

ESPECIFICAÇÃO DE UM SECADOR DE CAFÉ ADAPTADO À PRODUÇÃO CAFEIIRA NA AGRICULTURA FAMILIAR

Juan Diego Trullo Medina (juan.medina@aluno.unb.br) – Universidade de Brasília, (UnB).

Sanderson César Macedo Barbalho (Sandersoncesar@unb.br) – Universidade de Brasília, (UnB).

RESUMO

O estudo apresenta uma revisão sistemática de tecnologias inovadoras de secagem de café desenvolvidas para pequenos produtores através de um levantamento bibliográfico sobre tecnologias de secagem aplicáveis à agricultura familiar com o objetivo de estabelecer especificações de produto e técnicas para um secador a ser desenvolvido. A revisão destaca avanços nos métodos de secagem onde cinco principais áreas de pesquisa foram reveladas: inovação em métodos de secagem, modelagem matemática e simulação, preservação de compostos bioativos, tecnologias para pequenos produtores, e desafios e oportunidades futuras. A importância de integrar sensores de peso, umidade, luz e temperatura para otimizar o processo de secagem em tempo real é enfatizada. Os achados revelam o potencial dessas tecnologias para melhorar a qualidade do café, sustentabilidade e competitividade no mercado para pequenos produtores, enfatizando a necessidade de desenvolver secadores híbridos especificamente adaptados para pequenos produtores, combinando energia solar e aquecimento artificial com sistemas de controle automatizados. Esta integração tecnológica pode proporcionar não apenas melhorias na eficiência energética e qualidade do produto, mas também maior sustentabilidade e competitividade para agricultores familiares.

Palavras-chave: Coffee; Equipment; Dryer; Sensor.

1. INTRODUÇÃO

A secagem é uma etapa crucial na produção de café. De acordo com (“The World Atlas of Coffee - 2nd Edition - Signed Copy | Square Mile Coffee Roasters”, [s.d.]), os métodos tradicionais de secagem são ineficientes e vulneráveis às variações climáticas. Segundo (Wintgens, 2012), a falta de tecnologia adequada na secagem do café é um fator comum na agricultura familiar. Portanto, a aplicação de soluções tecnológicas pode melhorar significativamente a eficiência e qualidade do processo. O desenvolvimento de um protótipo de secador híbrido adaptado à agricultura familiar é planejado para as necessidades dos pequenos produtores, utilizando luz solar e aquecimento artificial do ar que, com a ajuda de sensores de peso, umidade, luz e temperatura, otimizará o processo de secagem em tempo real, buscando melhorar a qualidade e rentabilidade do café produzido. Para conhecer os temas de pesquisa relacionados ao projeto, esta pesquisa objetivou estabelecer uma revisão sistemática da literatura sobre o desenvolvimento de secadores de café automatizados. A busca foi realizada na base de dados Scopus, além da implementação de software como VOSviewer, para melhor analisar as publicações encontradas. Foram coletadas informações das principais fontes bibliográficas. Inicialmente foram identificados 159 documentos publicados a partir de 2000. Foram realizadas análises quantitativas e qualitativas, estabelecendo uma classificação que descreve os termos e especificações utilizados na estratégia de busca. Em seguida, foi realizada a bibliometria, onde se estudou a produtividade dos autores e a frequência das palavras-chave. A estrutura do estudo é a seguinte: na seção 2, é feito um referencial teórico relacionado ao estudo e desenvolvimento de equipamentos automatizados de secagem de café, e são enfatizados a classificação e os procedimentos metodológicos utilizados para filtrar os documentos analisados. Continuando com a seção 3, são apresentados os resultados da análise e, finalmente, a seção 4 mostra as conclusões do trabalho.

2. METODOLOGIA

(Cintra Faria e Barbalho, 2023) implementam uma metodologia para apoiar a revisão sistemática e ajudar a analisar e classificar publicações relacionadas à mecatrônica e inovação. Esta metodologia define variáveis e critérios específicos que orientam a seleção e análise do material bibliográfico. No contexto do artigo, o quadro analítico parece incluir variáveis como a relevância dos tópicos de mecatrônica nas publicações, a integração de diferentes disciplinas

como engenharia mecânica, controle eletrônico e design de software, e a contribuição dessas integrações para a inovação de produtos.

Essas variáveis ajudam a estruturar a revisão sistemática, permitindo aos pesquisadores identificar e categorizar estudos de uma forma que destaca como a mecatrônica é aplicada na criação de produtos inovadores e como essas aplicações levam a avanços tecnológicos e melhorias no processo de desenvolvimento de produtos. O framework, resumido na figura 1, serve como uma ferramenta para mapear as conexões entre mecatrônica e inovação, demonstrando como essas áreas se interconectam e impactam o campo da engenharia de produtos.

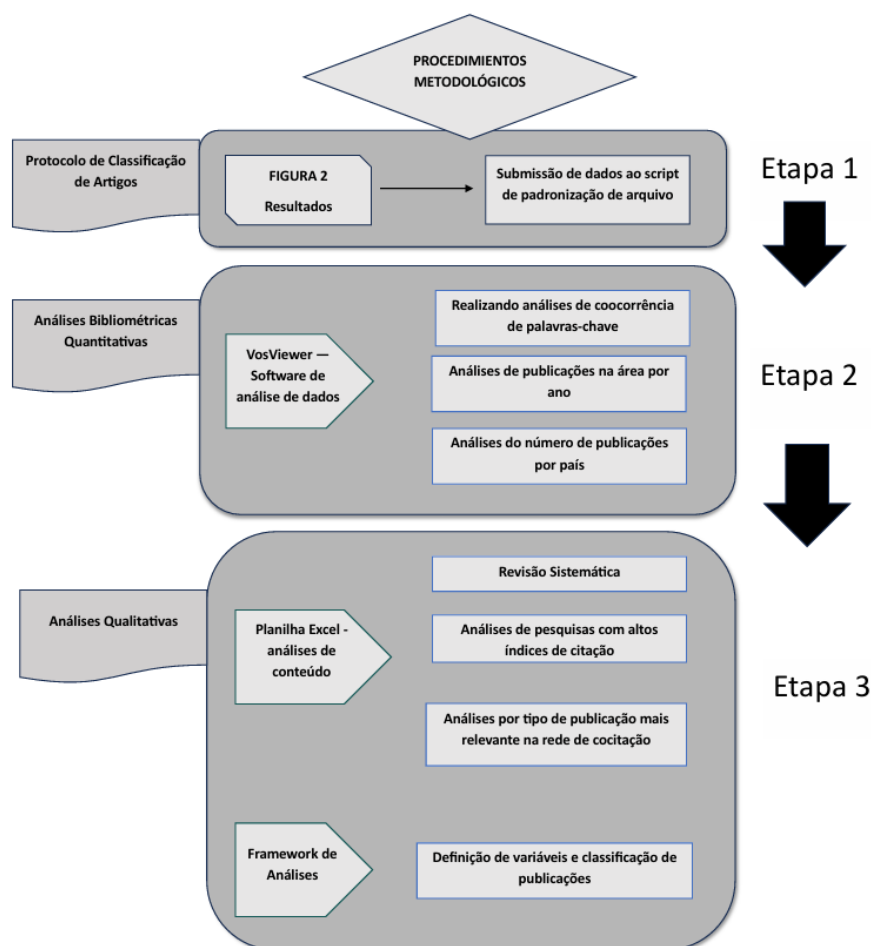


FIGURA 1 – Mapeamento de Fluxos Metodológicos e Análise Científica Integrada. Fonte:(Cintra Faria e Barbalho, 2023)

2.1 Procedimentos metodológicos

Se definem 5 passos apresentados na figura 2.

