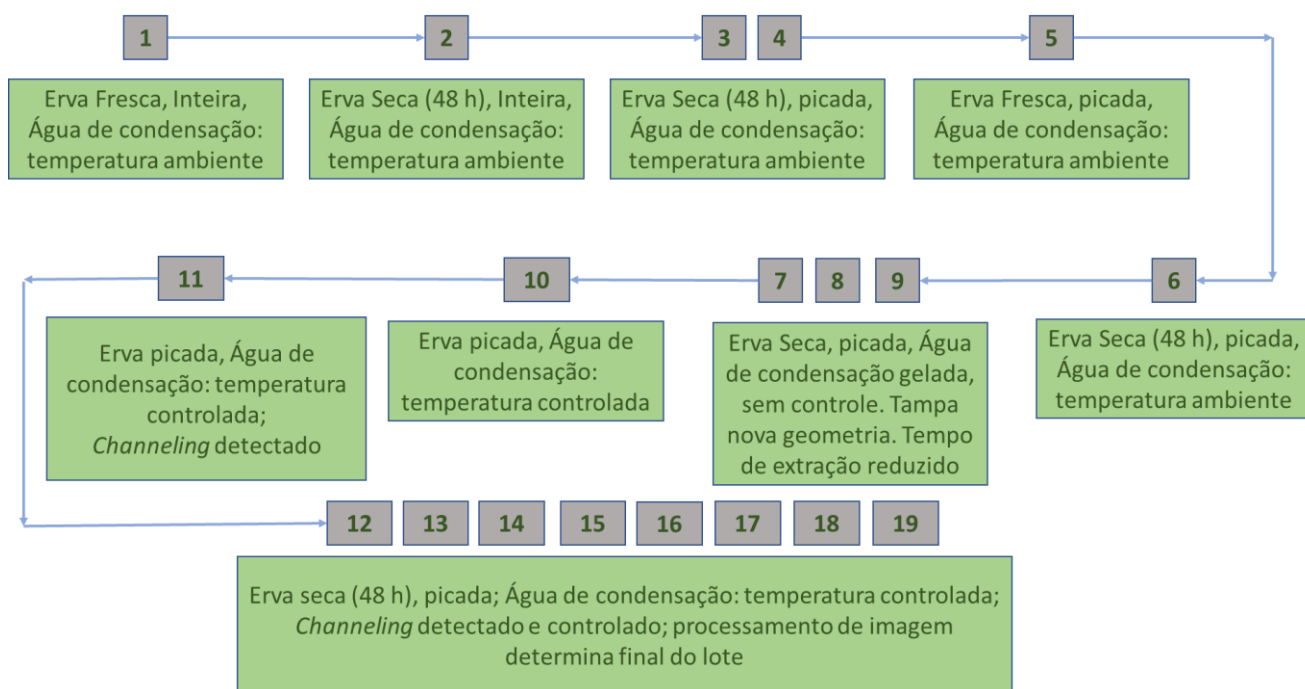
Os experimentos foram idealizados de forma a permitir comparações entre resultados produzidos com as instalações originais (convencionais) e aqueles em que as melhorias tecnológicas propostas tenham sido introduzidas.

Foram idealizadas 19 bateladas experimentais, mostradas na Figura 31.

A forma de alimentação da matéria-prima, conforme estudado no Capítulo 2, é fator importante na determinação do volume extraído. Nos primeiros experimentos, visou-se a confirmação de que a preparação por secagem e picagem da erva são fatores de aumento de rendimento. Além desta confirmação estes resultados também serviram de base comparativa, isto é, sem e com elementos tecnológicos adicionados.

Assim, nas extrações experimentais com adição de tecnologias foi utilizado o procedimento de manipulação da matéria-prima com melhores rendimentos nos lotes iniciais.

Figura 31. Bateladas experimentais



Fonte: autoria própria (2022)

4.4 Procedimento Analítico (composição química dos óleos essenciais)

A etapa de análises de laboratório, realizada na UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais (Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química/Colegiado de Extensão), visou quantificar os constituintes do OE de *Cymbopogon citratus*, com um cromatógrafo a gás da marca AGILENT 7820A, equipado com detector por ionização de chamas (DIC ou, em inglês, FID – “Flame-ionization detection”), e injetor *split/splitless*, operando no modo split (1:50) a uma temperatura de 200°C. Foi utilizada coluna Alltech EC™ wax-10 (30m x 0,32mm x 0,25 µm). A programação de temperatura do forno foi de 50°C (5 min), 3°C/min até 200 °C. A temperatura do detector foi de 220°C. O volume injetado das amostras de óleos essenciais foi de 1 µL, 2,0% m/v, em acetato de etila. O índice de retenção (IR) utilizado foi o LTPRI – “Linear temperature programmed retention index”.

Sendo o Citral o componente indicador do valor do óleo essencial, conforme mencionado no Capítulo 2, o aumento deste componente, com a adição de elementos de tecnologia ao processo, indicará a efetividade destas melhorias. A presente tese não teve a pretensão de aprofundar-se no processo analítico e sim valer-se de resultados comparáveis, nos dezenove experimentos, e possibilitar evidências de melhoria de qualidade.

Estes resultados, bem como de todo o conjunto de experimentos realizado, são apresentados no próximo capítulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados experimentais serão apresentados e discutidos, frente ao propósito da tese: uma proposta para aplicação de tecnologias digitais inteligentes à destilação de óleos essenciais, para melhoria de produtividade e qualidade. Esta proposta foi materializada no projeto de uma planta, em escala piloto, para realização de extrações experimentais que permitiram gerar dados para confirmação dos avanços dela esperados. Cabe reforçar que, no Capítulo 4, o processo aprimorado foi apresentado como “Materiais e Métodos”, para fins de consolidação no texto. No entanto, o conceito de processo com tecnologia embarcada, tema central desta tese, é parte integrante dos resultados, uma vez que foi o ente criado para habilitar as atividades experimentais e, inclusive, deu base a um pedido de patente (já depositada).

Os resultados operacionais das bateladas experimentais, obtidos com o processo evoluindo desde o original, aquele sem qualquer introdução de elementos tecnológicos, até o estado com a plena aplicação da proposta, foram as evidências que demonstraram a efetividade dos elementos introduzidos.

A pesquisa colocou foco na importância da distribuição homogênea de vapor e das temperaturas no leito vegetal, através de sensores e atuadores para detecção e do controle (atenuação ou eliminação) do *channeling*, respectivamente; na determinação da duração economicamente viável do processo extrativo, através da aplicação de processamento de imagem e tomada de decisão com sistemas de controle apropriados; e, na condensação com temperatura controlada, através de um “*chiller*”. A arquitetura de controle administrou as ações programadas e, também, teve o papel de historiar dados para análises posteriores.

5.1 Preparação da matéria-prima

Nas primeiras extrações da fase experimental foi utilizada matéria-prima inteira e fresca (recém-colhida), seguindo a prática usual nesta indústria. Estes experimentos objetivaram estabelecer valores para posterior comparação e ainda confirmar a efetividade da preparação da erva.

No Capítulo 2, trabalhos de diversos autores demonstraram a efetividade no uso de erva desidratada e picada (com tamanho de 20 mm, na grande maioria dos trabalhos encontrados) e que confirmaram maiores rendimentos. Experimentos desta tese vieram a confirmar aqueles trabalhos.

Com o intuito de isolar os resultados devidos aos efeitos da tecnologia embarcada, os experimentos utilizaram a melhor forma de preparo da erva, que foi desidratada e picada.

Um ganho adicional obtido com esta preparação da matéria-prima é a ocupação do volume do vaso extrator com uma massa maior de erva (diga-se, pesada quando fresca). Quando da desidratação controlada (à sombra), ou seja, sem perda de conteúdo de OE na matéria-prima, há uma diminuição no volume aparente, o que permite carregamento mais produtivo e um aumento da capacidade produtiva. Tais valores serão discutidos quando da análise de resultados quantitativos. Ainda, tal preparação reduz o impacto da anisotropia do meio, contribuindo para a redução do fenômeno *channeling*.

5.2 Detecção e correção dos caminhos preferenciais de vapor (*channeling*)

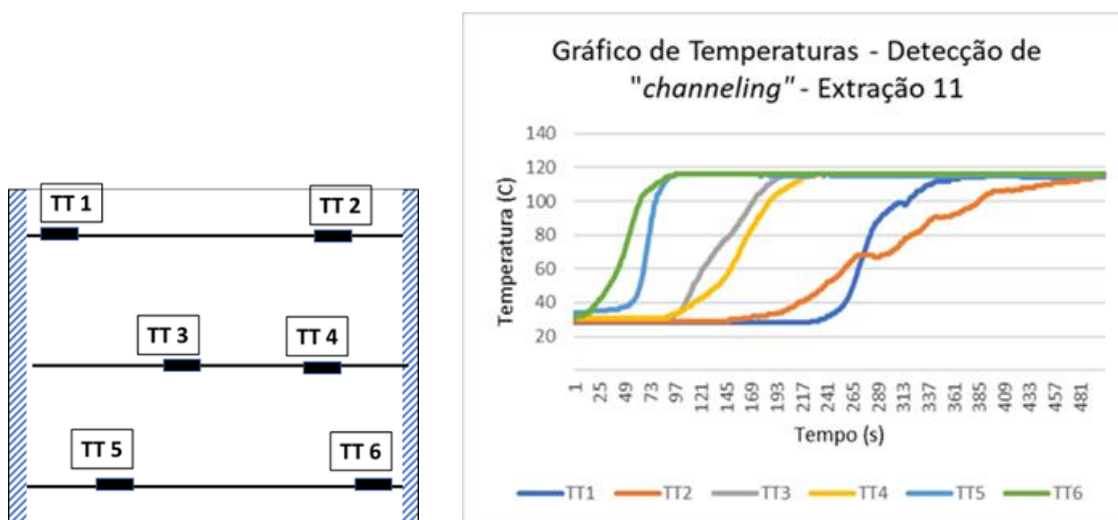
Resultado importante da pesquisa, os sensores de temperatura, instalados diretamente no seio da massa vegetal (matéria-prima), detectaram diferenças significativas entre pontos nos quais as temperaturas deveriam ser iguais ou bastante próximas. Foram 3 pares de termopares instalados em 3 níveis diferentes (fundo, meio e superior). Assim, cada par de sensores deveria indicar valores muito próximos de temperatura, caso a distribuição de vapor fosse homogênea. No entanto, o que pôde ser observado foram rampas de aquecimento com significativas diferenças nas temperaturas. A detecção do “*channeling*” significou o atingimento de um dos objetivos da tese, tanto pela confirmação de sua ocorrência como pela comprovação da eficácia da correção, conforme será detalhado mais adiante no texto.

O sistema de detecção de “*channeling*” foi introduzido a partir da extração experimental de número 11, sendo, assim, a primeira da série em que os sensores foram utilizados. A Figura 32 mostra as diferenças entre termopares instalados no mesmo plano no interior do vaso extrator: TT1 e TT2; TT3 e TT4; TT5 e TT6. Neste exemplo (extração experimental número 11), TT5 e TT6, mais ao fundo do vaso, são

os primeiros a indicarem aumento de temperatura. Suas curvas estão pronunciadamente descoladas uma da outra, o que indica falta de homogeneidade na distribuição do vapor pelo interior do vaso. Logo após, os sensores TT3 e TT4 indicam a rampa de aquecimento, também com diferenças superiores a 20 °C. No caso dos TT1 e TT2, neste experimento, foi detectada uma mudança no fluxo do vapor, ou seja, em dado instante TT2 indica passagem do vapor por ele em primeiro lugar e posteriormente houve uma alteração na trajetória por onde estava instalado o TT1.

Todos os demais gráficos, relativos aos experimentos, encontram-se no Apêndice A.

Figura 32. Primeira detecção do “channeling” – extração 11.



Fonte: autoria própria (2021)

A correção do “channeling”, com a ação do motor de passo, atingiu a finalidade de reacomodar a erva aromática em seu leito, com o intuito de debelar (ou atenuar continuamente) o caminho preferencial do vapor. As ações corretivas contribuíram para a melhoria do rendimento a partir da extração experimental de número 12, até a de número 19. Nestes experimentos o motor de passo foi acionado segundo sua lógica de controle. Os resultados experimentais quantitativos serão discutidos à frente.

A lógica de acionamento do motor de passo teve, inicialmente, por base o módulo das temperaturas entre termopares no mesmo nível. Assim, toda vez que este valor ultrapassava 5 °C (ponto de ajuste, “setpoint”, inicialmente alimentado ao SCADA), o motor de passo era acionado para girar um ângulo de 5 graus.

No entanto, foi notada uma equalização das temperaturas, após a fase de aquecimento (como se vê na Figura 32). O entendimento foi que, em função da condução e convecção, não mais haveria como identificar o “*channeling*” através do módulo das diferenças entre as temperaturas de termopares contíguos. Assim, a rotina deste motor de passo foi alterada para as três últimas extrações, fazendo com que o motor se movesse em ângulo de 5 graus, a cada 45 segundos, ora no sentido horário, ora no anti-horário. As três últimas extrações (de números 17, 18 e 19) utilizaram esta lógica de ação do motor de passo obtendo os maiores rendimentos da série de experimentos.

Apesar de a segunda lógica de comando do motor de passo ter se mostrado mais eficaz, praticamente independentemente dos sinais dos termopares, isto não invalida a detecção do “*channeling*”, nesta tese, uma vez que, na literatura, este fenômeno ainda não havia sido evidenciado através de sensores, tal qual foi no presente trabalho.

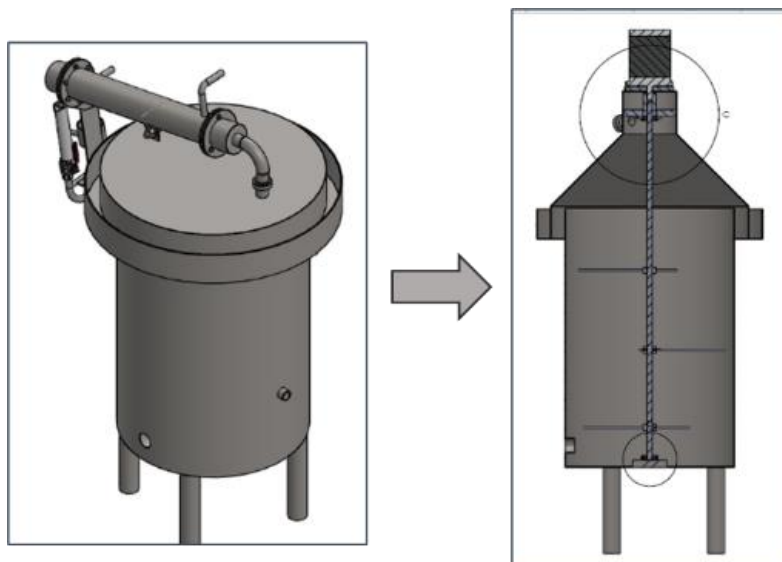
Se a distribuição de temperaturas fosse homogênea, as curvas seriam praticamente sobrepostas, o que indicaria distribuição uniforme do vapor. O ponto de interesse neste gráfico, ou seja, a ocorrência do “*channeling*”, tem lugar a partir do momento em que as temperaturas começam a se elevar, ou seja, com a o fluxo de vapor ascendente através da massa vegetal. Os dados para construção do gráfico da Figura 32 foram obtidos tendo início neste momento (que ocorre cerca de 20 minutos após o acionamento da resistência) quando as temperaturas começam a se elevar a partir da temperatura ambiente.

Este período tem duração de 6 a 8 minutos (360 a 480 segundos). A partir deste momento, as temperaturas se equalizam, como dito, e já não mais existem os diferenciais. Assim, nas extrações 17, 18 e 19, houve intensa ação do motor de passo, reacomodando a erva no leito do vaso extrator desde o início da extração, ou seja, desde o acionamento do aquecimento.

Ainda como resultado experimental, as alterações realizadas no topo do vaso extrator, que visaram unicamente a conexão do motor de passo e seu eixo, propiciaram melhorias no fluxo de vapor, com menor turbulência à entrada do condensador. As descontinuidades provindas das drásticas mudanças de diâmetros e o acabamento interno, de soldas protuberantes e de superfícies de contato com o fluido, sem qualquer tratamento de polimento, ainda permanecem carentes de

melhorias e são pontos a serem explorados em futuras pesquisas. Ainda assim, houve melhoria perceptível no fluxo, conforme mostra a Figura 33, o que representa um resultado positivo da pesquisa e possibilidades de melhorias futuras.

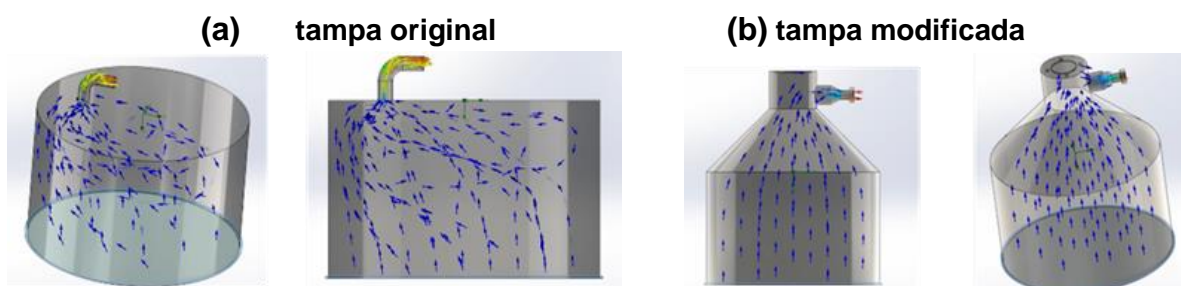
Figura 33. Melhoria do fluxo de vapor no vaso extrator.



Fonte: autoria própria (2021).

Na Figura 34 (a) e (b), os resultados gráficos da verificação no CFD mostram o fluxo mais suave na tampa modificada, o que favorece a distribuição homogênea do vapor.

Figura 34. Fluxo com tampa original e modificada.



Fonte: autoria própria (2022).

A redução de perda de carga, obtida com a geometria proposta da parte superior do vaso destilador, foi calculada pelo *CFD* e diminuiu de 128,01 Pa para 57,24 Pa.

5.3 Determinação da duração economicamente viável da extração

Neste tópico serão mostrados e discutidos resultados obtidos com a tecnologia de processamento de imagem para auxiliar a operação de extração na determinação do ponto final econômico do processo.

Avaliando os gráficos, com dados experimentais, do Apêndice A, observamos que a tarefa de determinação do tempo ideal de processo até poderia ser realizada através de observações periódicas do volume extraído, por parte do operador. A cada intervalo observado, quando não houver acréscimo significativo de volume, este é o momento de desligar a alimentação elétrica da resistência de aquecimento para a extração em curso. No entanto, no ambiente industrial, quando diversas extrações estão ocorrendo simultaneamente, o operador poderia incorrer em uma espera exagerada ou mesmo esquecimento, além de, ao dar atenção a este ponto do processo, outros riscos de segurança do trabalho e do processo não estariam sendo observados.

O sistema de processamento de imagem mostrou-se competente para determinar o final do processo, sendo que há ainda pontos a serem aprimorados para que esta solução seja amplamente utilizada na indústria. Um destes pontos é a saída turbulenta do fluido condensado (OE + hidrolato) que provoca movimento e borbulhamento nos meniscos da coluna de óleo essencial. Os experimentos levados a cabo com o processamento de imagem tiveram resultados satisfatórios, porém um fluxo de descida mais suave evitaria tais inconvenientes.

Na Figura 35 o ponto final de conclusão da extração deu-se com o volume de 45,01 mL. As leituras realizadas (visualmente) confirmaram os valores do sistema de processamento de imagem. A vantagem deste método de detecção é a universalidade, podendo ser empregado a qualquer óleo essencial, mesmo àqueles que sejam mais densos que a água, bastando uma simples reconfiguração do sistema. Uma biblioteca de cores e padrões pode ser criada para que, ao informar ao sistema a erva utilizada, ele já assuma os parâmetros cabíveis à detecção.

O algoritmo utilizado, utilizou a biblioteca de visão computacional OpenCV, com as cores no formato RGB (Red, Green, Blue). Não há aprofundamento neste ponto da pesquisa, uma vez que o intuito é a proposta de aplicação de configuração tecnológica e não o sistema de processamento de imagem em si.

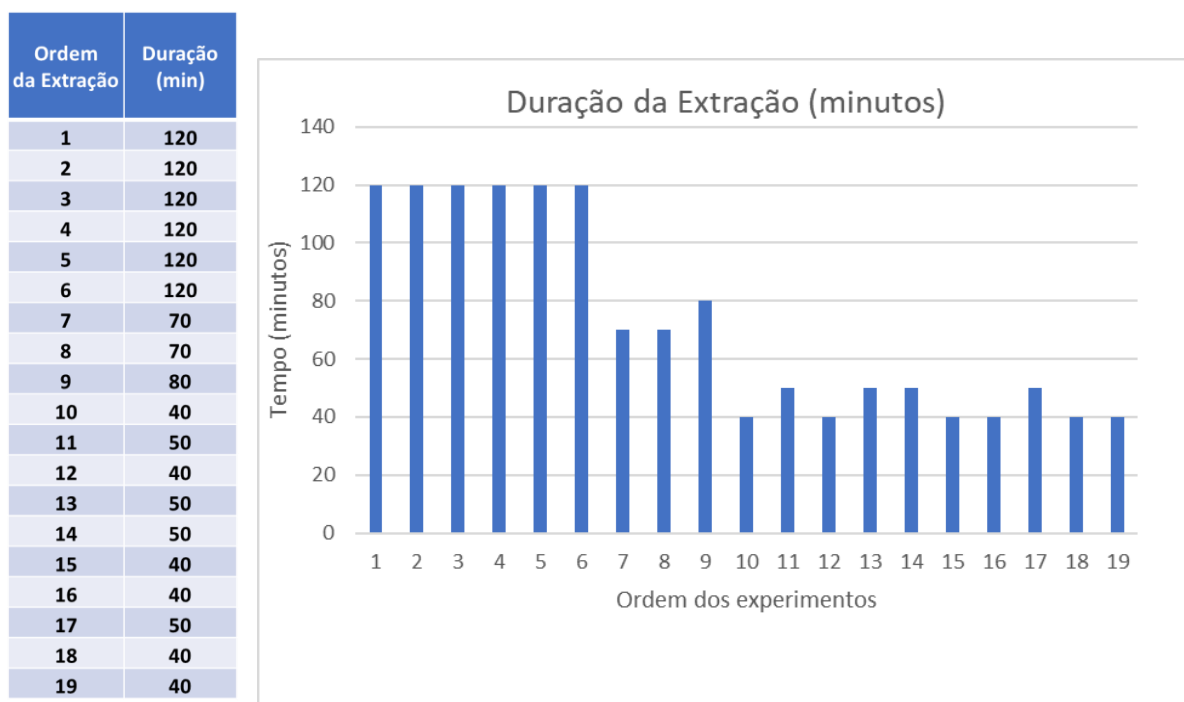
Figura 35. Foto típica: momento final da extração.



Fonte: autoria própria (2021).

Os tempos de processo foram registrados para as 19 extrações experimentais e são mostrados na Gráfico 1.

Gráfico 1. Duração das extrações experimentais



Fonte: autoria própria (2022)

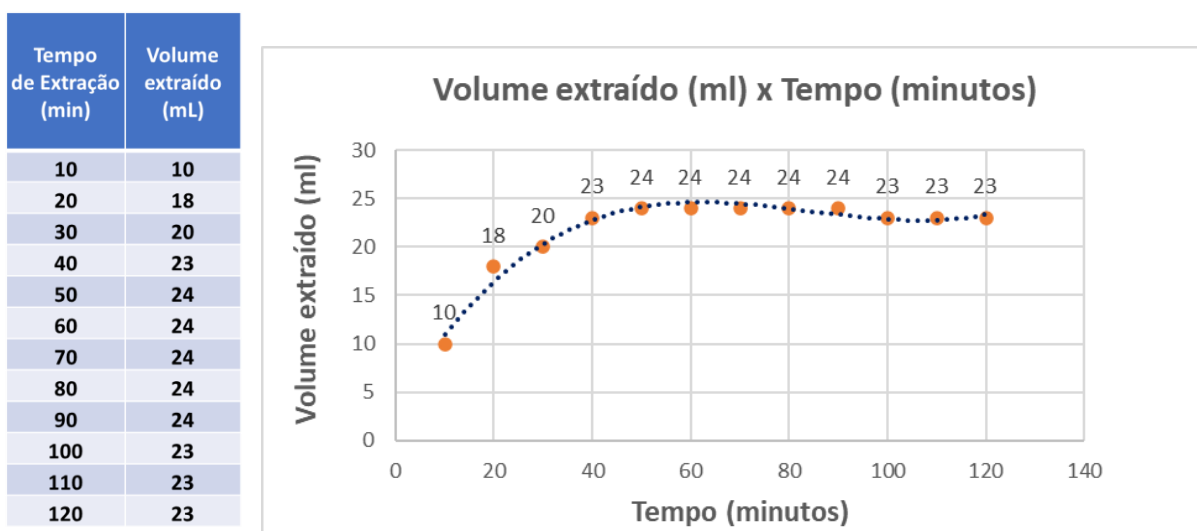
Nos experimentos iniciais de 1 a 6 o tempo padrão de 2 horas (120 minutos) foi utilizado, obedecendo procedimentos usuais industriais que variam de 2 a 4 horas. Nas extrações experimentais de 7 a 11, a decisão de interrupção da extração foi realizada por leitura física do nível do OE extraído. Nas extrações de 12 a 19, o

sistema de processamento de imagem foi o elemento de controle e decisório para conclusão do processo.

