



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



MÉTODOS E TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA SECAGEM DE SOJA

GUILHERME DOUGLAS AGUIAR

UBERLÂNDIA, MG

2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

MÉTODOS E TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA SECAGEM DE SOJA

GUILHERME DOUGLAS AGUIAR

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

**UBERLÂNDIA, MG
2025**

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GUILHERME DOUGLAS AGUIAR
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM
18/09/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
FEQUI/UFU - Orientador

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
PPGEQ/UFU

Dr. Heitor Otacílio Nogueira Altino
PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão. Foi pela Sua graça, força e misericórdia que pude chegar até aqui, superar os momentos mais difíceis e concluir esse sonho com saúde, coragem e fé renovada a cada novo desafio.

À minha família, por ser meu alicerce inabalável, por todo o amor, cuidado, orações e incentivo nos momentos em que mais precisei. Sem vocês, esse caminho seria impossível.

À minha namorada, Débora, que foi apoio constante, conselheira, motivadora e luz nos momentos em que pensei em desistir. Obrigado por acreditar em mim mesmo quando eu duvidei.

Aos meus amigos, que com sua presença me trouxeram leveza, sorrisos e conforto nos dias difíceis e intensos dessa caminhada.

Aos meus companheiros de quatro patas, Lola, Chico, Tobias, Fred, Mel e a Lua, que hoje brilha no céu. Cada um de vocês esteve presente em momentos únicos da minha caminhada, oferecendo carinho silencioso, olhares cheios de amor e uma lealdade que não se explica, apenas se sente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni, pela confiança, paciência e orientação ao longo deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu muito obrigado. Cada palavra de apoio, cada gesto de carinho e cada ensinamento deixaram marcas que levo para toda a vida.

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”
— Josué 1:9

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	I
LISTA DE TABELAS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo geral	2
1.2. Objetivos específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Fundamentos da Secagem de Grãos	3
2.1.1. Princípios de transferência de calor e massa	3
2.1.2. Etapas do processo de secagem	5
2.2. Tipos de Secadores Utilizados na Secagem de Soja	6
2.2.1. Secadores de leito fixo	7
2.2.2. Secadores de fluxo cruzado	9
2.2.3. Secadores de leito de jorro	9
2.2.4. Secadores rotativos	12
2.3. Secagem intermitente e contínua	15
2.4. Vantagens e limitações de cada tipo	16
2.5. Condições Operacionais na Secagem de Soja	16
2.5.1. Temperatura do ar de secagem	17
2.5.2. Umidade relativa do ar e fluxo de ar	18
2.5.3. Tempo de residência dos grãos	19
2.5.4. Tipo de combustível ou fonte de energia	19
2.5.5. Controle e automação do processo	20
2.6. Eficiência Energética do Processo de Secagem	22
2.6.1. Conceito e indicadores de eficiência energética	22
2.6.2. Dados comparativos da literatura por tipo de secador	22
2.6.3. Consumo energético e sustentabilidade	23

2.7. Efeitos da Secagem na Qualidade da Soja.....	23
2.7.1. Qualidade física (quebra, rachaduras, dano térmico).....	23
2.7.2. Qualidade química (teor de óleo, proteína, viabilidade fisiológica).....	24
2.7.3. Impactos da secagem rápida.....	25
3. ESTUDOS DE CASO	25
3.1. Secagem de grãos de soja em tambor rotativo com infravermelho auxiliado por convecção	26
3.2. Efeitos da Temperatura na Qualidade Física dos Grãos de Soja.....	29
3.3. Viabilidade da Secagem de Soja com Ar Ambiente em Mato Grosso	33
3.4. Uso de exaustores eólicos em silos de armazenamento de soja: Impacto na redução do custo de armazenamento e na redução de perdas de massa dos grãos.....	38
3.5. Terreiro suspenso:uma alternativa para secagem de grãos na agricultura familiar	42
4. CONCLUSÃO.....	46
5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Esquema de disposição de água nas camadas do grão.	3
Figura 2 - Exemplo de curva típica de secagem.	5
Figura 3 - Diagrama esquemático de um secador de leito fixo.	7
Figura 4 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxos cruzados que pode operar de forma contínua.	9
Figura 5 - Diagrama esquemático de um secador de leito de jorro.	10
Figura 6 - Diagrama esquemático de um secador rotatório.	13
Figura 7 - Tipos mais comuns de suspensores em secadores rotativos.	26
Figura 8 - Tambor rotativo (a) visão lateral e (b) visão frontal.	28
Figura 9 - Valores observados e estimados do ângulo de repouso de grãos de soja secados em diferentes temperaturas do ar.	30
Figura 10 - Valores observados e estimados da massa específica aparente (A) e massa específica unitária.	31
Figura 11 - Valores calculados da porosidade dos grãos de soja em função da temperatura do ar de secagem.	31
Figura 12 - Dados observados e estimados da massa de mil grãos de soja em função da temperatura do ar de secagem.	32
Figura 13 - Valores observados e estimados da condutividade elétrica do exsudato de grãos de soja secados em diferentes temperaturas do ar de secagem.	32
Figura 14 - Períodos decenciais com possibilidade de secagem de soja com ar ambiente, com ventilação contínua e intermitente, nos municípios de Diamantino, Sinop, Rondonópolis e Campo Verde.	37
Figura 15 - Silo de armazenamento de grãos utilizado, em destaque (A) silo sem exaustão, (B) silo com exaustão e luz e (C) silo com exaustão e sem luz.	39
Figura 16 - Imagens de termometria para os três silos, de 1 a 3 meses.	41
Figura 17 - (A) Estrutura externa de proteção da Cama Africana e (B) bancada da Cama Africana.	43
Figura 18 - Gráfico da temperatura externa no interior do terreiro suspenso.	44
Figura 19 - Gráfico da temperatura interna no terreiro suspenso.	44
Figura 20 - Gráfico da umidade no interior do terreiro suspenso.	44
Figura 21 - Gráfico do teor de umidade dos grãos no interior do terreiro suspenso.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações de projeto de secadores rotatórios	14
Tabela 2 - Comparação entre os principais tipos de secadores e tipos de secagem.	16
Tabela 3 - Teor de umidade final da soja (%) obtido em diferentes condições de potência, fração de enchimento e presença de suspensores no tambor rotativo.	29
Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de secagem.	32
Tabela 5 - Resultados dos parâmetros de análise dos grãos de soja armazenados por 0, 3 e 6 meses em diferentes silos.	40
Tabela 6 – Incidência de grãos fermentados e ardidos, acidez do grão e proteína solúvel de grãos de soja armazenados por 0, 3, 6 meses em diferentes silos.	42

