



PÂMELA CRISTINE AMORIM JOANAS

**SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM TAMBOR ROTATIVO
COM INFRAVERMELHO AUXILIADO POR CONVECÇÃO**

LAVRAS - MG

2022

PÂMELA CRISTINE AMORIM JOANAS

**SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM TAMBOR ROTATIVO COM
INFRAVERMELHO AUXILIADO POR CONVECÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél

LAVRAS - MG

2022

PÂMELA CRISTINE AMORIM JOANAS

**SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM TAMBOR ROTATIVO COM
INFRAVERMELHO AUXILIADO POR CONVECÇÃO**

**DRYING SOYBEANS IN ROTATING DRUM WITH INFRARED ASSISTED BY
CONVECTION**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em:

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél DEG/UFLA

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa DEG/UFLA

Profa. Dra. Suellen Mendonça Nascimento DEG/UFLA

LAVRAS - MG

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me trouxe fé e forças para que eu nunca desistisse mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais que foram a minha base. Em especial a minha mãe, pela amizade, orações e palavras de apoio.

Aos meus irmãos Ueslei, Pierre e Juan pela amizade, apoio e companheirismo para toda vida.

Um agradecimento especial ao meu noivo Daniel pelo apoio e carinho, por acreditar nos meus sonhos, e ser meu companheiro nessa jornada.

À UFLA por proporcionar muito aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

À minha orientadora Lidja, pelo apoio, incentivo, correções e dicas.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa trajetória.

RESUMO

A soja tem recebido grande destaque devido ao seu valor nutricional e sua vasta aplicabilidade na indústria alimentícia. O Brasil é o maior produtor e exportador de soja, respondendo por mais de um terço da produção mundial. O objetivo deste trabalho foi estudar a secagem de grãos de soja utilizando tambor rotativo com radiação infravermelho (IV) com um soprador acoplado, avaliando a influência da fração de enchimento do tambor, intensidade da radiação infravermelho e da presença de suspensores sobre a remoção de umidade. Além disso, visou investigar a produção de estudos na área de secagem híbrida utilizando técnicas de análise bibliométrica. Inicialmente executou-se uma análise bibliométrica da literatura sobre técnicas híbridas de secagem a fim de compreender a relevância dos diferentes parâmetros operacionais envolvidos na secagem. Para isso, fez-se a consulta dos termos “infrared dry*”, “hybrid dry*”, “rotary dry*” e “grain dry*” no campo *Article title, abstract and keywords* da plataforma de dados da Scopus e os dados foram utilizados para criação de mapas bibliométricos por meio do *software* VOSViewer[®]. Foi possível identificar que o Brasil tem se destacado na pesquisa sobre o tema e que trabalhos mais recentes têm tido ênfase na secagem de grãos e eficiência energética. Posteriormente, ensaios de secagem foram realizados conforme um planejamento fatorial 3² com duplicata no ponto central com potências da fonte IV de 141,86; 178,92 e 217,26 W e frações de enchimento do tambor de 10, 20 e 30%, sendo o tempo de secagem (90 min), a velocidade de rotação (11 rpm) e a velocidade do ar (4,9 m/s) mantidos constantes. Tais experimentos foram realizados em duas configurações: com e sem suspensores no tambor rotativo. Os dados obtidos foram analisados tendo como variável resposta o teor de umidade final. Os resultados mostraram que em maiores potências da fonte IV e menores frações de enchimento do tambor rotativo têm-se menores umidades finais. Ademais a presença dos suspensores não influenciou significativamente o teor de umidade final alcançado. O ajuste de modelos para descrição matemática da cinética de secagem mostrou que o modelo Logarítmico foi o mais adequado para representar os dados experimentais nas duas configurações do tambor, apresentando maiores valores de R_a² e menores valores de SQR (<0,0017). Os resultados obtidos foram promissores com relação à viabilidade do secador na remoção da umidade da soja, indicando a relevância de estudos relacionados as técnicas híbridas.

Palavras-chave: suspensores, umidade, secagem híbrida, análise bibliométrica.

ABSTRACT

Soybean has received great attention due to its nutritional value and its wide applicability in the food industry. Brazil is the largest producer and exporter of soybeans, accounting for more than one-third of world production. The objective of this work was to study the drying of soybeans using a rotating drum with infrared radiation with an attached fan, evaluating the influence of the filling fraction, the power of the infrared radiation and the presence of flights on the moisture removal. In addition, it aimed to investigate the production of studies in the area of hybrid drying using bibliometric analysis techniques. Initially, a bibliometric analysis of the literature on hybrid drying techniques was performed in order to understand the relevance of the different operational parameters. For this, the terms "infrared dry*", "hybrid dry*", "rotary dry*" and "grain dry*" were consulted in the Article title, abstract and keywords field of the Scopus data platform and the data were used to create bibliometric maps using the VOSViewer© software. It was possible to identify that Brazil has stood out in research on the subject and that more recent works have focused on grain drying and energy efficiency. Subsequently, drying experiments were performed according to a 3² factorial design with duplicate in the central point with IR source powers of 141.86; 178.92 and 217.26 W and filling fractions of 10, 20 and 30%, being the drying time (90 min), rotation speed (11 rpm) and air velocity (4.9 m/s) held constant. These experiments were performed in two configurations: with and without flights on the rotating drum. The data obtained were analyzed with the final moisture content as the response variable. The results showed that at higher IR powers and lower filling fractions, the final moisture content is lower. Furthermore, flights did not significantly influence the final moisture content reached. The adjustment of models for the mathematical description of drying kinetics showed that the Logarithmic model was the most appropriate to represent the experimental data in both drum configurations, presenting higher R_a² values and lower SQR values (<0.0017). The results obtained were promising regarding the feasibility of the dryer in removing moisture from soybeans, indicating the relevance of studies related to hybrid techniques.

Keywords: flights, moisture content, hybrid drying, bibliometric analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Tipos mais comuns de suspensores em secadores rotativos.....	9
Figura 2– Diferentes definições de transição entre os regimes de Catarateamento e Centrifugação: (a) quando todas as partículas formam um anel e (b) quando somente a camada mais externa do leito forma um anel.....	11
Figura 3 – Grãos de soja <i>in natura</i>	13
Figura 4 – Amostras no banho termostatizado.	14
Figura 5 – Unidade Experimental.	15
Figura 6 – Tambor rotativo (a) visão lateral e (b) visão frontal.....	16
Figura 7– Representação esquemática dos suspensores retos.....	17
Figura 8 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves – termo de busca “infrared dry*”.	20
Figura 9 – Publicações por países – termo de busca “infrared dry*”.....	21
Figura 10 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves – termo de busca: “hybrid dry*”.....	22
Figura 11– Publicações por países - termo de busca “hybrid dry*”.....	23
Figura 12 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves - termo de busca “grain dry*”.....	24
Figura 13 – Publicações por países – termo de busca “grain dry*”.....	24
Figura 14 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves – pesquisa “rotary dry*”.....	25
Figura 15 – Publicações por países – pesquisa “rotary dry*”.....	26
Figura 16 – Superfícies de resposta para o teor de umidade final em função da fração de enchimento e potência IV (a) sem e (b) com suspensores no tambor.....	30
Figura 17– Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem realizada em diferentes potências IV e frações de enchimento no tambor sem suspensores.....	32
Figura 18 – Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem realizada em diferentes potências IV e frações de enchimento no tambor com suspensores.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Densidade aparente e porosidade dos grãos de soja obtidos na literatura.	4
Tabela 2 – Principais regimes de escoamento em tambores rotativos.	11
Tabela 3 – Dimensões do Cilindro (cm).	16
Tabela 4 – Níveis das variáveis estudadas no planejamento experimental (3k).	17
Tabela 5 – Modelos ajustados aos dados obtidos.	18
Tabela 6 – Teor de umidade final da soja atingido através da secagem em diferentes frações de enchimento do tambor e de potência IV, sem e com a presença de suspensores.	27
Tabela 7 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) da fração de enchimento do tambor e de potência IV sobre o teor de umidade final da soja, sem e com a presença de suspensores.	28
Tabela 8 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) considerando como variáveis independentes a fração de enchimento do tambor, a presença de suspensores e a potência IV sobre o teor de umidade final da soja.	30
Tabela 9 – Parâmetros de ajuste dos modelos de Newton, Henderson e Pabis e Logarítmico.	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivos Específicos	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Análise Bibliométrica.....	3
2.2 Soja	3
2.3 Secagem.....	4
2.4 Umidade de Equilíbrio	6
2.5 Secagem via radiação infravermelho	6
2.6 Secagem IV híbrida.....	7
2.7 Tambor rotativo	8
2.8 Regimes de Escoamento	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Material.....	13
3.2 Reumidificação	13
3.3 Análise Bibliométrica.....	14
3.4 Aparato experimental.....	15
3.5 Ensaio de secagem	17
3.6 Cinética de secagem	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
4.1 Análise Bibliométrica.....	20
4.2 Secagem híbrida dos grãos de soja	27
4.3 Cinética de Secagem	33
5 CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
ANEXO A	42

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca no cenário de produção agrícola mundial, principalmente na produção de grãos. A estimativa da produção de grãos da safra 2021/22 é de 284,4 milhões de toneladas, apresentando um crescimento de 12,5% ou 31,6 milhões de toneladas superior à safra 2020/21 (CONAB, 2022). A soja é a principal cultura de grãos do país, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial (CONAB, 2022; NEPOMUCENO *et al.*, 2021). De acordo com Conab (2022), a safra 2021/22 apresentará um aumento de 3,8% na área de plantio em relação à safra anterior, continuando a tendência de crescimento das últimas safras e a estimativa de produção é de 140,5 milhões de toneladas de soja.

Apesar da crescente produção de grãos, as perdas nos processos de colheita, e pós-colheita ainda são consideráveis. A maior parte da produção brasileira de grãos é proveniente de pequenos e médios produtores. Nesse segmento produtivo, para a armazenagem, são utilizados depósitos, galpões ou paióis tecnicamente deficientes, que estão sujeitos a intensos ataques de insetos, ácaros, roedores e fungos (ELIAS *et al.*, 2017). Estima-se que no Brasil 20% da produção anual de grãos, é perdida entre a colheita e o armazenamento e que metade dessa perda é devida ao ataque de pragas durante a estocagem (CAMPOS, 2008).

Entre outros fatores que influenciam tamanha perda pode-se citar a taxa de umidade do grão, temperatura, umidade relativa do ar, impurezas, condições e tempo de armazenamento, teor de grãos fraturados, presença de insetos, microrganismos e fungos entre outros. Logo, é evidente a necessidade de conhecimentos sobre conservação de grãos quando são analisadas as potencialidades brasileiras de produção agrícola e são verificadas as elevadas perdas de grande parte do que se produz, em função da falta e/ou inadequação tecnológica da infraestrutura de unidades de secagem e armazenamento (ELIAS *et al.*, 2017).

A secagem é a etapa do processamento em que se remove a umidade do material, o que inibe a atividade microbiana e enzimática, visando a conservação dos grãos durante as etapas subsequentes do beneficiamento, armazenamento e comercialização (ELIAS *et al.*, 2017). O tambor rotativo é muito utilizado para secagem industrial devido à sua alta capacidade de processamento. A dinâmica de mistura no equipamento é um dos principais fatores responsáveis pela taxa de transferência de calor entre os sólidos. O estudo do comportamento

fluidodinâmico de secadores rotatórios pode ser feito de diferentes maneiras: no nível do tambor rotatório inteiro, dos suspensores, e das interações partícula-partícula.

O secador infravermelho (IV) possui, como vantagens, alta eficiência em converter energia elétrica em térmica, o aquecimento uniforme do material, o produto final apresenta uma baixa deterioração, possui uma grande facilidade de controle, além do que, os secadores IV apresentam uma longa vida útil e baixo custo de manutenção (ANDRADE, 2017).

Diante deste contexto, visando aproveitar a eficiente capacidade de desidratação via radiação IV com o potencial de mistura do tambor rotativo, esse trabalho visa à aplicação das duas técnicas em conjunto.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial de secagem dos grãos de soja no sistema composto por um secador de tambor rotativo exposto a uma fonte de radiação infravermelho e acoplado a um ventilador compondo um sistema híbrido. Além disso, visou investigar a produção de estudos na área de secagem híbrida utilizando técnicas de análise bibliométrica.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Delinear o estado da arte relativo ao tema de técnicas híbridas de secagem envolvendo a secagem infravermelho e a secagem em tambor rotativo empregando técnicas de análise bibliométrica;
- Avaliar o efeito da fração de enchimento do tambor e da intensidade da radiação IV sobre a remoção de umidade dos grãos de soja durante a secagem empregando o sistema híbrido;
- Analisar a influência da presença de suspensores no tambor sobre a remoção de umidade;
- Descrever matematicamente o comportamento cinético da secagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Análise Bibliométrica

A bibliometria é um método de análise quantitativa para a pesquisa científica. Os dados elaborados por meio dos estudos bibliométricos mensuram a contribuição do conhecimento científico derivado das publicações em determinadas áreas (SOARES et al., 2016). Os métodos bibliométricos são uma ajuda útil nas revisões de literatura antes mesmo do início da leitura, orientando o pesquisador para os trabalhos mais influentes e mapeando o campo de pesquisa sem viés subjetivo (ZUPIC e ČATER, 2015).

Para Zupic e Čater (2015), os cinco principais métodos de análise são: citação, cocitação, acoplamento bibliográfico, coautoria e coocorrência. Os três primeiros usam dados de citação para construir medidas de influência e similaridade (tendo como unidades de análise documento, autor e o jornal). O penúltimo mede a colaboração por meio dos dados de coautoria (sendo a unidade de análise o autor) e o último busca conexões entre palavras encontradas nos títulos, palavras-chave ou resumos dos documentos (unidade de análise as palavras).

A utilização de *softwares* para otimizar a análise bibliométrica tem sido empregada. Uma dessas ferramentas é o VOSViewer©, que realiza a criação de mapas baseados em dados de rede e é utilizado para visualizar e explorar esses mapas.