A possibilidade de redução do tempo de processo de 120 minutos para 40 a 60 minutos, como foi possível observar nos dados, traz importantes benefícios à indústria de óleos essenciais, tanto em acréscimo de capacidade produtiva como em redução do consumo energético.

As curvas de progresso do volume extraído *versus* o tempo seguem um padrão assintótico, em direção a um máximo de rendimento da extração. O Gráfico 2, relativo ao experimento de número 1, reflete este comportamento. Chama a atenção para alguns pontos importantes. Primeiro, é notório que a extração poderia ter sido interrompida com uma duração entre 40 e 60 minutos, ou seja, a continuidade não trouxe qualquer benefício, além de consumir energia desnecessariamente. Segundo, houve perda de conteúdo extraído (volume caiu de 24 mL para 23 mL), possivelmente por evaporação de frações voláteis do óleo essencial, ou seja, perda de produto.

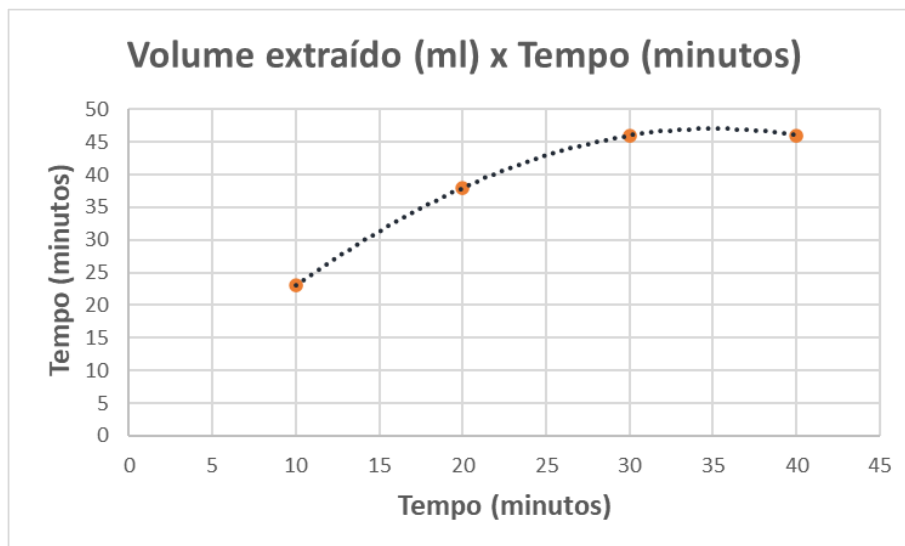
Gráfico 2. Volume da extração experimental 1.



Fonte: autoria própria (2021).

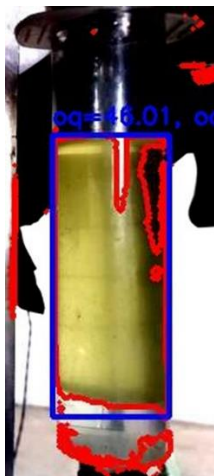
Já nas últimas extrações, a estabilização do volume extraído foi detectada pelo sistema de processamento de imagem que tomou a decisão de interromper o processo. Há que se mencionar que havia intertravamento inteligente programado entre este sistema de imagem e o processo de extração, para que a decisão fosse automática. O Gráfico 3 mostra o gráfico da extração experimental de número 18 e a Figura 36, mostra a imagem do momento final da extração.

Gráfico 3. Volume da extração experimental 18.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 36. Momento final da extração experimental 18



Fonte: autoria própria (2021).

O ponto ótimo de interrupção do processo é aquele em que a continuidade da extração não geraria volume suficiente para arcar com os custos operacionais. A programação deste ponto de decisão no SCADA é passo bastante simples, bastando comparar o valor gerado por 1 mL daquele OE em processo com os custos operacionais específicos para aquela extração, conforme mostrado no fluxograma da Figura 31.

5.4 Melhoria do Processo de Condensação

Na indústria de OE é comum a utilização de água à temperatura ambiente (ou água de torre de resfriamento) no processo de condensação. A perda de componentes voláteis, mais notadamente nos meses mais quentes do ano, então, ocorre e afeta resultados da indústria. Este fator é ainda mais intenso quando os tempos de extração são longos, permitindo que o OE extraído fique exposto, evaporando. Vale notar (vide Apêndice A), nos experimentos iniciais, que houve queda no volume extraído após algum tempo, o que indica perda de OE.

Ao utilizar-se água com temperatura controlada, o propósito foi o de se condensarem componentes voláteis e evitar sua evaporação, pelo menos não totalmente, para o ambiente. Também a redução no tempo de extração diminui esta exposição entre o final da extração e o envase do OE.

As análises demonstraram que houve resultado positivo quando do uso de água de condensação com temperatura controlada, uma vez que o conteúdo do componente Citral, de grande interesse comercial neste OE, aumentou desde o ponto onde se iniciou o uso de água gelada e utilizando-se matéria-prima de mesma origem (área, data de plantio e cuidados agrícolas).

A Tabela 2 traz os resultados das análises cromatográficas, do OE de *Cymbopogon citratus*, com destaque às linhas referentes aos isômeros do Citral (Neral e Geranial).

Tabela 2. Resultados da análises por cromatografia do OE de *Cymbopogon citratus*

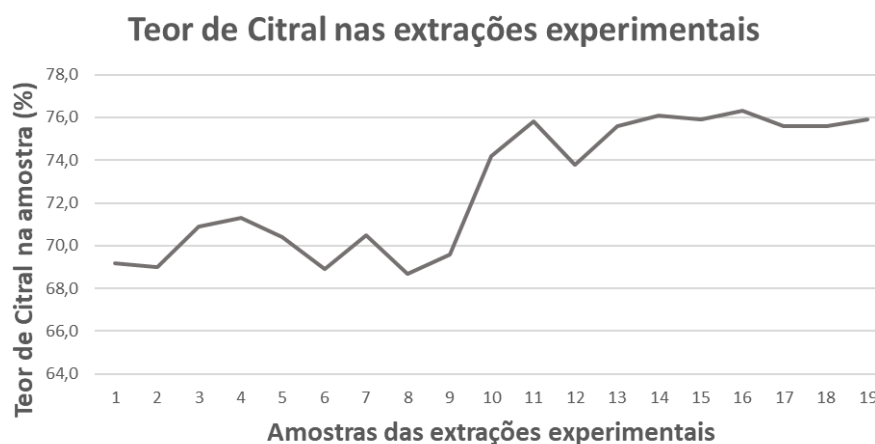
Composto	Percentuais presentes nas análises (%)																		
	Ordem dos Experimentos																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mirceeno	16,0	18,4	15,8	15,6	16,4	15,1	17,1	16,7	17,5	14,7	13,2	15,4	11,6	13,6	12,3	13,3	14,0	14,0	12,8
Z- β -ocimeno	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
E- β -ocimeno	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
6-metil-5-hepten-2-ona	0,9	0,7	0,5	0,7	1,0	0,7	1,2	1,2	1,4	0,6	0,5	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
6,7-epoximirceeno	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
óxido de limoneno	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,2	2,0	0,2	0,1	0,1	0,2	2,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
citronelal	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
hidrato de cis-sabineno	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
cânfora	0,9	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,1	1,0	1,1	0,9	1,0	0,8	0,9	1,1	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9
α -gurjuneno	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	0,9	1,1	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
β -elemeno	1,0	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,2	0,9	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	1,1	0,9
linalool	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
mircenol	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
neral	29,4	29,6	29,8	30,5	30,2	29,7	30,6	29,5	30,5	31,5	31,9	31,8	31,9	32,0	32,0	32,3	32,0	32,0	32,1
geranial	39,8	39,4	41,1	40,8	40,2	39,2	39,9	39,2	39,1	42,7	43,9	42,0	43,7	44,1	43,9	44,0	43,6	43,6	43,8
α -farneseno	0,6	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3	0,5
γ -cadineno	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
nerol	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,6	0,7	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
geraniol	4,8	3,9	4,0	3,9	3,7	4,0	3,4	3,0	3,4	3,6	3,6	3,6	3,4	3,1	3,1	3,6	3,7	3,7	4,0
cubenol	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
α -cadinol	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
óxido de cariofileno	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
T-murolol	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(E,Z)-farnesol	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
α -bisabolol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	1,6	1,0	1,1	1,0	0,9	3,8	0,4	1,2	0,5	0,7	0,4	0,2	0,5	0,4	1,7	0,2	0,1	0,1	0,7

Fonte: autoria própria (2022)

No Gráfico 4 são mostrados os teores de Citral (como a soma dos isômeros Neral e Geranial) para as 19 amostras das extrações experimentais.

Gráfico 4. Teor de Citral nas extrações experimentais

Ordem da Extração	% de Citral
1	69,2
2	69,0
3	70,9
4	71,3
5	70,4
6	68,9
7	70,5
8	68,7
9	69,6
10	74,2
11	75,8
12	73,8
13	75,6
14	76,1
15	75,9
16	76,3
17	75,6
18	75,6
19	75,9



Fonte: autoria própria (2022)

Os perfis dos 19 cromatogramas encontram-se no Apêndice A. A água gelada foi aplicada a partir da extração experimental de número 7. A partir da 12^a os controles de temperatura foram aplicados com o programa do PLC.

Há que se mencionar que a taxa (vazão) de condensado não apresentou incremento qualquer com o uso da água gelada, já que, na planta piloto experimental, a capacidade de geração de vapor estava limitada à fonte de energia utilizada (resistência elétrica de 4 kW). Na indústria, quando se utiliza vapor de caldeira, a capacidade do caudal disponível de vapor é muito maior, permitindo ao operador ou, eventualmente, a um sistema de controle, variá-la a ponto de explorar totalmente a capacidade de arraste do óleo essencial da superfície das folhas e, posteriormente, do sistema de condensação.

A unidade de refrigeração (*chiller*) gerou água de condensação com temperaturas ajustadas (*setpoints*) para valores entre 13 °C (comando para desligar o compressor do *chiller*) e 15 C (comando para ligar o compressor) e teve capacidade suficiente para liquefazer a mistura vapor-óleo essencial.

Além dos já mencionados, há os benefícios ambientais, na economia de água. Pequenos produtores utilizam a água de condensação e a dispensam no ambiente (normalmente para algum uso secundário). Alguns tentam utilizá-la deixando correr pela área de plantio, buscando evitar o desperdício. Outros acabam por perdê-la. A título de informação, nos experimentos onde a água foi dispensada, um volume

aproximado de 800 litros (período de 2 horas) foi deixado correr em direção à área de plantio.

5.5 Resultados quantitativos das extrações

As implementações tecnológicas mostraram-se efetivas na melhoria de rendimento das extrações experimentais. Com a forma mais efetiva de preparação da erva (desidratada 48 horas à sombra e picada com 2 cm), as adições de tecnologia tiveram papel determinante no crescimento do volume extraído e, conseqüentemente no rendimento, notadamente a partir da extração de número 12. A Tabela 3 exibe os resultados quantitativos das extrações experimentais.

Tabela 3. Resultados quantitativos

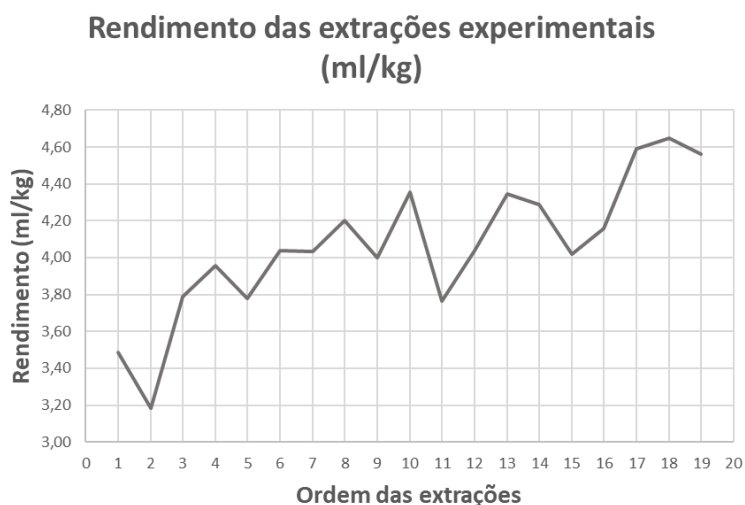
Ordem da Extração	Duração (min)	Massa de erva (kg)	Volume de OE (mL)	Rendimento (mL/kg)
1	120	6,6	23	3,48
2	120	6,6	21	3,18
3	120	6,6	25	3,79
4	120	9,6	38	3,96
5	120	9,0	34	3,78
6	120	10,4	42	4,04
7	70	11,9	48	4,03
8	70	10,0	42	4,20
9	80	10,0	40	4,00
10	40	10,1	44	4,36
11	50	10,1	38	3,76
12	40	9,9	40	4,04
13	50	9,9	43	4,34
14	50	9,8	42	4,29
15	40	9,7	39	4,02
16	40	10,1	42	4,16
17	50	9,8	45	4,59
18	40	9,9	46	4,65
19	40	10,0	45,6	4,56

Fonte: autoria própria (2021).

O gráfico da Gráfico 5 mostra a evolução do rendimento das 19 extrações experimentais.

Gráfico 5. Rendimento das extrações experimentais

Ordem da Extração	Rendimento (ml/kg)
1	3,48
2	3,18
3	3,79
4	3,96
5	3,78
6	4,04
7	4,03
8	4,20
9	4,00
10	4,36
11	3,76
12	4,04
13	4,34
14	4,29
15	4,02
16	4,16
17	4,59
18	4,65
19	4,56



Fonte: autoria própria (2021)

As médias dos rendimentos nas diversas configurações experimentais, com a progressiva introdução de elementos da proposta tecnológica, demonstram um interessante crescimento dos rendimentos, vide Tabela 4.

Tabela 4. Médias dos rendimentos

Modo operacional	Média dos rendimentos (mL)
Extrações realizadas no modo manual. Experimentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6	3,70
Extrações realizadas com a tampa nova, água gelada sem controle de temperatura e tempo reduzido baseado nas observações visuais (sem sistema de processamento de imagem). Experimentos 7, 8 e 9	4,08
Extrações realizadas com a tampa nova e água gelada com controle de temperatura. Experimentos 10 e 11	4,06
Extrações realizadas com todas as implementações tecnológicas Experimentos 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 3 19	4,33
Extrações com lógica de controle do motor de passo (controle de "channeling") aprimorada. Experimentos 17, 18 e 19	4,60

Fonte: autoria própria (2021)

As médias de rendimentos antes e após a implementação da proposta tecnológica, respectivamente 3,70 mL/kg e 4,33 mL/kg, já mostraram aumento significativo, de 17%. Com o aprimoramento da lógica de controle do motor de passo, a média dos três últimos experimentos (17, 18 e 19), a média subiu para 4,60 mL/kg e incremento superior a 24%.

5.6 Discussão sobre produtividade, capacidade produtiva e consumo energético

A pesquisa visou melhorar fatores impactantes na capacidade produtiva, produtividade e consumo energético. Foram eles: (1) a redução de tempo de extração; (2) maiores rendimentos; (3) confirmação dos ganhos com a preparação adequada da erva aromática.

A tecnologia de processamento de imagem possibilitou a determinação automática da duração economicamente viável da extração, com a tomada de decisão de interrupção, assim que a curva de volume extraído atingisse o patamar superior ou num tempo imediatamente anterior, quando não mais se justificasse economicamente a continuidade do processo. É certo que tal decisão poderia ser realizada manualmente, contudo a indústria necessitaria dispor de mão-de-obra específica para tal fim. O acompanhamento de várias extrações simultâneas, além de tantas outras atividades operacionais, como operação de caldeira, suprimento de água, colheita, preparação e pesagem da matéria-prima, dentre outras, requereria mão-de-obra adicional.

Os maiores rendimentos possibilitaram volumes maiores a partir da mesma quantidade de matéria-prima. Assim, além dos diretos ganhos de volume, há ganhos de capacidade.

A preparação da matéria-prima permitiu ocupar de forma mais efetiva o volume interno do vaso extrator. Após desidratada e picada a erva aromática se acomoda ocupando espaços intersticiais que, quando do uso de erva fresca e inteira, ficavam vazios.

De forma aproximada, os ganhos de capacidade nos lotes experimentais poderiam ser assim expressos:

A redução do tempo de processo de 120 minutos para cerca de 50 minutos habilita uma administração mais eficaz da capacidade instalada.

A título de exemplo, com a capacidade atual em um vaso extrator, em um mês com 22 dias trabalhados e 8 horas diárias, com 2 horas dedicadas à limpeza (a cada extração) e alimentação de matéria-prima, somente 2 extrações diárias seriam possíveis, ou 44 extrações em um mês.

Com o tempo de processo determinado economicamente (assumindo 50 minutos, com o sistema de processamento de imagem aplicado à extração de capim-limão) e 2 horas dedicadas à limpeza e alimentação de erva aromática, seriam possíveis 3 extrações em um dia e duas no dia subsequente e ainda com tempo extra para outras atividades (manutenção, por exemplo), levando a capacidade mensal a 55 extrações, com ganho de 25%. O Quadro 4 demonstra essa análise.

Quadro 44. Ganho de capacidade com redução do tempo de processo.

Capacidade Mensal	Modo Atual	Modo Proposto	
	Dia	Dia "n"	Dia "n+1"
Tempo de Extração (min)	120	50	
Limpeza e Alimentação (min)	120	120	120
Tempo de Extração (min)	120	50	50
Limpeza e Alimentação (min)	120	120	120
Tempo de Extração (min)		50	50
Limpeza e Alimentação (min)			120
T o t a l (min)	480	390	460
Tempo extra	0	90	20
22 dias de trabalho	44 extrações		
11 dias de trabalho		33 extrações	22 extrações

Fonte: autoria própria (2021)

Outro ganho de capacidade vem do aumento do rendimento das extrações. Também a título de exemplo, o crescimento das médias de rendimentos antes e após a implementação da proposta tecnológica, respectivamente 3,70 mL/kg e 4,60 mL/kg, apresentou incremento superior a 24%, o que tem direta relação com ganho de capacidade.

Assim, ganhos próximos a 50% (soma de 25% de tempo de processo e 24% de aumento de rendimento) de capacidade e de redução de consumo energético são evidenciados pelos resultados experimentais. A extensão destas melhorias à escala industrial e a outras ervas aromáticas merece claramente estudo específico.

A melhor ocupação do volume interno do vaso extrator, com a erva aromática picada e desidratada, representa mais um ganho de capacidade produtiva e merece ser endereçado aos produtores de óleo essencial, fato aqui citado para alertá-los e buscar um questionamento sobre a melhor forma de alimentação de matéria-prima, embora não seja resultado desta tese.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho atingiu o propósito de incrementar produtividade e qualidade dos óleos essenciais com aplicação de tecnologias digitais inteligentes. Foram atingidos os objetivos e os resultados servem de referência a esta indústria.

Os fatores influentes no desempenho das extrações e que impactam rendimento, tempo de extração, qualidade e consumo de energia foram identificados e se tornaram a base para a proposta. Tais fatores poderiam ser assim elencados: a homogeneidade da temperatura no seio da massa de matéria-prima indicando a distribuição uniforme do vapor; a determinação autônoma do final da extração; o controle da temperatura da água de condensação. As variáveis e ocorrências de processo, relacionados a estes fatores, foram identificadas e analisadas.

Mesmo com a preparação da matéria-prima (picagem e desidratação), ocorreu a formação de caminhos preferenciais de vapor (*channeling*), fato confirmado a partir do experimento de número 11, quando o sistema de detecção do “*channeling*” foi implementado e evidenciou tal fenômeno. Isto significou uma conquista da pesquisa, já que diversos autores mencionaram esta ocorrência sem, contudo, terem evidenciado sua presença. Após a detecção, a correção dos caminhos preferenciais de vapor significou um avanço no rendimento, mormente nos três últimos experimentos, quando se atingiu a maior média, com a lógica de comando do motor de passo melhor entendida e aprimorada.

A determinação automática do ponto de conclusão da extração foi um significativo avanço, uma vez que o consumo de energia ficará limitado àquele suficiente e necessário para aquela porção de erva. Nos experimentos com capim-limão, a ocupação de capacidade fabril e dos demais custos operacionais seguiram a redução de consumo energético. O sistema de processamento de imagem foi eficaz e permite a programação da interrupção baseada na comparação de valores como preço de venda ou margem operacional com os custos para obter o volume em um dado intervalo da produção ou outro fator de interesse do produtor.

A água de condensação, com temperatura controlada, aliada à duração reduzida do processo levaram ao aumento do ingrediente de interesse do óleo essencial de capim-limão: o Citral. Além disso, em alguns experimentos iniciais havia perda de volume extraído por evaporação, tanto pelo tempo demasiado longo como

pela demora em prosseguir para embalagem envasamento do óleo essencial em sua embalagem, passo seguinte à extração.

A qualidade do OE foi beneficiada. Com as análises cromatográficas pode-se evidenciar o aumento do teor de Citral. Os sete experimentos da fase final (13 a 19) obtiveram resultados melhores e mais consistentes, com o teor de Citral maior e com variabilidade menor. Tais conquistas de qualidade têm por causa todas as ações tecnológicas e de processo.

Os testes com tecnologia embarcada, em ambiente relevante, geraram resultados que permitiram comparação com aqueles obtidos com o processo original, com vantagem significativa para aqueles obtidos após introdução das tecnologias propostas.

6.1 Perspectivas para futuras pesquisas

O tema, de adição de tecnologias ao processo de destilação de óleos essenciais não foi aqui esgotado. Há ainda muito o que explorar. Reforça esta afirmação o fato de o desempenho apresentado pelo processo, após a implementação da proposta tecnológica, temática desta tese, composta pelos blocos de melhoria do processo de condensação, detecção e correção do “*channeling*” e determinação da duração econômica do processo, ter demonstrado marcante superioridade de resultados quando comparados àqueles obtidos na instalação convencional, porém ainda com oportunidades de progresso.

A gestão de tecnologia das empresas deste ramo industrial merece apropriada priorização, uma vez que grandes quantidades de ervas, as matérias-primas, são processadas em fábricas ainda carentes neste sentido.

Grandes áreas de plantio, consumos de água e energia, gastos gerais de fabricação, tempo e capacidade produtiva são aspectos que requerem atenção dos gestores e, ao buscarem os maiores rendimentos possíveis, entendendo o processo e agindo para continuamente melhorá-lo, contarem com as tecnologias disponíveis, dando acesso a benefícios de grande monta: competitividade obtida por superiores quantidade e qualidade, atendimento ao cliente e sustentabilidade. Esta solidez só é possível com o suporte da excelência operacional trazida pela apropriada gestão da tecnologia.

Este trabalho, com sua proposta, realça a relevância das melhorias tecnológicas e abre possibilidades para futuros estudos, tais como:

- Otimização da geometria dos sistemas de fluxo que compõem o processo extrativo.
- Extensão da correção dos caminhos críticos de vapor à escala industrial.
- Aprimoramento do processamento de imagem para determinação do ponto final da extração, levando-o à escala industrial e validando-o para outras matérias-primas.
- A aplicação de gêmeo digital para melhoria de desempenho de processos em tempo real.
- Avaliações ambientais do impacto do lançamento de hidrolato quando descartado no meio ambiente e melhorias da separação OE/hidrolato.