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a secagem de grãos de soja, com foco na análise da eficiência energética e na preservação da qualidade do grão sob o aspecto comercial utilizando diferentes condições operacionais. São abordados os fundamentos da secagem, os principais tipos de secadores utilizados na pós-colheita da soja e as variáveis que influenciam diretamente o desempenho do processo, como temperatura, tempo de residência, umidade relativa do ar, tipo de energia empregada e controle do sistema. A pesquisa foi complementada com cinco estudos de caso reais que ilustram os impactos das condições operacionais na eficiência térmica e na integridade dos grãos: um com tambor rotativo com infravermelho e convecção (UFLA), outro com variação de temperatura em secador de leito fixo (UFMT), um terceiro que avalia a secagem com ar ambiente em diferentes municípios de Mato Grosso (UFMT), o quarto de Cañizares et al. (2014) investigou o armazenamento de soja em silos com e sem exaustão, concluindo que o uso da exaustão reduziu o consumo energético e a perda de massa, sem comprometer a qualidade dos grãos e o quinto, de Santana et al. (2023), avaliou a utilização de um terreiro suspenso confeccionado com materiais reciclados, verificando redução da umidade relativa, aumento da temperatura interna e obtenção de teores adequados de umidade, comprovando sua viabilidade para a agricultura familiar. Os resultados reforçam que a eficiência energética pode ser aumentada significativamente com tecnologias híbridas, sem comprometer a qualidade final da soja.

Palavras-chave: secagem de soja, eficiência energética, qualidade dos grãos, secadores, pós-colheita.

ABSTRACT

This study presents a literature review on soybean grain drying, focusing on the analysis of energy efficiency and quality preservation under different operational conditions. It covers the fundamentals of drying, the main types of dryers used in soybean post-harvest, and the variables that directly influence process performance, such as temperature, residence time, air relative humidity, energy source, and system control. The research is complemented by three real case studies that illustrate the effects of operational conditions on thermal efficiency and grain integrity: one involving a rotary drum dryer with infrared and convection (UFLA), another with temperature variation in a fixed bed dryer (UFMT), and a third evaluating ambient air drying in different municipalities of Mato Grosso (UFMT), the fourth by Cañizares et al. (2014), which investigated soybean storage in silos with and without exhaust systems, concluding that exhaust use reduced energy consumption and mass loss without compromising grain quality, and the fifth by Santana et al. (2023), which evaluated the use of a suspended drying yard built with recycled materials, verifying reduced relative humidity, increased internal temperature, and adequate final moisture content, demonstrating its feasibility for family farming. The results reinforce that energy efficiency can be significantly increased through hybrid technologies without compromising the final quality of soybeans.

Keywords: soybean drying, energy efficiency, grain quality, dryers, post-harvest.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é atualmente uma das culturas de maior destaque no cenário agrícola brasileiro, não apenas pelo volume expressivo de produção e exportação, mas também por sua relevância estratégica na cadeia agroindustrial nacional. Com milhões de toneladas colhidas anualmente, a correta condução das etapas pós-colheita é fundamental para assegurar a qualidade final dos grãos. Entre essas etapas, destaca-se a secagem, processo essencial que visa reduzir o teor de umidade dos grãos recém-colhidos a níveis adequados para o armazenamento seguro e para manter a qualidade nutricional e fisiológica dos grãos (EMBRAPA, 2020).

O teor de umidade ideal para o armazenamento da soja situa-se entre 11% e 13%, sendo que valores acima desse intervalo favorecem a deterioração por microrganismos, reações enzimáticas indesejadas e aumento da respiração dos grãos, comprometendo sua integridade. A secagem, por sua vez, é uma operação unitária que envolve a transferência simultânea de calor e massa, e pode ser conduzida em diferentes configurações de equipamentos, tais como secadores de fluxo cruzado, leito fixo, de leito de jorro ou intermitentes. Cada tipo apresenta características operacionais distintas, sendo a escolha do equipamento influenciada por fatores como a escala de produção, disponibilidade energética e sensibilidade do produto (EMBRAPA, 2020).

Além disso, as condições operacionais de secagem, como temperatura do ar, umidade relativa, vazão de ar e tempo de exposição, exercem papel crucial tanto na eficiência energética quanto na qualidade final da soja. Pesquisas recentes mostram que altas temperaturas aceleram a remoção da água, mas também aumentam o risco de danos térmicos, como fissuras, escurecimento do tegumento, perda de germinação e degradação de compostos bioativos (BOTELHO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020). Por outro lado, secagens conduzidas em temperaturas mais moderadas tendem a preservar melhor a qualidade dos grãos, embora possam demandar maior tempo de operação e, consequentemente, maior consumo energético (SILVA, 2024; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

Dessa forma, a análise crítica das variáveis envolvidas no processo de secagem da soja, sob a ótica da eficiência energética e da conservação da qualidade dos grãos, é de suma importância para orientar práticas mais sustentáveis e tecnicamente adequadas. Neste trabalho, propõe-se uma revisão bibliográfica de alguns estudos acadêmicos publicados nos últimos dez

anos, com o objetivo de reunir, organizar e analisar os avanços científicos sobre os efeitos das condições operacionais na secagem da soja. A proposta busca não apenas consolidar o conhecimento existente, mas também identificar lacunas na literatura e apontar caminhos para futuras investigações dentro do campo da Engenharia Química, com ênfase em operações unitárias, eficiência térmica e qualidade de produto agroindustrial.

As buscas foram realizadas em bases como SciELO, Google Scholar, BDTD, Embrapa e Portal de Periódicos da CAPES, utilizando palavras-chave como “secagem de soja”, “eficiência energética” e “qualidade pós-secagem”. Aplicaram-se filtros de idioma (português e inglês), período (2015–2025) e tipo de documento (artigos científicos, dissertações, teses e manuais técnicos). Foram incluídos estudos com dados experimentais ou análises qualitativas relacionadas à secagem de soja, excluindo-se trabalhos duplicados, sem rigor científico ou com foco exclusivo em outras culturas ou armazenagem. As informações extraídas foram organizadas e analisadas por similaridade temática, buscando identificar padrões, lacunas e contribuições relevantes na literatura atual.

1.1. Objetivo geral

Analizar os impactos das condições operacionais no processo de secagem da soja, com foco na eficiência energética e na preservação da qualidade física, química e fisiológica dos grãos.