Na visualização de rede, os itens são representados por círculos ou rótulos. O tamanho da etiqueta e o círculo de um item são determinados pelo peso do item. Quanto maior o peso de um item (número de documentos e citações efetuadas), maior o círculo do item. A cor de um item é determinada pelo *cluster* ao qual o item pertence. As linhas entre os itens representam *links*. E quanto mais próximos dois *clusters* estão localizados entre si, mais fortes são suas relações (VAN ECK e WALTMAN, 2019).

2.2 Soja

O Brasil é o principal produtor e exportador de soja, respondendo por mais de um terço da produção mundial. A produção da soja está entre as atividades econômicas de maior destaque nas últimas décadas. Esse crescimento pode ser atribuído à sólida estruturação no mercado internacional, consolidação da oleaginosa como importante fonte de proteína vegetal, alta demanda dos setores ligados à produção de produtos de origem animal e novas tecnologias aplicadas ao setor agrícola. Nos últimos trinta anos, a soja passou a ser um dos grãos mais

produzidos e consumidos no mundo, perdendo apenas para o trigo, milho e arroz (USDA, 2022; HIRAKURI e LAZZAROTTO, 2014; ESPÍNDOLA e CUNHA, 2015).

A soja e os seus produtos vêm sendo amplamente estudados devido não somente ao seu valor nutricional, mas também devido às suas propriedades funcionais na indústria de alimentos, pois, exerce ação moduladora em determinados mecanismos fisiológicos através de suas proteínas e isoflavonas (CIABOTTI et al., 2006). Para Grieshop e Fahey (2001), a soja é basicamente composta por água (7,89 a 14,89%), proteínas (39,39 a 42,32%), lipídios (18,02 a 19,75%), fibras (11,50 a 17,13%) e minerais (4,97 a 5,21%).

Segundo o Senar (2018), a umidade recomendada para a colheita dos grãos de soja é de 16 a 18%, sendo 16% a umidade ideal. Para uma armazenagem segura da soja por um período de um ano, recomenda-se de 11 a 12% de teor de umidade, e de 9 a 10% se o período girar em torno de cinco anos, ambos em base úmida (b.u.). Para se ter uma boa competitividade no mercado e atrair os comerciantes, os grãos devem apresentar algumas características: baixo teor de umidade e impurezas, uniformidade, número mínimo de grãos com rachaduras, baixo teor de deformidades (descoloridos, danificados pelo calor, etc.) entre outros.

Tabela 1– Densidade aparente e porosidade dos grãos de soja obtidos na literatura.

	Literatura
Densidade Aparente (g/cm ³)	(0,63– 0,64) ²
	(0,710– 0,720) ³
	(0,708) ⁴
	(0,695 – 0,720) ¹
Porosidade (%)	(38 – 39) ²
	(42 – 43) ³
	(37) ⁴

Fonte: ¹ HAUTH et al. (2018); ²SHIRKOLE et al. (2011); ³RIBEIRO et al. (2005); ⁴DESHPANDE et al. (1993).

2.3 Secagem

A secagem consiste na redução da umidade de um produto até o nível adequado para sua estocagem, a fim de garantir sua qualidade. Na pós-colheita, a prática objetiva manter a qualidade durante o período de armazenamento, além da vantagem de diminuição de massa e volume. Segundo Celestino (2010), o processo de secagem convectiva utiliza ar quente para a transferência de calor para o alimento e a consequente vaporização da água contida nele, ocorrendo desidratação.

A secagem natural é o processo que consiste na exposição do grão úmido ao sol e ao vento, ou sua permanência em um ambiente seco, permitindo ao produto ceder ao ar uma parte da água em excesso. Apesar de possuir um baixo custo, não expor o grão a temperatura muito alta e não causar estes danos mecânicos, este tipo de secagem é muito limitada pelas condições do ar, tornando-se um processo muito lento, de modo que os grãos permanecem por muito tempo com umidade elevada. O método de secagem natural, portanto, não é aconselhado por ser um processo lento de remoção de umidade, que demanda extensa área de secagem e depende das condições climáticas locais. Além disso, a exposição do material ao ambiente pode facilitar a contaminação do produto por micro-organismos, insetos e impurezas (SILVA,2021; BOERI, 2007).

A secagem artificial, por sua vez, possibilita uma rápida remoção parcial da umidade, evitando alterações fisiológicas, e consiste, principalmente, na ventilação de ar aquecido ou não através do produto. A secagem artificial que utiliza um fluxo forçado de ar aquecido é um método que permite o controle dos parâmetros fundamentais que garantem a eficiência do processo de secagem, que são a temperatura e a vazão do ar de secagem, e o tempo de exposição do grão ao ar aquecido. Se trata de uma maneira mais ágil de redução do teor de água dos produtos agrícolas para o armazenamento seguro, apesar de ser uma operação que demanda elevado consumo energético e conseqüentemente um custo excessivo (LEMES,2016; BORTOLAIA, 2011; MÖHLER, 2010). Segundo Brooker et al. (1992) mais de 60% de toda a energia utilizada ao longo da cadeia produtiva dos grãos é empregada na secagem.

De Oliveira et al. (2012) realizaram a secagem de grãos de milho utilizando uma estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 40, 55, 70, 85 e 100 °C, até atingirem o teor de água de $0,149 \pm 0,009$ (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). O objetivo deste trabalho foi ajustar os modelos matemáticos aos dados experimentais. Dentre os modelos analisados o modelo de Newton apresentou o melhor ajuste para descrever os modelos de secagem.

Pohndorf et al. (2019) realizaram um estudo da influência da temperatura e velocidade do ar de secagem na qualidade dos grãos de pipoca vermelha (qualidade do estouro dos grãos e teor de β -caroteno). A secagem foi avaliada nas temperaturas de 40, 70 e 100°C e a velocidade do ar em 0,5, 1,5 e 2,5 m/s. Ambas as variáveis, temperatura e velocidade do ar, tiveram um efeito significativo no rendimento de estouro, tempo de expansão e teor de β -caroteno.

2.4 Umidade de Equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio corresponde à razão entre as pressões de vapor de água em um material e na vizinhança, quando este é submetido a uma determinada temperatura e pressão. Este parâmetro determina o teor de umidade que o grão pode atingir durante uma certa atividade, já que ele não pode perder uma quantidade de água maior que aquela em equilíbrio com o ar de secagem, isto é, não pode apresentar um teor de umidade menor que o de equilíbrio (BOERI,2007).

Na literatura encontram-se diversas correlações empíricas e semi-empíricas que foram desenvolvidas para determinação da umidade de equilíbrio, como por exemplo a Equação 1, proposta por Dalpasquale (1981) para determinação do teor de umidade de equilíbrio da soja. Na literatura, essa correlação foi utilizada para a determinação do teor de umidade de equilíbrio da soja nos trabalhos de Bortolaia (2011), Bihain (2011), Boeri (2007), dentre outros.

$$X_{eq} = \frac{3,962 \cdot UR^{0,4919}}{100 \cdot \ln(T)} \quad (1)$$

em que X_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio do material (base seca), UR é a umidade relativa percentual do ar de secagem e T é a temperatura do ar de secagem (°C).

2.5 Secagem via radiação infravermelho

A radiação é o modo pelo qual energia (calor) é transferida de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa sem que haja entre tais superfícies um meio interveniente, ou seja, a energia pode percorrer espaços em que há somente vácuo entre os corpos. A energia transferida desta maneira é chamada radiação térmica e sua transferência ocorre sob a forma de ondas eletromagnéticas (OLIVEIRA, 2009).

O comprimento de onda da radiação depende da natureza e da temperatura da fonte de aquecimento. Todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica. A faixa de comprimento de onda da radiação térmica varia entre 0,1 e 100 μm . A radiação infravermelha é, convencionalmente, classificada como: IV próximo (0,75-3 μm), IV médio (3-25 μm) e IV distante (25-100 μm) (ANDRADE, 2017).

Na secagem via radiação infravermelho, o calor é transferido para o material a ser seco na forma de energia eletromagnética. A determinação, no espectro, do comprimento de onda de uma radiação depende da natureza e da temperatura da fonte de calor. Esse método de secagem

envolve o uso de fontes de radiação infravermelho, tais como lâmpadas elétricas especiais e painéis cerâmicos ou metálicos aquecidos por eletricidade ou gás (RATTI e MUJUMDAR, 2006; NINDO e MWITHIGA, 2011).

O material a ser seco constitui-se no absorvedor da radiação. Segundo Costa (2010), ao desenvolver um modelo para descrever a transferência de calor e massa durante o aquecimento de sementes de oleaginosas submetidas à radiação infravermelho, assume-se que as sementes são opacas à radiação e, portanto, a radiação é convertida em calor na superfície do material. A irradiação IV penetra cerca de 1 mm abaixo da superfície do material. Abaixo desta camada até o núcleo, o calor é transferido por condução.

A secagem IV é, portanto, um método que apresenta menor perda de energia quando comparado com a secagem com ar quente, já que a energia em onda eletromagnética é absorvida diretamente pelo produto sem aquecer o ar circundante de modo que o material é aquecido rapidamente e de maneira uniforme (MONGPRANEET et al., 2002; SWASDISEVI et al., 2007).

Park (2018) estudou a secagem da soja em modo contínuo e intermitente. Estipulou-se um teor de umidade alvo de 7,7% e os grãos de soja tiveram seu teor de umidade inicial ajustado para 22%. As condições de secagem consideradas foram: velocidade do ar de secagem fixado em 3 m s^{-1} nas temperaturas de 35, 40 e 45 °C e tempo de secagem de 600 min com pesagem a cada 30 min (na secagem contínua não houve interrupções) e intermitência de 30 minutos (em que a amostra era colocada no dessecador). A secagem intermitente se mostrou mais efetiva que a secagem contínua, alcançando menor teor de umidade na faixa investigada e fornecendo grãos de soja com menor porcentagem de fissuras no teor de umidade alvo (7,7%). O modelo de Midilli apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

2.6 Secagem IV híbrida

A secagem híbrida consiste na aplicação de mais de um método de secagem, simultaneamente com a finalidade de intensificar as transferências de calor e massa, melhorar a qualidade do produto, como também reduzir os custos do processo (ANDRADE, 2017). A combinação de infravermelho (IV) e secagem por convecção (CD) de alimentos surgiu como uma alternativa viável em comparação a outros métodos de secagem devido ao efeito sinérgico que leva à redução do tempo de secagem e maior eficiência (ONWUDE et al., 2019).

A utilização combinada da secagem convectiva e da radiação infravermelho em grãos de *Moringa oleifera Lam* foi estudada por Nascimento (2014). As condições de secagem consideradas foram: temperatura de 30-60 °C, velocidade do ar de 0,55-1,05 m s⁻¹, tempo de aplicação da radiação IV de 2-5 min e intensidade da radiação IV de 1500-4500 W. O aumento na intensidade de radiação infravermelho gerou um decréscimo do tempo de secagem e o aumento do tempo de aplicação da radiação levou ao aumento na taxa de secagem. Assim a associação da radiação IV à secagem convectiva contribuiu para uma redução no tempo total de secagem. O modelo de Midilli apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

El-Mesery et al. (2021) realizaram o estudo da secagem das fatias de maçã em um secador híbrido (infravermelho-convectivo). Este teve como objetivo avaliar o impacto da temperatura do ar e intensidade do infravermelho na cinética, consumo específico de energia e qualidade das fatias de maçã seca. Fatias de maçã de 2 mm de espessura foram secas com intensidade do IV de 0,15, 0,2 e 0,3W/cm² com temperaturas do ar convectivo de 30, 40 e 50°C. O consumo energético foi menor em uma temperatura do ar de 50°C e intensidade do IV de 0,30W/cm².

Andrade (2017) realizou o estudo da secagem infravermelho (operando nos modos contínuo, intermitente e assistido por convecção) de amêndoas de cacau avaliando a influência das condições operacionais na qualidade do fruto e no consumo energético dos sistemas de secagem. A secagem foi realizada com temperaturas da fonte de 75, 100 e 125°C. Além do modo contínuo, a secagem intermitente em tempos de 5, 10 e 15 minutos e a secagem híbrida (assistida por convecção) com velocidades do ar de 1, 2 e 3 m/s foram investigadas. A utilização do modo intermitente e híbrido reduziu a resistência interna à transferência de massa, comprovando a intensificação na taxa de secagem com a aplicação dos tratamentos, refletindo na redução do consumo energético.

2.7 Tambor rotativo

Os tambores rotativos consistem em um cilindro que gira em torno do seu próprio eixo de modo a proporcionar a movimentação de partículas. Os dispositivos baseados nessa configuração são amplamente utilizados para o processamento de materiais granulares nas indústrias farmacêutica, mineral, alimentícia, cerâmica e de cimento, nos quais são utilizados para promover a secagem, aquecimento, mistura, dentre outras aplicações (CHOU e HSIAU, 2012).

A fração de enchimento caracteriza a porção do volume do tambor rotativo que é ocupada, expressa em porcentagem volumétrica. A massa utilizada nos procedimentos pode ser calculada pela Equação 2 (RAMADAN, 2017).