6.2 Produção acadêmica associada à pesquisa

A pesquisa desta tese permitiu a publicação de artigos e depósito de patente na modalidade invenção. O processo para obtenção da patente, em andamento, terá sua duração determinada pela burocracia necessária.

Os artigos são os seguintes:

- “*Steam Distillation for Essential Oil Extraction: An Evaluation of Technological Advances Based on an Analysis of Patent Documents*” (Destilação a vapor de óleos essenciais: uma avaliação dos avanços tecnológicos baseada em análise de documentos de patentes, tradução livre do autor). Autores: Carlos Alberto Machado, Fabricia Oliveira Oliveira, Matheus Antônio de Andrade, Katharine Valéria Saraiva Hodel, Herman Lepikson, Bruna Aparecida Souza Machado. Periódico: Sustainability (MDPI)
- “*Distillation of essential oils: an innovative technological approach focused on productivity, quality and sustainability*” (destilação de óleos essenciais: uma abordagem inovadora com foco em produtividade, qualidade e sustentabilidade, tradução livre do autor). Autores: Carlos Alberto Machado, Matheus Antônio de Andrade, Katharine Valéria Saraiva Hodel, Herman

Lepikson, Bruna Aparecida Souza Machado. Periódico: Sustainability (MDPI).
Obs.: Artigo submetido e aguardando aprovação do periódico Scientific Reports.

- “*Technology as a pillar for essential oil green extraction*” (Tecnologia como pilar para a extração verde de óleos essenciais, tradução livre do autor)
- “*Manufacturing 4.0: Discussion on Application in the Extractive Industry of Essential Oils*” (Manufatura 4.0 discussão e aplicação na indústria extrativa de óleos essenciais, tradução livre do autor). Autores: Carlos Alberto Tosta Machado; Matheus Antonio Nogueira de Andrade; Herman Augusto Lepikson. Periódico: Journal of Bioengineering and Technology applied to Health.
- “*Essential Oil Steam Distillation: Manufacturing 4.0*” (Destilação de óleos essenciais: manufatura 4.0, tradução livre do autor) (MACHADO et al., 2021b). Autores: Carlos Alberto Tosta Machado, Herman Augusto Lepikson, Matheus Antônio Nogueira de Andrade, Paulo Renato Câmara da Silva. Periódico: Journal of Bioengineering and Technology applied to Health.
- “*Essential Oil Extraction Industry: Exploring the Strategic Technology Dimension*” (Indústria extrativa de óleos essenciais: explorando a dimensão estratégica da tecnologia, tradução livre do autor). (MACHADO, et al. 2020). Autores: Carlos Alberto Tosta Machador, Herman Augusto Lepikson, Matheus Antônio. Nogueira de Andrade, Yasmim Thasla Santos Ferreira, Sara Freitas Santos Vasconcelos. VI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY (SIINTEC).
- “*Essential Oil Extraction: Being Green and Emerging Technologies*” (Extração de óleos essenciais: o caminho verde com tecnologias emergentes, tradução livre do autor). Autores: Carlos Alberto Tosta Machado, Herman Augusto Lepikson, Matheus Antônio Nogueira de Andrade, Paulo Renato Câmara da Silva. Periódico: Journal of Bioengineering and Technology applied to Health.

A patente foi depositada sob o seguinte título:

- Sistema de detecção e correção de caminhos de vapor, sistema de processamento de imagem e equipamentos de extração de óleos essenciais.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, R., et al. The Comparative Study of Anti-Windup PID Controllers for Steam Distillation Process. **Institute of Electrical and Electronics Engineers** v.1, n. 32, 2020. Disponível em: DOI: 10.1109/ICSPC50992.2020.9305812
- AKHIHIERO, E. T.; AYODELE, B. V.; AKPOJOTOR, G. Distillation, lemon grass using steam. effect of particle size and temperature variation on the yield of essential oil fromM. **African Journal of Physics**, v. 6, p. 105-112, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/287992920>.
- AKHTAR, M. S.; SWAMY, M. K.; SINNIAH, U. R. (ed.). **Natural Bio-active Compounds**: volume 1: Production and Applications. Springer Nature, 2019.
- ALMEIDA-BEZERRA, J. W. et al. Alelopatia? Não sei! Nunca Vi! Eu só ouço falar!. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/RITA/Downloads/10873-Article-148780-1-10-20201219.pdf>.
- ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. **Peer reviewed: design through the 12 principles of green engineering**. 2003. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es032373g>.
- ANDRADE, M. A. N. de. **Um Método Modular, Escalável e Generalizável Para Criação de Gêmeos Digitais de Processos Industriais**. Orientador: Herman Augusto Lepikson. 2021. 122 f. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.
- ATHOS ELECTRONICS., Motor de Passo: o que é e como funciona. 2021. Disponível em: <https://athoselectronics.com/motor-de-passo-como-funciona/>.
- AUTOMATIK, W.; MINYAK, A. K. H. Extraction of Citrus hystrix DC (Kaffir Lime) essential oil using automated steam distillation process: Analysis of volatile compounds. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v. 17, n. 3, p. 359-369, 2013. Disponível em: http://www.ukm.my/mjas/v17_n3/Nurhani.pdf.
- AZAMBUJA, Wagner. **Óleo essencial de capim limão ou lemongrass**. Ponta Grossa, PR: Leosessenciais. 2019. Disponível em: <https://www.oleosessenciais.org/oleo-essencial-de-capim-limao-ou-lemongrass/>.
- BARBIERI, C.; BORSOTTO, P. **Essential oils: market and legislation**. El-Shemy, H. Potential of Essential Oils, IntechOpen, p. 107-127, 2018. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/61798>.
- BASER, K. H. C.; BUCHBAUER, G. (Ed.). **Handbook of essential oils: science, technology, and applications**. CRC press, 2015.
- BEIS, S. H. et al. **Production of essential oil from cumin seeds**. Chemistry of Natural compounds, v. 36, n. 3, p. 265-268, 2000. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/221716676> Production of essential oil from Cumin seeds.

BELWAL, T. et al. Recent advances in scaling-up of non-conventional extraction techniques: Learning from successes and failures. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 127, p. 115895, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993620301242>.

BOSCHERT, S.; ROSEN, R. **Digital twin: the simulation aspect**. In: Mechatronic futures. Springer, Cham, p. 59-74. 2016. Disponível em: <https://www.springerprofessional.de/en/digital-twin-the-simulation-aspect/10247880>.

BOŽOVIĆ, Mijat et al. Essential oils extraction: A 24-hour steam distillation systematic methodology. **Natural product research**, v. 31, n. 20, p. 2387-2396, 2017.

BURGER, P. et al. Extraction of natural fragrance ingredients: History overview and future trends. **Chemistry & biodiversity**, v. 16, n. 10, p. e1900424, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cbdv.201900424>.

BUSATO, N. V. et al. Estratégias de modelagem da extração de óleos essenciais por hidrodestilação e destilação a vapor. **Ciência Rural**, v. 44, p. 1574-1582, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/gvHbsFT68gFVPfBksDYYhnL/?format=pdf&lang=pt>.

CANNON, Jeffery. B. et al. Modification of yield and composition of essential oils by distillation time. **Industrial Crops and Products**, v. 41, p. 214-220, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257372073> Modification of yield and composition of essential oils by distillation time.

CASSEL, E. et al. **Steam distillation modeling for essential oil extraction process**. *Industrial crops and products*, v. 29, n. 1, p. 171-176, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/229104884> Steam Distillation Modeling for Essential Oil Extraction Process.

CASSEL, E.; VARGAS, R. MF. Experiments and modeling of the *Cymbopogon winterianus* essential oil extraction by steam distillation. **Journal of the Mexican Chemical Society**, v. 50, n. 3, p. 126-129, 2006. Disponível em:

CASTILLO CASTELLANOS, J. S.; RODRÍGUEZ MURCIA, C. G. **Diseño de la ingeniería en detalle para la repotenciación de la unidad de extracción multipropósito para prácticas no presenciales**. 2021. TCC (graduação em engenharia mecânica. 2021. Disponível em: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/16672/Tesis%20Jhoan%20y%20Carlos%20Ing%20Automatizaci%C3%B3n%202021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- CERQUEIRA, Martins M. Dias D. de et al. **Variação sazonal da composição do óleo essencial de *Myrcia salzmannii* Berg.(Myrtaceae)**. Química Nova, v. 32, n. 6, p. 1544-1548, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600035>.
- CHAKRAVARTY, I.; PARMAR, V. M.; MANDAVGANE, S. A. Current trends in essential oil (EO) production. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-24, 2021.
- CHAMORRO, Ester E. R. et al. **Study of the chemical composition of essential oils by gas chromatography**. Intechopen. v. 1, p. 307-324, 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/30595>.
- CHÁVEZ, M. G. C. **Hidrodestilación de aceites esenciales: modelado y caracterización**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidad de Valladolid. 2007. Disponível em: <https://www.anipam.es/downloads/43/hidrodestilacion-de-aceitesesenciales.pdf>.
- CHEMAT, F. et al. Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 118, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993619300706>.
- CHEMAT, Farid.; BOUTEKEDJIRET, Chahrazed. Extraction//steam distillation. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering; **Elsevier: Amsterdam**, The Netherlands, p. 1-12, 2015.
- CHEN, J. et al. Research on Verification Techniques of Common Glass Measuring Capacity Based on Image Processing. In: International Conference on Information Science and Technology (ICIST), 10. **Anais [...] IEEE**, 2020. p. 50-57. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9202065>.
- COSTA, L. C. do B. et al. Yield and composition of essential oil of lemongrass in different drying and fragmentation conditions. **Horticultura Brasileira**, v. 23, n. 4, p. 956-959, 2005.
- DA SILVA, Caroline F. et al. On the production and release of Hedychium coronarium essential oil from nanoformulations. **Industrial Crops and Products**, v. 171, p. 113984, 2021.
- DALENOGARE, L. S, et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018. Disponível em: <https://iranarze.ir/wp-content/uploads/2018/10/E9915-IranArze.pdf>.
- DAO, T. P. et al. Central Composite Design, Kinetic Model, Thermodynamics, and Chemical Composition of Pomelo (*Citrus Maxima* (Burm.) Merr.) Essential Oil Extraction by Steam Distillation. **Processes**, v. 9, n. 11, p. 2075, 2021.

- DE ANDRADE, M. A. N.; LEPIKSON, H. A.; MACHADO, C. A. T. **A Model Proposal For Digital Twin Development: Essential Oil Extraction Perspective**. Research square. 2021b. Disponível em: https://assets.researchsquare.com/files/rs-300217/v1_covered.pdf?c=1631859432.
- DE ANDRADE, M. A. N.; LEPIKSON, H. A.; MACHADO, C. A. T. A New Framework and Methodology for Digital Twin Development. In: IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 14. **Anais [...]** IEEE, p. 134-138. 2021a. Disponível em; <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9529701>.
- DOBRNJAC, M. et al. The new solution of the substance flow system in the steam distillation process of essential oil. **Innovations, International Scientific Journals**, v. 5, n. 3, p. 153-155, 2017. <https://stumejournals.com/journals/innovations/2017/3/153>.
- DONELIAN, A. et al. Comparison of extraction of patchouli (Pogostemon cablin) essential oil with supercritical CO₂ and by steam distillation. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 48, n. 1, p. 15-20, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0896844608003008>.
- DU, H.; LI, M.; MENG, J. Study of fluid edge detection and tracking method in glass flume based on image processing technology. **Advances in Engineering Software**, v. 112, p. 117-123, 2017. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-fluid-edge-detection-and-tracking-method-Du-Li/2bc40977b5fc9b8c39bdbc81566141794b3e7f7c>.
- EMERSON ELECTRIC. **Sobre medidores de vazão de turbina de líquido**, 2021. Disponível em: <https://www.emerson.com/pt-br/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-liquid-turbine-flow-meters>
- ERMINAWATI. et al. The role of pre-treatment in enhancing yield and antioxidant activity of lemongrass (Cymbopogon citratus) essential oil. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais [...]** IOP Publishing, 2021. p. 012131. Disponível em: <https://sciprofiles.com/publication/view/f55ec48344463fdfed6bef242dc66ee>.
- FITRI, N. et al. A comparative study of water-steam distillation with water-bubble distillation techniques to increase the quality of patchouli essential oil. In: AIP Conference Proceedings. **Anais [...]** AIP Publishing LLC, v. 1823, 2017. p. 020122. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4978195>.
- FONSECA, R. R. et al. Automation and control of a dissolved air flotation pilot plant. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 3911-3916, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317307048>.
- FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Essential oils market size, share & growth report [2021-2028]. 2021. Disponível em:

<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/essential-oils-market-101063>. Acesso em: 02 de ago. de 2021.

FURLAN, Marcos R. et al. Variação dos teores de constituintes voláteis de *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf, Poaceae, coletados em diferentes regiões do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 20, p. 686-691, 2010.

GALVÃO, Francielton Santos et al. **Estudo sazonal e circadiano do óleo essencial de *Dizygostemon riparius* (Plantaginaceae): uma nova espécie aromática do Leste Maranhense.** 2021.

GONÇALVES, N. et al. Yarn features extraction using image processing and computer vision: a study with cotton and polyester yarns. **Measurement**, v. 68, p. 1-15, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273398076_Yarn_features_extraction_using_image_processing_and_computer_vision_-_A_study_with_cotton_and_polyester_yarns

GUENTHER, E.; ALTHAUSEN, D. **The essential oils**. New York: Van Nostrand, 1948, p.76.

GUIMARÃES, L. G. de L. **Estudo da estabilidade e do efeito fungitóxico do óleo essencial de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf).** 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica e Agrobioquímica) -Universidade Federal de Lavras, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2031>.

GUIMARÃES, L. G. de L. et al. Atividades antioxidante e fungitóxica do óleo essencial de capim-limão e do citral. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 464-472, 2011. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1312/0>.

HUANG, Z. Mass transfer models for supercritical fluid extraction of fresh tea leaves (*Camellia sinensis* L.). **Braz. J. Chem. Eng**, v. 34, n 3, 2015. p. 77-115. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150545> .

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9235: (ISO). Aromatic natural raw materials: Vocabulary. 9235, Genebra, 2013.

JAIMAND, K. et al. Optimization of Essential Oil Extraction Conditions for *Rosmarinus officinalis* L. on a Laboratory and Semi-industrial Scale. **Journal of Medicinal plants and By-product**. v. 9, n. Special, p. 29-34, 2020. Disponível em: https://jmpb.areeo.ac.ir/article_121748.html.

JOHARI, S. N. H. et al. Real-time IMC-PID Control and Monitoring of Essential Oil Extraction Process Using IoT. In: IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). **Anais [...] IEEE**, 2020. p. 51-56. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9140207>.

- KASUAN, N. et al. A discrete model reference adaptive control for temperature tracking in steam distillation process. In: International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), 11. **Anais** [...] IEEE, 2015. p. 5-10.
- KASUAN, N. et. al. Extraction of Citrus hystrix DC (Kaffir Lime) essential oil using automated steam distillation process: Analysis of volatile compounds. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v. 17, n. 3, p. 359-369, 2013. Disponível em: http://www.ukm.my/mjas/v17_n3/Nurhani.pdf.
- KASUAN, N.; TAIB, M. N.; RAHIMAN, M. H. F. Model Reference Adaptive Controller to regulate steam temperature in distillation process for essential oil extraction. In: International Colloquium on Signal Processing and its Applications, 7. **Anais** [...] IEEE, 2011. p. 298-303.
- KAYA, D. A. et al. Selection of optimal operating conditions for extraction of Myrtus Communis L. essential oil by the steam distillation method. **Molecules**, v. 25, n. 10, p. 2399, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7287582/>.
- KIM, Min. H.o; CHO, H.. M. Performance of function relationship with trend by selective actuator, **International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)** v. 9, n. 7, July 2018, pp. 215–219, Article ID: IJMET_09_07_025 Available online at <http://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=9&Issue=7>.
- KUMORO, A. C. et al. A brief review on the characteristics, extraction and potential industrial applications of citronella grass (Cymbopogon nardus) and lemongrass (Cymbopogon citratus) essential oils. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais** [...] IOP Publishing, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1053/1/012118/pdf>.
- LEWINSOHN, E. et al. Histochemical localization of citral accumulation in lemongrass leaves (Cymbopogon citratus (DC.) Stapf., Poaceae). **Annals of Botany**, v. 81, n. 1, p. 35-39, 1998. Disponível em: <https://academic.oup.com/aob/article/81/1/35/2587742>.
- LI, Y.; FABIANO-TIXIER, A. S.; CHEMAT, F. **Essential oils: from conventional to green extraction**. In: LI, Y.; FABIANO-TIXIER, A. S.; CHEMAT, F. Essential oils as reagents in Green Chemistry. Springer, p. 9-20, 2014.
- LIMA, A. E. F. et al. Rendimento, caracterização química e antibacteriana do óleo essencial de capim limão coletado em diferentes horários. **Magistra**, v. 28, n. 3/4, p. 369-378, 2016. Disponível em: <https://magistraonline.ufrb.edu.br/index.php/magistra/article/view/275>.
- LOURENÇO, J. A. A. **Destilação industrial de óleos essenciais. Curso Teórico-Prático**. In: FIGUEIREDO A. C, BARROSO J. G, PEDRO, L. G. (Eds), Potencialidades e Aplicações das Plantas Aromáticas e Medicinais: Curso Teórico-Prático, Portugal: Centro de Biotecnologia Vegetal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 3. Ed. 2007. ISBN: 978-972-9348-16-7. Disponível em: <http://cbv.fc.ul.pt/PAM/pdfsLivro/JoaoLourenco.pdf>

- MACHADO, C. A. et al. Steam Distillation for Essential Oil Extraction: **An Evaluation of Technological Advances Based on an Analysis of Patent Documents. Sustainability**, v. 14, n. 12, p. 7119, 2022.
- MACHADO, C. A. T. et al. Essential Oil Extraction: Being Green and Emerging Technologies. **Journal Of Bioengineering, Technologies And Health**, v. 4, n. 4, p. 128-133, 2021.(a)
- MACHADO, C. A. T. et al. Essential Oil Steam Distillation: Manufacturing 4.0. **Journal Of Bioengineering, Technologies And Health** v. 4, n. 3, p. 95-99, 2021. (b)
- MACHADO, C. A. T.; DE ANDRADE, M. A. N.; LEPIKSON, H. A. Manufacturing 4.0: Discussion on Application in the extractive industry of essential oils. **Journal of Bioengineering of and Tecchnology applied to Health**, v. 2, n. 3, p. 86-91, 2019. Disponível em: <http://www.ibth.com.br/index.php/JBTH/article/view/76>.
- MACHADO, C. et al. Technology as a Pillar for Essential Oil Green Extraction. In: International Symposium On Innovation And Technology (Siintec). **Anais [...]** SIINTEC, 6, v. 4, n. 1, p. 9-16, 2021(c). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348089087_TECHNOLOGY_AS_PILLAR_FOR_ESSENTIAL_OIL_GREEN_EXTRACTION.
- MACHADO, C. A. T.; et. al. Essential oil extraction industry: exploring the strategic technology dimension.", p. 567-575 . Anais [...] VI Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia. São Paulo: Blucher, 2020. ISSN 2357-7592, ISBN: 2357-7592, DOI 10.5151/siintec2020-ESSENTIALOIL
- MADNI, A. M.; MADNI, C. C.; LUCERO, S. D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. **Systems**, v. 7, n. 1, p. 7, 2019. Dsponível em: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>.
- MAHARAJ, S.; MCGAW, D. Mathematical model for the removal of essential oil constituents during steam distillation extraction. **Processes**, v. 8, n. 4, p. 400, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/4/400>
- MAHMOOD, W; _ABDULLAH, I. Translating OEE measure into manufacturing sustainability. In: Applied Mechanics and Materials. **Applied Mechanics and Materials**, 2015. p. 555-559. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280627987_Translating_OEE_Measure_into_Manufacturing_Sustainability
- MAIA, N. B. et al. Essential oil production and quality of Mentha arvensis L. grown in nutrient solutions. **Acta Hort**, v. 548, p. 181-187, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.19>.
- MALEKYDOZZADEH, Masoud et al. Application of Multistage Steam Distillation Column for Extraction of Essential Oil of Rosemarinuse officinalis L. **Iranian Journal of Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 55, 2012.

- MARTIN, C. **The dōTERRA Difference**. 2017. Disponível em <https://charmiemartin.com/2017/09/17/the-doterra-difference/>. Acesso em: 30 ago. 2021.
- MARTINAZZO, A. P. et al. Avaliação do óleo essencial folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf após o processo de secagem. **Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas**, v. 12, n. 5, p. 523-536, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262560575_Avaliacao_do_oleo_essencial_de_folhas_de_Cymbopogon_citratus_DC_Stapf_apos_o_processo_de_secagem
- MASANGO, P. Cleaner production of essential oils by steam distillation. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 8, p. 833-839, 2005. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-94925c68-0e32-36b8-bf0e-153e1ca07c36>.
- MEJRI, Jamel. et al. Study of hydro-distillation process of *Ruta chalepensis* L. essential oil. **Research Journal of Agriculture and Environmental Management**. Vol, v. 3, n. 10, p. 511-518, 2014. Disponível em: <http://apexjournal.org/rjaem/archive/2014/Oct/fulltext/Mejri%20et%20al.pdf>.
- MEZIANE, I. A. A et al. The first-order model in the simulation of essential oil extraction kinetics. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v.15, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214786119305078?via%3Dihub>
- MIGDADI, M. M. Knowledge management, customer relationship management and innovation capabilities. **Journal of Business & Industrial Marketing**, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342645395_Knowledge_management_customer_relationship_management_and_innovation_capabilities
- MOREIRA, C. A.; RAU, C. Implicações da RDC 48/2013 para a validação de limpeza em indústrias cosméticas. **Acta de Ciências e Saúde**, v. 1, n. 2, p. 1-20, 2014. Disponível em: <https://www2.ls.edu.br/actacs/index.php/ACTA/article/view/87..>
- MU'AZU, K. et al. Process intensification of lemon grass oil in a pilot plant. **Nigerian Journal of Technology**, v. 38, n. 2, p. 376-383, 2019a. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/njt/article/view/185685>.
- MU'AZU, K. et al. Production and Economics Evaluation of Pilot Scale Essential Oil Extract from *Eucalyptus Citriodora* Leaves. **Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment**, v. 15, n. 4, p. 958-972, 2019b. Disponível em: <https://azojete.com.ng/index.php/azojete/article/view/155>.
- MUHAMMAD, Z. et al. The self-tuning fuzzy PID to regulate the steam temperature in real-time process. In: 2015 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC). **IEEE**, 2015. p. 28-33.