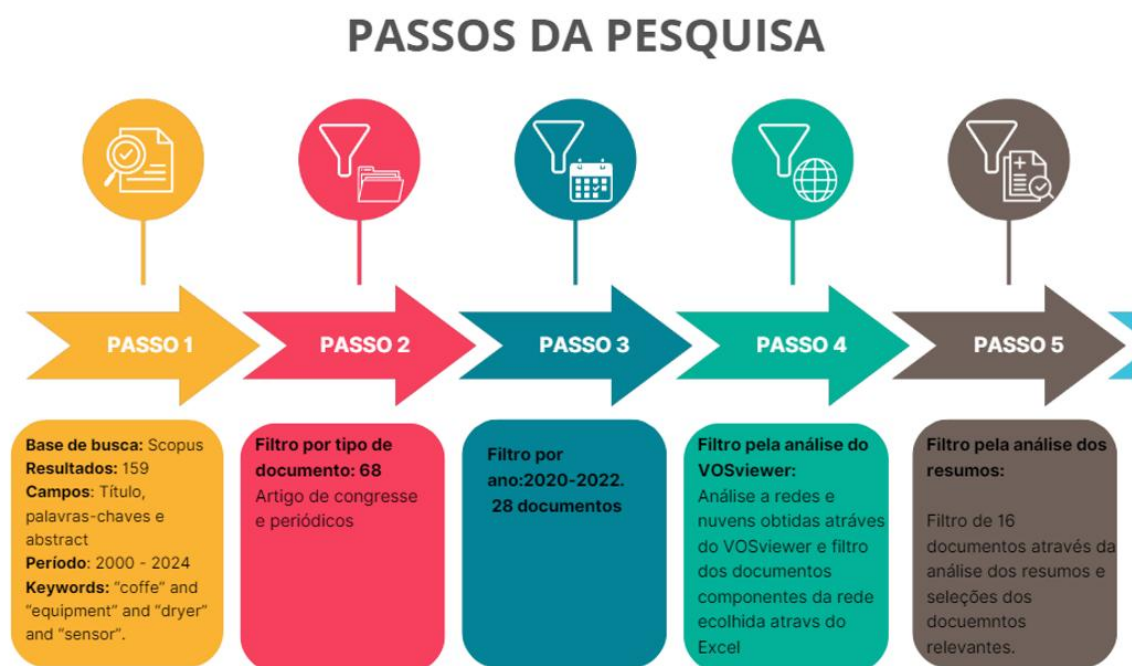


FIGURA 2 – Passos da pesquisa.

Primeiramente, 159 documentos foram obtidos através da busca na Scopus utilizando a combinação de palavras-chave ("coffee" AND "equipment" AND "Dryer" AND "sensor*"). Como mostrado na Figura 3, os documentos mais relevantes são artigos e livros.

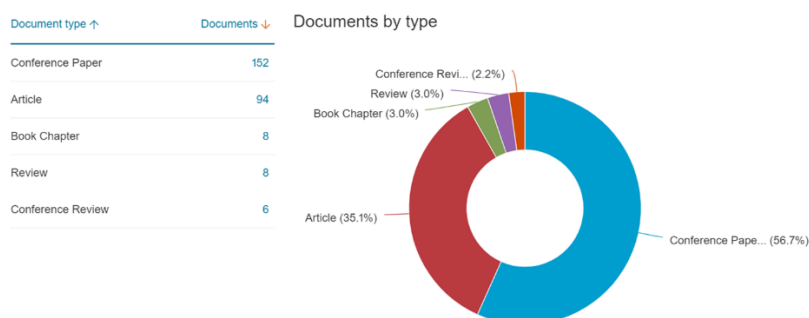


FIGURA 3 – Análise por tipo de documento. Fonte: ("Scopus", [s.d.])

A exclusão de outros documentos levou ao segundo passo, onde artigos de periódicos e congressos foram considerados. O terceiro passo utilizou o software VOSviewer para visualizar as redes, representando os 68 documentos formados pela co-ocorrência das palavras-chave. Isso nos ajudou a entender melhor quais áreas eles abrangiam. A análise que resultou em um filtro

e consequente redução de documentos foi publicações por ano. Utilizando os mesmos dados da análise de rede, a Figura 4 mostra que as ocorrências mais frequentes de palavras-chave vêm de publicações entre 2020 e 2022.

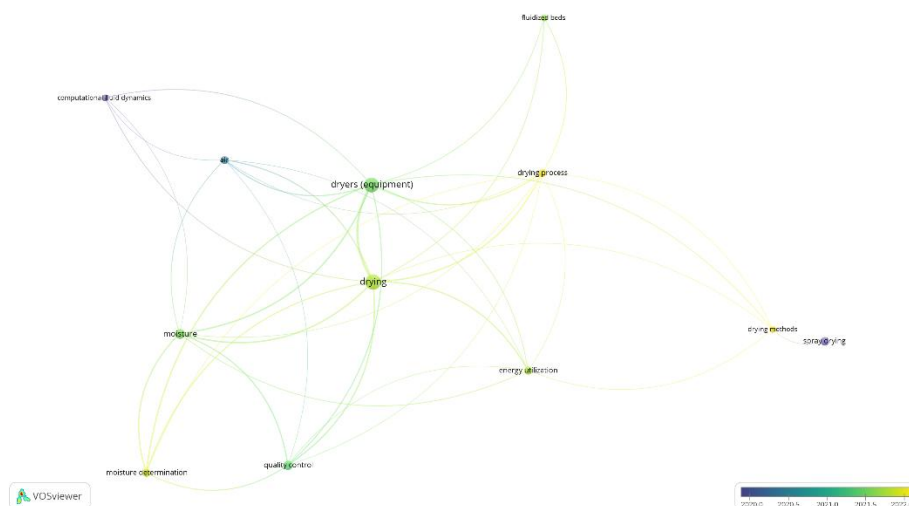


FIGURA 4 – Ocorrências por ano.