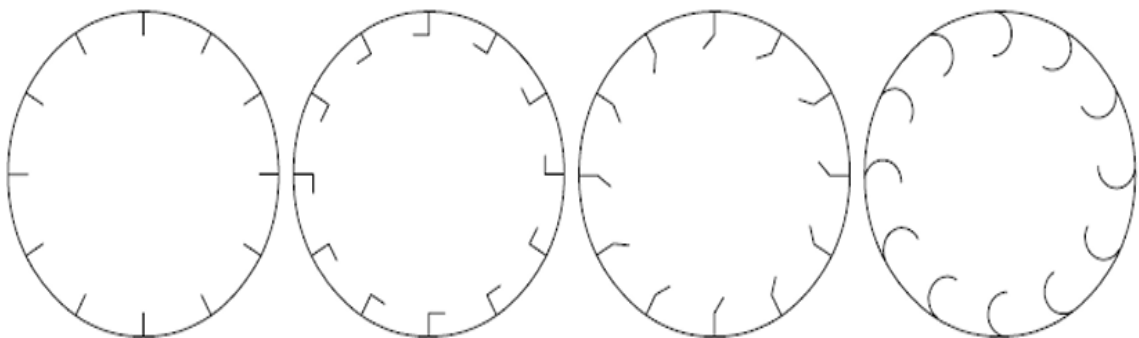
$$m = \pi \frac{d^2}{4} l (1 - \varepsilon) \rho_s f \quad (2)$$

em que d , l , ε , ρ_s , e f representam o diâmetro interno do tambor rotativo, o comprimento, a porosidade do leito, a densidade aparente da partícula e o grau de enchimento do tambor, respectivamente.

Para promover o contato entre o gás quente e os sólidos úmidos em secadores rotatórios convencionais, existem suspensores (*flights*) localizados na parte interna do tambor que carregam as partículas e as lançam através da corrente de ar quente, aumentando a taxa de transferência de calor e massa entre o fluido e o sólido (NASCIMENTO, 2014).

Os suspensores são os responsáveis por promover o cascadeamento do material. No cascadeamento, o sólido úmido é alimentado até a parte mais elevada do tambor e cai, e enquanto o tambor permanece em rotação, o sólido que se encontra no fundo do tambor é coletado e transportado até a parte superior, ocorrendo então a cascata de sólido. O material percorre o secador em movimentos giratórios de uma extremidade para a outra por ação da gravidade, enquanto o ar escoar na direção longitudinal e atravessa esta cascata, promovendo a secagem (FREITAS, 2015). Na Figura 1 são apresentados alguns tipos de suspensores comumente usados em secadores rotativos.

Figura 1– Tipos mais comuns de suspensores em secadores rotativos.



a) suspensores retos b) suspensores ângulo reto c) suspensores angulares d) suspensores helicoidais

2.8 Regimes de Escoamento

O número de Froude (F_r) é um parâmetro adimensional que relaciona a força centrífuga e a aceleração gravitacional, conforme descrito pela Equação 3 (MELLMANN, 2001).

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (3)$$

em que ω , R e g representam, velocidade angular de rotação, raio interno do tambor rotativo e aceleração da gravidade, respectivamente.

A dinâmica das partículas no interior de tambores rotativos pode descrever diferentes regimes de escoamento, conforme disposto na Tabela 2.

Baixas velocidades de rotação combinadas com uma parede lisa do tambor induzem a ocorrência dos regimes de deslizamento e caimento. O regime de Deslizamento é caracterizado por um leito de material estático deslizando sobre a parede do tambor sem nenhum grau de mistura entre as partículas. No regime de Caimento, um certo grau de mistura é alcançado em virtude das constantes ‘avalanches’ que ocorrem no leito de material após atingir um ângulo de repouso crítico (SCATENA et al., 2015).

À medida que a velocidade de rotação do tambor aumenta, ocorre a transição para o regime de Rolamento. Este regime apresenta uma superfície de leito plana com uma inclinação constante, caracterizando o ângulo de repouso dinâmico do material. A superfície do leito começa a “arquear”, apresentando formato de “feijão”, com um maior aumento da velocidade de rotação, correspondendo ao regime de Cascadeamento. Em altas velocidades de rotação, o regime de Catarateamento é observado, em que as partículas começam a serem lançadas do leito de material para o espaço vazio do tambor (MELLMANN, 2001; JUAREZ et al., 2011).

Para Watanabe (1999), a velocidade crítica necessária para atingir o regime de Centrifugação pode ser definida de duas maneiras: a velocidade crítica é alcançada quando todas as partículas são lançadas de encontro à parede do tambor formando um único anel (Figura 2a); ou quando apenas a camada mais externa do leito de material forma um anel (Figura 2b).

Figura 2– Diferentes definições de transição entre os regimes de Catarateamento e Centrifugação: (a) quando todas as partículas formam um anel e (b) quando somente a camada mais externa do leito forma um anel.

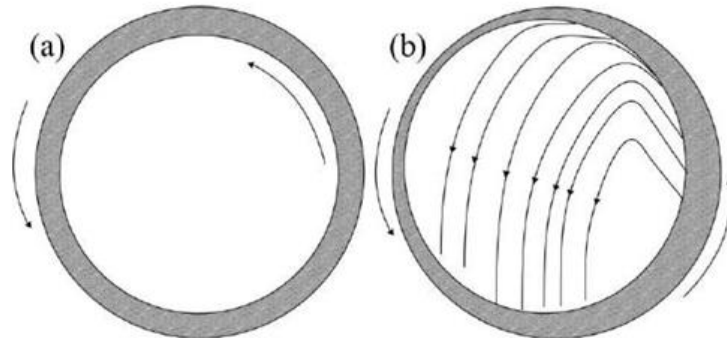


Tabela 2 – Principais regimes de escoamento em tambores rotativos.

Regime	Faixa de Número de Froude	Grau de Enchimento do tambor	Esquema
Deslizamento	$0 < F_r < 10^{-4}$	$f < 0,1$	
“Avalanche” ou Caimento	$10^{-5} < F_r < 10^{-3}$	$f < 0,1$	
Rolamento	$10^{-4} < F_r < 10^{-2}$	$f > 0,1$	
Cascadeamento	$10^{-3} < F_r < 0,1$	$f > 0,1$	
Catarateamento	$0,1 < F_r < 1$	$f > 0,2$	
Centrifugação	$F_r \geq 1$	$f > 0,2$	

Fonte: Adaptado de MELLMANN, 2001.

Kaveh et al. (2021) realizaram a secagem de terebinto com a utilização combinada do tambor rotativo e infravermelho. Os experimentos de secagem foram realizados em três níveis de potência 250, 500 e 750 W e em três níveis de velocidade de rotação do tambor 5, 10 e 15 rpm. As variáveis respostas analisadas foram o tempo de secagem, a difusividade efetiva, retração, mudança de cor, taxa de reidratação, conteúdo fenólico total e atividade antioxidante. Os resultados mostraram que a potência IV é o principal parâmetro de processo em termos de qualidade e tempo de secagem. Com o aumento da radiação infravermelho e velocidade de rotação do tambor, o tempo de secagem, taxa de reidratação, atividade antioxidante e fenólicos totais diminuíram, enquanto os demais parâmetros foram aumentados. As condições ótimas de secagem do terebinto foram potência IV de 250 W e velocidade de rotação de 5 rpm. Estes valores foram considerados devido aos bons resultados nas variáveis resposta analisadas.

A utilização combinada da secagem em tambor rotativo e micro-ondas de resíduos de acerola foi estudada por Ramadan (2017). As condições de secagem consideradas foram: velocidade de rotação de 15, 30 e 45 rpm e potência de 200, 300 e 400 W. O tempo de secagem de 34 minutos e o grau de enchimento do tambor de 13% foram mantidos constantes. Observou-se que, quanto maior a potência, maior a quantidade de água evaporadora. O sistema permitiu obter produtos com baixos teores de umidade, possibilitando o armazenamento apropriado do material.

Perazzini et al. (2022) estudaram a biomassa de resíduos cítricos em um secador rotativo semi-industrial. O principal objetivo foi determinar a condição operacional com maior eficiência energética de secagem. Os experimentos foram realizados sob diferentes vazões de massa sólida (0,2 e 0,4 kg/min), velocidades do ar de entrada (1 e 2 m/s) e temperaturas (135, 145 e 155 °C). Como resultado, os autores obtiveram eficiência energética média de 13,1%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Transporte, localizado no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

Nos experimentos de secagem foram utilizados grãos de soja, cedidos pelo professor Adriano Teodoro Bruzi do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras. O material foi dividido em embalagens de 0,5 kg e armazenadas em *freezer* a -4°C . Para ser utilizada nas etapas experimentais, a soja era retirada do freezer com 24 horas de antecedência e colocadas na geladeira. Na Figura 3 são apresentados os grãos de soja.

Figura 3 – Grãos de soja *in natura*.



Fonte: Da autora (2022).

3.2 Reumidificação

Os grãos foram adquiridos com umidade inicial de 10% (b.s.) devido à dificuldade de obtenção de grãos recém-colhidos. Então procedeu-se a reumidificação dos grãos por meio da absorção do vapor d'água saturado em ambiente fechado até atingirem a umidade inicial desejada.

Os grãos de soja foram expostos ao vapor d'água em um ambiente fechado e saturado a 35°C, por 24 horas. O equipamento utilizado para promover essas condições foi um banho termostaticado (Figura 4), em que a soja foi disposta sobre uma tela (em uma camada de aproximadamente 2 cm) para evitar o contato direto dos grãos com a água e facilitar a transferência de massa (HAMM,2013; SOUZA,2013). Após o processo de reumidificação, a soja atingiu umidade inicial média de $24,01 \pm 1,43\%$ b.s..

Figura 4 – Amostras no banho termostaticado.



Fonte: Da autora (2022).

3.3 Análise Bibliométrica

Para realizar um estudo bibliométrico sobre a secagem híbrida, procedeu-se uma pesquisa na plataforma Scopus, visto que ela oferece um panorama abrangente da produção de pesquisas no mundo disponibilizando ferramentas inteligentes para monitorar, analisar e visualizar pesquisas (ELSEVIER, 2022).

A consulta na base Scopus foi realizada no dia 01 de agosto de 2022 com os termos “infrared dry*”, “hybrid dry*”, “rotary dry*” e “grain dry*” no campo *Article title, abstract and keywords*. Posteriormente, foi feita uma busca com o tema de pesquisa deste trabalho “Infrared dry*” AND “Rotary dry*”. Nas consultas foi aplicada a restrição para área da Engenharia Química.

O banco de dados provenientes das pesquisas foi extraído no formato csv e utilizado para a criação de mapas com o auxílio do *software* VOSViewer[®]. Para a criação dos mapas usou-se a opção “Create”, em seguida “Create a Map Based on Bibliographic Data” e depois,

“Read Data from Bibliographic Database File”. Fez-se, então, a seleção do arquivo da base que foi utilizada (no caso, Scopus) e, posteriormente, realizou-se a escolha da análise que seria realizada (coocorrência de palavras-chave), aplicando - se as restrições relacionadas a essa análise (SZERMAN, 2021).

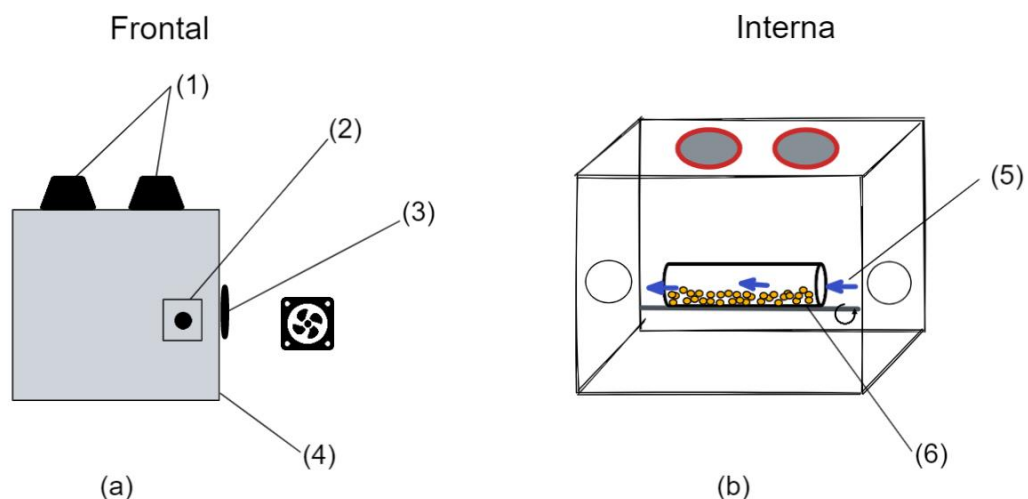
Após a escolha do número de ocorrências mínima das palavras-chave foram retiradas aquelas que não possuíam correlação com o tema da busca.

Como forma de visualização dos *clusters* formados foi selecionado o gráfico de evolução temporal (“Overlay Visualization”), que possibilita uma avaliação temporal com cores diferentes, em que, as cores frias indicam documentos mais antigos e as cores quentes, os mais recentes.

3.4 Aparato experimental

A secagem dos grãos de soja reumidificados foi conduzida em um secador de tambor rotativo exposto a duas lâmpadas refletoras incandescentes de infravermelho Ourolux de 250 W conforme esquematizado na Figura 5. Na Figura 5a, é possível visualizar os suportes das lâmpadas (1), o controle de rotação do cilindro (2), o ventilador (3) e a câmara de secagem (4). Na Figura 5b, tem-se a vista interna do secador com a representação dos eixos de rotação do tambor (5) e o fluxo de ar do soprador (6). Também é possível visualizar as duas lâmpadas e as perfurações circulares nas laterais, sendo que, em um dos lados foi incorporado o ventilador.