- MUÑOZ LOPEZ DE BUSTAMANTE, Fernando. **Plantas medicinales y aromáticas: estudio, cultivo y procesado**. Madri: Mundi-Prensa Libros, 1996.
- NICOLA, M. et al. SCADA Systems Architecture Based on OPC and Web Servers and Integration of Applications for Industrial Process Control. **International Journal of Control Science and Engineering**. v. 8, n. 1, p. 13-21, 2017. Disponível em: <https://fluidas.ro/hervex/proceedings2017/pp.222-232.pdf>.
- OLIVEIRA, C. E. L. **Determinação de grandezas termodinâmicas de compostos terpênicos presentes em óleos essenciais por cromatografia gasosa e proposição de modelo de contribuição de grupos para estimação de entalpias de vaporização**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia química) – UNICAMP, 2017. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_b956084ec92310bea9184beb8ceb0c4e.
- PARROTT, A.; WARSHAW, L. **Industry 4.0 and the digital twin**. Deloitte University Press. 1–17, 2017. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html>.
- PERINO, S.; CHEMAT, F. Green process intensification techniques for bio-refinery. **Current Opinion in Food Science**, v. 25, p. 8-13, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330249050_Green_process_intensification_techniques_for_bio-refinery.
- PÉRINO-ISSARTIER, S. et al. A comparison of essential oils obtained from lavandin via different extraction processes: Ultrasound, microwave, turbohydrodistillation, steam and hydrodistillation. **Journal of Chromatography A**, v. 1305, p. 41-47, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021967313010443?via%3Dihub>
- PREEDY, V. R. (ed.); STRATAKOS, A. C, KOIDIS, A. **Methods for Extracting Essential Oils**. In: PREEDY, V. R. (ed.), **Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety**. San Diego: Irish Academic Press. 2016. p. 31-38. (Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00004-3>.
- PREEDY, V. R. (Ed.). **Essential oils in food preservation, flavor and safety**. **Academic Press**, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rosa-Mourao/publication/288807775_Amazon_Rosewood_Aniba_rosaeodora_Ducke_Oils/links/5b192a92aca272021ceedc49/Amazon-Rosewood-Aniba-rosaeodora-Ducke-Oils.pdf
- QI, Q.; TAO, F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. **Ieee Access**, v. 6, p. 3585-3593, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8258937>
- QIAN, F.; ZHONG, W.; DU, W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry. **Engineering**, v. 3, n. 2, p. 154-

- 160, 2017.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991730293X>
- REŽEK JAMBRAK, Anet A. et al. Internet of Nonthermal Food Processing Technologies (IoNTP): Food Industry 4.0 and Sustainability. **Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 686, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/686>
- RIBEIRO, S. M.; BONILLA, O. H.; LUCENA, E. M. Pereira. Influência da sazonalidade e do ciclo circadiano no rendimento e composição química dos óleos essenciais de Croton spp. da Caatinga. **Iheringia**, Série Botânica., v. 73, n. 1, p. 31-38, 2018. Disponível em: <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/371>.
- RICHA, R.ishi et al. Ultrasound assisted essential oil extraction technology: New boon in food industry. **SKUAST Journal of Research**, v. 22, n. 2, p. 78-85, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351598752_Ultrasound_assisted_essential_oil_extraction_technology_New_boon_in_food_industry
- ROCHA, R. P. **Avaliação do teor e da composição do óleo essencial de Cymbopogon citratus e Thymys vulgaris submetidos a processos de secagem e armazenamento.** 2011. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, 2011, 167 p. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/695/1/texto%20completo.pdf>.
- ROJAS, C. M. et al. Regulation of primary plant metabolism during plant-pathogen interactions and its contribution to plant defense. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 17, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3919437/>.
- ROMDHANE, M.; TIZAOUI, C. The kinetic modelling of a steam distillation unit for the extraction of aniseed (*Pimpinella anisum*) essential oil. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 80, n. 7, p. 759-766, 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jctb.1221>.
- SANTOS, F. R. **Estudo comparativo dos óleos essenciais de espécies da família Myrtaceae através do perfil cromatográfico, análise multivariada e atividades biológicas.** 2016. Tese (doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?id%5Ftrabalho=3701041&popup=true>.
- SARTOR, R. B. et al. Dynamic simulation of rosemary essential oil extraction in an industrial steam distillation unit. **American Chemical Society**. v. 50, n. 7, p. 3955-3959, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie1015848>.
- SARTOR, R. B. **Modelagem, simulação e otimização de uma unidade industrial de extração de óleos essenciais por arraste a vapor.** 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/21924/000737903.pdf?...>

- SCHÜTZE, A.; HELWIG, N.; SCHNEIDER, T. Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0. **Journal of Sensors and Sensor systems**, v. 7, n. 1, p. 359-371, 2018. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3d6b/b4b64f0ee55da555645cfdcaf878a25c99ec.pdf>
- SHAGHALEH, H. et al. Investigation on the utilization possibility of orange (*Citrus sinensis* var. Valencia) oil extracted by microwave pretreatment-improved steam distillation as natural flavoring agent based on its characteristics analysis. **Journal of Essential Oil Bearing Plants**, v. 21, n. 2, p. 298-316, 2018.
- SHARIFF, H. M. D. et al. **Comparative Study of PID Controllers for Time-Varying of Steam Distillation Process**. In: 2021 IEEE International Conference on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS). IEEE, 2021. p. 334-339.
- SHARMEEN, J. B. et al. Essential oils as natural sources of fragrance compounds for cosmetics and cosmeceuticals. **Molecules**, v. 26, n. 3, p. 666, 2021.
- SILVA, S. G. et. al. Aspectos botânicos dos óleos essenciais. In: DALLAMUTA, J. (ORG.). **Estudos transdisciplinares nas Engenharias**. v. 03, Ponta Grossa: Antena Editora, 2019. P.170-181. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/23031>
- SILVEIRA, J. C. et al. Levantamento e análise de métodos de extração de óleos essenciais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, 2012. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3767>.
- SOUZA, M. P. et al. **Constituintes químicos ativos de plantas medicinais brasileiras**. Fortaleza: Edições UFC, 1991, 416 p.
- STASHENKO, E. El desarrollo y perspectivas de la industria de aceites esenciales en Colombia. **Memorias Institucionales**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2018. Disponível em: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/memoriasuis/article/view/10068>.
- TAJJUDIN, M. et al. Adaptive Steam Temperature Regulation for Essential Oil Extraction Process. **International Journal of Control Science and Engineering**, v. 2, n. 5, p. 111-119, 2012. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.control.20120205.03.html>.
- TAVARES, C. S. et al. Hydrolates: A review on their volatiles composition, biological properties and potential uses. **Phytochemistry Reviews**, p. 1-77, 2022.
- THANH, N. D. B.; DUC, T. H.; DUNG, N. T. **Kinetics and Modeling of oil extraction from vietnam lemongrass by steam distillation**. Vietnam Journal of Science and Technology, v. 55, n. 5A, p. 58-65, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324777751_KINETICS_AND_MODELING_OF_OIL_EXTRACTION_FROM_VIETNAM_LEMONGRASS_BY_STEAM_DISTILLATION.

- UHLENBROCK, L. et al. Natural Products Extraction of the Future: sustainable Manufacturing Solutions for Societal Needs. **Processes**, v. 6, n. 10, p. 177, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/6/10/177>.
- VALDERRAMA, F.; RUIZ, F. An optimal control approach to steam distillation of essential oils from aromatic plants. **Computers & Chemical Engineering**, v. 117, p. 25-31, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135418301352?via%3Dihub>.
- VENÂNCIO, A. M. **Toxicidade aguda e atividade antinociceptiva do óleo essencial do Ocimum basilicum L.** (MANJERICÃO), EM Mus musculus (CAMUNDONGOS). 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) - Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2006. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFS-2_23acda80c1c05ace911bc25aa7beff82.
- WAHYUDI, D. et al. **Smart sensor based distillation for fractionating citronella oil: current research challenges**. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Anais [...] IOP Publishing, 2020. p. 012012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342394535>.
- WENG, D. C. J. et al. Optimal extraction and evaluation on the oil content of citronella oil extracted from Cymbopogon nardus. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v. 19, n. 1, p. 71-76, 2015. Disponível em: http://www.ukm.my/mjas/v19_n1/pdf/Chong_19_1_9.pdf.
- XAVIER, V. Barbieri B.. et al. Mathematical modeling for extraction of essential oil from Baccharis spp. by steam distillation. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 3, p. 599-604, 2011. Disponível em: DOI:[10.1016/j.indcrop.2010.12.019](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.019)
- XIA, K. et al. A digital twin to train deep reinforcement learning agent for smart manufacturing plants: Environment, interfaces and intelligence. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 58, p. 210-230, 2020. Disponível em: <https://en.x-mol.com/paper/article/1281717832529920000>.
- YUSOFF, Z. M. et al. Real time PID control for hydro-diffusion steam distillation essential oil extraction system using Gradient Descent tuning method. In: IEEE Control and System Graduate Research Colloquium. **Anais [...]** IEEE, 2012. p. 288-293. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/261025259>
- ZAMAN, F. Q.; JAFFEL, K.; ABDELMAGEED, A. H. A. The Effects of Post-Harvest Drying Period on the Yield and Chemical Composition of leaf Essential Oil from Cymbopogon citratus (DC.) Stapf. **Journal of Essential Oil Bearing Plants**, p. 1-10, 2022.
- ZHELJAZKOV, V. D. et al. Distillation time effect on lavender essential oil yield and composition. **Journal of Oleo Science**, v. 62, n. 4, p. 195-199, 2013.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS

Dados detalhados dos experimentos

A seguir são mostrados os resultados detalhados de todos os dezenove experimentos realizados.

Extração 1; Modo manual

Data: 3 de agosto de 2021.

Rendimento final = 3,48 mL/kg

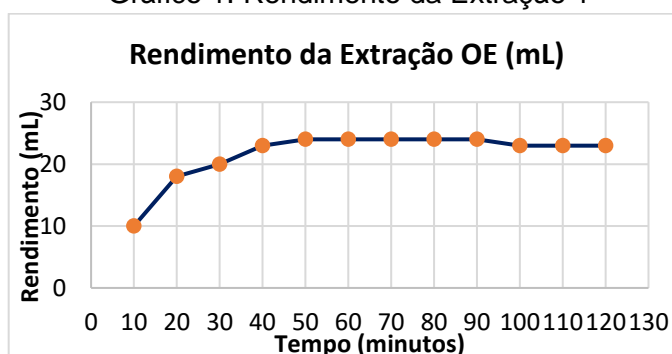
Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante. Foi utilizada água da rede da fazenda, sendo descartada após passagem pelo condensador, com dispêndio estimado de 800 litros durante o período da extração. A Tabela 1 traz os dados de volume de OE e HS (mL) que foram lançados no Gráfico 1.

Tabela 1. Dados da Extração 1

Massa de Capim-limão (Kg)	6,60		
Caracterização	Erva fresca, recém-colhida		
Condições do tempo	Dia chuvoso, temperatura ambiente inicial 17 C		
Horário de acionamento do aquecimento	11:00		
Procedimento padrão da empresa Akã	2 horas de processo a partir da primeira gota de condensado		
Hora	Tempo de Extração	Volume de OE (ml)	Volume de HS (ml)
11:27		1.a gota condensado	
11:37	10	10	650
11:47	20	18	1300
11:57	30	20	2100
12:07	40	23	2900
12:17	50	24	3700
12:27	60	24	5400
12:37	70	24	6800
12:47	80	24	7400
12:57	90	24	8300
13:07	100	23	9100
13:17	110	23	10000
13:27	120	23	10800

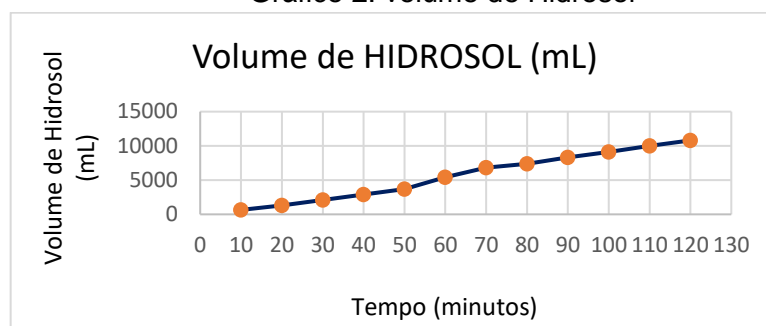
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 1. Rendimento da Extração 1



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 2. volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 2; Modo manual

Data: 5 de agosto de 2021.

Rendimento final = 3,18 mL/kg

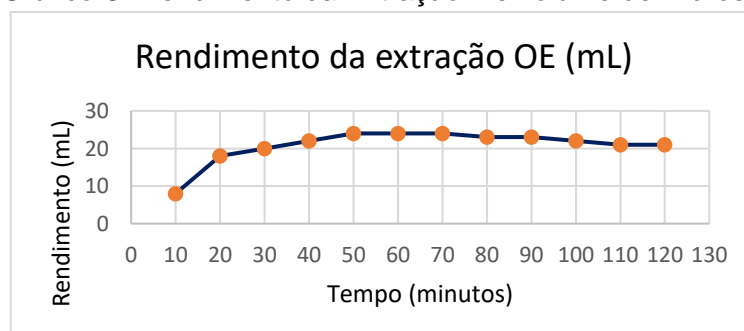
A tabela 3 traz os dados de volume de OE e HS (mL) que foram lançados no Gráfico. Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante. Foi utilizada água da rede da fazenda, sendo descartada após passagem pelo condensador, com dispêndio estimado de 800 litros durante o período da extração.

Tabela 3. Dados da Extração 2.

Massa de Capim-limão (Kg)	6,60		
Caracterização	Erva seca, 48 horas.		
Condições do tempo	Dia seco, temperatura ambiente inicial 18 C		
Horário de acionamento do aquecimento	08:55		
Procedimento padrão da empresa Akã	2 horas de processo a partir da primeira gota de condensado		
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
09:22		1.a gota condensado	
09:32	10	8	400
09:42	20	18	1400
09:52	30	20	2100
10:02	40	22	3100
10:12	50	24	4000
10:22	60	24	4700
10:32	70	24	5400
10:42	80	23	6300
10:52	90	23	7000
11:02	100	22	7800
11:12	110	21	8500
11:22	120	21	9300

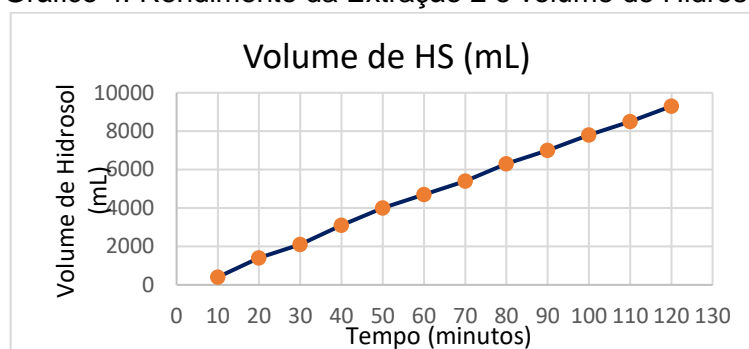
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 3. Rendimento da Extração 2 e volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 4. Rendimento da Extração 2 e volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 3; Modo manual

Data: 5 de agosto de 2021, tarde.

Rendimento final = 3,94 mL/kg

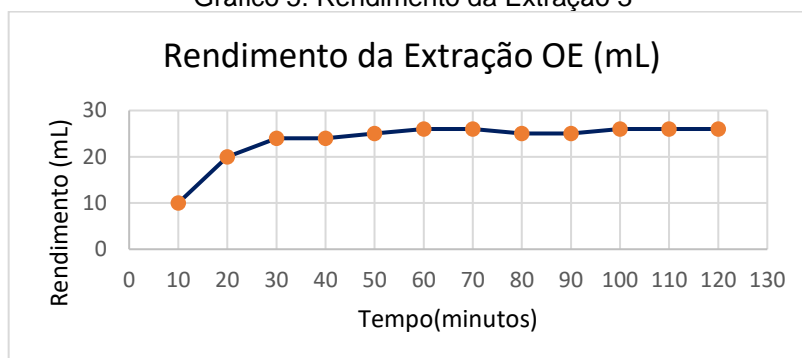
Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante. Foi utilizada água da rede da fazenda, sendo descartada após passagem pelo condensador, com dispêndio estimado de 800 litros durante o período da extração. A tabela 4 traz os dados de volume de OE e HS (mL) que foram lançados no Gráfico

Tabela 4. Dados da Extração 3

Massa de Capim-limão (Kg)	6,60		
Caracterização	Erva seca, 48 horas, picada aleatoriamente (15 - 20 cm)		
Condições do tempo	Dia seco, temperatura ambiente inicial 18 C		
Horário de acionamento do aquecimento	12:50		
Procedimento padrão da empresa Akã	2 horas de processo a partir da primeira gota de condensado		
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
13:10		1.a gota condensado	
13:20	10	10	400
13:30	20	20	1200
13:40	30	24	2000
13:50	40	24	2800
14:00	50	25	3600
14:10	60	26	4400
14:20	70	26	5200
14:30	80	25	5900
14:40	90	25	6800
14:50	100	26	7600
15:00	110	26	8200
15:10	120	26	9000

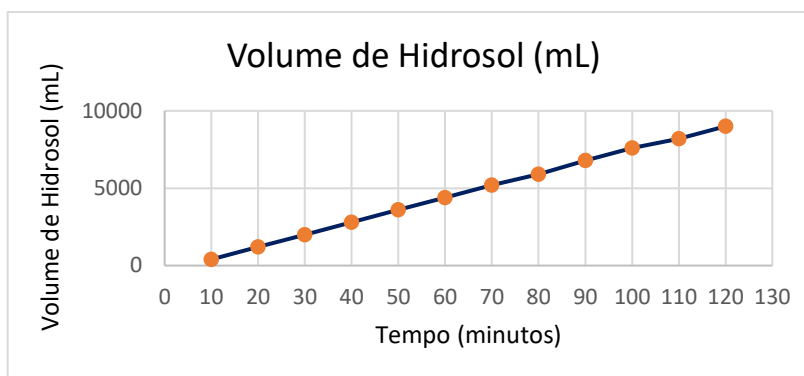
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 5. Rendimento da Extração 3



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 6. volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021)

Extração 4; Modo manual

Data: 12 de agosto de 2021.

Rendimento final = 3,96 mL/kg

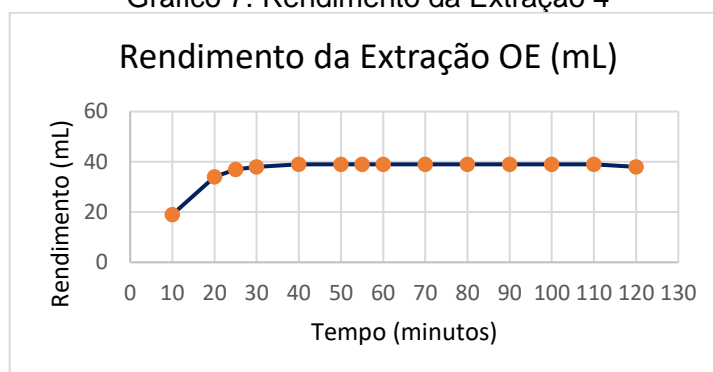
Tabela 5. Dados da Extração 3.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,60	
Caracterização		Erva seca, 48 horas, picada tamanho 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 18 C	
Horário de acionamento do aquecimento		10:13	
Procedimento padrão da empresa Akã		2 horas de processo a partir da primeira gota de condensado	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
10:34		1.a gota condensado	
10:44	10	19	400
10:54	20	34	1200
10:59	25	37	1700
11:04	30	38	2000
11:14	40	39	2800
11:24	50	39	3600
11:29	55	39	4000
11:34	60	39	4500
11:44	70	39	5300
11:54	80	39	6000
12:04	90	39	6900
12:14	100	39	7700
12:24	110	39	8500
12:34	120	38	9300

Fonte: autoria própria (2021).

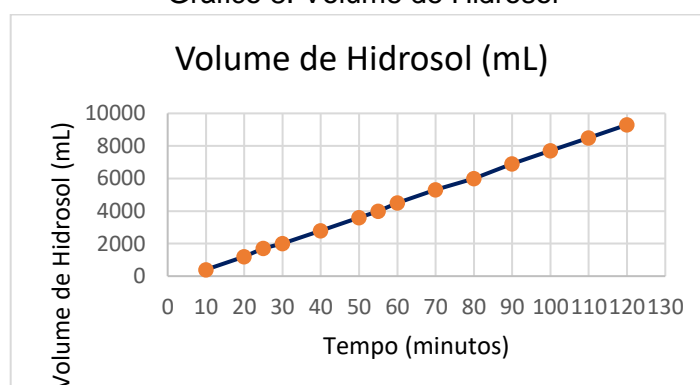
Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante. Foi utilizada água da rede da fazenda, sendo descartada após passagem pelo condensador, com dispêndio estimado de 800 litros durante o período da extração. A tabela 5 traz os dados de volume de OE e HS (mL) que foram lançados no gráfico 7.

Gráfico 7. Rendimento da Extração 4



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 8. Volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 5; Modo manual

Data: 26 de agosto de 2021.

Rendimento final = 3,78 mL/kg

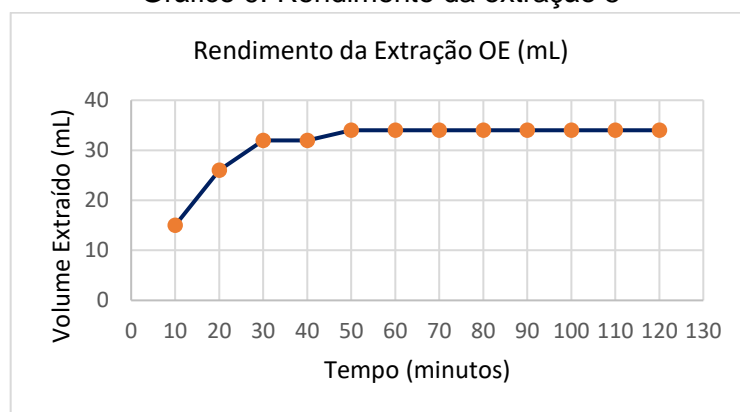
Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante. Foi utilizada água da rede da fazenda, sendo descartada após passagem pelo condensador, com dispêndio estimado de 800 litros durante o período da extração. A tabela 6 traz os dados de volume de OE e HS (mL) que foram lançados no gráfico 9 e 10

Tabela 6. Dados da Extração 5.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,00	
Caracterização		Erva, fresca, picada tamanho 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 18 C	
Horário de acionamento do aquecimento		10:40	
Procedimento padrão da empresa Akã		2 horas de processo a partir da primeira gota de condensado	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
11:10		1.a gota condensado	
11:20	10	15	400
11:30	20	26	1200
11:40	30	32	2000
11:50	40	32	2800
12:00	50	34	3500
12:10	60	34	4300
12:20	70	34	5100
12:30	80	34	5900
12:40	90	34	6600
12:50	100	34	7500
13:00	110	34	8300
13:10	120	34	9000

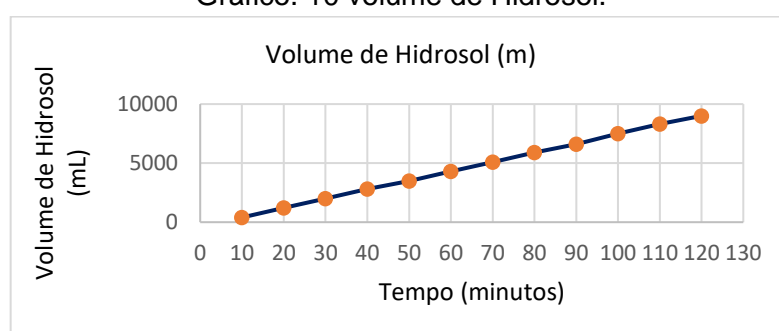
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 9. Rendimento da extração 5



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico. 10 volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 6; Modo manual

Data: 27 de agosto de 2021.

Rendimento final = 3,96 mL/kg

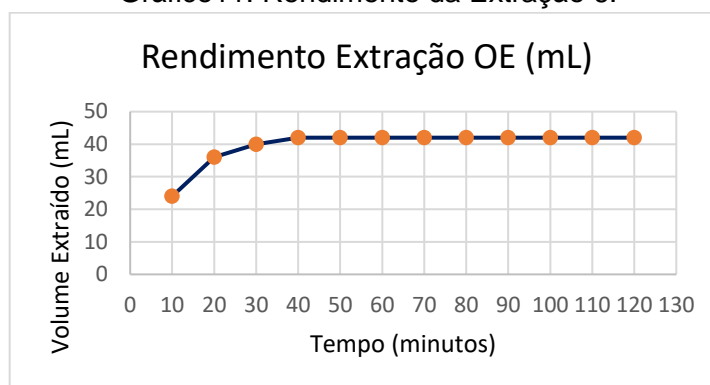
Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante. Foi utilizada água da rede da fazenda, sendo descartada após passagem pelo condensador, com dispêndio estimado de 800 litros durante o período da extração. A tabela 7 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 11 e 12 as observações durante a extração.

Tabela 7. Dados da Extração 6.

Massa de Capim-limão (Kg)	10,60		
Caracterização	Erva seca, seca 48 horas, picada tamanho 2 cm		
Condições do tempo	Dia seco, temperatura ambiente inicial 18 C		
Horário de acionamento do aquecimento	08:00		
Procedimento padrão da empresa Akã	2 horas de processo a partir da primeira gota de condensado		
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
08:21		1.a gota condensado	
08:31	10	24	400
08:41	20	36	1400
08:51	30	40	2100
09:01	40	42	2900
09:11	50	42	3800
09:21	60	42	4500
09:31	70	42	5300
09:41	80	42	6000
09:51	90	42	6800
10:01	100	42	7600
10:11	110	42	8300
10:21	120	42	9100

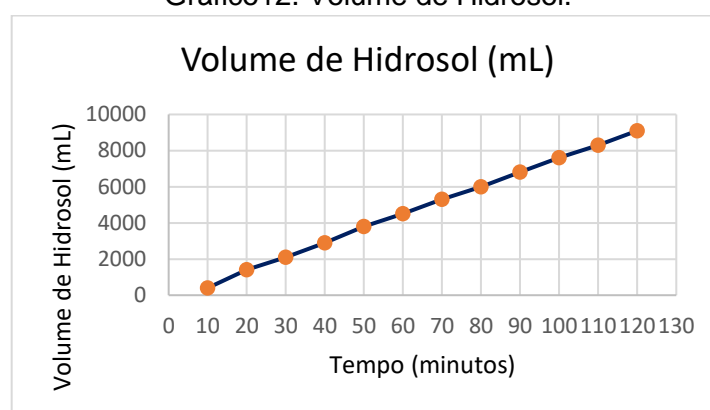
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico11. Rendimento da Extração 6.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico12. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 7; Modo manual; com unidade de refrigeração, sem temperatura controlada.