Como mostrado na Figura 4, todos os documentos publicados entre 2000 e 2024 foram considerados. A ocorrência de palavras-chave com maior incidência derivada de publicações localizadas entre 2020 e 2022 nos permite restringir os documentos e aplicar análise aos documentos publicados nesse intervalo de tempo. Isso retornou 28 documentos publicados a partir de 2020, o que gerou um novo arquivo de documentos com a ajuda do Excel. O arquivo foi importado para o VOS viewer para analisar as redes e nuvens. Embora as nuvens tenham representado 12 termos de abordagem em equipamentos de secagem, após o processamento das informações com o software VOS viewer, o número de itens diminuiu para 6. Os termos presentes e distribuídos por toda a rede são mostrados na Figura 5.

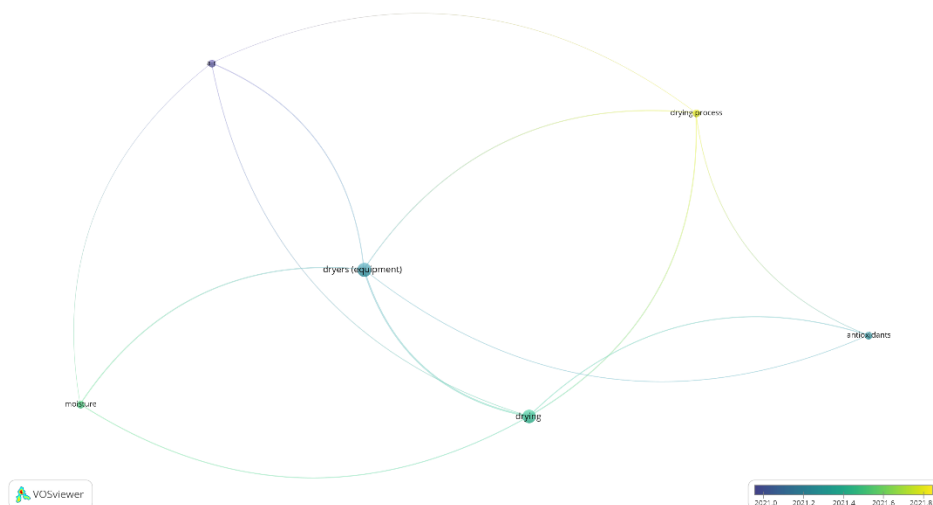


FIGURA 5 – Rede dos 28 documentos.

A solução encontrada para identificar os principais aspectos relacionados foi identificar uma rede que demonstrasse uma forte relação entre os termos anteriormente destacados. Esta escolha se mostra na figura 6.

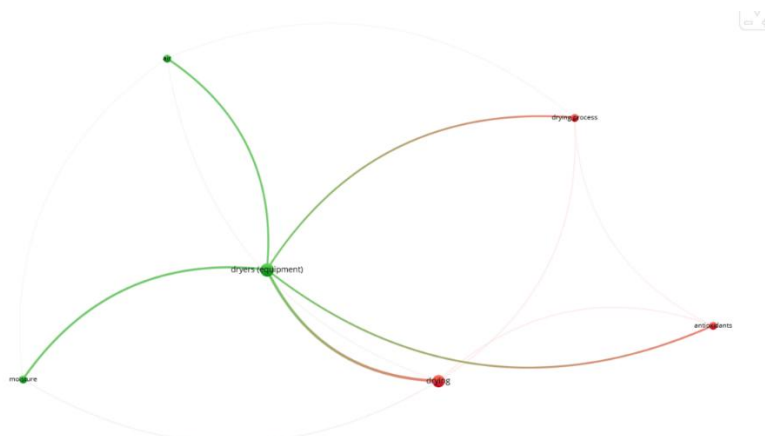


FIGURA 6 – Rede selecionada para análise.

A rede anterior tinha "Dryers (equipment)" e "drying" como as palavras-chave mais recorrentes e foi um critério de seleção para o próximo passo; aplicando essas palavras como critérios de seleção na Scopus, obtivemos um total de 16 documentos. A rede pode ser vista na figura seguinte.

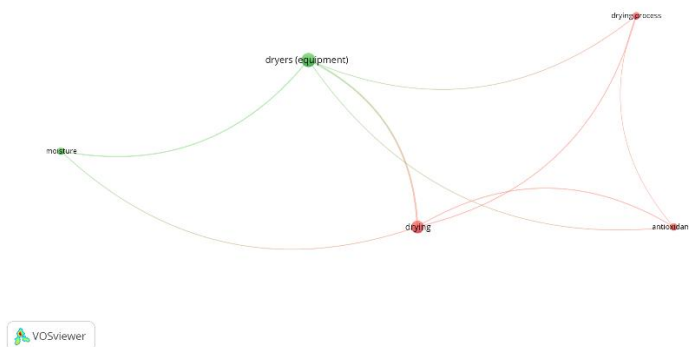


FIGURA 7 – Rede selecionada para análise.

A seleção dos documentos representados pela rede ilustrada resultou em 16 documentos, os quais tiveram seus resumos analisados, no passo seguinte se destaca os artigos de maior relevância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos documentos estudados pode ser separada em duas etapas distintas: inicialmente, é apresentada uma avaliação quantitativa dos dados, abrangendo aspectos como o período de publicação, os pesquisadores mais relevantes, as nações mais relevantes e um exame da produção por país ao longo do tempo. Isso é seguido por uma avaliação qualitativa do conteúdo dos documentos, na qual os artigos são agrupados em quatro categorias temáticas, destacando as características específicas de cada uma. As informações sobre os documentos analisados podem ser divididas em duas etapas: a primeira etapa fornece uma análise quantitativa dos dados, como ano de publicação, principais autores, principais países e análise de países por ano; a segunda etapa apresenta uma abordagem qualitativa para a análise dos documentos, que classifica os artigos em 4 temas diferentes e aponta cada uma de suas particularidades.

3.1 Análise quantitativa

3.1.1 Produções por ano

A quantidade de produções anual retrata o aumento de pesquisas acerca do tema nos últimos anos, onde se evidencia um aumento de número de pesquisa na área de interesse, o qual pode se verificar mediante o análises de palavras-chave por ano, o que indica que as palavras “Drying”, “Dryers(equipmet)” e “Drying process” como destaques mais recentes (figura 8).