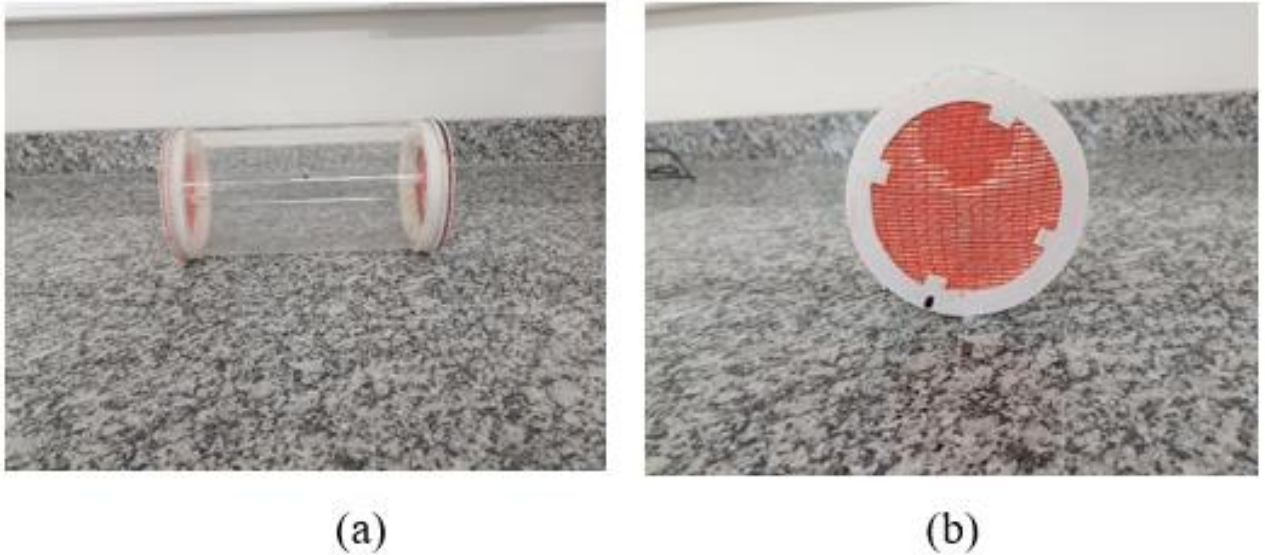
Figura 5 – Unidade Experimental.



Fonte: Da Autora (2022)

O tambor rotativo foi confeccionado em acrílico (conforme Figura 6), sendo que nas laterais possui abertura do tipo tela que permite a saída da umidade, conforme dimensões apresentadas na Tabela 3.

Figura 6 – Tambor rotativo (a) visão lateral e (b) visão frontal.



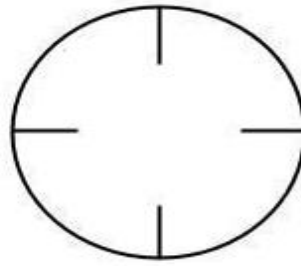
Fonte: Da Autora (2022).

Tabela 3 – Dimensões do Cilindro (cm).

Diâmetro Interno	10,7
Diâmetro Externo	12,0
Comprimento	22,5
Espessura da Tampa	1,7
Diâmetro da Tampa	12,7

O tambor possui quatro suportes em cada tampa (cada suporte tem as seguintes dimensões: 1,2 x 1,0 x 1,6 cm), conforme ilustrado na Figura 7, que permitem o acoplamento de suspensores. No interior do tambor, foram dispostos 4 suspensores retos confeccionados em acrílico.

Figura 7– Representação esquemática dos suspensores retos.



Fonte: Da Autora (2022).

3.5 Ensaio de secagem

Nos dias de realização dos ensaios de secagem, a temperatura e a umidade relativa do ar foram obtidas no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A temperatura esteve entre 8,8 e 17°C e a umidade entre 48 e 90%.

Para avaliar o efeito da potência da lâmpada infravermelho e da fração de enchimento do tambor sobre o teor de umidade final dos grãos, essas variáveis foram estudadas em 3 níveis conforme mostrado na Tabela 4. Utilizou-se um planejamento fatorial do tipo 3^k , com 2 variáveis e 2 réplicas no ponto central, totalizando 11 experimentos.

Tabela 4 – Níveis das variáveis estudadas no planejamento experimental (3^k).

	-1	0	+1
Potência da Radiação IV (W)	141,86	178,92	217,26
Fração de Enchimento (%)	10	20	30

Cada experimento foi realizado em duas configurações do tambor rotativo, sem a presença dos suspensores no tambor rotativo e com os suspensores.

Para o carregamento do tambor, calculava-se a massa de sólidos utilizando a Equação 2 considerando a porosidade e a massa específica aparente de 39% e 0,720 g/cm³, que são valores médios obtidos na literatura (ver Tabela 1). Posicionando-se o tambor carregado no secador, eram então reguladas a velocidade do ar (4,9 m/s) e a velocidade de rotação do tambor (11 rpm) e posteriormente a potência das lâmpadas até a condição desejada. O tempo de secagem foi de 90 minutos. A velocidade de rotação do tambor, a velocidade do soprador e o tempo de secagem foram escolhidos em testes preliminares que demonstraram limitações operacionais no equipamento em tempos superiores a 90 minutos.

Durante os ensaios, realizou-se a pesagem do tambor rotativo em intervalos de 10 minutos. Para determinação do teor de umidade nos grãos de soja foi utilizado o método padrão de estufa ($105 \pm 3^\circ\text{C}$) durante 24h (BRASIL, 2009). De posse dos dados de massa obtidos, calculou-se o teor de umidade em base úmida e o adimensional de umidade (XR) de acordo com as Equações 9 e 10, respectivamente (NOGUEIRA, 2016).

$$X = \frac{(m - m_c) - (m_0 - m_c) \left(1 - \frac{X_0}{100}\right)}{m - m_c} 100 \quad (4)$$

em que m = massa da amostra e do tambor rotativo; m_c = massa do tambor rotativo e m_0 = massa inicial da amostra.

$$XR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \approx \frac{X}{X_0} \quad (5)$$

em que: X = teor de umidade do material (base seca); X_{eq} = teor de umidade de equilíbrio do material (base seca) e X_0 = teor de umidade inicial do material (base seca).

Considerou-se que o valor de X_{eq} é negligenciável em comparação com X ou X_0 e, assim, este não foi levado em consideração durante o uso da Equação 5 (MARCINKOWSKI, 2006). Essa consideração também foi feita nos trabalhos de El-Mesery et al. (2022), Onwude et al. (2019), Bagheri e Kashaninejad (2018) para a secagem combinando sistemas IV e aquecimento a ar quente para secar frutas, grãos e vegetais, respectivamente.

3.6 Cinética de secagem

Os modelos matemáticos de Newton, Henderson e Pabis e Logarítmico (Tabela 5), foram ajustados aos dados experimentais de XR em função do tempo, utilizando o *software* Statistica. Estes modelos são comumente utilizados para descrever a secagem de produtos agrícolas (NASCIMENTO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2012; ARAÚJO et al., 2021).

Tabela 5 – Modelos ajustados aos dados obtidos.

Modelo	Equação
Newton	$XR = e^{-kt}$ (6)
Henderson e Pabis	$XR = ae^{-kt}$ (7)
Logarítmico	$XR = ae^{-kt} + c$ (8)

em que a , c , e k são coeficientes dos modelos e t é o tempo de secagem (min)

A adequação dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) e da soma dos quadrados dos resíduos (SQR). Estes foram calculados de acordo com as Equações 10 e 11, respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$$R_a^2 = \frac{(n-1)R^2 - k}{n-1-k} \quad (10)$$

$$SQR = \sum (XR_{exp} - XR_{pred})^2 \quad (11)$$

em que n , k , R^2 , XR_{exp} e XR_{pred} representam o número de observações da amostra, o número de variáveis independentes, o coeficiente de determinação, o valor observado para o adimensional de umidade e o valor predito pelo modelo para o adimensional de umidade, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

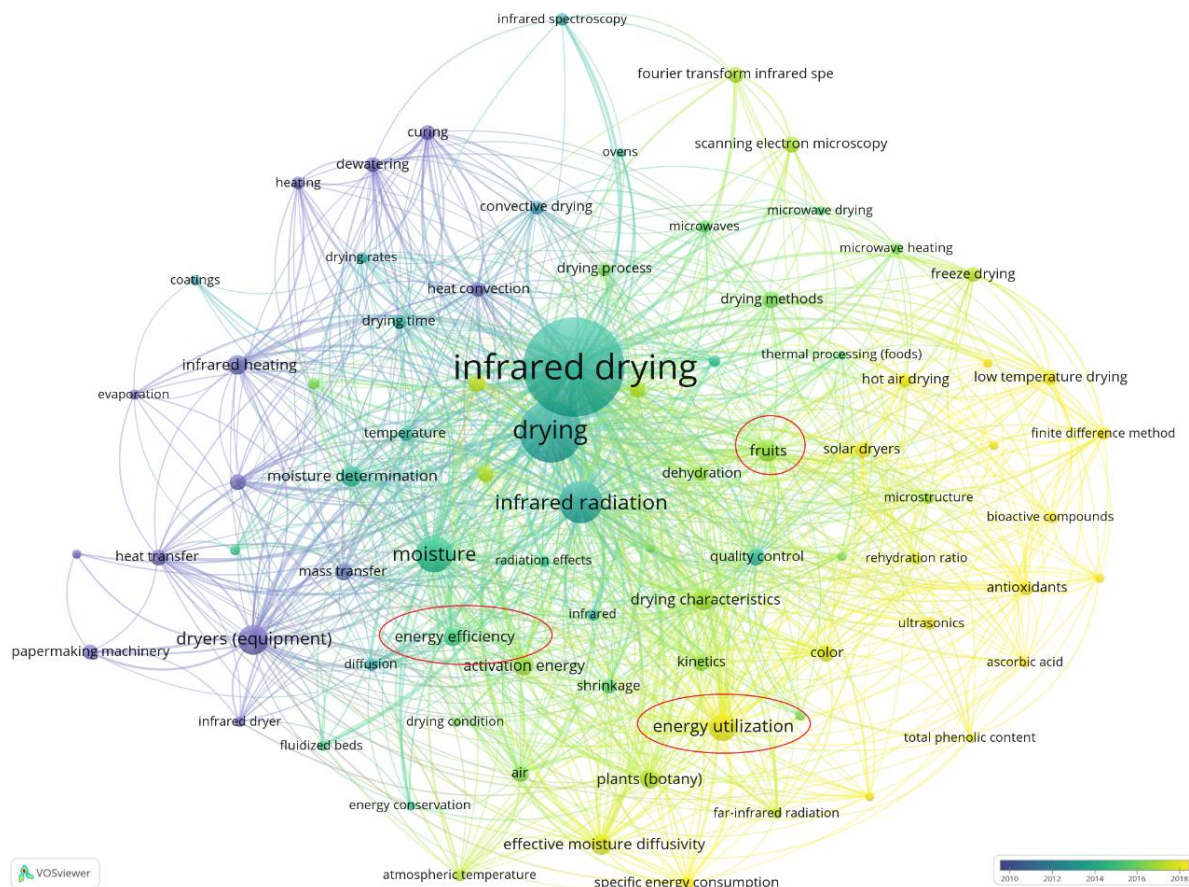
4.1 Análise Bibliométrica

A partir da busca de cada termo elencado no tópico 3.3 criou-se um banco de dados, que foi utilizado para a criação de mapas com o auxílio do software VOSViewer[®]. Foram identificadas 602 publicações que continham a palavra-chave “infrared dry*”, 119 publicações foram encontradas da busca por “hybrid dry*”, 239 e 220 publicações retornaram das buscas utilizando as palavras chaves “rotary dry*” e “grain dry*”, respectivamente.

Para o termo “infrared dry*” foram identificadas 4896 palavras-chave. Escolhendo-se um número mínimo de 15 ocorrências, identificaram-se 85 palavras agrupadas em 4 *clusters*.

Na Figura 8 mostra-se o mapa de co-ocorrência de palavras-chaves para o termo “infrared dry*”. É possível observar que os estudos mais recentes relacionados à secagem com radiação IV tiveram grande interesse em frutas, utilização de energia e eficiência energética, conforme representado pelo *cluster* amarelo.

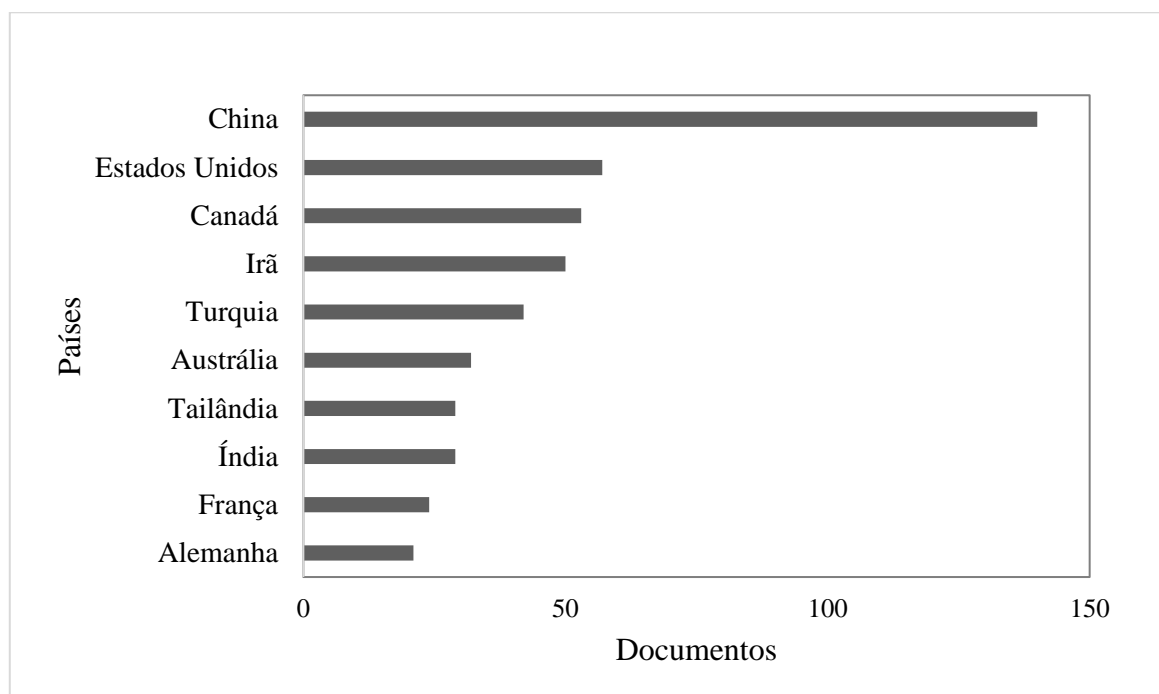
Figura 8 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves – termo de busca “infrared dry*”.