1.2. Objetivos específicos

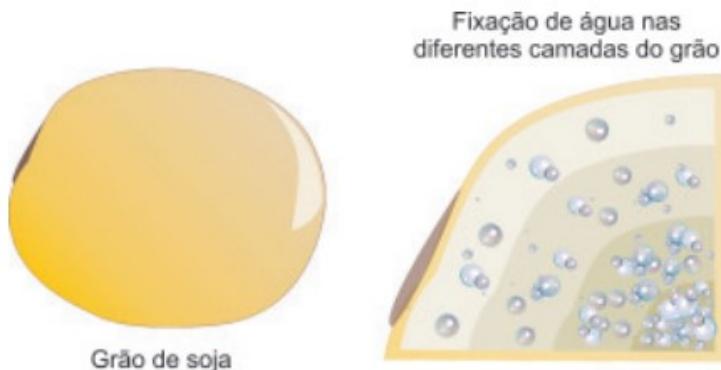
- Levantar, por meio de revisão bibliográfica, os principais tipos de secadores utilizados na secagem de soja e suas características operacionais;
- Investigar os efeitos de variáveis como temperatura, velocidade do ar e tempo de residência sobre o desempenho do processo de secagem;
- Avaliar os impactos dessas condições operacionais na qualidade final da soja, considerando parâmetros físicos e químicos;
- Apresentar estudos de caso com dados experimentais reais, discutindo os resultados em termos de rendimento térmico e conservação dos grãos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentos da Secagem de Grãos

A secagem de grãos é uma operação unitária fundamental na pós-colheita, cuja principal finalidade é reduzir o teor de umidade do produto a níveis seguros para armazenamento e transporte. Esse processo envolve a remoção de água presente nos poros e superfícies dos grãos, com o objetivo de evitar perdas por deterioração, proliferação de microrganismos e reações bioquímicas indesejadas. No caso da soja, manter o equilíbrio entre a eficiência do processo e a qualidade dos grãos é um desafio operacional frequente (SILVA, 2024; BOTELHO et al., 2015). A Figura 1 apresenta a forma como se dispõe a umidade dentro do grão.

Figura 1 - Esquema de disposição de água nas camadas do grão.



Fonte: (SENAR-MT, 2023)

2.1.1. Princípios de transferência de calor e massa

A secagem de grãos é caracterizada pela simultaneidade de dois fenômenos fundamentais: a transferência de calor para o produto e a transferência de massa da umidade do interior para a superfície do grão. O calor pode ser transferido por convecção, condução ou radiação, sendo a convecção do ar quente o mecanismo mais utilizado em sistemas industriais. A transferência de massa ocorre por difusão da umidade interna do grão até sua superfície, de onde é evaporada pelo fluxo de ar (OLIVEIRA et al., 2020; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

Algumas equações modelam o processo de secagem de grãos (RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M). Para o cálculo da transferência de calor convectiva, temos a Lei de resfriamento de Newton:

$$q = h \times A \times (T_{ar} - T_{grao}) \quad (1)$$

em que:

- q é o fluxo de calor (W);
- h é o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);
- A é a área superficial do grão (m^2);
- T_{ar} é a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$ ou K);
- T_{grao} é a temperatura do grão ($^{\circ}\text{C}$ ou K).

Para a difusão líquida de massa, temos a Lei de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \times \nabla^2 \times X \quad (2)$$

em que:

- X é o teor de umidade do grão (decimal, b.s. ou b.u.);
- D_{ef} é o coeficiente efetivo de difusão ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);
- t é o tempo (s).

Com isso, temos o balanço de massa simplificado representando o modelo exponencial de secagem:

$$\frac{dX}{dt} = -k \times (X - X_{eq}) \quad (3)$$

em que:

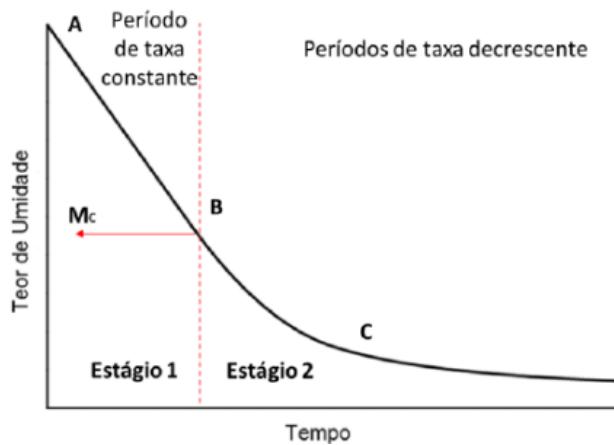
- k é a constante de secagem (s^{-1});
- X_{eq} é a umidade de equilíbrio higroscópico (decimal).

A taxa de secagem depende diretamente da diferença de pressão de vapor entre o grão e o ar, da temperatura do ar e da sua umidade relativa. O conhecimento desses princípios permite a modelagem matemática e a otimização do processo, visando maior eficiência energética e menor impacto na qualidade do produto.

2.1.2. Etapas do processo de secagem

O processo é dividido em duas etapas principais: o período de taxa constante e o período de taxa decrescente. A Figura 2 mostra uma curva típica de secagem, com a variação do teor de umidade com o tempo.

Figura 2 - Exemplo de curva típica de secagem.



Fonte: (GASPAROTTO & TRICHES, 2020).

Durante o período constante, a umidade superficial dos grãos é removida rapidamente, sendo essa etapa dominada pela evaporação da água livre, com alta taxa de secagem. Essa fase é predominantemente controlada pelas condições externas, como temperatura e velocidade do ar. Já no período decrescente, a umidade passa a migrar do interior do grão para a superfície, em um processo mais lento e dependente das propriedades físicas do material. Nesta fase, a taxa de secagem diminui gradativamente, sendo influenciada por fatores como porosidade, tamanho do grão e ligação da água às estruturas celulares (SILVA, 2024; FERREIRA et al., 2017).

O número de Biot mássico (Bi_m) é a ferramenta clássica para discutir a interação entre resistências interna e externa:

$$Bi_m = \frac{k_{ext} \times L_c}{D_{ef}} \quad (4)$$

em que:

- Bi_m é o número de Biot mássico (adimensional);
- k_{ext} é o coeficiente externo de transferência de massa ($m \cdot s^{-1}$);
- L_c é o comprimento característico do grão (m) — geralmente o raio médio para sementes;
- D_{ef} é o coeficiente efetivo de difusão da umidade no interior do grão ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Na fase constante, o grão ainda apresenta água livre na superfície, e a evaporação ocorre como se fosse uma “película” de água exposta. Nessa etapa, o valor de Bi_m tende a ser baixo, menor que 1, indicando que a resistência externa é mais significativa do que a resistência interna à difusão de umidade. A velocidade de secagem depende diretamente da temperatura do ar de secagem (que afeta o gradiente de pressão de vapor) e da velocidade do ar (que controla o coeficiente convectivo de transferência de massa, k_{ext}). À medida que a água superficial se esgota e a difusão interna passa a ser o fenômeno dominante, o Bi_m aumenta, caracterizando a fase decrescente (PARK; BROW; NUNES, 2002; RESENDE; CORRÊA; BOTELHO, 2008; BISSAO et al., 2012; CORRÊA et al., 2007).