Data: 5 de setembro de 2021.

Rendimento final = 3,97 mL/kg

Realizada com o processo básico, no estado original em que os equipamentos foram recebidos do fabricante, com a utilização da unidade de água gelada (*chiller*) sem controle de temperatura, ou seja, em sua potência máxima.

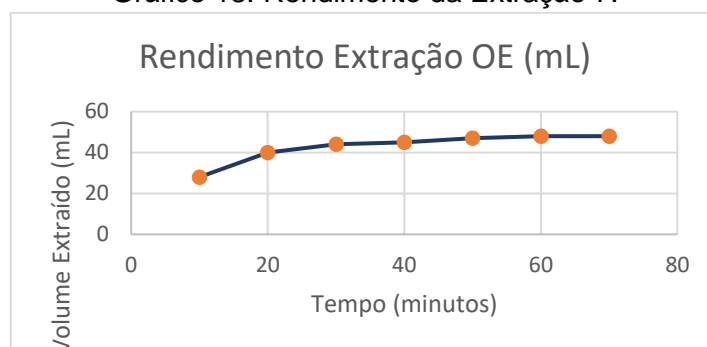
A tabela 8 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 13 e 14 as observações durante a extração.

Tabela 8. Dados da Extração 7.

Massa de Capim-limão (Kg)		12,10	
Caracterização		Erva seca, seca 72 horas, picada tamanho 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 18 C	
Horário de acionamento do aquecimento		08:10	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
08:34		1.a gota condensado	
08:44	10	28	600
08:54	20	40	1400
09:04	30	44	2100
09:14	40	45	2900
09:24	50	47	3800
09:34	60	48	4500
09:44	70	48	5300

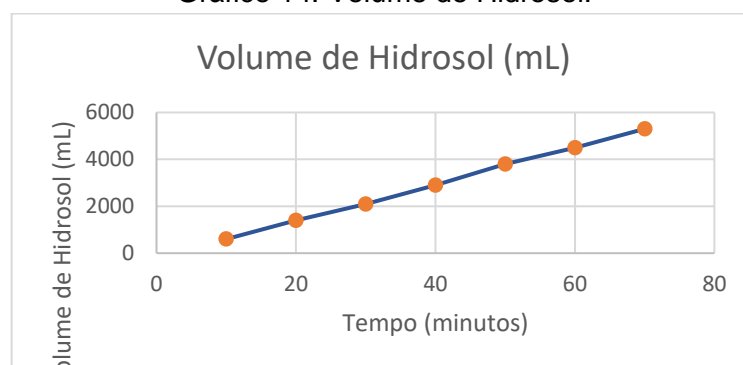
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 13. Rendimento da Extração 7.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 14. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 8; Modo manual; com unidade de refrigeração, sem temperatura controlada.

Data: 12 de setembro de 2021.

Rendimento final = 4,12 mL/kg

Realizada com a da tampa com geometria modificada do extrator D-10 e uso do “chiller” sem controle de temperatura. A tabela 9 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 15 e 16 as observações durante a extração.

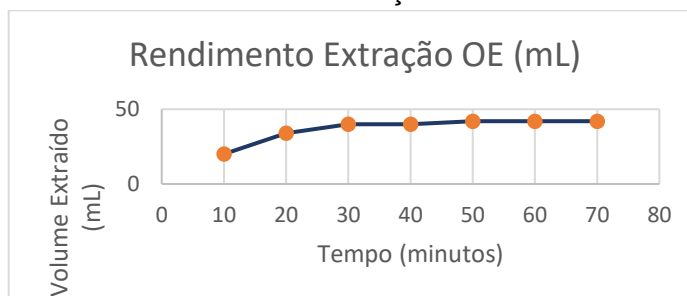
Tabela 9. Dados da Extração 8⁴

Massa de Capim-limão (Kg)		10,20	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada aleatoriamente 5 a 10 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 21 C	
Horário de acionamento do aquecimento		10:24	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
10:49		1.a gota condensado	
10:59	10	20	500
11:09	20	34	1200
11:19	30	40	1900
11:29	40	40	2700
11:39	50	42	3500
11:49	60	42	4200
11:59	70	42 (*)	4900

Fonte: autoria própria (2021).

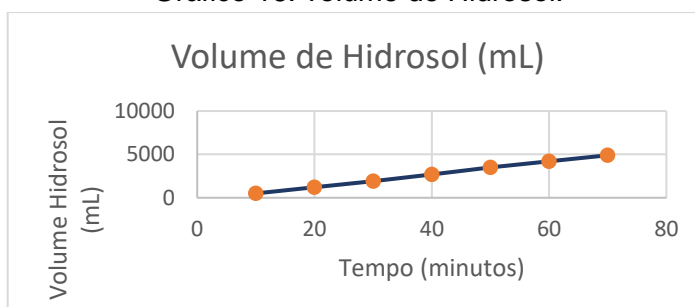
⁴ (*) decisão por dupla repetição: indicação duvidosa de volume.

Gráfico 15. Rendimento da Extração 8 e volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 16. volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 9; Modo manual; com unidade de refrigeração, sem temperatura controlada; fonte de aquecimento: chama a partir de GLP.

Data: 23 de setembro de 2021.

Rendimento final = 4,00 mL/kg

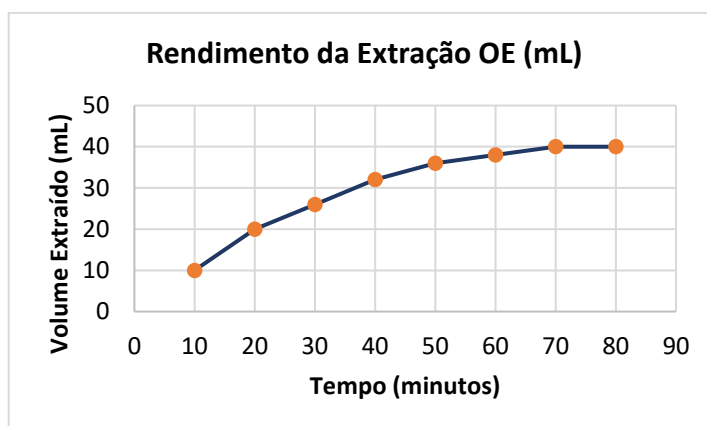
Realizada com aquecimento a gás, tampa nova do extrator D-10 e “chiller” sem controle de temperatura. A tabela 10 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 17 e 18 as observações durante a extração.

Tabela 10. Dados da Extração 9

Massa de Capim-limão (Kg)	10,00		
Caracterização	Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm		
Condições do tempo	Dia seco, temperatura ambiente inicial 27 C		
Aquecimento a gás	13:30		
Procedimento	Repetição do valor extraído.		
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
14:00		1.a gota condensado	
14:10	10	10	100
14:20	20	20	200
14:30	30	26	600
14:40	40	32	900
14:50	50	36	1200
15:00	60	38	1500
15:10	70	40	1800
15:20	80	40	2000

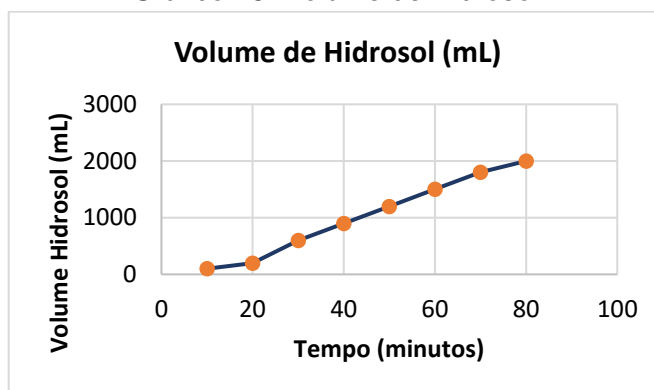
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 17. Rendimento da Extração 9.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 18. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 10; Modo automático sem controle de caminhos preferenciais; unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 3 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,19 mL/kg

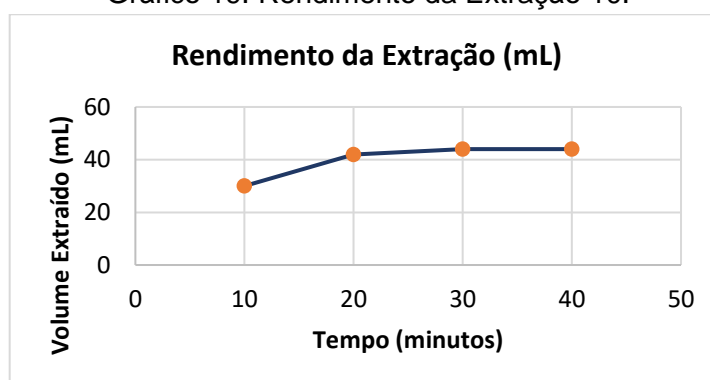
Realizada no modo automático, porém sem controle de “channeling”. A tabela 11 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os Gráficos as observações durante a extração.

Tabela 11. Dados da Extração 10.

Massa de Capim-limão (Kg)		10,50	
Caracterização		Erva seca, seca 72 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 28 C	
Resistência liada às		13:30	
Procedimento		Repetição do valor extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
13:45		1.a gota condensado	
13:55	10	30	500
14:05	20	42	1500
14:15	30	44	2300
14:25	40	44	3300

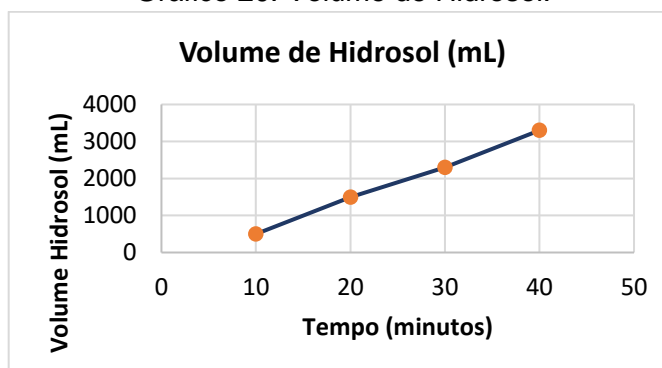
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 19. Rendimento da Extração 10.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 20. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 11; Modo automático sem controle de caminhos preferenciais; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada

Data: 4 de outubro de 2021.

Rendimento final = 3,94 mL/kg

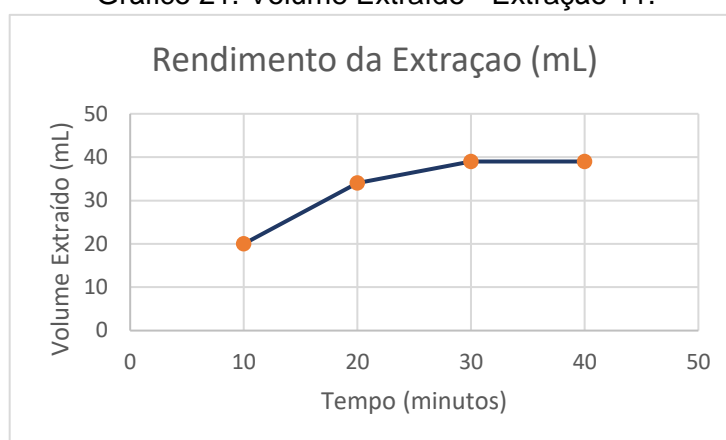
Realizada no modo automático, porém sem controle de “channeling”. Neste experimento foi possível, pela primeira vez durante a prática experimental, a detecção do *channeling* pelo sistema supervisorio (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*). A tabela 12 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os Gráficos 21 e 22 as observações durante a extração.

Tabela12. Dados da Extração 11.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,90	
Caracterização		Erva seca, seca 24 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 28 C	
Resistência liada às		18:10	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
18:40		1.a gota condensado	
18:50	10	20	500
19:00	20	34	1300
19:10	30	39	2200
19:20	40	39	3000

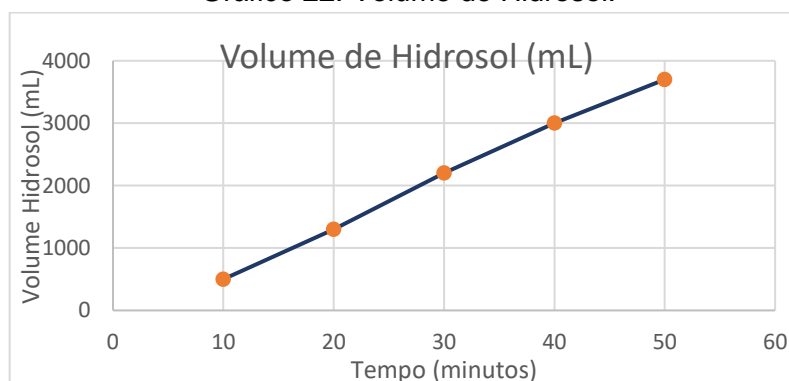
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 21. Volume Extraído - Extração 11.



Fonte: autoria própria (2021).

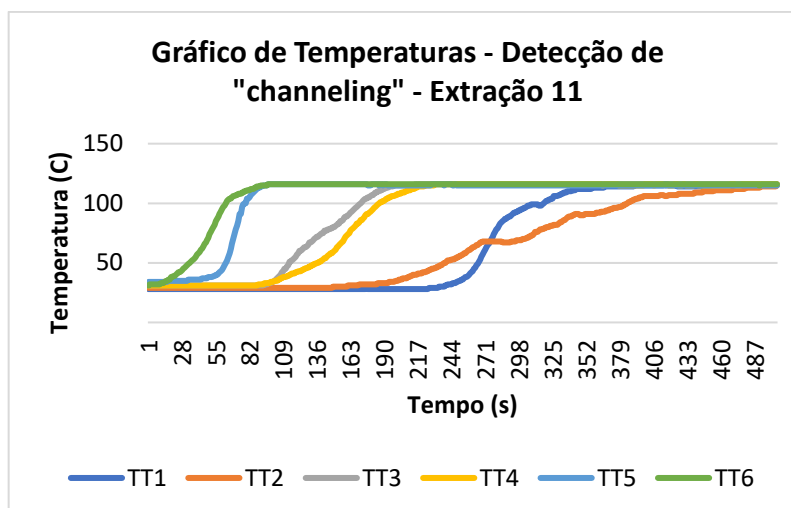
Gráfico 22. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Os caminhos preferenciais de vapor (*channeling*) foram evidenciados pelas diferenças de temperaturas em termopares instalados no mesmo nível do vaso extrator D-10 (vide gráfico 23), ou seja, em sensores que deveriam indicar a mesma temperatura. O gráfico 23 mostra a ocorrência do “*channeling*”.

Gráfico 23. Indicação do “*channeling*” pelas diferenças de temperatura – extração 11.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 12; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de reacomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 13 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,04 mL/kg

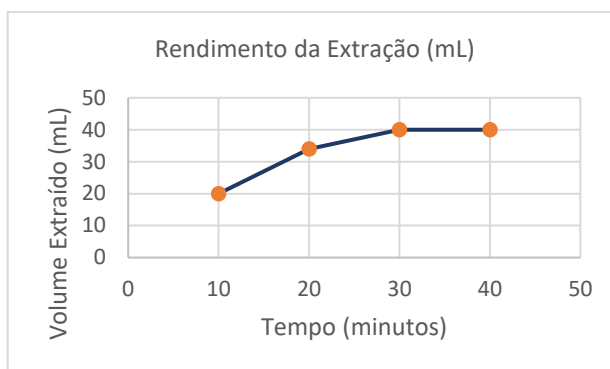
Realizada no modo automático, com controle de "channeling". Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisorio (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo). A tabela 13 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 24, 25 e 26 as observações durante a extração.

Tabela13. Dados da Extração 12.

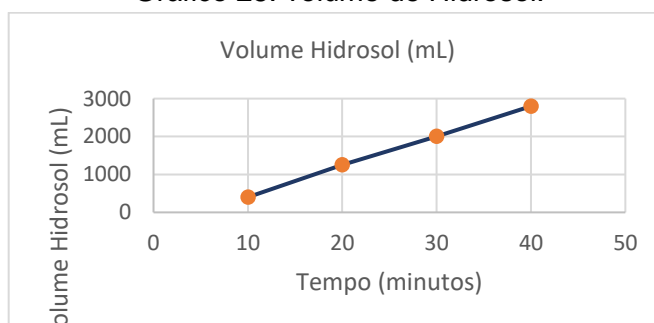
Massa de Capim-limão (Kg)	9,90		
Caracterização	Erva seca, seca 192 horas, picada 2 cm		
Condições do tempo	Dia úmido, chuva, temperatura ambiente inicial 24 C		
Resistência liada às	08:04		
Procedimento	Repetição do volume extraído		
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
08:23		1.a gota condensado	
08:33	10	20	400
08:43	20	34	1250
08:53	30	40	2000
09:03	40	40	2800

Fonte: autoria própria (2021).

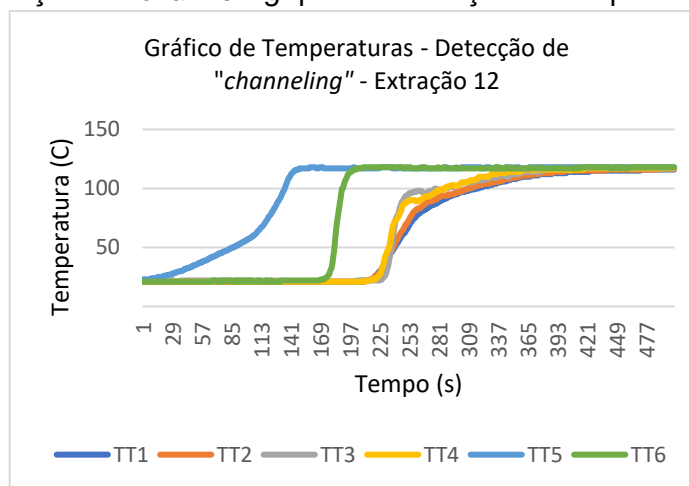
Gráfico 24. Rendimento da Extração 12 e volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).
Gráfico 25. volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).
Gráfico 26. Indicação do "channeling" pelas diferenças de temperatura – extração 12.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 13; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de reacomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 15 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,34 mL/kg

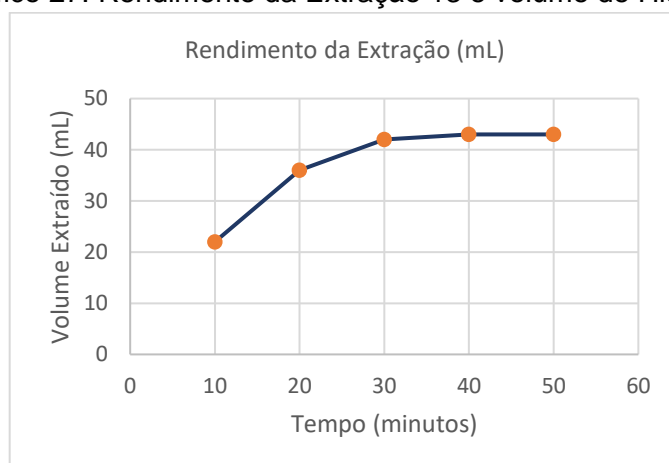
Realizada no modo automático, com controle de "channeling". Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisor (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo). A tabela 14 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os Gráficos 27, 28 e 29 as observações durante a extração.

Tabela14. Dados da Extração 13.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,90	
Caracterização		Erva seca, seca 192 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 24 C	
Resistência liada às		08:48	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
09:13		1.a gota condensado	
09:23	10	22	500
09:33	20	36	1250
09:43	30	42	2000
09:53	40	43	2600
10:03	50	43	3400

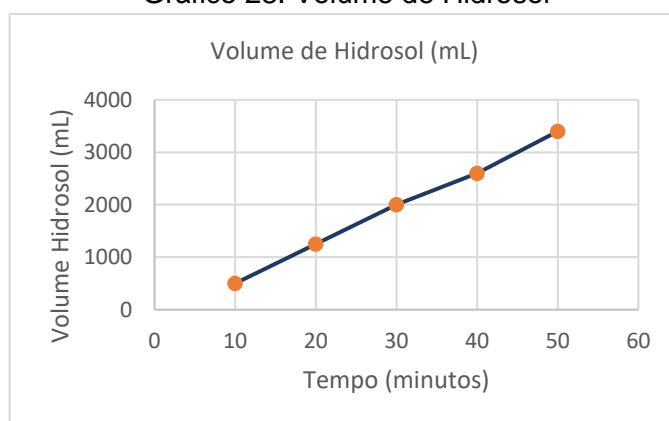
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 27. Rendimento da Extração 13 e volume de Hidrosol



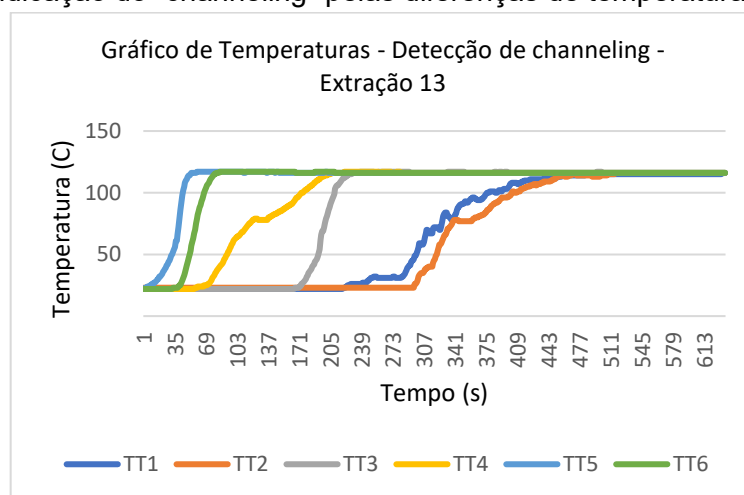
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 28. Volume de Hidrosol



Fonte: autoria própria (2021).

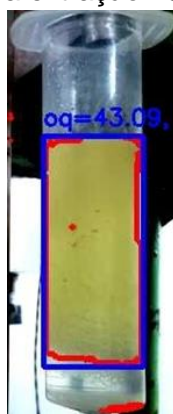
Gráfico 29. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 13.



Fonte: autoria própria (2021).

Nesta extração o sistema de processamento de imagem indicou o final da extração, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1. Determinação do final da extração 13 pelo processamento de imagem.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 14; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de acomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 15 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,29 mL/kg

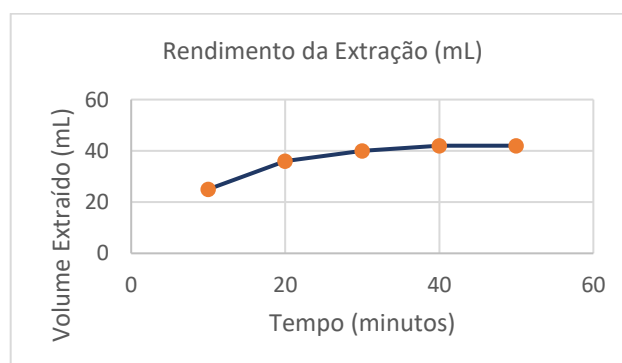
Realizada no modo automático, com controle de “channeling”. Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisor (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo). A tabela 15 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 30, 31 e 32 as observações durante a extração.

Tabela 15. Dados da Extração 14.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,80	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia SECO temperatura ambiente inicial 24 C	
Resistência liada às		13:38	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
14:01		1.a gota condensado	
14:11	10	25	500
14:21	20	36	1250
14:31	30	40	2000
14:41	40	42	2750
14:51	50	42	3500

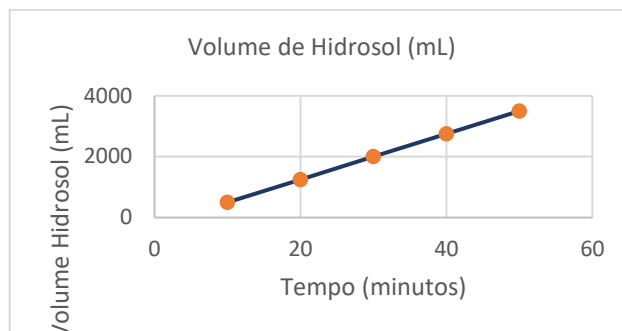
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 30. Rendimento da Extração 14.