Fonte: Da Autora (2022).

Na Figura 9 tem-se a distribuição de publicações com o termo “infrared dry*” por país. Verificou-se que a China, Estados Unidos e Canadá são os países com mais trabalhos relacionados à secagem IV. O Brasil ocupa a décima terceira posição. Os principais interesses da China são a secagem IV de frutas e legumes, baixas temperaturas de secagem e a utilização de energia.

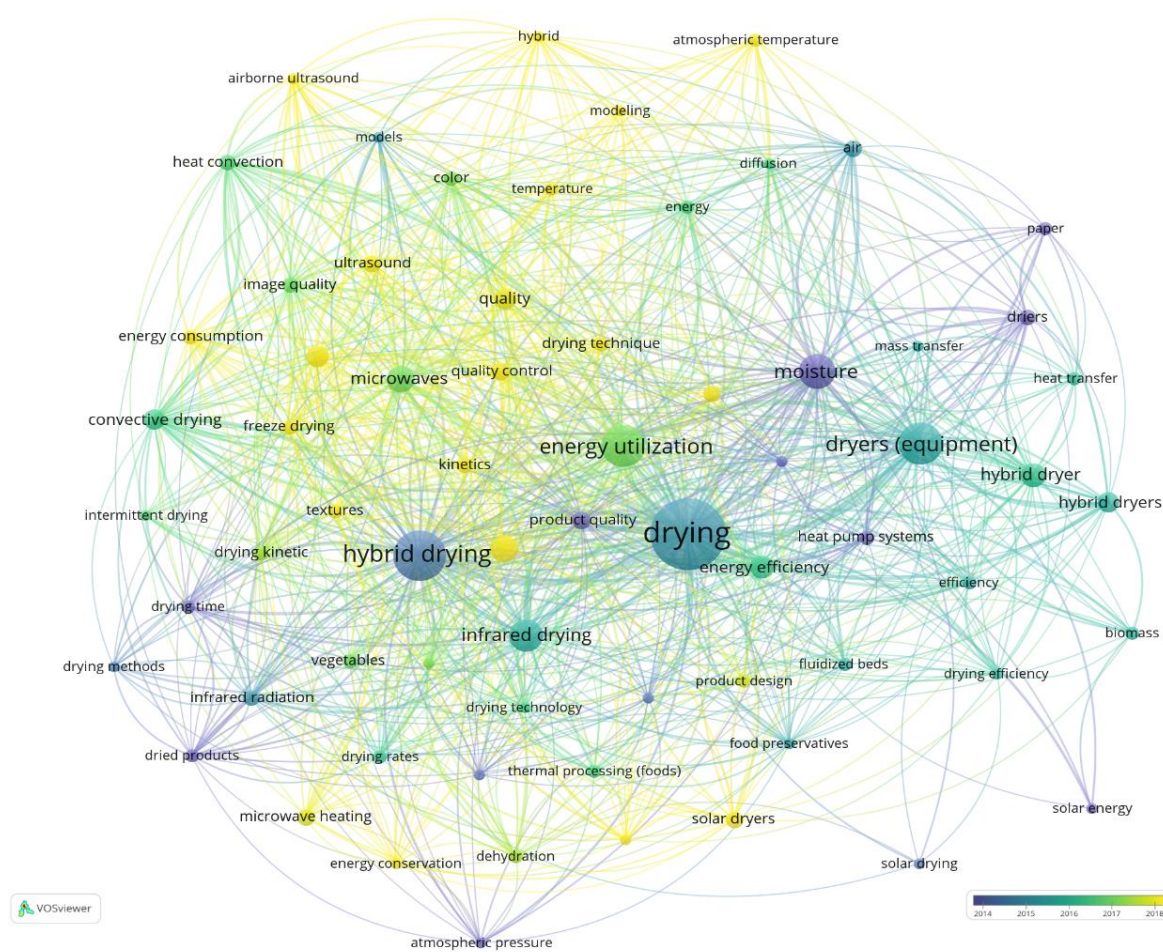
Figura 9 – Publicações por países – termo de busca “infrared dry*”.



Fonte: Da Autora (2022).

Na busca relacionada ao termo “hybrid dry*” foram identificadas 1249 palavras-chave. Com mínimo de 5 ocorrências, identificaram-se 68 palavras que foram agrupadas em 6 *clusters*. Na Figura 10 é apresentada uma rede de co-ocorrência de palavras-chave para os documentos relacionados ao termo “hybrid dry*”. É possível observar que os trabalhos até meados de 2016 tiveram grande interesse nas técnicas híbridas associadas à secagem infravermelho, secagem micro-ondas e secagem convectiva. Nos trabalhos mais recentes, a secagem de frutas, a qualidade do material e a utilização de energia tiveram grande enfoque.

Figura 10 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves – termo de busca: “hybrid dry*”.

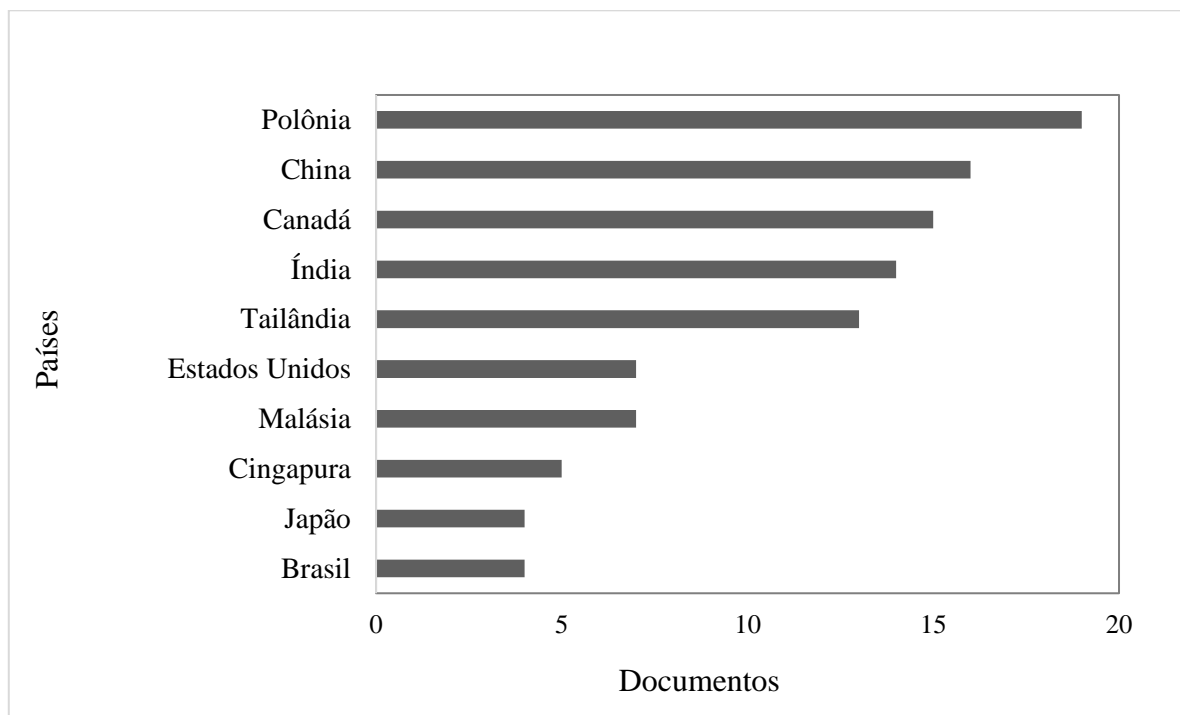


Fonte: Da Autora (2022).

Na Figura 11 tem-se a distribuição de publicações com o termo “hybrid dry*” por país. Nota-se que a Polônia, China e Canadá são os países com mais trabalhos relacionados à secagem híbrida. O Brasil ocupa a décima posição.

As técnicas mais estudadas no Brasil são micro-ondas, secador de leito fluidizado assistido por IV e convectivo assistido por IV. Nogueira et al. (2019) realizou o estudo dos resíduos de acerola utilizando um secador de leito empacotado assistido por radiação infravermelho. Os resíduos de acerola também foram estudados por Ramadan et al. (2019), que fez a utilização combinada da secagem em tambor rotativo e micro-ondas.

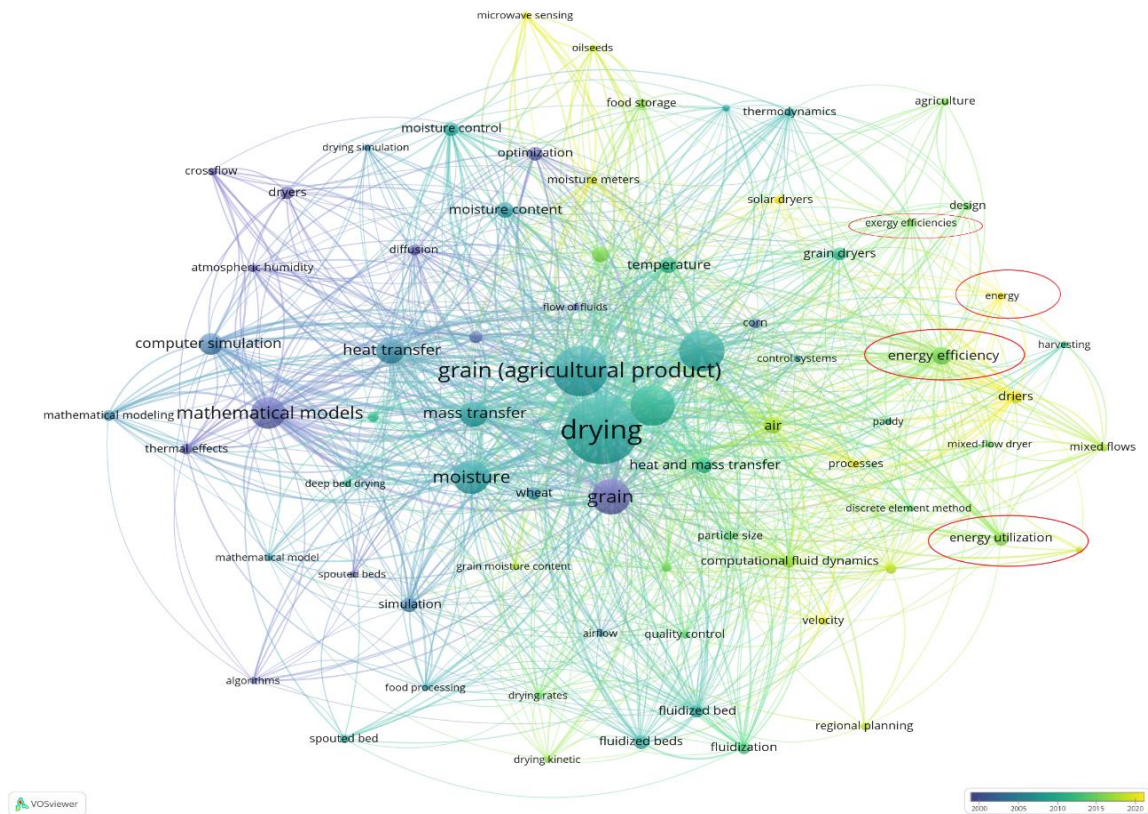
Figura 11– Publicações por países - termo de busca “hybrid dry*”.



Fonte: Da Autora (2022).

Para o termo “grain dry*” foram localizadas 1691 palavras-chave, e com mínimo de 5 ocorrências identificaram-se 82 palavras que foram agrupadas em 7 *clusters*. Na Figura 12 apresenta-se o mapa de co-ocorrência de palavras-chaves para o termo “grain dry*”. Observa-se que, entre os anos 2000 e 2010, teve-se grande interesse em pesquisas relacionadas à secagem de grãos, podendo ser observado nos *clusters* roxo e verde. Nos estudos recentes (após o ano de 2015), o interesse principal das pesquisas está relacionado à eficiência energética, como pode ser observado no *cluster* de cor amarela.

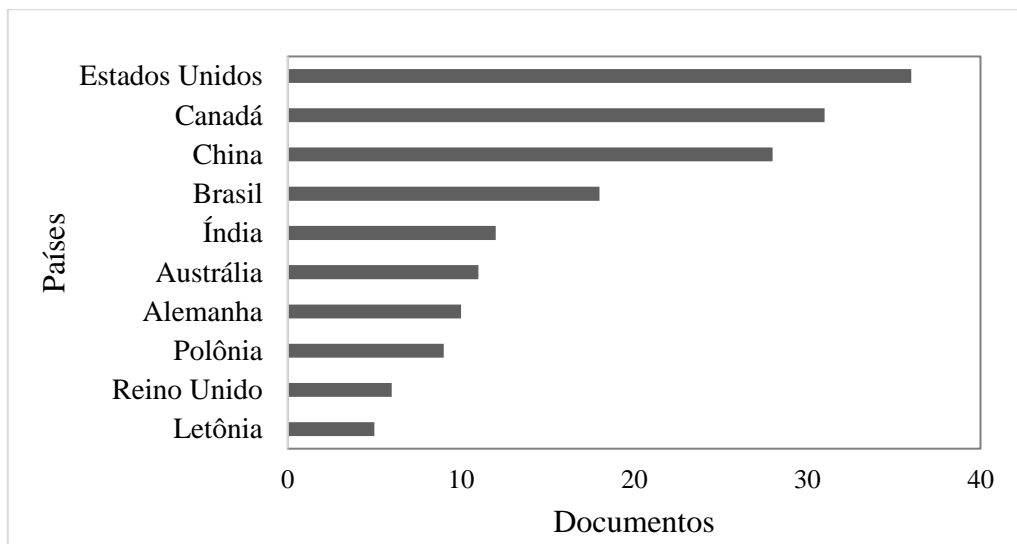
Figura 12 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves - termo de busca “grain dry*”.



Fonte: Da Autora (2022).

Na Figura 13 tem-se a distribuição de publicações com o termo “grain dry*” por país. Os países com mais trabalhos são os Estados Unidos, Canadá e China. O Brasil ocupa a quarta posição.