Compreender essas etapas é essencial para ajustar os parâmetros operacionais de forma a evitar danos térmicos, preservar a qualidade fisiológica e reduzir custos energéticos.

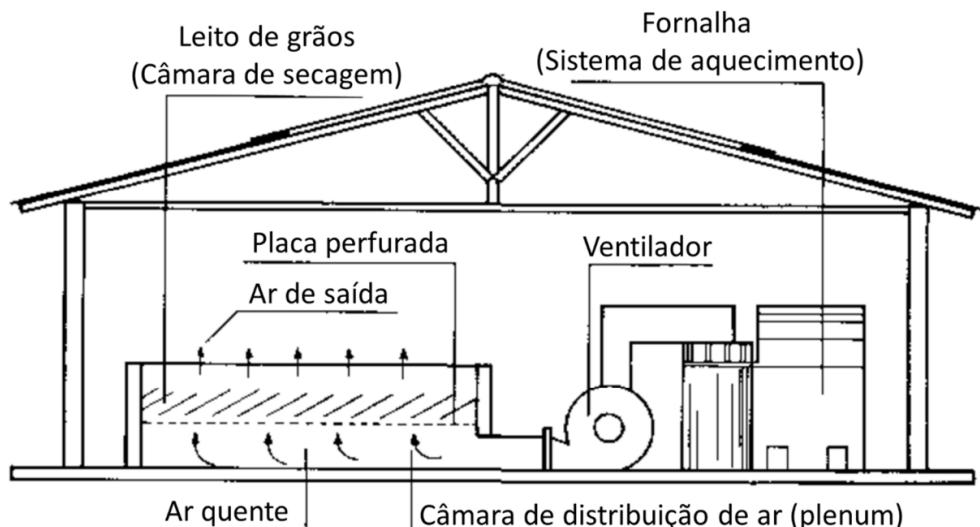
2.2. Tipos de Secadores Utilizados na Secagem de Soja

A escolha do secador é um dos fatores mais relevantes na etapa de pós-colheita da soja, pois influencia diretamente a eficiência do processo, o consumo de energia e a preservação da qualidade do grão. Entre os modelos mais utilizados destacam-se os secadores de fluxo cruzado, contrafluxo, fluxo concorrente, rotativos e de leito fixo, cada um apresentando vantagens e limitações conforme a escala de produção, as condições climáticas e o objetivo final da secagem. Em geral, secadores contínuos são mais empregados em operações de grande porte devido à maior capacidade de processamento, enquanto os secadores intermitentes e de leito fixo são comuns em propriedades menores, oferecendo maior controle sobre a temperatura e a uniformidade da secagem (SILVA et al., 2014; GONELI et al., 2016; SANTOS et al., 2020). A correta seleção do equipamento é essencial para otimizar a eficiência energética e reduzir riscos de danos físicos, fisiológicos e nutricionais aos grãos de soja.

2.2.1. Secadores de leito fixo

Os secadores de leito fixo consistem em estruturas onde o ar aquecido é forçado verticalmente através de uma camada estacionária de grãos. São amplamente utilizados em pequenas propriedades e estações experimentais, devido à sua construção simples e baixo custo de operação. Esse tipo de secador oferece bom controle da temperatura e da taxa de secagem, o que contribui para a preservação da qualidade dos grãos. No entanto, pode apresentar limitações quanto à uniformidade da secagem e à produtividade, principalmente quando operado sem sistema de homogeneização, como o uso de agitadores, revolvedores ou pás móveis que movimentam os grãos durante o processo, alteração manual na disposição dos grãos ou até alternância no fluxo de ar (SILVA, 2024; FERREIRA et al., 2017). A Figura 3 apresenta um secador de leito fixo.

Figura 3 - Diagrama esquemático de um secador de leito fixo.



Fonte: (Adaptada de DALPASQUALE, 1991).

O dimensionamento de secadores de leito fixo fundamenta-se nos balanços de massa e energia do processo de secagem. O balanço de massa pode ser representado pela taxa de remoção de água do produto, dada por:

$$m_w = -m_s \frac{dX}{dt}$$

(5)

em que:

- m_w é a taxa de evaporação da água ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);
- m_s é a massa seca de grãos (kg);
- X é o teor de umidade ($\text{kg água}\cdot\text{kg}^{-1}$ massa seca).

O balanço de energia, por sua vez, relaciona a energia transferida pelo ar aquecido com a evaporação da água:

$$m_{ar}c_{p,ar}(T_{in} - T_{out}) \approx m_w L_v \quad (6)$$

em que:

- m_{ar} é a vazão mássica do ar de secagem ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);
- $c_{p,ar}$ é o calor específico do ar ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);
- T_{in} e T_{out} são as temperaturas do ar (K);
- L_v é o calor latente de vaporização da água ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Além disso, a transferência de massa superficial pode ser descrita pela expressão convectiva:

$$m_w = k_c A_s (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \quad (7)$$

em que:

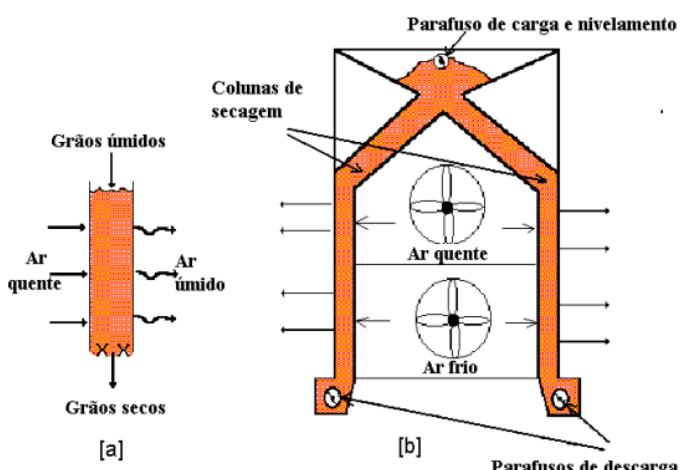
- k_c é o coeficiente de transferência de massa ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
- A_s é a área superficial de troca (m^2);
- $\rho_{v,s}$ e $\rho_{v,\infty}$ são as densidades de vapor de água na superfície do grão e no ar de secagem, respectivamente.