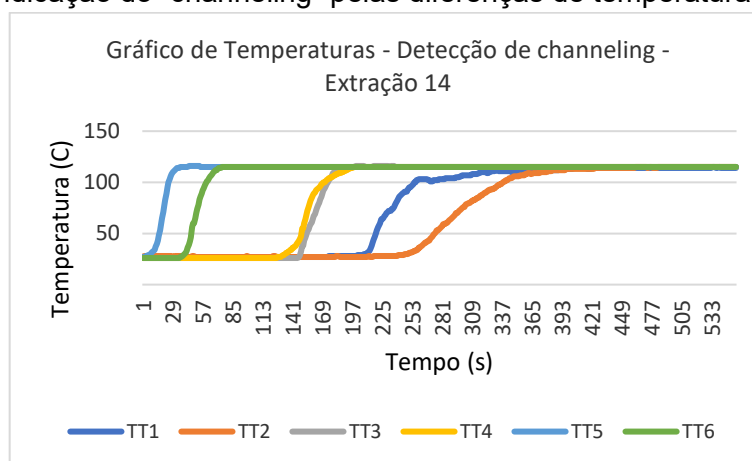
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 31. Volume de Hidrosol.



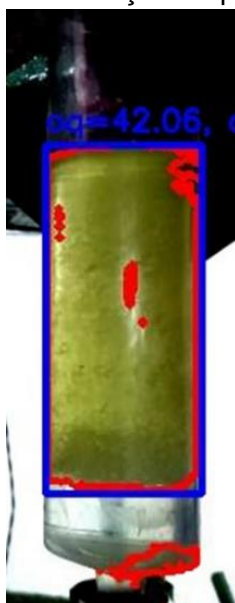
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 32. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 14.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 2. Determinação do final da extração 14 pelo processamento de imagem.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 15; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de reacomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 16 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,02 mL/kg

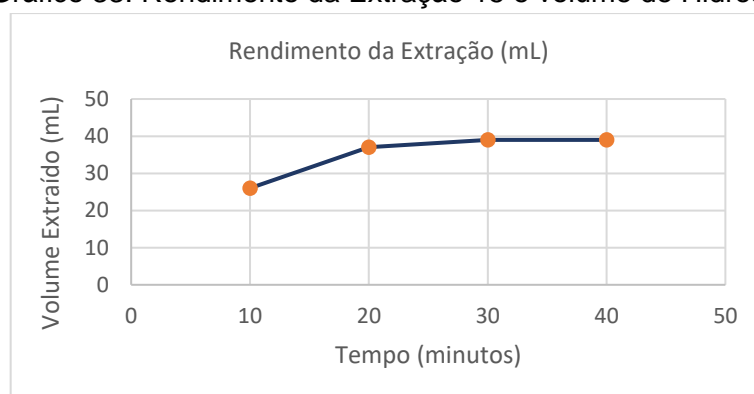
Realizada no modo automático, com controle de “*channeling*”. Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisorio (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo). A tabela 16 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 33, 34 e 35 as observações durante a extração.

Tabela16. Dados da Extração 15.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,70	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 24 C	
Resistência liada às		09:51	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
10:16		1.a gota condensado	
10:26	10	26	500
10:36	20	37	1250
10:46	30	39	2000
10:56	40	39	2800

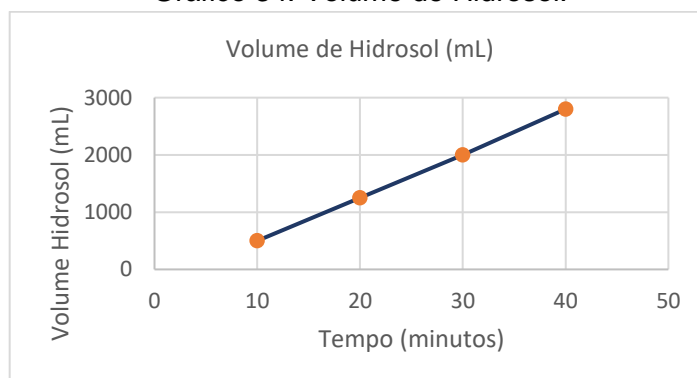
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 33. Rendimento da Extração 15 e volume de Hidrosol



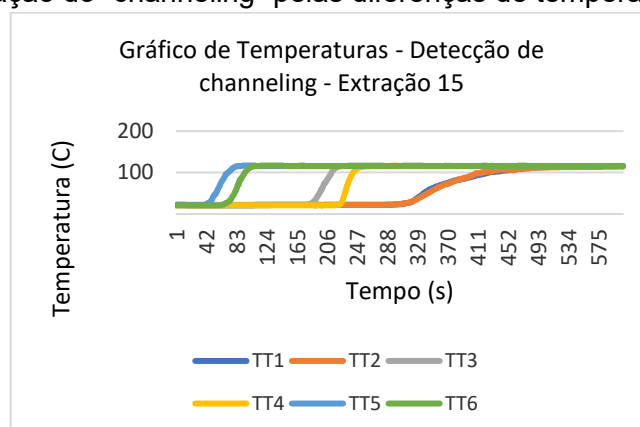
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 34. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 35. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 15.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 16; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de reacomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 17 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,16 mL/kg

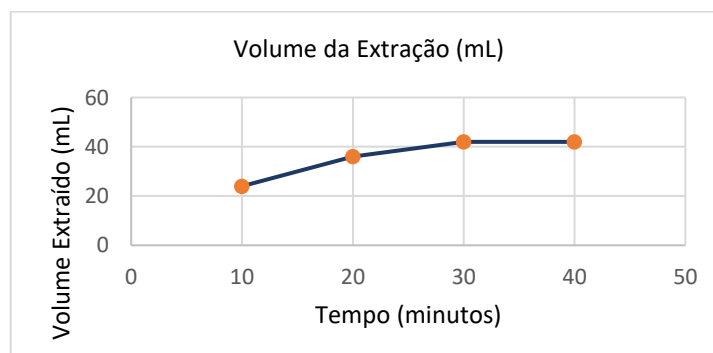
Realizada no modo automático, com controle de “channeling”. Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisorio (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo). A tabela 17 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e o gráfico 36, 37 e 38 as observações durante a extração.

Tabela 17. Dados da Extração 16.

Massa de Capim-limão (Kg)		10,10	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 22 C	
Resistência liada às		09:34	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
09:58		1.a gota condensado	
10:08	10	24	500
10:18	20	36	1250
10:28	30	42	2000
10:38	40	42	2700

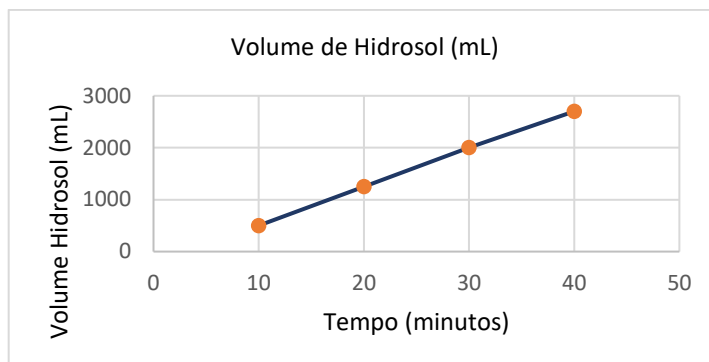
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 36. Rendimento da Extração 16.



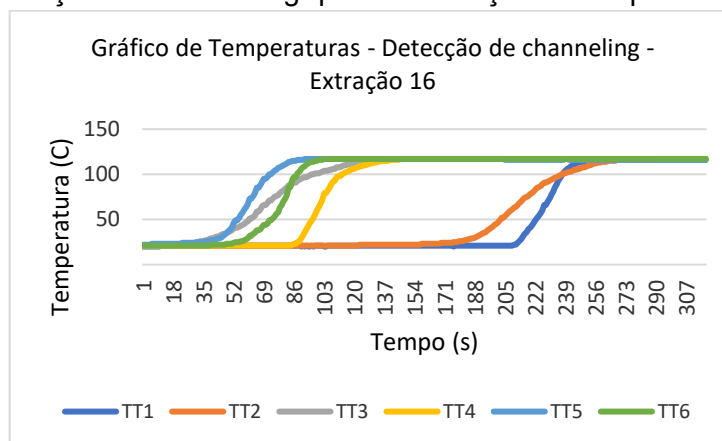
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 37. volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 38. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 16



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 3. Determinação do final da extração 16 pelo processamento de imagem



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 17; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de acomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 17 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,59 mL/kg

Realizada no modo automático, com controle de “channeling”. Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisor (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo).

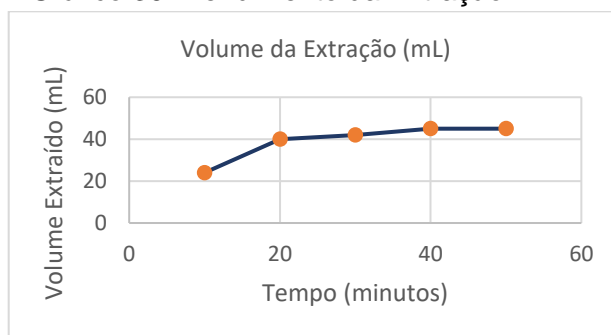
A tabela 18 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e o gráfico 39, 40 e 41 as observações durante a extração.

Tabela18. Dados da Extração 17.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,80	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 22 C	
Resistência liada às		12:53	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
13:16		1.a gota condensado	
13:26	10	24	500
13:36	20	40	1250
13:46	30	42	2000
13:56	40	45	2900
14:06	50	45	3500

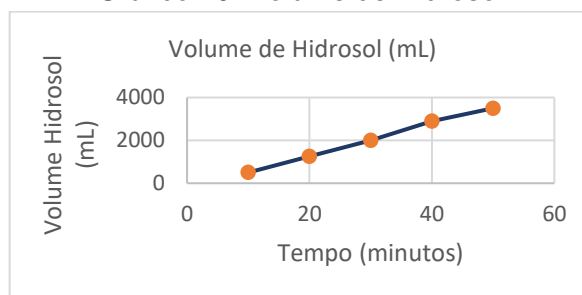
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 39. Rendimento da Extração 17.



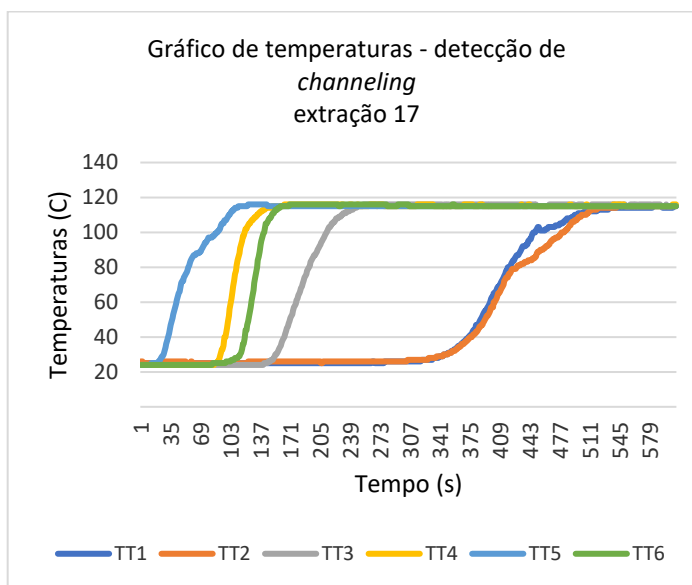
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 40. Volume de Hidrosol.



Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 41. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 17.



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 18; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de acomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 19 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,65 mL/kg

Realizada no modo automático, com controle de “channeling”. Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisor (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo).

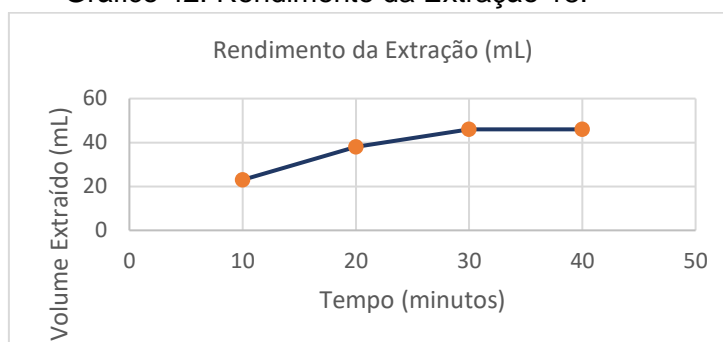
A tabela 19 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os Gráficos 42, 43 e 44 as observações durante a extração.

Tabela19. Dados da Extração 18.

Massa de Capim-limão (Kg)		9,90	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 25 C	
Resistência liada às		09:38	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
10:04		1.a gota condensado	
10:14	10	23	500
10:24	20	38	1100
10:34	30	46	1800
10:44	40	46	2500

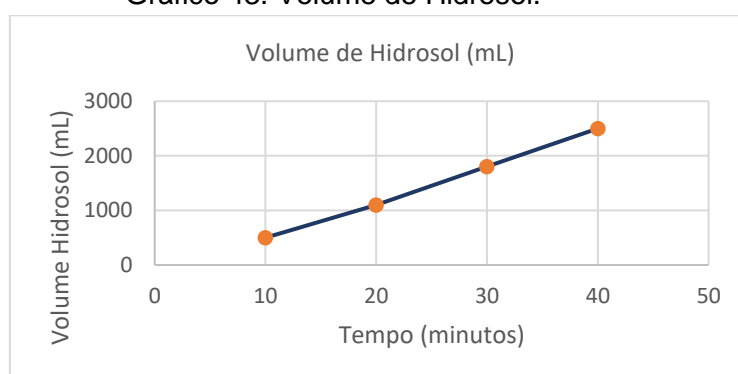
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 42. Rendimento da Extração 18.



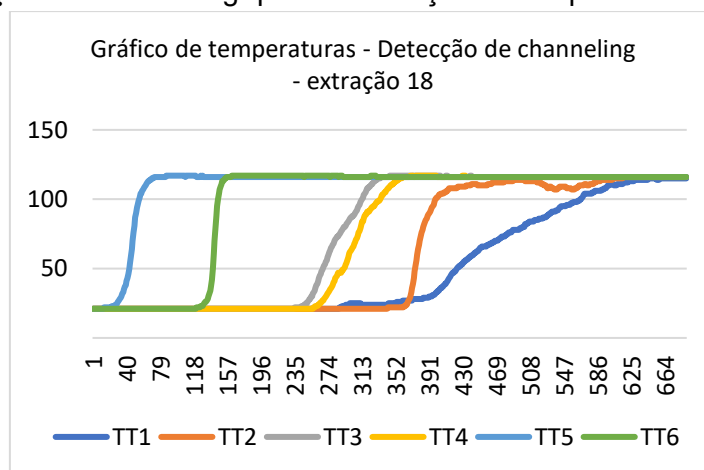
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 43. Volume de Hidrosol.



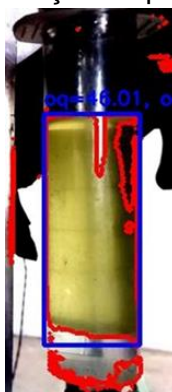
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 44. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 18.



Fonte: autoria própria (2021)

Figura 4. Determinação do final da extração 18 pelo processamento de imagem



Fonte: autoria própria (2021).

Extração 19; Modo automático com controle de caminhos preferenciais através de reacomodação com motor de passo; com unidade de refrigeração, com temperatura controlada.

Data: 20 de outubro de 2021.

Rendimento final = 4,56 mL/kg

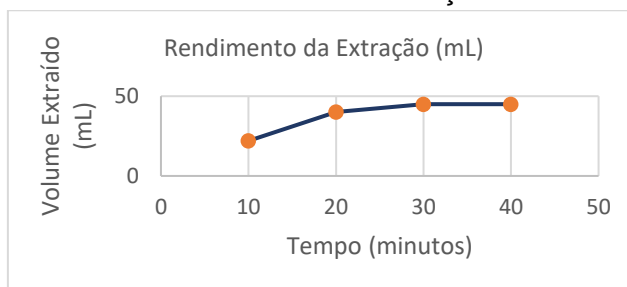
Realizada no modo automático, com controle de “channeling”. Neste experimento foi possível a detecção do *channeling* pelo sistema supervisorio (SCADA – *Supervisory, control and data acquisition*) com acionamento do atuador (motor de passo). A tabela 20 traz os dados de volume de OE e HS (mL) e os gráficos 45, 46 e 47 as observações durante a extração.

Tabela 20. Dados da Extração 19.

Massa de Capim-limão (Kg)		10,00	
Caracterização		Erva seca, seca 48 horas, picada 2 cm	
Condições do tempo		Dia seco, temperatura ambiente inicial 25 C	
Resistência liada às		10:17	
Procedimento		Repetição do volume extraído	
Hora	Tempo de Extração	volume de OE (ml)	volume de HS (ml)
10:42		1.a gota condensado	
10:52	10	22	500
11:02	20	40	1100
11:12	30	45	1800
11:22	40	45,6	2500

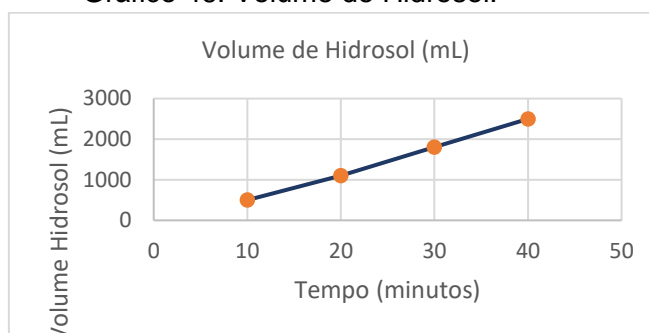
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 45. Rendimento da Extração 19.



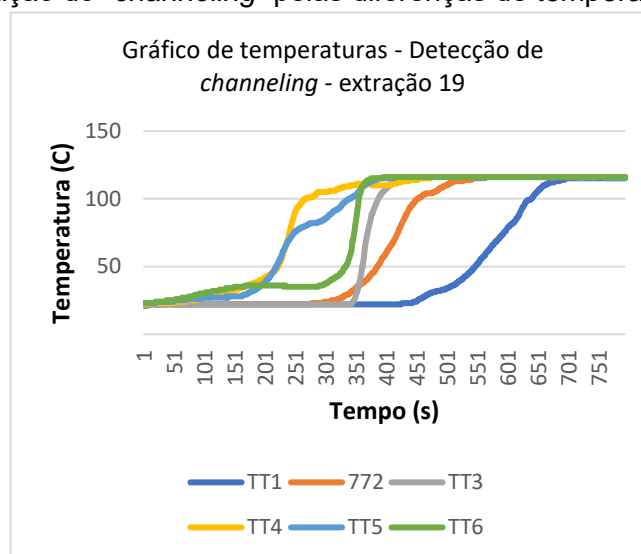
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 46. Volume de Hidrosol.



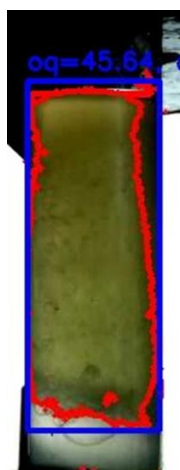
Fonte: autoria própria (2021).

Gráfico 47. Indicação do “channeling” pelas diferenças de temperatura – extração 19.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 5. Determinação do final da extração 19 pelo processamento de imagem.



Fonte: autoria própria (2021)

ANEXO A – CERTIFICADOS DE ANÁLISE QUÍMICA FEITA PELA UFMG

Figura 1: Certificado de análise química – amostra 1

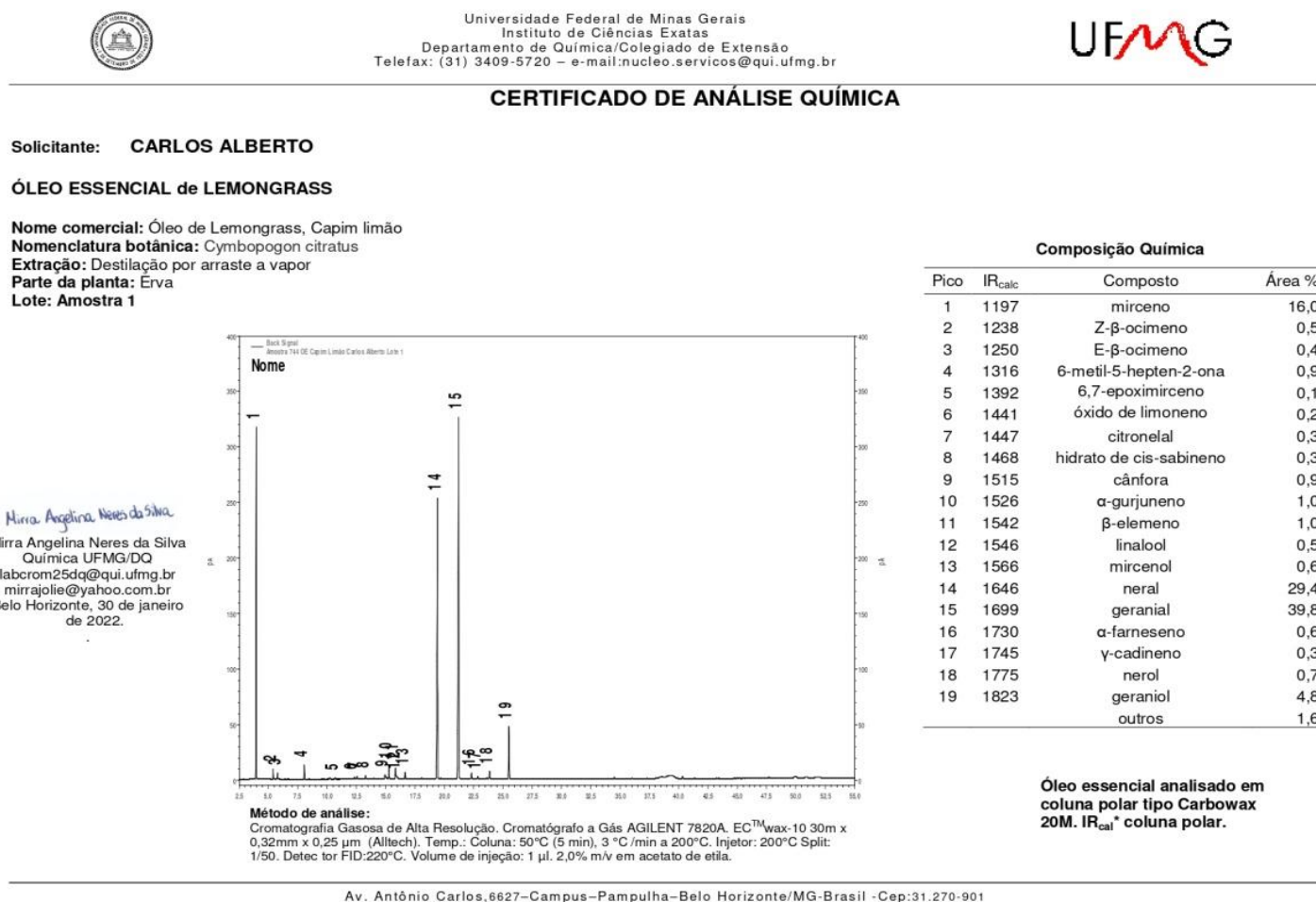


Figura 2: Certificado de análise química – amostra 2



Universidade Federal de Minas Gerais
 Instituto de Ciências Exatas
 Departamento de Química/Colegiado de Extensão
 Telefax: (31) 3409-5720 – e-mail:nucleo.servicos@qui.ufmg.br



CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

Solicitante: **CARLOS ALBERTO**

ÓLEO ESSENCIAL de LEMONGRASS

Nome comercial: Óleo de Lemongrass, Capim limão

Nomenclatura botânica: *Cymbopogon citratus*

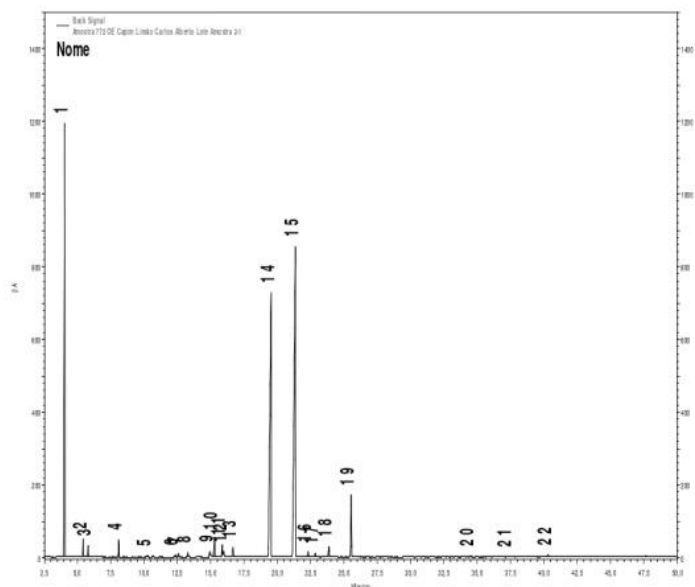
Extração: Destilação por arraste a vapor

Parte da planta: Erva

Lote: Amostra 2

Composição Química

Pico	IR _{calc}	Composto	Área %
1	1199	mirceno	18,4
2	1239	Z-β-ocimeno	0,6
3	1250	E-β-ocimeno	0,4
4	1317	6-metil-5-hepten-2-ona	0,7
5	1379	6,7-epoximirceno	0,1
6	1441	óxido de limoneno	0,2
7	1447	citronelal	0,2
8	1467	hidrato de cis-sabineno	0,3
9	1515	cânfora	0,7
10	1526	α-gurjuneno	1,0
11	1542	β-elemeno	0,8
12	1546	linalool	0,6
13	1566	mircenol	0,6
14	1649	neral	29,6
15	1702	geranial	39,4
16	1730	α-farneseno	0,3
17	1745	γ-cadineno	0,3
18	1775	nerol	0,8
19	1823	geraniol	3,9
20	2084	cubenol	0,1
21	2165	óxido de cariofileno	0,0
22	2252	α-cadinol	0,1
		outros	1,0



Método de análise:

Cromatografia Gasosa de Alta Resolução. Cromatógrafo a Gás AGILENT 7820A. ECTMwax-10 30m x 0,32mm x 0,25 μm (Alltech). Temp.: Coluna: 50°C (5 min), 3 °C /min a 200°C. Injetor: 200°C Split: 1/50. Detec tor FID:220°C. Volume de injeção: 1 μl. 2,0% m/v em acetato de etila.