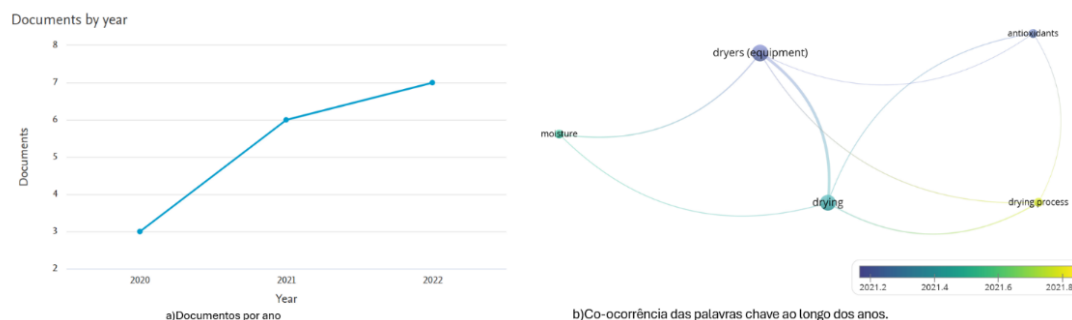


FIGURA 8– Documentos por ano e co-ocorrência de palavras-chave ao longo dos anos.

3.1.2 Principais autores

A análise dos principais autores mostrou um período de publicação muito próximo entre si, o que pode ser interpretado como um interesse em pesquisas nesta área para atender necessidades técnicas através da inovação. Concentrando-se na análise quantitativa, os autores aparecem com uma publicação de cada documento relevante (Figura 9).

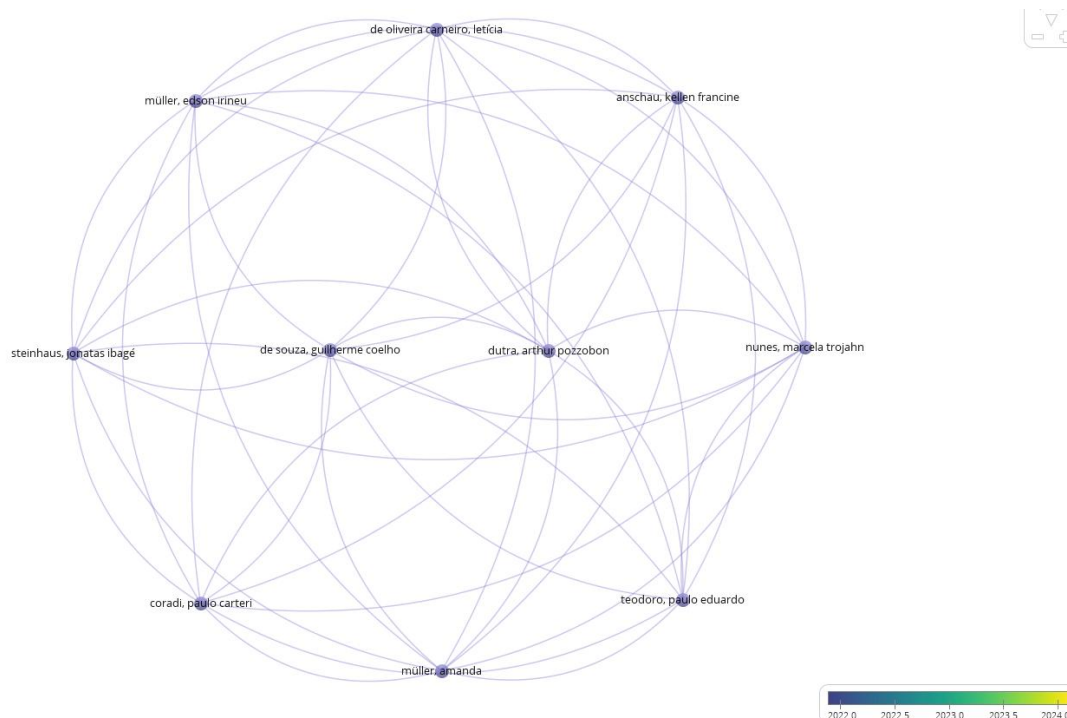


FIGURA 9– Rede formada pelos principais autores ao longo dos anos.

A rede de colaboração entre autores revela citações mútuas e caminhos tecnológicos compartilhados, indicando consolidação da área através de avanços incrementais. Contrastando com (Cintra Faria e Barbalho, 2023), que identificaram redes isoladas em outros campos, esta integração favorece o alinhamento metodológico, porém evidencia ausência de inovações disruptivas, sugerindo necessidade de explorar abordagens mais radicais para além da melhoria contínua atual.

3.1.3 Principais países

Brasil é um dos países que mais realizam pesquisa na área de equipamentos agrícolas enfocados na área agrícola, como se evidencia no estudo Brasil possui o maior número de publicações mais recentes (figura 10).

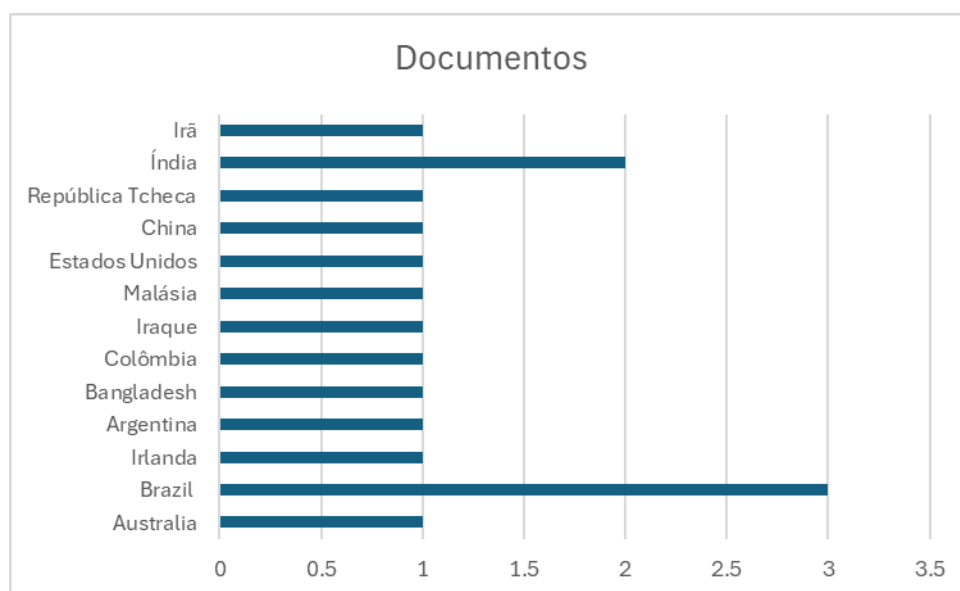


FIGURA 10 – Distribuição dos documentos por país.

A análise bibliométrica identificou Brasil, Austrália e Irlanda com força de ligação 2, evidenciando redes colaborativas consolidadas na disseminação do conhecimento. Esta cooperação internacional demonstra como parcerias científicas ampliam o alcance e impacto da pesquisa, facilitando intercâmbio de ideias e tecnologias entre nações, sendo essencial para avanços significativos na área de secagem de café.