Essas equações permitem estimar parâmetros de projeto como a vazão de ar necessária, o tempo de residência dos grãos e a energia requerida, fornecendo uma base quantitativa para o dimensionamento de secadores de leito fixo (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; CORRÊA et al., 2007; PARK; BROD; NUNES, 2002).

2.2.2. Secadores de fluxo cruzado

Os secadores de fluxo cruzado são amplamente empregados na indústria agrícola brasileira, especialmente em unidades armazenadoras de médio e grande porte. Nessa configuração, o fluxo de grãos é vertical enquanto o ar quente atravessa horizontalmente a massa de grãos, promovendo a secagem, como mostra a Figura 4. Apesar de sua eficiência operacional e alta capacidade, uma desvantagem relevante é a diferença de temperatura entre os grãos do centro e da periferia, o que pode causar secagem desigual (BOTELHO et al., 2015; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

Figura 4 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxos cruzados que pode operar de forma contínua.



Fonte: (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

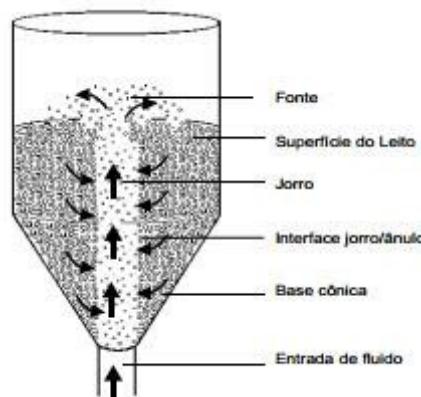
No caso do fluxo cruzado, a particularidade está na orientação do escoamento: o ar se movimenta horizontalmente através da coluna de grãos que escoa verticalmente, o que pode gerar diferenças de umidade entre regiões centrais e periféricas. Assim, as equações de balanço são aplicadas localmente em elementos diferenciais do leito, permitindo o cálculo de perfis de temperatura e umidade ao longo da coluna de grãos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; CORRÊA et al., 2007; PARK; BROD; NUNES, 2002).

2.2.3. Secadores de leito de jorro

Os secadores de leito de jorro são equipamentos mais complexos que operam com elevada turbulência entre os grãos e o ar quente. O contato intenso entre as fases promove alta

taxa de transferência de calor e massa, sendo indicado para materiais sensíveis, como sementes de soja. Embora ofereçam secagem mais rápida e eficiente, requerem maior controle operacional e custo energético elevado, o que restringe seu uso a aplicações específicas e pesquisas (OLIVEIRA et al., 2020; GASPAROTTO; TRICHES, 2020). A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático desse tipo de secador.

Figura 5 - Diagrama esquemático de um secador de leito de jorro.



Fonte: (Jornal EquipeX , 2022).

A velocidade mínima de jorro é o parâmetro fundamental para garantir a estabilidade da operação do leito de jorro. Diversas correlações empíricas foram propostas na literatura. Uma das mais utilizadas é a de Mathur e Gishler (1955):

$$U_{mj} = K \times \left(\frac{g \times D_p \times (\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{0,5} \quad (8)$$

em que:

- U_{mj} é a velocidade mínima de jorro (m/s);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- D_p é o diâmetro médio da partícula (m);
- ρ_s é a densidade do sólido (kg/m^3);
- ρ_g é a densidade do gás (kg/m^3);

- K é a constante empírica dependente da geometria (tipicamente entre 2,0 e 4,0) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A queda de pressão no leito em regime de jorro pode ser estimada a partir do balanço de forças entre o arraste do gás e o peso das partículas. Uma forma simplificada é dada por:

$$\Delta P = \frac{(1 - \varepsilon) \times \rho_s \times g \times H}{\varepsilon} \quad (9)$$

em que:

- ΔP é a perda de carga no leito (Pa);
- ε é a fração de vazios do leito;
- H é a altura da cama de partículas (m).

A taxa de remoção de umidade em regime de taxa constante pode ser aproximada pela equação geral de transferência de massa (MUJUMDAR, 2014):

$$N_A = k_y \times a \times (Y_s - Y_\infty) \quad (10)$$

em que:

- N_A é o fluxo molar de vapor de água (kmol/m²·s);
- k_y é o coeficiente de transferência de massa (m/s);
- a é a área interfacial específica (m²/m³);
- Y_s é a umidade na interface da partícula (kg vapor/kg ar seco);
- Y_∞ é a umidade do ar de secagem no meio (kg vapor/kg ar seco).

O tempo médio de secagem em um leito de jorro pode ser estimado pelo balanço entre a quantidade de umidade a ser removida e a taxa de secagem média (RIBEIRO; ANDRADE, 2004):

$$t_s = \frac{X_i - X_f}{R_s}$$

(11)

em que:

- t_s é o tempo de secagem (s);
- X_i é a umidade inicial (kg água/kg sólido seco);
- X_f é a umidade final (kg água/kg sólido seco);
- R_s é a taxa média de secagem (kg água/kg sólido seco·s).

A eficiência térmica pode ser estimada pela relação entre a energia utilizada na evaporação da água e a energia fornecida pelo ar de secagem (KUNII; LEVENSPIEL, 1991):

$$\eta = \frac{m_{H_2O} \times \Delta H_{vap}}{m_g \times C_{pg} \times (T_{in} - T_{out})} \quad (12)$$

em que:

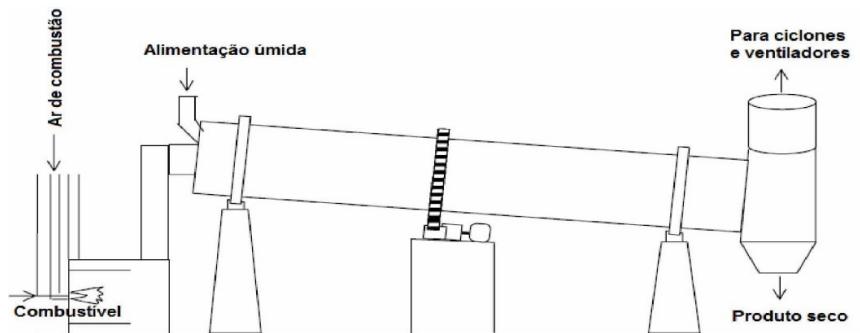
- η é a eficiência térmica (%);
- m_{H_2O} é a massa de água evaporada (kg/s);
- ΔH_{vap} é o calor latente de vaporização da água (kJ/kg);
- m_g é a vazão mássica do ar de secagem (kg/s);
- C_{pg} é o calor específico do ar (kJ/kg·K);
- T_{in} e T_{out} são as temperaturas de entrada e saída do ar (K).