Óleo essencial analisado em
 coluna polar tipo Carbowax
 20M. IR_{calc}* coluna polar.

Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus – Pampulha – Belo Horizonte/MG-Brasil - Cep:31.270-901

Fonte (UFMG, 2022)

Figura 3: Certificado de análise química – amostra 3



Universidade Federal de Minas Gerais
 Instituto de Ciências Exatas
 Departamento de Química/Colegiado de Extensão
 Telefax: (31) 3409-5720 – e-mail: nucleo.servicos@qui.ufmg.br



CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

Solicitante: **CARLOS ALBERTO**

ÓLEO ESSENCIAL de LEMONGRASS

Nome comercial: Óleo de Lemongrass, Capim limão

Nomenclatura botânica: *Cymbopogon citratus*

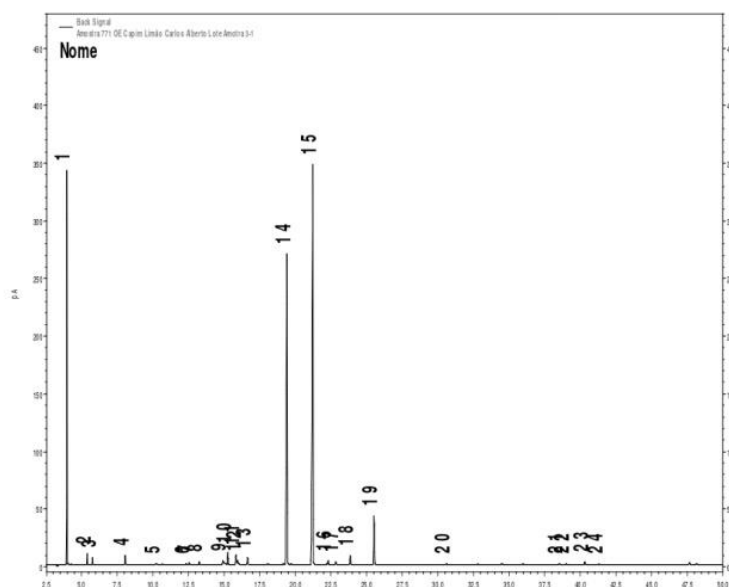
Extração: Destilação por arraste a vapor

Parte da planta: Erva

Lote: Amostra 3

Composição Química

Pico	IR _{calc}	Composto	Área %
1	1197	mirreno	15,8
2	1238	Z-β-ocimeno	0,5
3	1249	E-β-ocimeno	0,4
4	1316	6-metil-5-hepten-2-ona	0,5
5	1379	6,7-epoximirceno	0,1
6	1440	óxido de limoneno	0,1
7	1446	citronelal	0,2
8	1467	hidrato de cis-sabineno	0,3
9	1515	cânfora	0,8
10	1525	α-gurjuneno	0,9
11	1542	β-elemeno	0,8
12	1545	linalool	0,7
13	1565	mircenol	0,6
14	1645	neral	29,8
15	1698	geranial	41,1
16	1729	α-farneseno	0,4
17	1745	γ-cadineno	0,2
18	1774	nerol	0,8
19	1823	geraniol	4,0
20	1971	óxido de cariofileno	0,1
21	2201	τ-murolol	0,1
22	2215	α-bisabolol	0,1
23	2252	α-cadinol	0,3
24	2282	(E,Z)-farnesol	0,1
		outros	1,1



Método de análise:

Cromatografia Gasosa de Alta Resolução. Cromatógrafo a Gás AGILENT 7820A. ECTMwax-10 30m x 0,32mm x 0,25 μm (Alltech). Temp.: Coluna: 50°C (5 min), 3 °C/min a 200°C. Injetor: 200°C Split: 1/50. Detec tor FID:220°C. Volume de injeção: 1 μl. 2,0% m/v em acetato de etila.

Óleo essencial analisado em coluna polar tipo Carbowax 20M. IR_{calc}* coluna polar.

Mirra Angelina Neres da Silva
 Química UFMG/DQ
 labcrom25dq@qui.ufmg.br
 mirrajolie@yahoo.com.br
 Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2022.

Figura 4: Certificado de análise química – amostra 4



Universidade Federal de Minas Gerais
 Instituto de Ciências Exatas
 Departamento de Química/Colegiado de Extensão
 Telefax: (31) 3409-5720 – e-mail:nucleo.servicos@qui.ufmg.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

Solicitante: **CARLOS ALBERTO**

ÓLEO ESSENCIAL de LEMONGRASS

Nome comercial: Óleo de Lemongrass, Capim limão

Nomenclatura botânica: Cymbopogon citratus

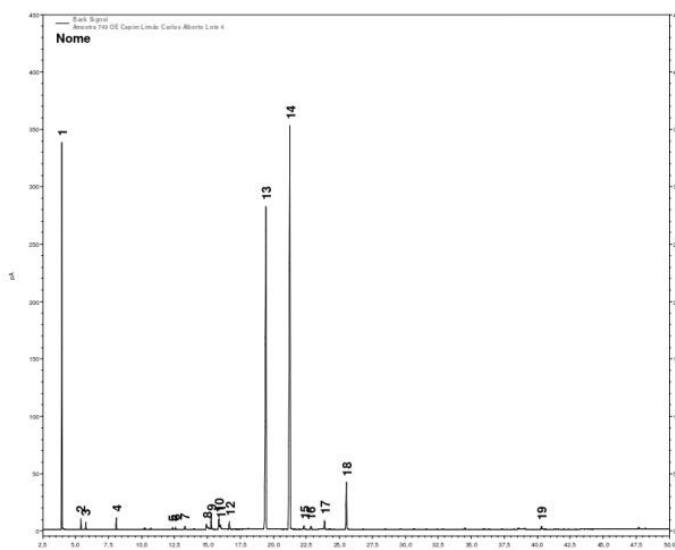
Extração: Destilação por arraste a vapor

Parte da planta: Erva

Lote: Amostra 4

Composição Química

Pico	IR _{calc}	Composto	Área %
1	1197	mirreno	15,6
2	1239	Z-β-ocimeno	0,5
3	1250	E-β-ocimeno	0,4
4	1317	6-metil-5-hepten-2-ona	0,7
5	1441	óxido de limoneno	0,1
6	1447	citronelal	0,2
7	1468	hidrato de cis-sabineno	0,3
8	1516	cânfora	0,9
9	1526	α-gurjuneno	1,0
10	1543	β-elemeno	0,9
11	1546	linalool	0,8
12	1566	mircenol	0,6
13	1646	neral	30,5
14	1699	geranial	40,8
15	1730	α-farneseno	0,4
16	1746	γ-cadineno	0,3
17	1776	nerol	0,9
18	1824	geraniol	3,9
19	2253	α-cadinol	0,3
		outros	1,0



Mirra Angelina Neres da Silva
 Mirra Angelina Neres da Silva
 Química UFMG/DQ
 labcrom25dq@qui.ufmg.br
 mirrajolie@yahoo.com.br
 Belo Horizonte, 31 de janeiro
 de 2022.

Método de análise:

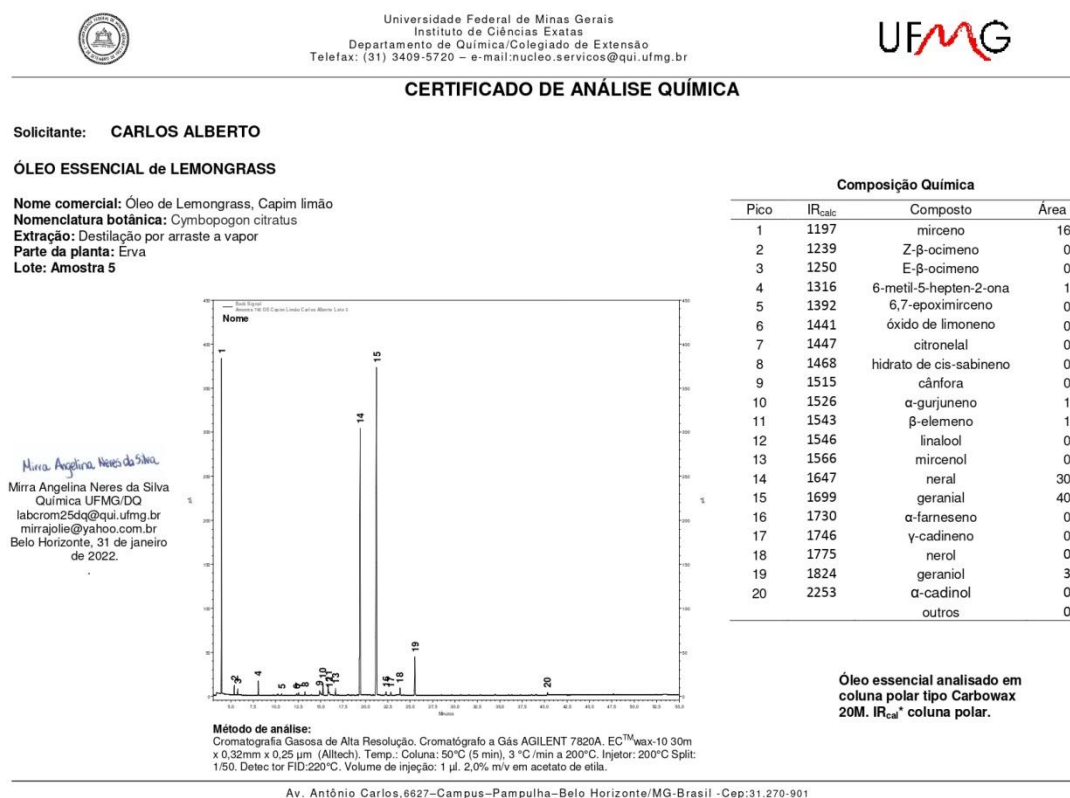
Cromatografia Gasosa de Alta Resolução. Cromatógrafo a Gás AGILENT 7820A, ECTMwax-10 30m x 0,32mm x 0,25 μm (Alltech). Temp.: Coluna: 50°C (5 min), 3 °C /min a 200°C. Injetor: 200°C Split: 1/50. Detec tor FID:220°C. Volume de injeção: 1 μl. 2,0% m/v em acetato de etila.

Óleo essencial analisado em
 coluna polar tipo Carbowax
 20M. IR_{calc}* coluna polar.

Av. Antônio Carlos, 6627–Campus–Pampulha–Belo Horizonte/MG-Brasil -Cep:31.270-901

Fonte (UFMG, 2022)

Figura 5: Certificado de análise química – amostra 5



Fonte (UFMG, 2022)

Figura 6: Certificado de análise química – amostra 6



Universidade Federal de Minas Gerais
 Instituto de Ciências Exatas
 Departamento de Química/Colegiado de Extensão
 Telefax: (31) 3409-5720 – e-mail: nucleo.servicos@qui.ufmg.br

UFMG

CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

Solicitante: **CARLOS ALBERTO**

ÓLEO ESSENCIAL de LEMONGRASS

Nome comercial: Óleo de Lemongrass, Capim limão

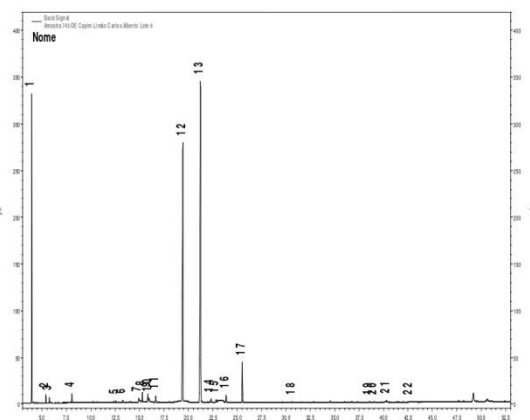
Nomenclatura botânica: Cymbopogon citratus

Extração: Destilação por arraste a vapor

Parte da planta: Erva

Lote: Amostra 6

Mirra Angelina Neres da Silva
 Mirra Angelina Neres da Silva
 Química UFMG/DQ
 labrom25dq@qui.ufmg.br
 mirrajolie@yahoo.com.br
 Belo Horizonte, 30 de janeiro
 de 2022.



Método de análise:
 Cromatografia Gasosa de Alta Resolução. Cromatógrafo a Gás AGILENT 7820A. EC™ Wax-10 30m x 0,32mm x 0,25 µm (Alltech). Temp.: Coluna: 50°C (5 min), 3 °C/min a 200°C. Injetor: 200°C Split: 1/50. Detec tor FID:220°C. Volume de injeção: 1 µl, 2,0% m/v em acetato de etila.

Composição Química

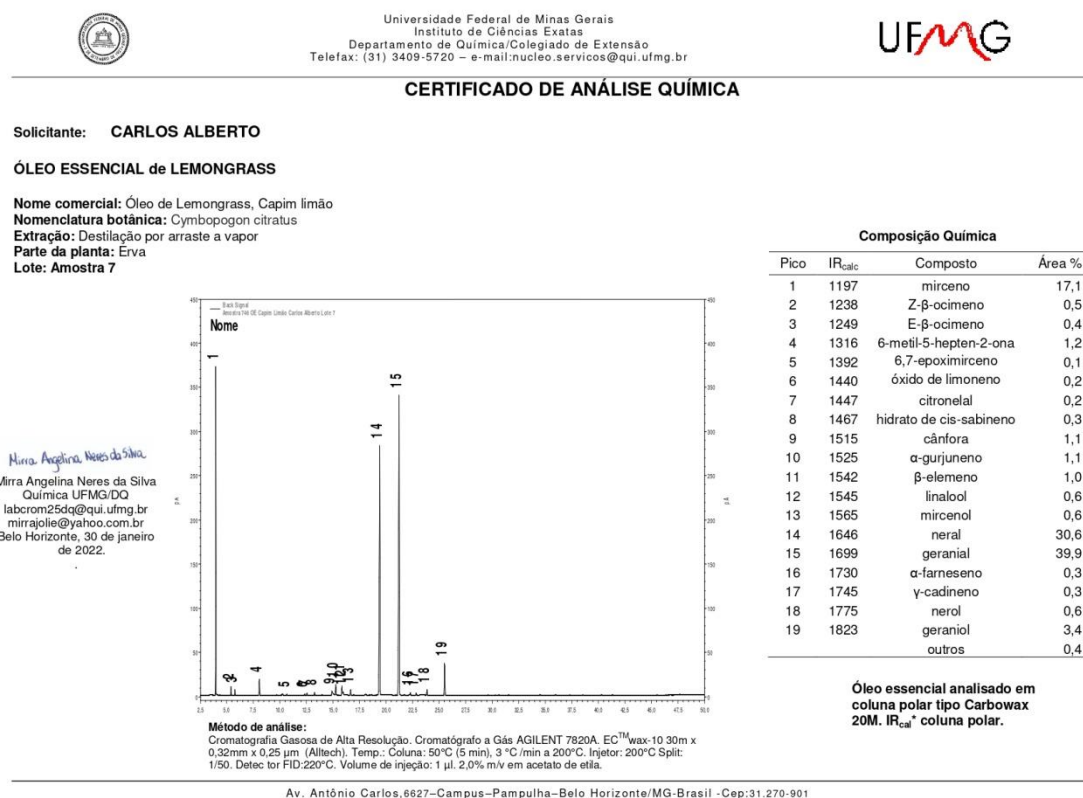
Pico	IR _{calc}	Composto	Área %
1	1197	mirreno	15,1
2	1238	Z-β-ocimeno	0,5
3	1249	E-β-ocimeno	0,3
4	1316	6-metil-5-hepten-2-ona	0,7
5	1447	citronelal	0,2
6	1467	hidrato de cis-sabineno	0,2
7	1515	cânfora	0,9
8	1525	α-gurjuneno	0,9
9	1542	β-elemeno	0,9
10	1545	linalool	0,8
11	1566	mircenol	0,6
12	1646	neral	29,7
13	1699	geranial	39,2
14	1730	α-farneseno	0,3
15	1745	γ-cadineno	0,2
16	1775	nerol	0,8
17	1823	geraniol	4,0
18	1972	óxido de cariofileno	0,1
19	2202	τ-murolol	0,1
20	2215	α-bisabolol	0,2
21	2253	α-cadinol	0,3
22	2321	farnesol	0,3
		outros	3,8

Óleo essencial analisado em
 coluna polar tipo Carbowax
 20M. IR_{calc} coluna polar.

Av. Antônio Carlos, 6627–Campus–Pampulha–Belo Horizonte/MG-Brasil -Cep:31.270-901

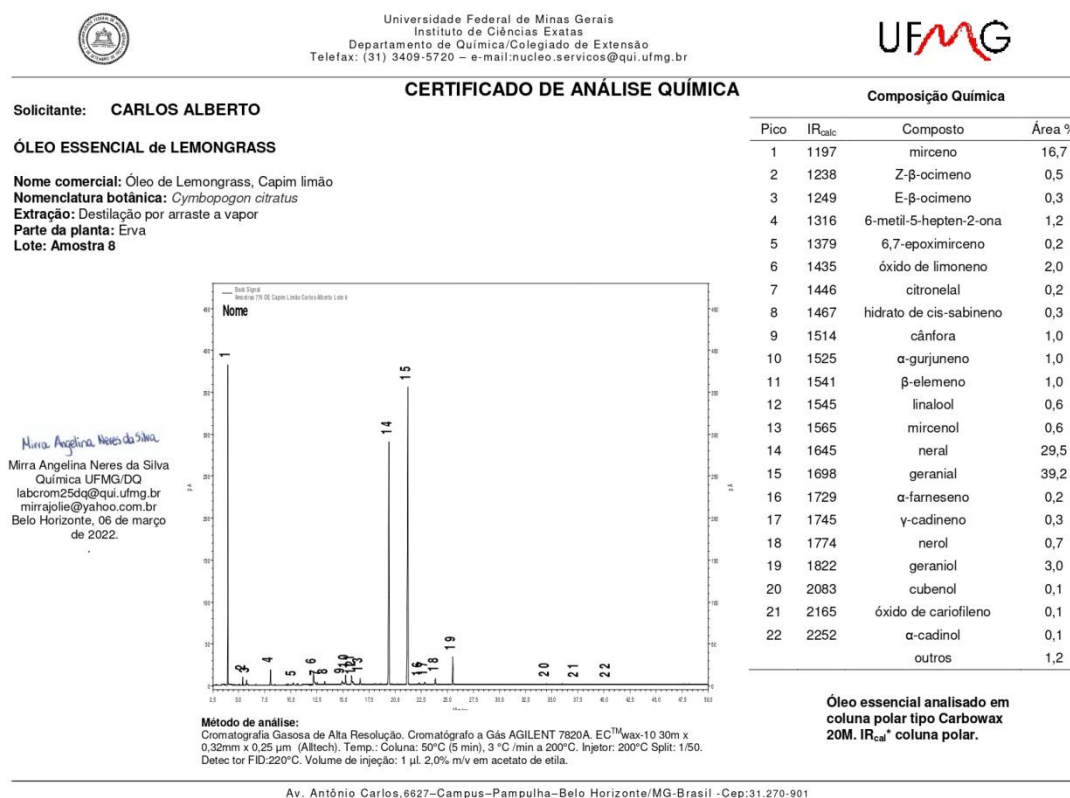
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 7: Certificado de análise química – amostra 7



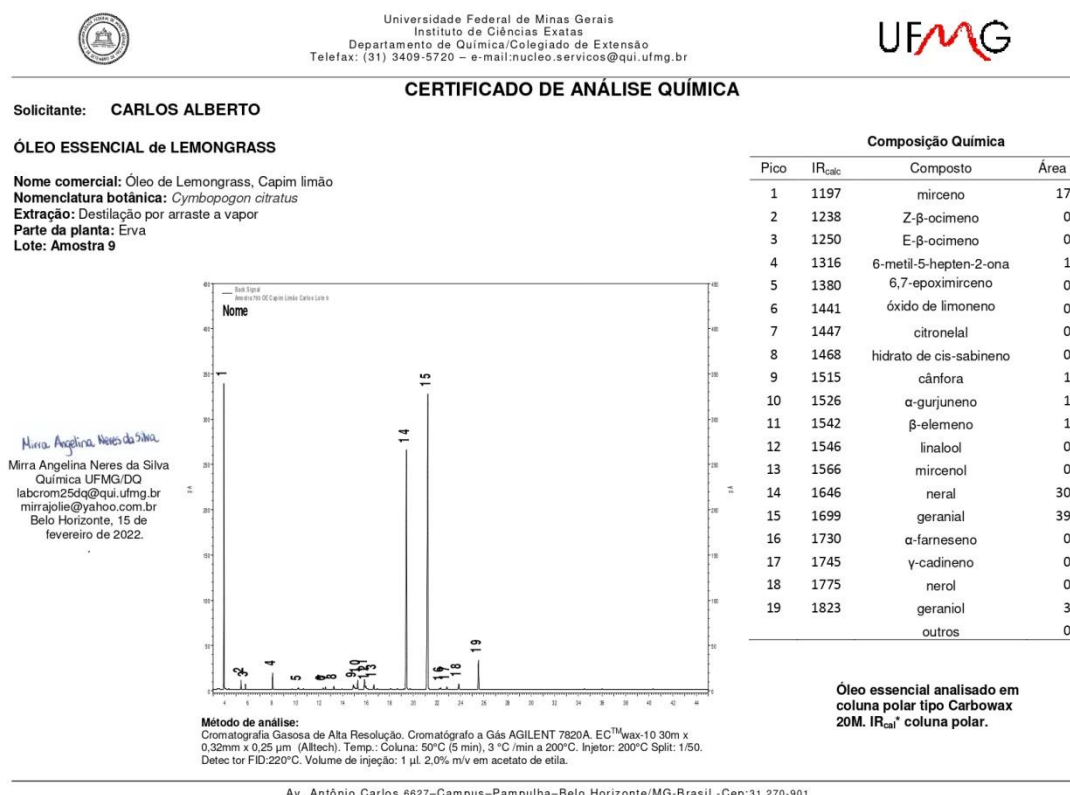
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 8: Certificado de análise química – amostra 8



Fonte (UFMG, 2022)

Figura 9: Certificado de análise química – amostra 9



Fonte (UFMG, 2022)

Figura 10: Certificado de análise química – amostra 10



Universidade Federal de Minas Gerais
 Instituto de Ciências Exatas
 Departamento de Química/Colegiado de Extensão
 Telefax: (31) 3409-5720 – e-mail:nucleo.servicos@qui.ufmg.br

UFMG

CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

Solicitante: **CARLOS ALBERTO**

ÓLEO ESSENCIAL de LEMONGRASS

Nome comercial: Óleo de Lemongrass, Capim limão

Nomenclatura botânica: *Cymbopogon citratus*

Extração: Destilação por arraste a vapor

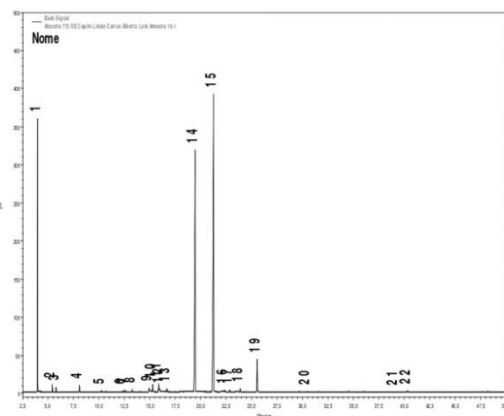
Parte da planta: Erva

Lote: Amostra 10

Composição Química

Pico	IR _{calc}	Composto	Área %
1	1197	mirreno	14,7
2	1239	Z-β-ocimeno	0,5
3	1250	E-β-ocimeno	0,3
4	1317	6-metil-5-hepten-2-ona	0,6
5	1380	6,7-epoximirreno	0,2
6	1441	óxido de limoneno	0,1
7	1447	citronelal	0,2
8	1468	hidrato de cis-sabineno	0,3
9	1516	cânfora	0,9
10	1526	α-gurjuneno	0,8
11	1543	β-elemeno	0,9
12	1546	linalool	0,5
13	1566	mircenol	0,3
14	1647	neral	31,5
15	1700	geranial	42,7
16	1730	α-farneseno	0,2
17	1746	γ-cadineno	0,2
18	1775	nerol	0,4
19	1823	geraniol	3,6
20	1967	óxido de cariofileno	0,1
21	2216	α-bisabolol	0,0
22	2253	α-cadinol	0,2
		outros	0,7

Mirra Angelina Neres da Silva
 Mirra Angelina Neres da Silva
 Química UFMG/DQ
 labqrom25dq@qui.ufmg.br
 mirraajolie@yahoo.com.br
 Belo Horizonte, 03 de março
 de 2022.