3.2 Análise qualitativa

Os documentos oferecem uma visão abrangente de como diferentes metodologias e tecnologias podem impactar a qualidade final dos produtos e a sustentabilidade das práticas agrícolas. Um aspecto central abordado pelos estudos (Cássia Tomasi, de *et al.*, 2021; Nahar *et al.*, 2022) é a inovação em métodos de secagem, como abordagens novas, tais como secagem a vácuo, micro-ondas e secagem assistida por infravermelho, desafiando técnicas tradicionais. As tecnologias emergentes reduzem o tempo de processamento e preservam compostos bioativos essenciais, ajudando manter a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos. Esta preservação é indispensável, especialmente em um mercado onde os consumidores são cada vez mais exigentes. Outra similaridade nas publicações é a aplicação de modelos matemáticos para otimizar processos de secagem. Autores como (Reyes Chaparro *et al.*, 2022; Zare *et al.*, 2020) se aprofundam nesta área, onde a modelagem matemática e simulações computacionais, como o método de elementos finitos (MEF) e dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), desempenham um papel crucial na compreensão da dinâmica de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Essas ferramentas tornam possível prever o comportamento dos produtos e desenvolver equipamentos mais eficientes adaptados às características específicas de cada material a ser seco. O uso dessas tecnologias de simulação representa um avanço significativo na capacidade de projetar secadores que maximizam a eficiência energética e garantem secagem uniforme, preservando as qualidades essenciais dos alimentos. Além dos aspectos tecnológicos e qualitativos, as publicações destacam a importância de adaptar essas inovações às necessidades de pequenos produtores e comunidades rurais. Estudos como os de (Hidayat *et al.*, 2021; Nunes *et al.*, 2022) abordam o desenvolvimento de secadores de baixo custo e fáceis de operar, como secadores solares e de tambor, oferecendo uma alternativa viável para pequenos agricultores que enfrentam perdas pós-colheita e limitações de infraestrutura. Essas tecnologias permitem maior autonomia e sustentabilidade, possibilitando que esses produtores mantenham a qualidade de seus produtos e acessem mercados mais competitivos. Apesar dos avanços significativos, estudos de (Duque-Dussán e Banout, 2022; Qiu *et al.*, 2022) apontam para desafios que ainda precisam ser superados. A variabilidade na qualidade do produto devido a fatores como umidade inicial e condições ambientais ressalta a necessidade de sistemas de controle mais precisos e adaptáveis. Além disso, existe uma lacuna

na literatura sobre o impacto dos métodos de secagem no armazenamento a longo prazo, especialmente no que se refere à estabilidade de compostos bioativos.

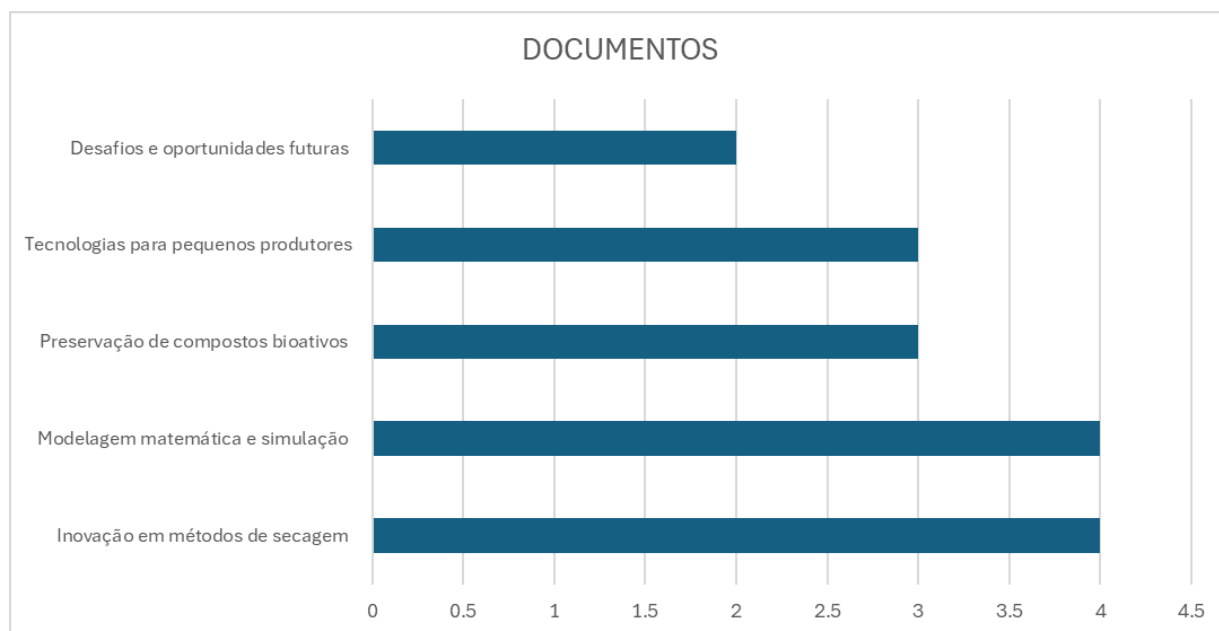


FIGURA 11 – Distribuição dos documentos por tema.

Destacam cinco áreas principais de pesquisa em secagem. Inovação em Métodos de Secagem lidera o caminho, focando em tecnologias como vácuo e micro-ondas, que otimizam processos e preservam a qualidade dos alimentos. Modelagem matemática e simulação contribui com ferramentas como MEF e CFD, permitindo maior eficiência energética e controle de processos. O cluster de preservação de compostos bioativos explora métodos que mantêm nutrientes essenciais, como antioxidantes. O cluster de tecnologias para pequenos produtores promove soluções acessíveis, como secadores solares, para reduzir perdas pós-colheita. Finalmente, o cluster de desafios e oportunidades futuras destaca a busca por sustentabilidade e inovação, mostrando o equilíbrio entre progresso acadêmico e impacto prático.

3.2.1 Inovação em Métodos de Secagem

Os artigos com este como tema principal exploram o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias e técnicas para otimizar o processo de secagem de alimentos e produtos agrícolas. Estes estudos (Çelik, Parlak e Çay, 2022; Feitosa *et al.*, 2020; Junka *et al.*, 2021) variam desde o uso de secadores por aspersão e micro-ondas até a integração de fontes híbridas de calor, como secadores que combinam energia solar e GLP (gás liquefeito de petróleo). O foco está em melhorar a eficiência energética, reduzir o tempo de secagem e preservar a qualidade

nutricional e sensorial dos produtos. Estes artigos refletem esforços significativos para encontrar métodos de secagem mais eficientes que possam ser adaptados às necessidades de diferentes produtos agrícolas. Eles demonstram como a inovação tecnológica pode melhorar a qualidade e viabilidade econômica dos processos de secagem.