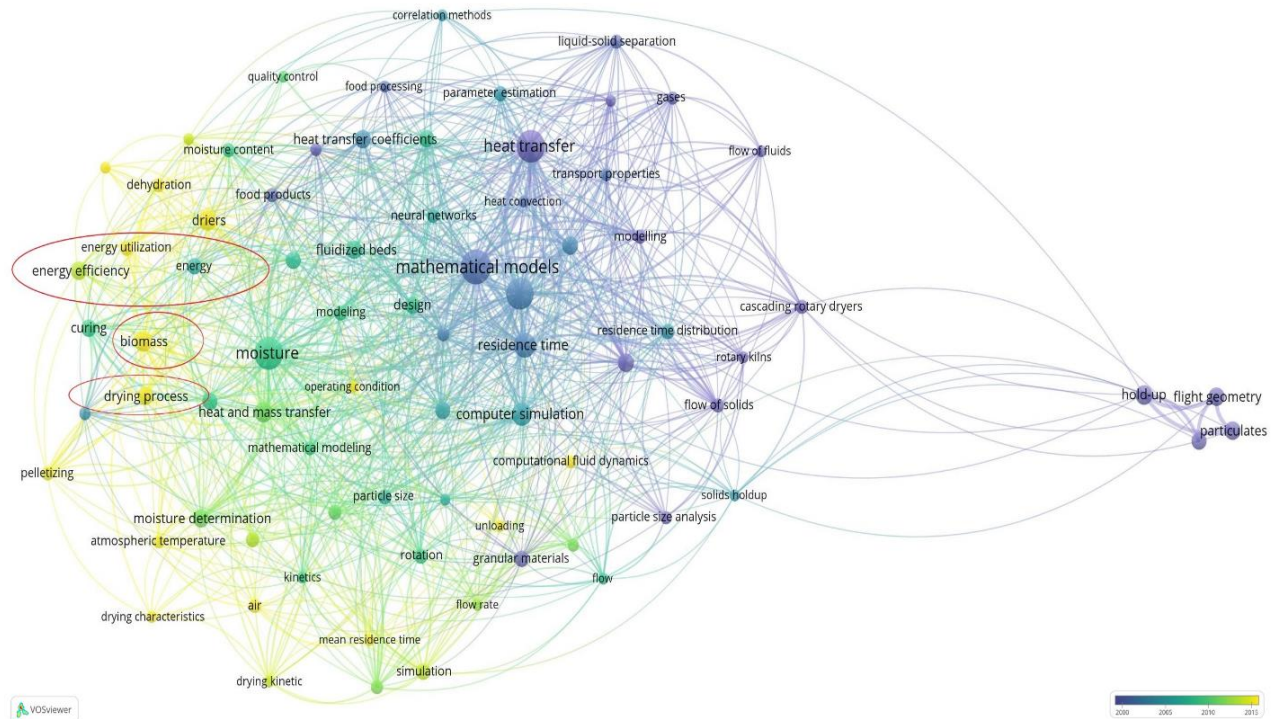
Figura 13 – Publicações por países – termo de busca “grain dry*”.



Fonte: Da Autora (2022).

Para o termo “rotary dry*” foram encontradas 1673 palavras-chave, considerando o mínimo de 5 ocorrências identificaram-se 89 palavras agrupadas em 6 *clusters*. Na Figura 14 observa-se que nos trabalhos recentes, *cluster* amarelo, o interesse está relacionado à eficiência energética, biomassa e ao processo de secagem.

Figura 14 – Redes de co-ocorrência de palavras-chaves – pesquisa “rotary dry*”.

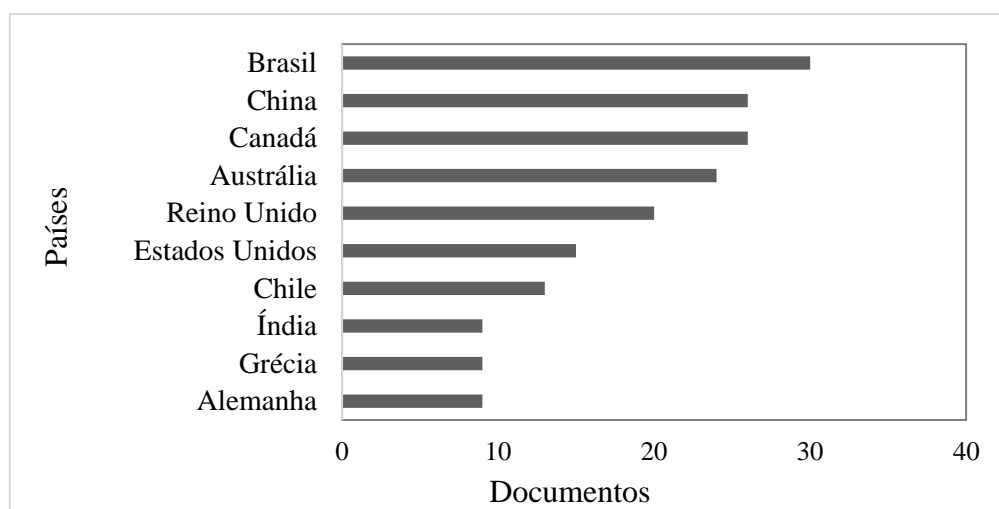


Fonte: Da Autora (2022).

Nos trabalhos relacionados a secadores rotativos, o Brasil ocupa a primeira posição, seguido por China e Canadá, conforme apresentado na Figura 15.

Os principais interesses do Brasil estão relacionados aos secadores rotativos, biomassa, fertilizantes e compostos bioativos.

Figura 15 – Publicações por países – pesquisa “rotary dry*”.



Fonte: Da Autora (2022).

Na busca sobre o tema de estudo deste trabalho na base Scopus foram encontrados poucos trabalhos, o que evidencia a necessidade de mais estudos sobre a utilização combinada da secagem em tambor rotativo com infravermelho. Dos estudos encontrados na busca serão citados dois trabalhos: o de Kaveh et al. (2021) e Aghbashlo et al (2015). Pois ambos, fazem uma avaliação da secagem utilizando diferentes técnicas.

Kaveh et al. (2021) estudaram a secagem da ervilha verde em diferentes métodos: secador convectivo, IV, micro-ondas, convectivo-vácuo, convectivo-IV, convectivo-micro-ondas, convectivo-rotativo e IV-rotativo). Foi feita a avaliação do consumo específico de energia, eficiência energética, eficiência de secagem, eficiência térmica e emissão de gases de efeito estufa (CO₂) do método de secagem utilizado. A secagem no secador IV-rotativo foi avaliada em três níveis de potência 250, 500 e 750 W e três níveis de velocidade de rotação 5, 10 e 15 rpm. Os resultados mostraram que ao aumentar a potência do IV e a velocidade de rotação, o consumo de energia diminuiu. Nas potências de IV e velocidade de rotação mais altos a transferência de calor foi acelerada, o que pode ter aumentado a taxa de secagem enquanto diminuía o consumo de energia.

Aghbashlo et al. (2015) realizaram uma revisão do uso da abordagem da rede neural artificial (RNA) para modelagem de vários métodos de desidratação (secagem rotativa, IV, micro-ondas, convectivo, processos assistidos por IV e micro-ondas, entre outros). As RNA's têm sido usadas na tecnologia de secagem para modelagem, previsão e otimização da transferência de calor e massa, parâmetros de desempenho termodinâmico e indicadores de qualidade, bem como propriedades físico-químicas de produtos secos.

Nota-se que o Brasil tem se destacado nas publicações relacionadas aos temas pesquisados neste trabalho, mas percebe-se que, quando se avaliam as técnicas combinadas, o país ocupa posições inferiores. Observa-se que a partir de 2020, houve uma retomada do interesse dos estudos com relação à secagem de grãos. Este fato, pode estar relacionado à crescente demanda mundial por grãos.

4.2 Secagem híbrida dos grãos de soja

A partir do conjunto de experimentos executados empregando o sistema híbrido composto por um secador de tambor rotativo exposto a uma fonte IV e acoplado a um ventilador obtiveram-se os dados de umidade final apresentados na Tabela 6 para diferentes frações de enchimento do tambor e de potência IV, sem e com a presença de suspensores. Percebe-se que nas potências mais altas e em frações de enchimento mais baixas atingiu-se umidades finais mais baixas, próximas da umidade desejável para armazenamento da soja, que varia entre 12 e 9% em base úmida, de acordo com o período de armazenamento, conforme descrito na seção 2.2.

Tabela 6 – Teor de umidade final da soja atingido através da secagem em diferentes frações de enchimento do tambor e de potência IV, sem e com a presença de suspensores.

Teste	Sem Suspensores					Com Suspensores		
	P(W)	f(%)	UR(%)	T(°C)	X _{b.s.,final} (%)	UR(%)	T(°C)	X _{b.s.,final} (%)
1	141,86	10	87	16,2	13,88	87	12	16,24
2	141,86	20	70	11	15,90	87	12	16,62
3	141,86	30	70	11	15,91	90	17	16,93
4	178,92	10	79	8,8	9,51	90	17	12,44
5	178,92	20	79	8,8	12,39	87	18	15,19
6	178,92	30	75	15	14,88	87	18	15,50
7	217,26	10	75	15	8,68	88	21	8,74
8	217,26	20	83	15	10,79	88	21	11,57
9	217,26	30	76	16,4	11,85	88	21	13,28
10	178,92	20	55	22	10,13	82	21	12,27
11	178,92	20	48	24	10,49	82	21	12,56

A partir dos dados da Tabela 6, é possível estimar o erro associado aos dados experimentais do ponto central (testes 5, 10 e 11) em que $X_{b.s.,final} = 11,00 \pm 1,21$ com desvio percentual de 11% para o tambor rotativo sem os suspensores e $X_{b.s.,final} = 13,34 \pm 1,61$ com desvio percentual de 12% na configuração com suspensores. Embora a variação das condições de temperatura e umidade relativa do ar ter afetado a repetibilidade dos ensaios e contribuído para um erro relativo alto (>5%), considera-se que os valores obtidos são aceitáveis para inferir sobre o processo neste caso.

Na Tabela 7 são apresentados os efeitos significativos ao nível de confiança de 90% ($p \leq 0,10$) das variáveis independentes, fração de enchimento do tambor e potência IV, sobre o teor de umidade final da soja, sem e com a presença de suspensores.

Tabela 7 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) da fração de enchimento do tambor e de potência IV sobre o teor de umidade final da soja, sem e com a presença de suspensores.

	Fator	Efeito	Erro Padrão	p
Sem suspensores ($R^2 = 0,874$)	Média	12,37	0,34	0,000
	P (L)	-4,79	0,89	0,001
	P (Q)	-1,40	0,66	0,073
	f (L)	3,52	0,89	0,006
Com Suspensores ($R^2 = 0,904$)	Média	13,74	0,29	0,000
	P (L)	-5,39	0,77	0,000
	f (L)	2,77	0,77	0,009
	P(L) * f(L)	1,92	0,95	0,082

Como pode ser notado na Tabela 7, os fatores que apresentaram valor-p menor que 10% possuem efeito significativo no valor da variável-resposta, que é a umidade final. Nos experimentos conduzidos em tambor rotativo sem e com a presença dos suspensores, a potência (P) foi o fator que teve influência mais significativa, atingindo um efeito estimado de -4,79 para os experimentos conduzidos sem a presença dos suspensores e efeito estimado de -5,39 para os experimentos com a presença dos suspensores. O sinal negativo indica que com a diminuição

da potência se tem umidades finais mais elevadas após a secagem. Uma possível explicação está no fato de que quanto maior a potência, maior quantidade de água é evaporada.

A fração de enchimento do tambor(f), apresentou um efeito de 3,52 para os experimentos sem a presença dos suspensores e 2,77 para os experimentos com a presença dos suspensores. O sinal positivo indica que com o aumento na fração de enchimento do tambor tem-se maiores teores de umidade final após a secagem. Este resultado pode estar relacionado ao fato de que em maiores frações de enchimento tem-se uma maior camada de soja, sendo o aquecimento reduzido quando comparado a menores frações de enchimento, provocando uma maior resistência a transferência de calor e massa.

Indica-se uma relação entre menores frações de enchimento do tambor e maior potência, obtendo-se menores umidades finais nessas condições de secagem. Ramadan (2017), observou que é possível verificar que uma maior quantidade de umidade é removida quando utilizados menores grau de enchimento em densidades de potência mais elevadas, pois, neste caso, há o fornecimento aquecimentos mais intensos por unidade de massa.

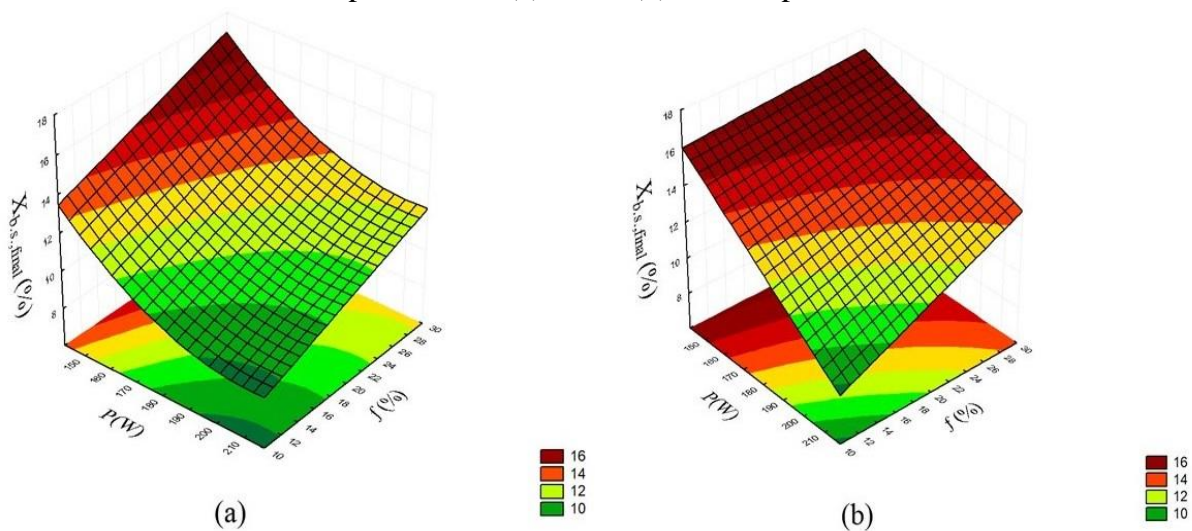
Nota-se ainda que a variação da potência IV teve efeito mais evidente do que a variação da fração de enchimento do tambor. Para a secagem em tambor rotativo com velocidade de rotação constante (11 rpm), o número de Froude (F_r) nas condições estudadas foi de $7,24 \cdot 10^{-3}$ (calculado usando a Equação 3), o qual encontra-se na faixa de Rolamento ($10^{-4} < F_r < 10^{-2}$) e Cascadeamento ($10^{-3} < F_r < 0,1$) (vide Tabela 2).