2.2.4. Secadores rotativos

O secador rotatório é um dos equipamentos mais utilizados em processos de secagem na engenharia química devido à sua simplicidade e versatilidade. Ele é constituído por um cilindro metálico que gira apoiado em rolamentos e, geralmente, possui uma leve inclinação que facilita o deslocamento do material úmido da entrada até a saída do produto seco. O movimento de rotação combinado com o fluxo de ar quente proporciona intensa mistura e favorece a transferência de calor e massa. A escolha entre fluxo concorrente ou contracorrente depende das características do material, sendo que o primeiro é aplicado a substâncias sensíveis ao calor

e o segundo é utilizado quando se busca maior eficiência térmica (MUJUMDAR, 2006). A Figura 6 demonstra um secador rotatório típico:

Figura 6 - Diagrama esquemático de um secador rotatório.



Fonte: Adaptado de HANDBOOK OF INDUSTRIAL DRYING, 2006.

De acordo com Mujumdar (2006), os secadores rotatórios de contato direto são considerados os mais simples e econômicos, embora possam apresentar perdas de partículas finas na corrente de gases, o que torna necessária a instalação de coletores como ciclones e filtros. O controle do processo é realizado principalmente por meio da temperatura do ar e da taxa de alimentação, que deve ser estável para assegurar uniformidade na secagem. Além disso, o isolamento térmico é frequentemente empregado para reduzir perdas de energia, enquanto acessórios como câmaras de combustão ou bobinas de vapor são utilizados para ajustar as condições operacionais. Dessa forma, o método de operação e as condições de processo devem ser definidos de acordo com as propriedades do material a ser seco. O Quadro 1 apresenta as equações de projeto de secadores rotatórios.

Tabela 1 - Equações de projeto de secadores rotatórios

Equações	Descrição	Referência
$m_{H_2O} = m_s(X_i - X_f)$ (13)	Balanço de massa da água	MUJUMDAR (2006)
$m_{H_2O} = m_g(Y_{out} - Y_{in})$ (14)	Alternativa pelo balanço de ar úmido	MUJUMDAR (2006)
$Q = m_{H_2O} \Delta H_{vap} + m_s C_{p,s}(T_{s,out} - T_{s,in}) + Q_{perdas}$ (15)	Balanço de energia	MUJUMDAR (2006); KUNII; LEVENSPIEL (1991)
$Q \approx m_g C_{p,g}(T_{g,in} - T_{g,out})$ (16)	Estimativa simplificada de calor pela diferença de entalpia do ar.	MUJUMDAR (2006)
$Q = UA\Delta T_{lm}$ (17)	Dimensionamento da área de troca térmica do cilindro.	KUNII; LEVENSPIEL (1991)
$A = \pi DL$ (18)	Relação área-comprimento do secador rotatório.	KUNII; LEVENSPIEL (1991)
$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_g} + \frac{\delta_w}{k_w} + \frac{1}{h_s}$ (19)	Resistências em série: cálculo do coeficiente global de transferência de calor.	KUNII; LEVENSPIEL (1991)
$Nu = C R_e^m P_r^n$ (20)	Correlação convectiva para estimar o coeficiente de película do gás.	KUNII; LEVENSPIEL (1991); MUJUMDAR (2006)
$t_r = \frac{\rho_b V}{m_s}$ (21)	Tempo de residência médio dos sólidos no tambor.	MUJUMDAR (2006)
$L \approx u_s t_r$ (22)	Relação entre comprimento, velocidade axial média dos sólidos e tempo de residência.	MUJUMDAR (2006)
$m_g = \frac{m_{H_2O}}{Y_{out} - Y_{in}}$ (23)	Vazão de ar necessária para atingir a remoção de umidade desejada.	MUJUMDAR (2006)
$\Delta P \approx \frac{(1-\varepsilon)\rho_s g H}{\varepsilon}$ (24)	Estimativa simplificada da perda de carga do sistema.	MASSARANI (2002)

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2025).

em que:

- m_{H_2O} é a vazão mássica de água evaporada (kg/s);
- m_s é a vazão mássica de sólidos secos (kg/s);
- X_i é a umidade inicial do material (kg água/kg sólido seco);
- X_f é a umidade final do material (kg água/kg sólido seco);
- m_g é a vazão mássica de ar de secagem (kg/s);
- Y_{in} é a umidade específica do ar na entrada (kg vapor/kg ar seco);
- Y_{out} é a umidade específica do ar na saída (kg vapor/kg ar seco);
- Q é a taxa de calor requerida no processo (kW ou kJ/s);
- ΔH_{vap} é o calor latente de vaporização da água (kJ/kg);

- $C_{p,s}$ é o calor específico dos sólidos (kJ/kg·K);
- $C_{p,g}$ é o calor específico do ar (kJ/kg·K);
- $T_{s,in}$ é a temperatura de entrada dos sólidos (K ou °C);
- $T_{s,out}$ é a temperatura de saída dos sólidos (K ou °C);
- $T_{g,in}$ é a temperatura de entrada do ar (K ou °C);
- $T_{g,out}$ é a temperatura de saída do ar (K ou °C);
- Q_{perdas} é a perda térmicas do sistema (kW ou kJ/s);
- U é o coeficiente global de transferência de calor (W/m²·K);
- A é a área de troca térmica (m²);
- ΔT_{lm} é a diferença logarítmica média de temperatura (K);
- D é o diâmetro interno do tambor rotatório (m);
- L é o comprimento do tambor rotatório (m);
- h_g é o coeficiente convectivo do lado do gás (W/m²·K);
- h_s é o coeficiente convectivo do lado do sólido (W/m²·K);
- δ_w é a espessura da parede metálica do secador (m);
- k_w é a condutividade térmica do material da parede (W/m·K);
- Nu é o número de Nusselt (adimensional);
- Re é o número de Reynolds (adimensional);
- Pr é o número de Prandtl (adimensional);
- k_g é a condutividade térmica do gás (W/m·K);
- D_h é o diâmetro hidráulico ou dimensão característica (m);
- t_r é o tempo médio de residência dos sólidos (s);
- ρ_b é a densidade aparente do leito de sólidos (kg/m³);
- V é o volume ocupado pelos sólidos no tambor (m³);
- u_s é a velocidade axial média dos sólidos (m/s);
- ΔP é a queda de pressão no sistema (Pa);
- ε é a porosidade ou fração de vazios do leito (adimensional);
- ρ_s é a densidade do sólido (kg/m³)
- g é a aceleração da gravidade (m/s²);
- H é a altura efetiva da cama de partículas (m.)