3.2.2 Modelagem Matemática e Simulação

Aqui estão 4 artigos, (Khan *et al.*, 2021; Mohammed, Alhelli e Meor Hussin, 2021; Reyes Chaparro *et al.*, 2022; Zare *et al.*, 2020) Eles abordam o uso de modelos matemáticos avançados e simulações computacionais para prever e otimizar o comportamento de processos de secagem em alimentos e produtos agrícolas. Estes estudos utilizam uma variedade de modelos, como Midilli e Fick, bem como simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e métodos de elementos finitos (MEF), para descrever a transferência de calor e massa durante a secagem. O objetivo é melhorar a precisão dos processos, reduzir o consumo de energia e garantir a qualidade uniforme dos produtos secos. Ilustram como a modelagem matemática e simulações avançadas são ferramentas essenciais para compreender e otimizar processos de secagem, permitindo maior controle sobre as variáveis envolvidas e possibilitando o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e precisas.

3.2.3 Preservação de Compostos Bioativos

Três estudos (Cássia Tomasi, de *et al.*, 2021; Minh, 2022; Nahar *et al.*, 2022) focam na análise de como diferentes métodos de secagem afetam a retenção de compostos bioativos, como polifenóis, ácido ascórbico e antioxidantes, em alimentos e produtos agrícolas. O principal objetivo destes estudos é identificar as condições de secagem que melhor preservam esses compostos, que são essenciais para a qualidade nutricional e valor funcional dos produtos. A pesquisa varia desde a secagem de folhas de erva-mate até rizomas de lótus, avaliando o impacto das variáveis de secagem na qualidade bioquímica e sensorial dos produtos. A importância de selecionar métodos de secagem que preservem a integridade bioquímica dos alimentos, garantam a retenção de suas propriedades funcionais e apoiem a saúde do consumidor. Além disso, este estudo oferece insights críticos sobre a otimização de técnicas de secagem para melhorar a preservação de compostos bioativos.

3.2.4 Tecnologias para Pequenos Produtores

Os autores (Harguindeguy e Fissore, 2020; Hidayat *et al.*, 2021; Nunes *et al.*, 2022) ilustram como a adaptação de tecnologias de secagem pode melhorar a qualidade dos produtos agrícolas, reduzir perdas e promover sustentabilidade. Eles fornecem soluções viáveis e de baixo custo para pequenos produtores, ajudando a fortalecer a economia local e a segurança alimentar em comunidades rurais. Eles focam no desenvolvimento e adaptação de tecnologias de secagem acessíveis e eficientes para agricultores e pequenos negócios rurais. O principal objetivo desta pesquisa é fornecer soluções tecnológicas que aumentem a qualidade e durabilidade dos produtos agrícolas, reduzindo perdas pós-colheita e melhorando a rentabilidade dos pequenos produtores. As inovações variam desde secadores solares de baixo custo até o desenvolvimento de secadores adaptados para comunidades rurais, destacando a importância da sustentabilidade e acessibilidade tecnológica.

3.2.5 Desafios e Oportunidades Futuras

Dois estudos (Duque-Dussán e Banout, 2022; Qiu *et al.*, 2022) abordam desafios na implementação de tecnologias de secagem, focando em sustentabilidade, eficiência energética e preservação da qualidade a longo prazo. Propõem soluções inovadoras para superar barreiras tecnológicas e operacionais, identificando oportunidades de adaptação local e exploração de novos mercados, incluindo proteínas alternativas e valorização de produtos agrícolas de alto valor agregado.

3.3 Projeto do protótipo de secador híbrido

3.3.1 Requisitos e especificações de projeto para pequenos produtores

Com base na análise sistemática dos documentos, os requisitos do protótipo foram organizados conforme a Tabela 1 seguindo o procedimento sugerido em (Barbalho, 2006)

TABELA 1 - Requisitos do projeto baseados na revisão sistemática.

Categoria	Requisitos Identificados	Artigos de Referência	Justificativa da literatura
Acessibilidade e Operação	Baixo custo de implementação; Operação simplificada; Manutenção com recursos locais; Adaptação à infraestrutura rural limitada.	(Harguindeguy; Fissore, 2020; Hidayat <i>et al.</i> , 2021; Nunes <i>et al.</i> , 2022)	Tecnologias devem ser viáveis para pequenos agricultores, reduzindo perdas pós-colheita e melhorando rentabilidade.
Eficiência Energética	Manutenção de compostos bioativos; Controle de variáveis críticas; Preservação sensorial (aroma/sabor); Umidade final adequada (11-12%).	(de Cássia Tomasi <i>et al.</i> , 2021; Minh, 2022; Nahar <i>et al.</i> , 2022)	Métodos híbridos demonstram melhor eficiência energética e adaptabilidade às condições locais.
Controle de Processo	Modelagem CFD/MEF para design; Controle preciso temperatura/umidade; Uniformidade na secagem; Monitoramento em tempo real.	(Khan <i>et al.</i> , 2021; Mohammed; Alhelli; Meor Hussin, 2021; Reyes Chaparro <i>et al.</i> , 2022; Zare <i>et al.</i> , 2020)	Modelos matemáticos (Midilli, Fick) e simulações computacionais garantem otimização e controle precisos
Preservação da Qualidade	Manutenção de compostos bioativos; Controle de variáveis críticas; Preservação sensorial (aroma/sabor); Umidade final adequada (11-12%).	(de Cássia Tomasi <i>et al.</i> , 2021; Minh, 2022; Nahar <i>et al.</i> , 2022)	Condições controladas preservam polifenóis, ácido ascórbico e características organolépticas
Adaptabilidade	Sistema ajustável à umidade inicial variável; Resposta a condições ambientais; Flexibilidade de capacidade; Sustentabilidade operacional.	(Duque-Dussán; Banout, 2022; Qiu <i>et al.</i> , 2022)	Variabilidade nas condições iniciais requer sistemas adaptativos e robustos.

Esta síntese dos requisitos, extraída diretamente dos 16 documentos analisados, estabelece as bases técnicas e operacionais para o desenvolvimento do secador híbrido automatizado, garantindo alinhamento com as melhores práticas científicas identificadas na literatura.

3.3.2 Seleção de materiais e justificativa

A tabela 2 apresenta um aspecto importante no projeto conceitual de equipamentos de natureza mecatrônica, conforme (Barbalho, 2006)

TABELA 2 - Seleção de materiais fundamentada na análise bibliométrica.