Método de análise:
 Cromatografia Gasosa de Alta Resolução. Cromatógrafo a Gás AGILENT 7820A, ECTMwax-10 30m x
 0,32mm x 0,25 μm (Altech). Temp.: Coluna: 50°C (5 min), 3 °C/min a 200°C. Injetor: 200°C Split: 1/50.
 Detec tor FID 220°C. Volume de injeção: 1 μl. 2,0% m/v em acetato de etila.

**Óleo essencial analisado em
 coluna polar tipo Carbowax
 20M. IR_{calc} coluna polar.**

Av. Antônio Carlos, 6627-Campus-Pampulha-Belo Horizonte/MG-Brasil -Cep:31.270-901

Fonte (UFMG, 2022)

Figura 11: Certificado de análise química – amostra 11

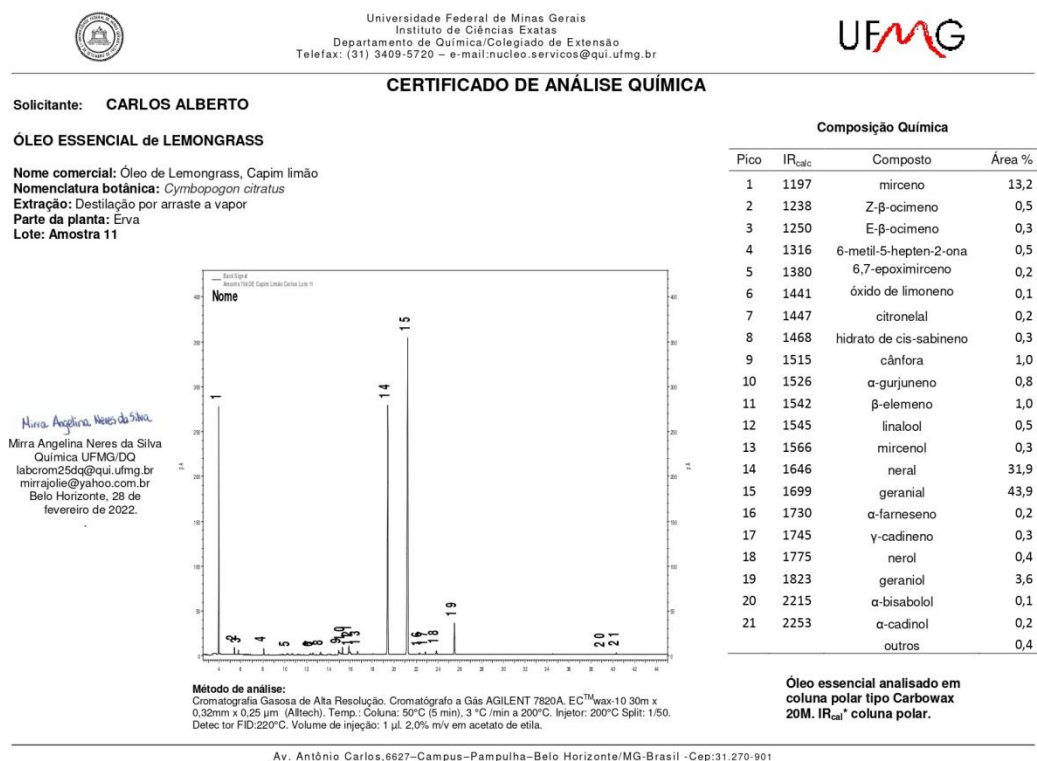
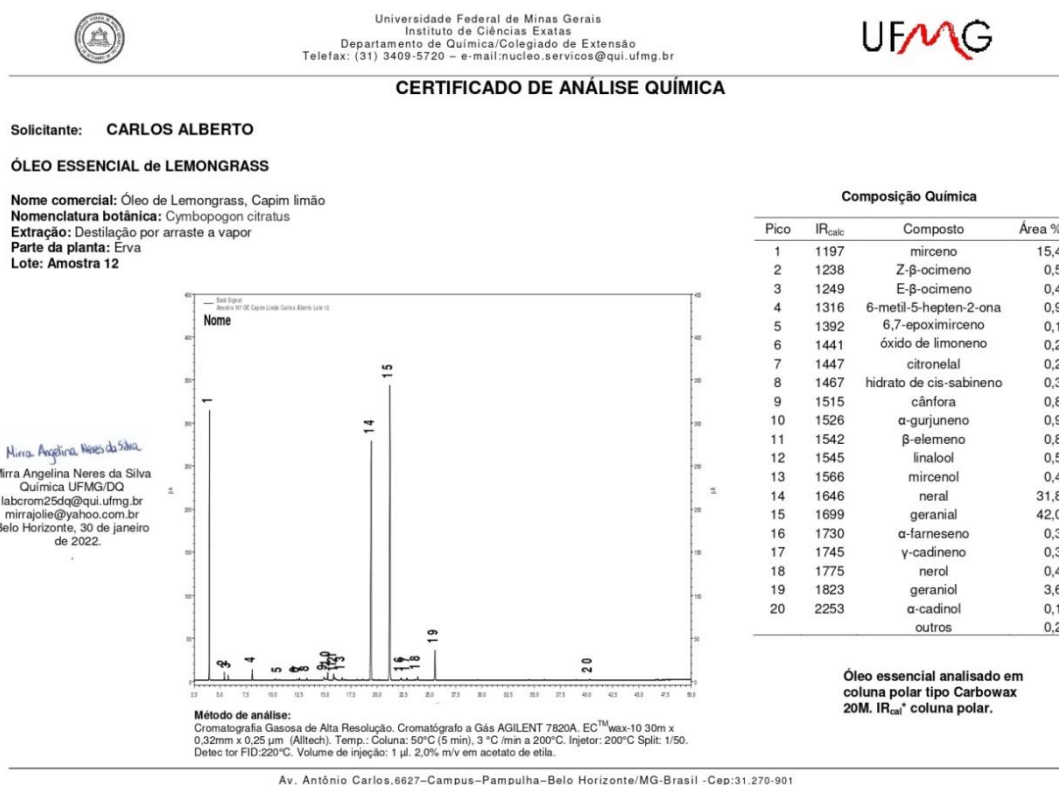
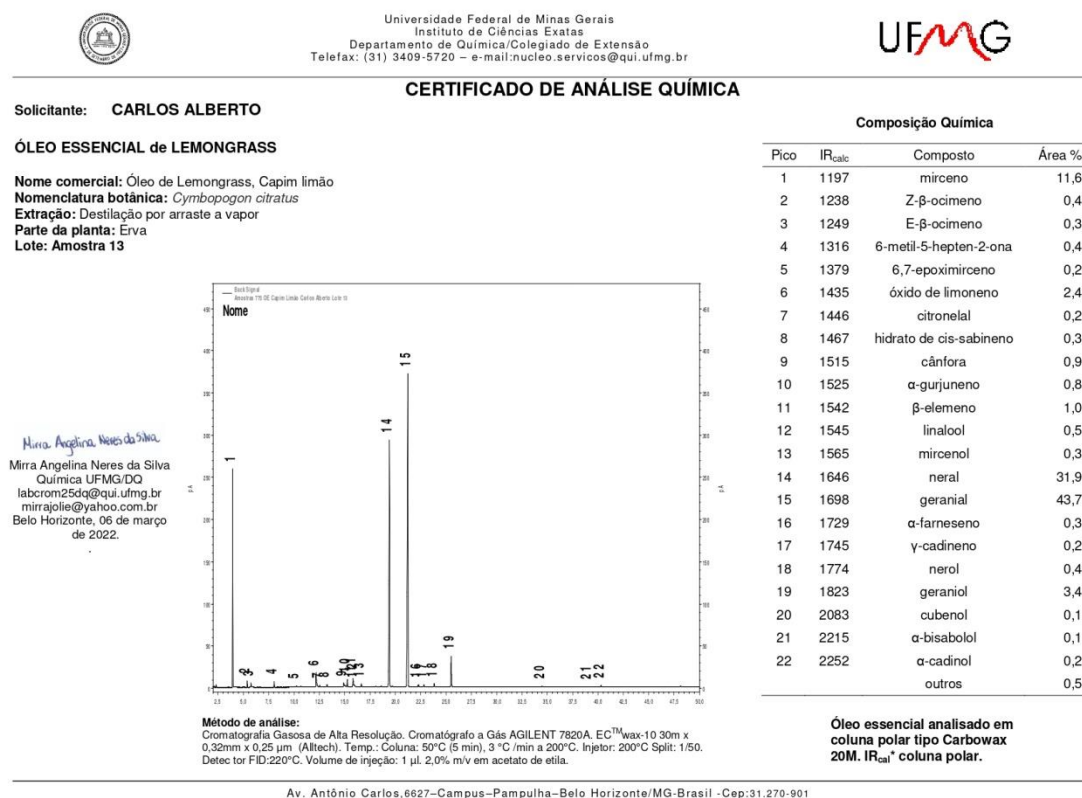


Figura 12: Certificado de análise química – amostra 12



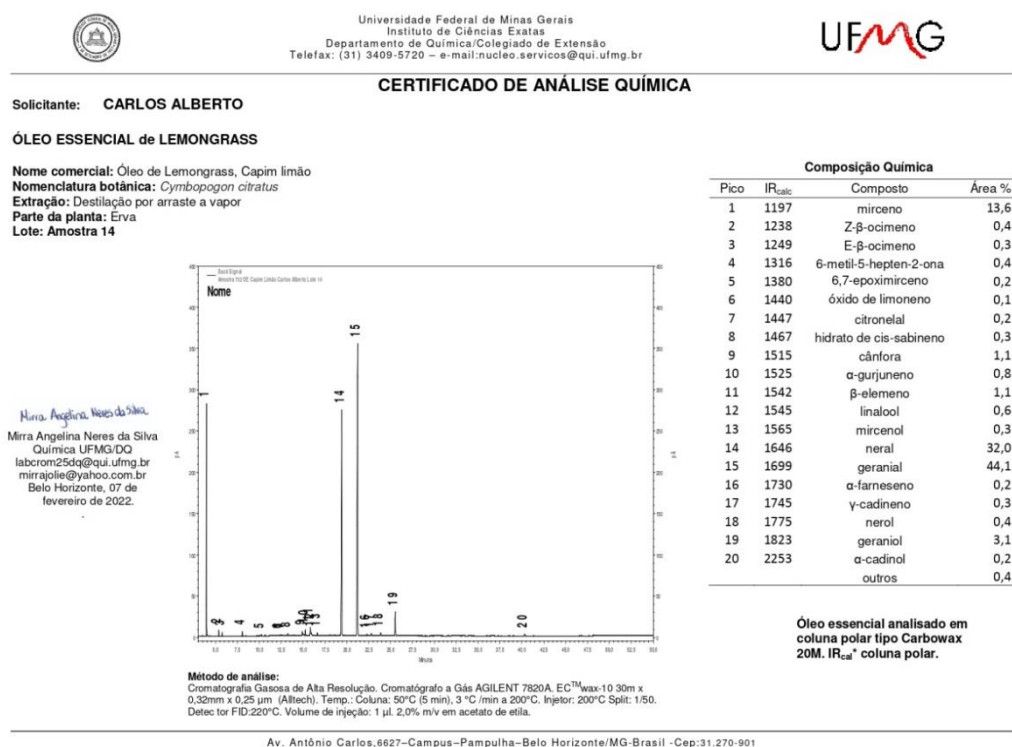
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 13: Certificado de análise química – amostra 13



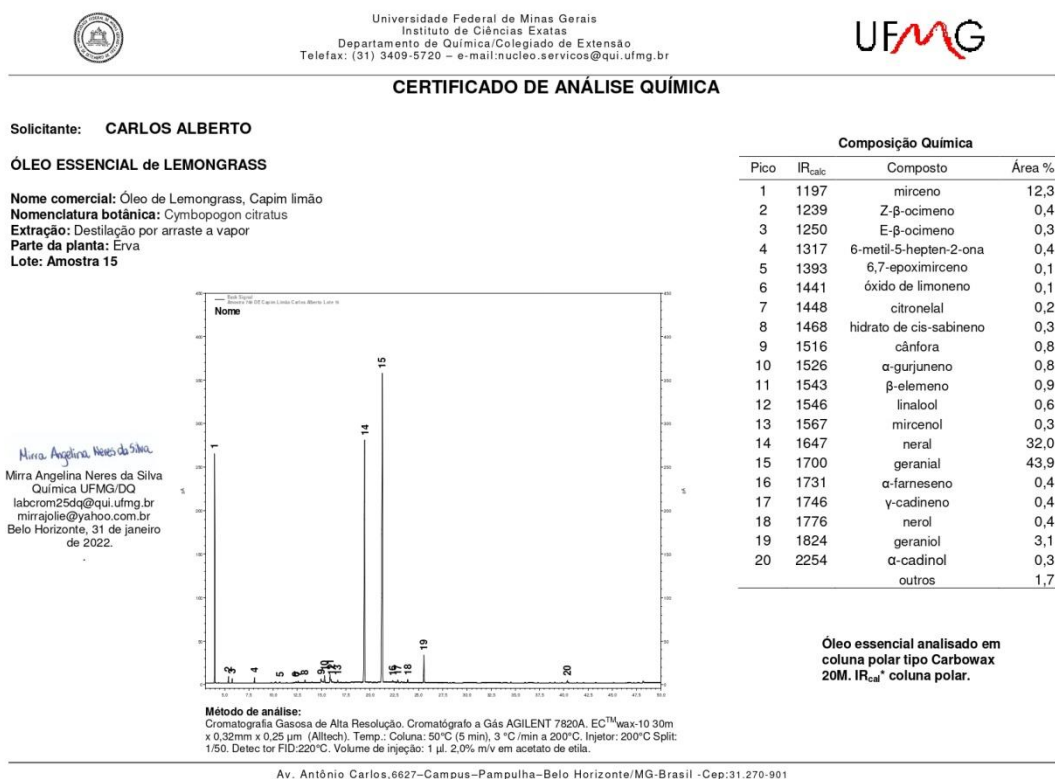
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 14: Certificado de análise química – amostra 14



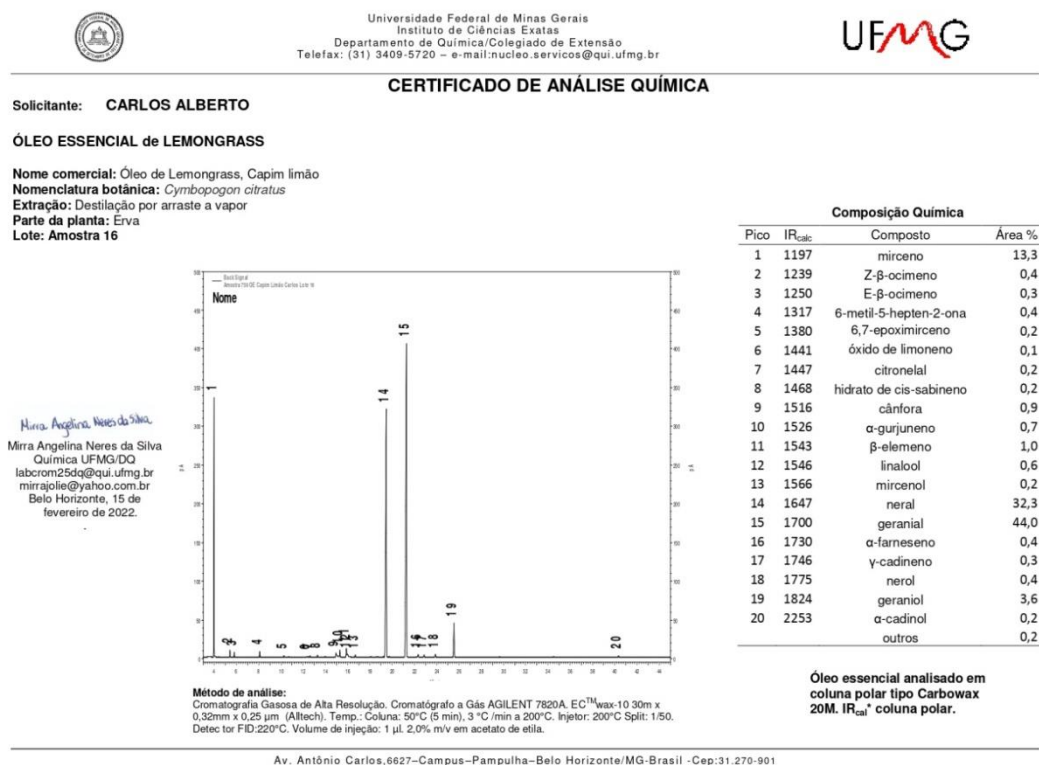
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 15: Certificado de análise química – amostra 15



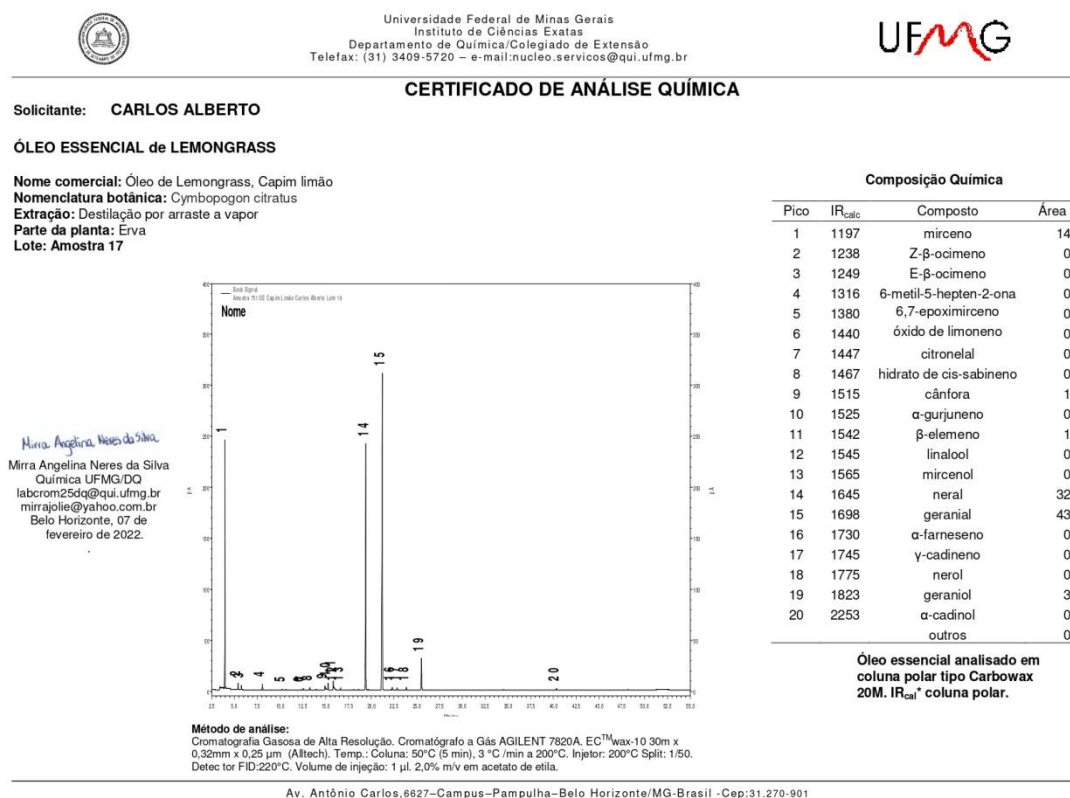
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 16: Certificado de análise química – amostra 16



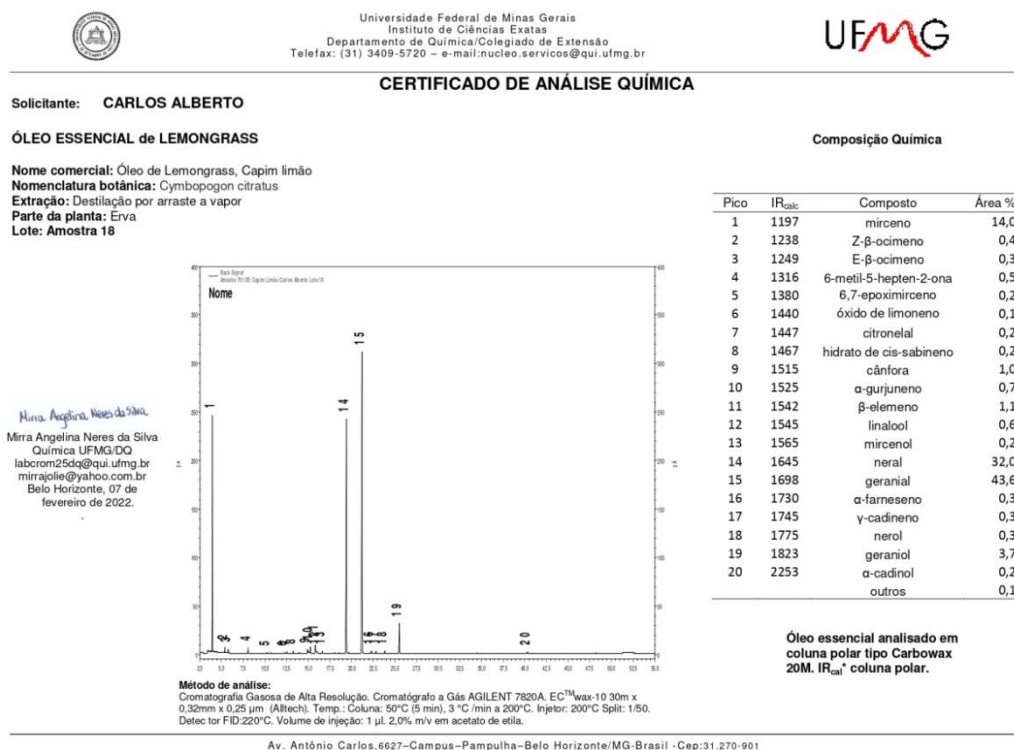
Fonte (UFMG, 2022)

Figura 17: Certificado de análise química – amostra 17



Fonte (UFMG, 2022)

Figura 18: Certificado de análise química – amostra 18



Fonte (UFMG, 2022)

Figura 19: Certificado de análise química – amostra 19