2.3. Secagem intermitente e contínua

A secagem contínua é caracterizada pelo fluxo constante de grãos e ar aquecido, sendo amplamente adotada em secadores industriais de grande porte. Já a secagem intermitente é realizada em etapas, com pausas entre os ciclos de aquecimento e repouso, permitindo melhor redistribuição da umidade interna dos grãos. Estudos indicam que a secagem intermitente pode reduzir o estresse térmico sobre os grãos e melhorar a uniformidade da secagem, embora o tempo total de processo seja maior (SILVA, 2024; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

2.4. Vantagens e limitações de cada tipo

Cada tipo de secador apresenta características específicas que devem ser consideradas conforme o volume de grãos, sensibilidade do produto, disponibilidade energética e custo operacional. Secadores de leito fixo oferecem simplicidade e controle, mas baixa produtividade. Os de fluxo cruzado têm alta capacidade, porém menor uniformidade. Leitos de jorro promovem secagem eficiente, porém com custos mais elevados. A escolha entre secagem contínua e intermitente também depende da finalidade (grãos comerciais ou sementes) e da qualidade desejada. A Tabela 1 resume essas comparações com base em critérios técnicos extraídos da literatura.

Tabela 2 - Comparaçao entre os principais tipos de secadores e tipos de secagem.

TIPO DE SECADOR	CAPACIDADE OPERACIONAL	CONTROLE DE TEMPERATURA	QUALIDADE DO PRODUTO	CUSTO E COMPLEXIDADE
Leito Fixo	Baixa a média	Bom controle	Alta	Baixo, simples
Fluxo Cruzado	Alta	Variável	Boa	Moderado, amplamente utilizado
Leito de Jorro	Média	Excelente, com alto contato térmico	Muito alta	Alta complexidade e custo elevado
Secagem Contínua	Alta	Menor controle individual	Boa	Alta eficiência, menor uniformidade
Secagem Intermitente	Média	Melhor redistribuição de umidade	Alta	Maior tempo de processo

Fonte: Adaptado de SILVA (2024); BOTELHO et al. (2015); OLIVEIRA et al. (2020); GASPAROTTO; TRICHES (2020).

2.5. Condições Operacionais na Secagem de Soja

2.5.1. Temperatura do ar de secagem

A temperatura do ar de secagem é um dos parâmetros mais críticos para o desempenho do processo de secagem de soja. Ela influencia diretamente a velocidade de remoção da umidade e o consumo energético do sistema. Em geral, temperaturas mais elevadas aceleram o processo, mas podem causar danos térmicos aos grãos, como rachaduras, escurecimento e redução da viabilidade fisiológica, especialmente em sementes destinadas à reprodução (BOTELHO et al., 2015; SILVA, 2024).

A literatura aponta que a faixa ideal de temperatura para secagem de grãos de soja destinados ao consumo gira entre 40 °C e 60 °C, enquanto para sementes recomenda-se não ultrapassar 40 °C, para evitar perda de germinação (OLIVEIRA et al., 2020). A elevação da temperatura também pode provocar degradação de compostos lipídicos e proteicos, afetando negativamente o valor nutricional dos grãos.

A temperatura de secagem exerce influência direta sobre a qualidade dos grãos de soja. A escolha inadequada dessa variável pode comprometer tanto o valor comercial quanto o uso agronômico dos grãos. Diversos estudos mostram que as propriedades físicas, nutricionais e fisiológicas da soja são afetadas conforme a intensidade térmica aplicada durante o processo (OLIVEIRA et al., 2018; BOTELHO et al., 2015). A seguir, são discutidos os principais parâmetros de qualidade impactados por temperaturas elevadas:

- Danos ao grão (rachaduras e quebras): de acordo com Botelho et al. (2015), temperaturas superiores a 55 °C favorecem a ocorrência de rachaduras e fissuras devido à rápida evaporação de água no interior do grão. Esse choque térmico causa estresse estrutural, gerando perdas na integridade física e reduzindo a capacidade de armazenamento.
- Preservação da inteireza do grão: OLIVEIRA et al. (2018) observaram que secagens a temperaturas moderadas resultam em menor taxa de trincas, mantendo o aspecto externo dos grãos mais uniforme. A integridade física é essencial para o transporte, a comercialização e o processamento posterior.
- Reidratação e aparência visual: estudos de Compagnon et al. (2010) apontam que temperaturas elevadas causam escurecimento dos grãos e reduzem sua capacidade de reidratar uniformemente. Esse efeito é prejudicial especialmente para sementes e produtos alimentícios destinados à exportação.

- Qualidade nutricional (proteínas, lipídios, solubilidade): a exposição a temperaturas acima de 40–45 °C pode afetar negativamente a solubilidade de proteínas e degradar compostos lipídicos, conforme relatado por ZANIN et al. (2016). A redução desses componentes compromete o uso da soja em formulações nutricionais e rações animais.
- Germinação e vigor de sementes: segundo Park et al. (2018), o potencial germinativo dos grãos de soja diminui significativamente quando submetido a temperaturas acima de 43 °C. Isso ocorre porque o calor excessivo danifica estruturas celulares essenciais para o desenvolvimento do embrião.
- Longevidade dos lotes de sementes: ZANIN et al. (2016) também demonstraram que secagens mais suaves garantem maior longevidade das sementes durante o armazenamento, preservando sua viabilidade por períodos prolongados e reduzindo perdas pós-colheita.

2.5.2. Umidade relativa do ar e fluxo de ar

Além da temperatura, a umidade relativa do ar e o fluxo de ar são variáveis fundamentais no processo de secagem da soja. A umidade relativa do ar influencia diretamente a capacidade higroscópica do ar em absorver água dos grãos. Quando o ar está seco (baixa umidade relativa), ele possui maior potencial de remoção de umidade; por outro lado, em condições de alta umidade relativa, a secagem se torna mais lenta e menos eficiente (OLIVEIRA et al., 2020).

O fluxo de ar (ou vazão de ar) também é um fator determinante para a taxa de secagem. Vazões elevadas aumentam a renovação do ar no sistema e reduzem a umidade da camada de ar próxima à superfície do grão, favorecendo o gradiente de pressão de vapor. Entretanto, fluxos excessivos podem causar aumento no consumo energético sem ganhos significativos na eficiência, especialmente quando combinados com temperaturas inadequadas (SILVA, 2024; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

A escolha adequada desses parâmetros deve considerar as condições climáticas locais, o tipo de secador e a umidade inicial do produto. Em geral, recomenda-se trabalhar com umidade relativa abaixo de 60% e vazões de ar ajustadas conforme a capacidade térmica do sistema, visando eficiência energética e preservação da qualidade final dos grãos.