Componente	Material Selecionado	Justificativa Técnica	Referência	Custo-Benefício
Estrutura Principal	Aço galvanizado (2-3mm); Perfis metálicos comerciais; Conexões mediante parafuso.	Resistência à corrosão em ambientes úmidos; Disponibilidade nacional; Facilidade de manutenção.	(Hidayat <i>et al.</i> , 2021; Nunes <i>et al.</i> , 2022)	Ampla disponibilidade; Preço competitivo; Durabilidade.
Isolamento Térmico	Poliuretano expandido (30mm)	Redução de perdas térmicas; Eficiência energética comprovada; Resistência à umidade.	(Çelik; Parlak; Çay, 2022; Khan <i>et al.</i> , 2021)	Economia energética; Redução no consumo; Manutenção mínima.
Câmara de Secagem	Bandejas perfuradas inox 304; Estrutura interna alumínio; Suportes removíveis.	Redução contaminação do grão; Facilidade de limpeza; Peso reduzido.	(de Cássia Tomasi <i>et al.</i> , 2021; Nahar <i>et al.</i> , 2022)	Durabilidade; Higiene; contaminação reduzida.
Sistema Solar	Coletores planos (chapa aluzinc); Vidro temperado 4mm; absorvedor seletivo	Tecnologia madura e confiável; Eficiência >65%.	(Feitosa <i>et al.</i> , 2020; Junda <i>et al.</i> , 2021)	Energia sem custo; Manutenção simples.
Componentes de Fluxo	Ventilador centrífugo; Dutos em chapa galvanizada; Dampers manuais/automáticos	Fluxo uniforme validado; Resistência a partículas; Controle preciso.	(Mohammed; Alhelli; Meor Hussin, 2021; Reyes Chaparro <i>et al.</i> , 2022; Zare <i>et al.</i> , 2020)	Eficiência aerodinâmica; Baixo ruído; Consumo otimizado.
Alternativas Regionais	Madeira tratada (estrutura); Bambu (bandejas); Adobe (paredes térmicas).	Materiais locais abundantes; Sustentabilidade ambiental.	(Duque-Dussán; Banout, 2022; Harguindeguy; Fissore, 2020)	Custo mínimo; manipulável com mão de obra local; eco amigável.

A Tabela 2 evidencia o equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica na seleção de componentes, priorizando materiais localmente disponíveis e de fácil manutenção conforme indicado pela literatura sobre tecnologias rurais apropriadas, materializando assim um secador híbrido que combina avanço tecnológico com sustentabilidade socioeconômica para agricultura familiar.

3.3.3 Sistema de sensores e controle

A tabela 3 apresenta características de projeto técnico em um produto mecatrônico, conforme (Barbalho, 2006)

TABELA 3 - Sistema de automação baseado na literatura de modelagem e controle

Componente	Material Selecionado	Justificativa Técnica	Referência	Custo-Benefício
Sensores de Temperatura	DHT22 (4 unidades)	Monitoramento de temperatura e umidade do ar de secagem; Mapeamento de gradientes térmicos; Controle de uniformidade	(Khan <i>et al.</i> , 2021; Mohammed; Alhelli; Meor Hussin, 2021; Zare <i>et al.</i> , 2020)	Ajuste automático de condições; Prevenção de pontos quentes; Otimização energética; Histórico de processo
Sensor de Massa	Célula de carga fina 50kg; Resolução: 10g; IP65; Compensação térmica	Acompanhamento contínuo da perda de água; Determinação da taxa de secagem; Critério de parada automática; Cálculo rendimento	(Duque-Dussán; Banout, 2022; Reyes Chaparro <i>et al.</i> , 2022)	Precisão no ponto final; Economia de energia; Padronização de qualidade; Rastreabilidade
Sensor de Umidade do Grão	SEN0193 (DFRobot) ou SKU:SEN0193 capacitivo; Saída analógica 0-3V; Interface direta ADC ESP32;	Medição direta sem amostragem destrutiva; Controle fino do processo; Garantia de qualidade final; Múltiplos pontos medição	(de Cássia Tomasi <i>et al.</i> , 2021; Minh, 2022; Nahar <i>et al.</i> , 2022)	Produto uniforme; Prevenção de sobre-secagem; Preservação de aromas; Valor agregado
Plataforma de Controle	ESP32-WROOM-32 DevKit; Dual-core 240MHz; 520KB SRAM; 4MB Flash; WiFi/Bluetooth integrados;	Processamento paralelo (sensores/controle); Algoritmos complexos CFD simplificados; Conectividade nativa; Machine learning edge.	(Qiu <i>et al.</i> , 2022)	Superior ao Arduino em: velocidade 15x; memória 65x; WiFi nativo; multitasking real; menor consumo; futuro IoT
Interface Homem-Máquina	LCD 2004A I2C (HD44780); Display OLED 128x64 (SSD1306) para gráficos;	Interface dual (texto/gráfico); Visualização curvas secagem; Touch para ajustes rápidos.	(Hidayat <i>et al.</i> , 2021; Nunes <i>et al.</i> , 2022)	UX aprimorada; Curvas em tempo real; Operação intuitiva; Diagnóstico gráfico; Estética profissional
Registro de Dados	SD Card SPI nativo ESP32; SPIFFS 3MB para logs; updates	Dual storage (local/flash); Sincronização horária internet; Consultas SQL locais; Análise embarcada;	(HARGUINDEGUY; FISSORE, 2020)	Analytics local; Backup redundante; Queries complexas; Updates seguros; Manutenção remota
Conectividade	WiFi 802.11n nativo; Bluetooth 4.2/BLE; MQTT sobre TLS; HTTP/HTTPS server;	WebApp responsiva embarcada; App móvel via BLE; Cloud híbrida opcional; Protocolo seguro.	(Duque-Dussán; Banout, 2022; Qiu <i>et al.</i> , 2022)	Indústria 4.0 ready; Segurança dados; Real-time dashboard; Integração ERP; Escalabilidade

A Tabela 3 detalha o sistema de controle baseado no ESP32, escolhido por seu processamento superior e conectividade nativa conforme requisitos dos estudos adaptativos analisados. A

combinação de sensores comerciais validados com interfaces modernas oferece desempenho superior ao Arduino, viabilizando algoritmos complexos e integração com agricultura 4.0, mantendo simplicidade operacional e custo acessível para pequenos produtores.

4. CONCLUSÃO

As publicações revisadas demonstram como a integração da inovação tecnológica, modelagem avançada e foco na qualidade pode transformar os processos de secagem na indústria alimentar e agrícola. As inovações discutidas promovem maior eficiência e sustentabilidade e também oferecem aos pequenos produtores novas oportunidades para agregar valor aos seus produtos e melhorar sua competitividade. Este conjunto de conhecimentos e práticas é essencial ao considerar um futuro no qual o processo de secagem será uma técnica de preservação e uma estratégia fundamental para a valorização e sustentabilidade da produção agrícola global.