Sem os suspensores, a dinâmica de escoamento observada no tambor rotativo foi de Rolamento para $f = 10\%$ e nas frações de enchimento de 20% e 30% foi observado Rolamento no centro do tambor e escoamento semelhante ao Cascadeamento nas laterais. Este comportamento pode estar relacionado a presença de rugosidade nas laterais do tambor rotativo, provocando uma agitação nas laterais, se assemelhando ao Cascadeamento do material. Por sua vez, com os suspensores observou-se o Cascadeamento em todas as frações de enchimento estudadas (vide Anexo A). Nos experimentos de Ramadan (2017), operando nos regimes de Rolamento e “Avalanche”, a autora observou que o regime de escoamento é mais dependente da velocidade de rotação do tambor do que do grau de enchimento.

Na Figura 16 são apresentadas as superfícies de resposta ajustadas para o teor de umidade final alcançado em função das variáveis fração de enchimento e potência IV. Em concordância com os efeitos determinados, é possível observar que com o aumento da potência tem-se baixos teores de umidade. Já com o aumento da fração de enchimento do tambor rotativo tem-se maiores teores de umidade.

Pode-se observar que os menores teores de umidade se encontram entre as potências alta e intermediária e fração de enchimento do tambor entre a baixa e a intermediária. Os teores de umidade para armazenamento da soja variam entre 9 e 12% (b.u.), conforme descrito no item 2.2. Com base nisso, sugere-se uma faixa de operação de potência entre 178,92 e 217,26W e fração de enchimento do tambor rotativo entre 10 e 20%, pois, conforme observado na Figura 16, e nos resultados apresentados anteriormente, estes apresentaram umidades finais próximas da umidade final desejada para o armazenamento.

Figura 16 – Superfícies de resposta para o teor de umidade final em função da fração de enchimento e potência IV (a) sem e (b) com suspensores no tambor.



Fonte: Da Autora (2022).

A fim de avaliar também o efeito da presença de suspensores no tambor sobre a remoção de umidade, analisaram-se os resultados de teor de umidade final constituindo um planejamento 2^k considerando como variáveis independentes a fração de enchimento do tambor, a presença de suspensores e a potência IV. Os efeitos significativos ao nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$) determinados neste caso estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) considerando como variáveis independentes a fração de enchimento do tambor, a presença de suspensores e a potência IV sobre o teor de umidade final da soja.

Fator	Efeito	Erro Padrão	p
Média	13,19	0,43	0,000
P(L)	-5,10	0,86	0,002
f(L)	2,61	0,86	0,029

Pelo exposto na Tabela 8, não houve influência significativa da presença dos suspensores no tambor durante a secagem dos grãos de soja. Este resultado difere do esperado, visto que a presença dos suspensores deveria aumentar a transferência de calor e massa entre o fluido e o sólido e deveria conduzir a teores menores de umidade final. Isso pode estar relacionado à presença do ar sem aquecimento com velocidade de 4,9 m/s e as maiores umidades relativas do ar nos dias de realização dos testes. Visto que, o fluxo do ar pode ter variado dentro do tambor. Assim, como a presença dos suspensores, faz com que a soja seja “carregada” pelos suspensores, e, ao ser “carregada”, têm contato com o fluxo de ar em vários pontos do tambor, a amostra pode ter tido maior contato com o ar em escoamento, sendo necessário um reaquecimento. E em maiores teores de umidades relativas à secagem tende a ser menos efetiva. Consequentemente, estes fatores podem ter influenciado nos resultados da secagem, tendo umidades finais maiores.

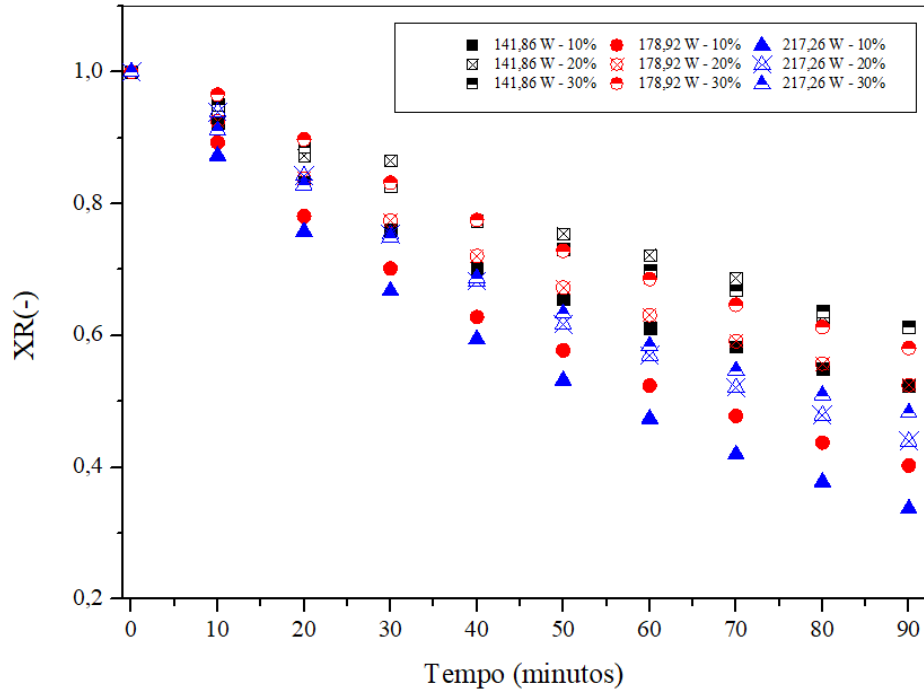
Na literatura normalmente é utilizada uma corrente de ar aquecido em tambores rotativos e velocidades do ar mais baixas. Kaveh et al. (2021) estudaram a secagem das ervilhas verdes em um secador convectivo-rotativo com velocidade de rotação de 5, 10 e 15 rpm com temperatura do ar de 40, 55, e 70 °C a 0,5 e 1 m/s. O consumo específico de energia diminuiu com o aumento da temperatura e da velocidade de rotação e redução da velocidade do ar.

A partir dos dados de umidade inicial e final foram calculados os valores do adimensional de umidade em função do tempo para as diferentes condições de secagem, sem e com a presença dos suspensores no tambor rotativo conforme mostrado nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Verifica-se nas Figuras 17 e 18 que o aumento da potência IV provocou uma maior remoção de umidade em frações de enchimento mais baixas do tambor. Este comportamento concorda com o reportado por Costa (2010) para a secagem de sementes de girassol, em que se constatou que o aumento da temperatura da fonte de radiação, resulta numa aceleração na remoção da umidade.

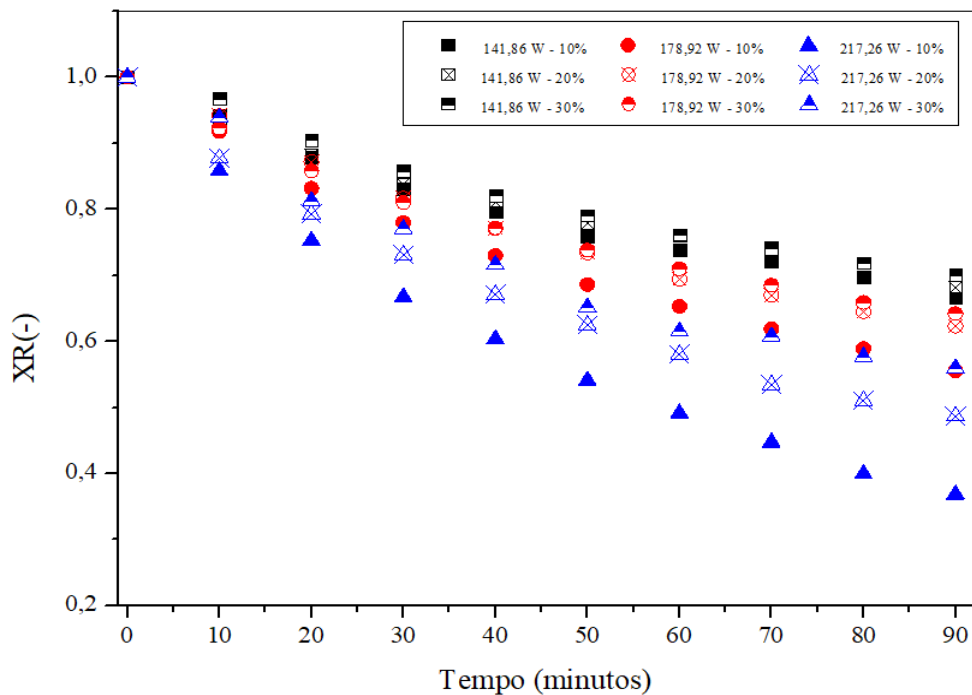
Além disso, neste trabalho verificou-se que, em geral, o aumento da fração de enchimento do tambor ocasionou uma diminuição no processo de secagem. Esta observação é coerente com o estudo de Ramadan (2017), que avaliou o efeito do grau de enchimento do tambor na remoção de umidade e constatou que maior quantidade de umidade foi removida em menores graus de enchimento.

Figura– Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem realizada em diferentes potências IV e frações de enchimento no tambor sem suspensores.



Fonte: Da Autora (2022).

Figura 17 – Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem realizada em diferentes potências IV e frações de enchimento no tambor com suspensores.



Fonte: Da Autora (2022).

4.3 Cinética de Secagem

O ajuste dos modelos de Newton, Henderson e Pabis, e Logarítmico aos dados experimentais de XR em função do tempo forneceu os parâmetros dispostos na Tabela 9. A seleção do melhor ajuste baseou-se nos maiores valores do coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) e nos menores valores da soma do quadrado dos resíduos (SQR) também apresentados.

Para o ajuste dos dados na configuração sem suspensores, a constante de secagem (parâmetro “k”) dos modelos, em geral, aumentou com o aumento da potência IV. Araújo et al. (2021) explicam que este parâmetro se relaciona à difusividade durante a secagem. Portanto, com o aumento da potência, há maior disponibilidade de energia, de modo que os grãos aquecem mais rapidamente alcançando menores teores de umidade. Na configuração com suspensores, não foi clara a tendência da constante em relação às condições operacionais.

Na Tabela 9, nota-se que ambos os modelos apresentaram ajuste satisfatório para o processo estudado, com valores de R_a^2 superiores a 0,945. Na configuração sem suspensores, os valores médios de R_a^2 foram 0,9913; 0,9916 e 0,9967 para os modelos de Newton, Henderson e Pabis e Logarítmico, respectivamente. Assim o modelo Logarítmico foi selecionado como o mais adequado por também apresentar o menor SQR médio (0,0004). Na configuração com suspensores, os valores médios de R_a^2 foram 0,9641; 0,9746 e 0,9957 para os modelos de Newton, Henderson e Pabis e Logarítmico, respectivamente. Portanto, novamente o modelo Logarítmico foi o mais adequado apresentando também o menor SQR médio (0,0005). A soma do quadrado dos resíduos (SQR) em ambas as condições operacionais foi inferior a 0,8%.

SUN et al. (2007) realizaram o estudo da secagem infravermelho do bagaço de maçã. Dez modelos matemáticos comumente utilizados foram usados para ajustar os dados experimentais obtidos, sendo que, o modelo Logarítmico e o modelo de Page foram os mais adequados para descrever a secagem do bagaço de maçã fresco.

Tabela 9 – Parâmetros de ajuste dos modelos de Newton, Henderson e Pabis e Logarítmico.