Com base no levantamento bibliográfico, o desenvolvimento de um secador de café inovador integra os conceitos e soluções discutidos nos artigos analisados. A implementação de tecnologias como modelagem matemática e simulação computacional (MEF e CFD) fornece uma base sólida para otimizar a transferência de calor e massa durante o processo de secagem, garantindo eficiência energética e uniformidade. Além disso, o uso de sensores avançados para monitoramento em tempo real, como sensores de umidade, temperatura e fluxo de ar, permite ajustes automáticos no processo, garantindo maior controle e precisão.

A integração de fontes de energia renovável, como sistemas solares e híbridos, promove sustentabilidade e reduz custos operacionais, tornando o equipamento ambientalmente responsável e economicamente viável. O design também considera materiais isolantes e estruturas que maximizam a retenção de calor minimizando o desperdício de energia. Esses materiais, combinados com sistemas de controle automatizados, garantem que o processo de secagem seja eficiente e preserve características valiosas do café, como aroma, sabor e compostos bioativos essenciais.

Para atender às necessidades dos pequenos produtores, o secador é projetado com um design modular e de fácil manutenção, permitindo que seja adaptado a diferentes volumes de produção e condições climáticas. Além disso, sistemas de monitoramento remoto, possibilitados pela integração de tecnologias IoT, permitem acompanhar o processo de secagem em tempo real, proporcionando flexibilidade e maior eficiência operacional.

Esta proposta visa oferecer mais que apenas equipamento, mas uma solução que otimize o processo de secagem, reduza perdas pós-colheita e agregue valor ao trabalho agrícola. Inspirado nos avanços apresentados nos documentos analisados, o secador representaria uma ferramenta para promover uma agricultura mais sustentável, inclusiva e competitiva, alinhada com as melhores práticas tecnológicas e as demandas do setor.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de estudos, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

BARBALHO, S. C. M. **Modelo de referência para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos: proposta e aplicações.** [s.l: s.n.].

CÁSSIA TOMASI, J. DE; GOETTEN DE LIMA, G.; MENDES DUARTE, M.; CATIE BUENO DE GODOY, R.; WENDLING, I.; VIEIRA HELM, C.; AUGUSTO HANSEL, F.; LÚCIA GRUNENVALDT, R.; MACIEL TOMAZZOLI, M.; DESCHAMPS, C. Toasted yerba mate: Impact of drying methods on bioactive compounds, antioxidant capacity, and mate tea consumer acceptance. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, nov. 2021.

ÇELİK, E.; PARLAK, N.; ÇAY, Y. Development of an integrated corn dryer with an indirect moisture measuring system. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 47, mar. 2022.

CINTRA FARIA, A. C.; BARBALHO, S. C. M. Mechatronics: A Study on Its Scientific Constitution and Association with Innovative Products. **Applied System Innovation**, v. 6, n. 4, p. 72, 1 ago. 2023.

DUQUE-DUSSÁN, E.; BANOUT, J. Improving the drying performance of parchment coffee due to the newly redesigned drying chamber. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, dez. 2022.

FEITOSA, R. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. DE; MELO QUEIROZ, A. J. DE; SILVA, W. P. DA; SANTOS MOREIRA, I. DOS. Assessment of myrtle powder dried by spray drying. **International Journal of Food Engineering**, v. 16, jul. 2020.

HARGUINDEGUY, M.; FISSORE, D. On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: A review. **Drying Technology**, v. 38, p. 846–868, maio 2020.

HIDAYAT, D. D.; SAGITA, D.; DARMAJANA, D. A.; INDRIATI, A.; RAHAYUNINGTYAS, A.; SUDARYANTO, A.; KURNIAWAN, Y. R.; NUGROHO, P. DEVELOPMENT AND THERMAL EVALUATION OF DOUBLE DRUM DRYER FOR READY-TO-EAT FOOD PRODUCTS TO SUPPORT STUNTING PREVENTION. **INMATEH - Agricultural Engineering**, v. 64, p. 43–53, 2021.

JUNKA, N.; RATTANAMECHAISKUL, C.; WONGS-AREE, C.; SOPONRONNARIT, S. Drying and mathematical modelling for the decelerated rancidity of treated jasmine brown rice using different drying media. **Journal of Food Engineering**, v. 289, jan. 2021.

KHAN, M. A.; MORADIPOUR, M.; OBEIDULLAH, M.; QUADER, A. K. M. A. Heat and mass transport analysis of the drying of freshwater fishes by a forced convective air-dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, jan. 2021.

MINH, N. P. Thermal treatments affected to quality attributes of *Solanum procumbens* Lour. **Plant Science Today**, v. 9, p. 150–156, jan. 2022.

MOHAMMED, N. K.; ALHELLI, A. M.; MEOR HUSSIN, A. S. Influence of different combinations of wall materials on encapsulation of *Nigella sativa* oil by spray dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, mar. 2021.

NAHAR, N.; HAZRA, S.; RAYCHAUDHURI, U.; ADHIKARI, S. Effect of different drying methods on drying kinetics, modeling, energy-economic, texture profile, color, and antioxidant of lotus rhizomes (*Nelumbo nucifera*). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, out. 2022.

NUNES, M. T.; CORADI, P. C.; MÜLLER, A.; OLIVEIRA CARNEIRO, L. DE; STEINHAUS, J. I.; ANSCHAU, K. F.; SOUZA, G. C. DE; MÜLLER, E. I.; TEODORO, P. E.; DUTRA, A. P. Stationary rice drying: Influence of initial moisture contents and impurities in the mass grains on the physicochemical and morphological rice quality. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, maio 2022.

QIU, F.; LI, B.; XU, T.; HE, D. Drying behavior and mathematical modeling of Tenebrio molitor using a closed system heat pump dryer. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 17, p. 841–849, 2022.

REYES CHAPARRO, J.; DURÁN BARÓN, R.; VALLE VARGAS, M.; RAMIRO ARBALLO, J.; CAMPAÑONE, L. A. Experimental and computational study of fluidized-microwave drying process of shrinking parchment coffee and determination of quality attributes. **International Journal of Food Engineering**, v. 18, p. 383–397, maio 2022.

Scopus.

The World Atlas of Coffee - 2nd Edition - Signed Copy | Square Mile Coffee Roasters. Disponível em: <https://shop.squaremilecoffee.com/products/the-world-atlas-of-coffee-2nd-edition?srsltid=AfmBOorkSn2H1hyR4h5Y5AzTyhQeqGVc2w-8IoE9e2B-QZ_67ndjEu7U>. Acesso em: 15 set. 2024.

WINTGENS, J. NICOLAS. Coffee : growing, processing, sustainable production : a guidebook for growers, processors, traders, and researchers. p. 983, 2012.

ZARE, D.; AKBARZADEH, S.; NEMATOLLAHI, M. A.; LOGHAVI, M. Simulation of hot air infrared-assisted green peas drying using finite element method. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, out. 2020.