Sem Suspensores												
Teste	Newton			Henderson e Pabis				Logarítmico				
	k	R _a ²	SQR	a	k	R _a ²	SQR	a	c	k	R _a ²	SQR
1	0,0079	0,9814	0,0039	0,9803	0,0076	0,9834	0,0023	0,6260	0,3810	0,0164	0,9985	0,0002
2	0,0056	0,9860	0,0019	0,9925	0,0055	0,9852	0,0017	0,8418	0,1539	0,0068	0,9831	0,0017
3	0,0058	0,9901	0,0014	0,9927	0,0057	0,9897	0,0009	0,6031	0,4055	0,0119	0,9973	0,0003
4	0,0108	0,9922	0,0025	0,9816	0,0104	0,9935	0,0018	0,7803	0,2208	0,0160	0,9992	0,0002
5	0,0076	0,9906	0,0019	0,9844	0,0073	0,9923	0,0014	0,6788	0,3234	0,0134	0,9992	0,0001
6	0,0061	0,9943	0,0010	1,0101	0,0063	0,9950	0,0008	0,8565	0,1581	0,0080	0,9949	0,0007
7	0,0126	0,9983	0,0013	0,9849	0,0123	0,9974	0,0009	0,8683	0,1290	0,0156	0,9995	0,0001
8	0,0093	0,9961	0,0012	1,0103	0,0095	0,9964	0,0010	0,9234	0,0920	0,0109	0,9963	0,0008
9	0,0087	0,9960	0,0020	0,9852	0,0085	0,9930	0,0015	0,7240	0,2797	0,0143	0,9996	0,0001
10	0,0089	0,9952	0,0012	0,9917	0,0088	0,9952	0,0011	0,7780	0,2279	0,0131	0,9988	0,0002
11	0,0088	0,9836	0,0039	0,9776	0,0083	0,9864	0,0028	0,6686	0,3342	0,0163	0,9978	0,0003
Com Suspensores												
Teste	Newton			Henderson e Pabis				Logarítmico				
	k	R _a ²	SQR	a	k	R _a ²	SQR	a	c	k	R _a ²	SQR
1	0,0049	0,9549	0,0043	0,9744	0,0045	0,9675	0,0027	0,4161	0,5852	0,0170	0,9957	0,0003
2	0,046	0,9489	0,0042	0,9702	0,0041	0,9720	0,0020	0,4142	0,5767	0,0145	0,9892	0,0007
3	0,0043	0,9762	0,0021	0,9891	0,0041	0,9767	0,0018	0,4346	0,5743	0,0138	0,9948	0,0003
4	0,0071	0,9747	0,0043	0,9724	0,0066	0,9826	0,0026	0,5740	0,4238	0,0158	0,9979	0,0003
5	0,0058	0,9781	0,0029	0,9819	0,0055	0,9817	0,0021	0,5206	0,4845	0,0148	0,9987	0,0001
6	0,0056	0,9448	0,0061	0,9658	0,0050	0,9654	0,0034	0,4337	0,5636	0,0185	0,9989	0,0001
7	0,0120	0,9867	0,0045	0,9688	0,0114	0,9912	0,0026	0,7740	0,2178	0,0178	0,9984	0,0004
8	0,0090	0,9678	0,0074	0,9607	0,0083	0,9797	0,0041	0,6243	0,3677	0,0183	0,9979	0,0004
9	0,0075	0,9516	0,0091	0,9731	0,0070	0,9545	0,0075	0,5422	0,4702	0,0205	0,9879	0,0017
10	0,0071	0,9685	0,0053	0,9711	0,0065	0,9768	0,0034	0,5510	0,4463	0,0171	0,9972	0,0003
11	0,0068	0,9526	0,0071	0,9608	0,0061	0,9725	0,0036	0,5112	0,4805	0,0179	0,9966	0,0004

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de um secador híbrido de tambor rotativo com fonte de radiação IV e convecção para secar grãos de soja. Do estudo bibliométrico feito sobre as técnicas híbridas de secagem foi possível concluir que o Brasil vem se destacando nos termos de busca avaliados neste estudo. Além disso, a eficiência energética na secagem tem sido abordada em muitos estudos e a partir de 2020, houve uma retomada de interesse dos estudos relacionado à secagem de grãos.

Pelos resultados obtidos nos testes de secagem foi possível observar que o aumento da potência das lâmpadas IV e a diminuição da fração de enchimento do tambor rotativo contribuíram para a remoção de umidade do material. Além disso, a potência teve efeito mais significativo nas condições operacionais estudadas.

A dinâmica de escoamento observada dentro do tambor rotativo sem a presença dos suspensores foi Rolamento ($f=10\%$) e Rolamento no centro do tambor e Cascadeamento do material nas laterais ($f=20\%$ e 30%). Operando com a presença dos suspensores foi observado o Cascadeamento em ambas frações de enchimento estudadas e implica em maior homogeneidade fornecida pelo movimento das partículas.

Quanto ao efeito da presença dos suspensores sobre a remoção de umidade, verificou-se que, na faixa e configurações investigadas, não houve influência significativa sobre a secagem dos grãos de soja. Este resultado não era esperado e pode estar atrelado às maiores umidades relativas do ar nos dias de realização dos testes com suspensores.

Dos modelos matemáticos estudados, o modelo Logarítmico foi o que se mostrou mais adequado para representar os dados experimentais dos grãos de soja. Apresentando maiores valores de R_a^2 e menores valores de SQR.

Portanto, constatou-se que o sistema estudado é promissor para o processamento de grãos como a soja. Para continuação deste estudo, sugere-se uma avaliação da presença dos suspensores utilizando ar aquecido, operar o sistema com outras faixas de velocidade de rotação do tambor rotativo, avaliar os impactos do sistema na qualidade final da soja, estudo do índice de segregação das partículas e avaliar a eficiência energética do secador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGHBASHLO, M.; HOSSEINPOUR, S.; MUJUMDAR, A. S. Application of artificial neural networks (ANNs) in drying technology: a comprehensive review. *Drying technology*, v. 33, n. 12, p. 1397-1462, 2015.
- ANDRADE, D. S. Estudo da secagem infravermelho de amêndoas de cacau nos modos contínuo, intermitente e assistido por convecção. Dissertação de Mestrado, UFS, São Cristóvão, SE, 2017.
- ARAÚJO, K. T. A., DE MELO QUEIROZ, A. J., DE FIGUEIRÊDO, R. M. F., DA SILVA, R. C., AMADEU, L. T. S., & PAIVA, Y. F. (2021). Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo das polpas de noni e umbu. *Research, Society and Development*, 10(4), e46710413985-e46710413985.
- BIHAIN A.L.J. Modelagem matemática da influência da umidade do ar, sobre a dinâmica de secagem de grãos de soja em camada fina. 2011.138f. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.
- BAGHERI, H.; KASHANINEJAD, M. Kinetic modeling of mass transfer during roasting of soybeans using combined infrared-hot air heating. *Journal of Food Biosciences and Technology*, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2018.
- BOERI, C. N. Modelagem matemática da secagem de grãos de soja em camada fina. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática), UNIJUI, Ijuí, 2007.
- BOERI, C. N.; KHATCHATOURIAN, O. Análise da secagem de grãos de soja e secador de leito fixo. UFRN, Natal- RN, 2008.
- BORTOLAIA, L. A. Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: Mapa/ACS, 2009.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, 450p.

- CAMPOS, T. B. A importância do instituto biológico no desenvolvimento dos estudos sobre pragas de grãos e produtos armazenados. Instituto Biológico, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Sanidade Vegetal. São Paulo, p.85-86, 2008.
- CHOU, S. H.; HSIAU, S. S. Dynamic properties of immersed granular matter in different flow regimes in a rotating drum. *Powder Technology*, v. 226, p. 99–106, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.024>.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira – grãos: Quarto levantamento, janeiro 2022 – safra 2021/2022.:Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/infoagro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- COSTA, D. M. Estudo da secagem infravermelho de sementes de girassol. Dissertação de mestrado. Universidade Tiradentes, Aracaju, 2010.
- CIABOTTI, S. et al. AVALIAÇÕES QUÍMICAS E BIOQUÍMICAS DOS GRÃOS, EXTRATOS E TOFUS DE SOJA COMUM E DE SOJA LIVRE DE LIPOXIGENASE. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 30, n. 5, p. 920-929, set./out., 2006.
- DALPASQUALE, V.A. Drying of soybeans in continuous-flow dryers and fixed-bed drying systems. Michigan. Tese (Ph.D), Michigan State University,1981.
- DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Physical properties of soybean. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 56, n. 2, p. 89-98, 1993.
- DE OLIVEIRA, D. E. C. et al. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, n. 2, p. 190-201, 2012.
- DURKS, J. M., BOTELHO, F. M., BOTELHO, S., & de ALMEIDA, L. C. B. (2017). Perdas em grãos de soja armazenados. In Embrapa Agrossilvipastoril-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 46.2017, Maceió. Anais. Maceió: SBEA, 2017.
- ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M. de; VANIER, N. L. Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos. UFPEL, Pelotas, 1 ed. 2017.
- EL-MESERY, Hany S. et al. Design of low-energy consumption hybrid dryer: A case study of garlic (*Allium sativum*) drying process. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 33, p. 101929, 2022.

- EL-MESERY, Hany S.; KAMEL, Reham M.; EMARA, Ramy Z. Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 27, p. 101365, 2021.
- ELSEVIER. Sobre a solução Scopus. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>>. Acesso em: 19 jun. 2022.
- ESPÍNDOLA, C. J.; CUNHA, R. C. C. A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva de soja no Brasil e no Mundo. *Geotextos*, v. 11, n. 1, p. 217-238, Salvador, UFBA, 2015.
- FERNANDES, N. J. Estudo da fluidodinâmica e da Secagem de um Secador rotatório da Indústria de Fertilizantes. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- FREITAS, Juliana Vieira de. Desenvolvimento de secador tipo cesto rotativo para a secagem de folhas de eucalipto (*Corymbia citriodora*). 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- GRIESHOP, C. M.; FAHEY, G. C. Comparison of quality characteristics of soybeans from Brazil, China, and the United States. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 49, p. 2669-2673, 2001.
- HAUTH, M. R. et al. Physical properties of different soybean cultivars during drying. *Engenharia Agrícola*, v. 38, p. 590-598, 2018.
- HIRAKURI, M. H., & LAZZAROTTO J. J. (2014). O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. *Documentos*, (349), 1-70.
- JUAREZ, G.; CHEN, P.; LUEPTOW, R. M. Transition to centrifuging granular flow in rotating tumblers: a modified Froude number, *New Journal of Physics*, v. 13, p. 1-12, 2011.
- KAVEH, M. et al. The quality of infrared rotary dried terebinth (*Pistacia atlantica* L.)- optimization and prediction approach using response surface methodology. *Molecules*, v. 26, n. 7, p. 1999, 2021.
- KAVEH, M.; ABBASPOUR-GILANDEH, Y.; NOWACKA, M. Comparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, v. 160, p. 108274, 2021.
- LEMES, A. F. C. Projeto protótipo silo-secador-aerador experimental e a qualidade de grãos. Dissertação de mestrado. Chapadão do Sul - MS, 2016.

- LOPES, M. A. et al. Propriedades físicas dos grãos de soja, cotilédones e impurezas. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 42, n. 4, p. 962-970, 2019.
- MARCINKOWSKI, E. de A. Estudo da Cinética de Secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, 2006.
- MELLMANN, J., The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior, *Powder Technology*, vol. 118, p. 251-270, 2001.
- MÖHLER, B.C. Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja. Porto Alegre. 2010.
- NASCIMENTO, S. M. Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores. Dissertação de mestrado. 106 p. PPGEQ-UFU-Uberlândia/MG, 2014.
- NASCIMENTO, V. R. G. Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de Moringa Oleifera Lam. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2014.
- NASCIMENTO, V. R. G; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. de. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleifera. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p. 686-692, 2015.
- NEPOMUCENO, A. L. et al. Programa SBC-Soja Baixo Carbono: um novo conceito de soja sustentável. 2021.
- NOGUEIRA, G. D. R. Estudo de técnicas híbridas de desidratação de resíduos de acerola. PPGEQ/UFU, Uberlândia-MG, 106 p. (Dissertação de Mestrado), 2016.
- NOGUEIRA, G. D., SILVA, P. B., DUARTE, C. R., & BARROZO, M. A. (2019). Analysis of a hybrid packed bed dryer assisted by infrared radiation for processing acerola (*Malpighia emarginata* DC) residue. *Food and bioproducts processing*, 114, 235-244.
- OLIVEIRA, D. E. C. et al. Cinética de secagem dos grãos de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 11, n. 2, p. 190-201, 2012.
- ONWUDE, D. I. et al. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*, v. 241, p. 75-87, 2019.

- PERAZZINI, Hugo et al. Efficiency analysis of citrus waste biomass valorization using rotary dryer. **Drying Technology**, p. 1-11, 2022.
- POHNDORF, Ricardo S. et al. Kinetic evaluation and optimization of red popcorn grain drying: Influence of the temperature and air velocity on the expansion properties and β -carotene content. *Journal of Food Process Engineering*, v. 42, n. 6, p. e13204, 2019.
- RIBEIRO, D. M. et al. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. *Food Science and Technology*, v. 25, p. 611-617, 2005.
- RAMADAN, L., DUARTE, C. R., & BARROZO, M. A. (2019). A new hybrid system for reuse of agro-industrial wastes of acerola: dehydration and fluid dynamic analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2273-2283.
- RAMADAN, L. "Estudo da secagem de resíduos de acerola em tambor rotativo acoplado a micro-ondas." Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), UFU, Uberlândia- MG, 2017.
- SCATENA, R. et al. CARACTERIZAÇÃO DOS DIFERENTES REGIMES DE ESCOAMENTO PRESENTES EM UM TAMBOR ROTATÓRIO. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 6297-6304, 2015.
- SENAR. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. Grãos: armazenamento de milho, soja, feijão e café. Brasília-Senar, 2018.
- SHIRKOLE, S. S.; KENGHE, R. N.; NIMKAR, P. M. Moisture dependent physical properties of soybean. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 3, n. 5, p. 3807-3815, 2011.
- SILVA, R. H. secagem convectiva da folha de aroeira (*Schinus terebinthifolius Raddi*) em tambor rotativo com parede perfurada: influência das condições operacionais na preservação da cor e compostos bioativos. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), UFSCar, São Paulo, 2021.
- SOARES, P. B.; CARNEIRO, T. C. J.; CALMON, J. L.; CASTRO, L. O. C. O. (2016). Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science. *Ambiente Construído*, 16, 175-185.
- SUN, J. et al. Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Food Science and Technology International**, v. 13, n. 2, p. 91-97, 2007.

- USDA. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Oilseeds and Products Annual (2022). Disponível em:< >. Acesso em: 18 jun. 2022.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSviewer Manual. CWTS Meaningful metrics, Universiteit Leiden, ago. 2018.
- ZUPIC, I., & ČATER, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.
- WATANABE, H. Critical rotation speed for ballmilling. *Powder Technol.*, v. 104, p. 95-99, 1999.

ANEXO A

Tambor rotativo sem suspensores

Regime de Rolamento na fração de enchimento de 10% no tambor rotativo.



Regime de Rolamento no centro do tambor e Cascateamento nas laterais na fração de enchimento de 20% no tambor rotativo.



Tambor rotativo com suspensores

Regime de Cascateamento no tambor rotativo