2.5.3. Tempo de residência dos grãos

O tempo de residência dos grãos no interior do secador refere-se ao período em que os grãos permanecem expostos ao fluxo de ar aquecido durante o processo de secagem. Este tempo influencia diretamente a uniformidade da secagem, a integridade física dos grãos e o consumo energético do sistema. Em secadores de fluxo contínuo, o tempo de residência é determinado pela velocidade de escoamento dos grãos e pela altura da coluna de produto; já nos sistemas de leito fixo ou intermitente, o tempo pode ser ajustado manualmente ou por controle automático (OLIVEIRA et al., 2020; SILVA, 2024).

Quando o tempo de residência é muito curto, os grãos podem não atingir a umidade final desejada, comprometendo a estabilidade no armazenamento. Por outro lado, tempos excessivamente longos aumentam o risco de superaquecimento, fissuras e degradação de compostos sensíveis ao calor. Estudos mostram que a variação do tempo de residência, quando associada à heterogeneidade da massa de grãos, pode resultar em secagem não uniforme e perdas qualitativas (BOTELHO et al., 2015; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

O ajuste adequado do tempo de residência, aliado ao monitoramento da temperatura e da umidade, é essencial para garantir um processo eficiente e seguro. Novas tecnologias têm explorado o uso de sensores e automação para monitoramento em tempo real, possibilitando ajustes dinâmicos no tempo de residência conforme as condições internas do secador.

2.5.4. Tipo de combustível ou fonte de energia

A escolha do tipo de combustível ou fonte de energia utilizada na secagem de soja está diretamente ligada aos custos operacionais, à disponibilidade local e ao impacto ambiental do processo. Os sistemas convencionais de secagem utilizam, majoritariamente, fontes térmicas derivadas da queima de lenha, GLP (gás liquefeito de petróleo), óleo diesel ou energia elétrica. Cada uma dessas opções apresenta vantagens e limitações quanto à eficiência térmica, custo por unidade de energia gerada e nível de controle sobre o processo (SILVA, 2024; BOTELHO et al., 2015).

A lenha é amplamente utilizada em regiões com disponibilidade florestal, sendo uma alternativa de baixo custo, mas que exige atenção quanto ao controle da temperatura e à emissão de poluentes. O uso de GLP e óleo diesel, por sua vez, permite maior controle térmico e uniformidade na secagem, porém representa custos mais elevados. Já a energia elétrica, apesar de limpa e precisa, possui custo operacional elevado em larga escala e exige infraestrutura adequada (OLIVEIRA et al., 2020).

Tendências recentes apontam para o uso de fontes renováveis, como biomassa, biogás e sistemas híbridos com energia solar térmica. Essas alternativas visam aumentar a sustentabilidade do processo e reduzir a pegada de carbono da cadeia produtiva. Além disso, estudos vêm investigando a viabilidade de integração de sistemas de recuperação de calor e cogeração, como forma de elevar a eficiência energética da secagem em ambientes agroindustriais (GASPAROTTO; TRICHES, 2020).

2.5.5. Controle e automação do processo

O controle e a automação do processo de secagem têm ganhado crescente relevância no contexto agroindustrial, especialmente no processamento de grãos como a soja. A adoção de sensores, atuadores e sistemas supervisórios permite o monitoramento contínuo de variáveis críticas como temperatura, umidade do ar, umidade do grão, tempo de residência e fluxo de ar. Com isso, é possível ajustar dinamicamente os parâmetros operacionais, otimizando a eficiência energética e garantindo maior uniformidade no produto final (SILVA, 2024; OLIVEIRA et al., 2020).

Sistemas automatizados reduzem a dependência de operadores humanos, minimizam erros operacionais e possibilitam o rastreamento dos dados do processo, o que é fundamental para tomadas de decisão baseadas em evidências. Além disso, permitem respostas rápidas a variações nas condições ambientais externas e às características dos lotes de grãos processados, reduzindo perdas e danos térmicos (MACHADO; MENDONÇA, 2016).

O avanço das tecnologias digitais, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e sistemas SCADA, tem impulsionado o desenvolvimento de soluções cada vez mais precisas e acessíveis para o controle da secagem. Pesquisas atuais investigam, por exemplo, o uso de algoritmos preditivos para estimar o ponto ótimo de secagem,

contribuindo para decisões em tempo real e para a automação inteligente da operação (GASPAROTTO; TRICHES, 2020).

Em sistemas modernos, sensores de umidade online (“online moisture meters”) são colocados tanto na entrada quanto na saída do secador, permitindo ajustes automáticos do fluxo de ar, da temperatura ou da taxa de descarga de grãos, para evitar tanto a secagem insuficiente quanto o superaquecimento. Por exemplo, Zhang et al. (2013) descrevem um sistema de controle preditivo que inclui medidores de umidade do grão instalados nos elevadores de entrada e saída, além de sensores de temperatura do ar e dos grãos — os dados são usados em malha fechada para manter metas de umidade fixas.

Além disso, há dispositivos comerciais que integram medição contínua de umidade do produto diretamente no fluxo de grãos (por exemplo, sensores TDR, medidores capacitivos & resistivos) que alimentam controladores lógicos programáveis (PLCs) ou sistemas SCADA. O sensor TRIME® GWs, por exemplo, fornece medição contínua de umidade do grão dentro do secador, com integração para automação do processo, reduzindo perdas por desidratação ou umidade residual elevada.

Outro aspecto relevante é a monitoração da massa do leito de grãos ou “massa de sólidos em secador” em tempo real. Esse dado permite estimar o tempo de residência dos grãos, ajustar a alimentação, a velocidade de descarga, compensar variações de carga e manter a uniformidade do produto final. Em muitos casos isso é feito por célula de carga ou balança instalada na saída ou entrada do secador, combinada a sensores de nível ou peso em funis/elevadores. Zhang et al. também mencionam sensores de nível (L1, L2) no sistema para estimar a massa/stocks de grãos em diferentes pontos.

A adoção de algoritmos preditivos/malha de controle avançada (Model Predictive Control – MPC) permite antecipar variações no grão (umidade, granulometria), condições ambientais (temperatura/umidade do ar ambiente) ou operacional (vazão de ar, carga do secador) e ajustar os parâmetros operacionais antes que o produto sofra danos ou ocorra desperdício energético. Essas técnicas são cada vez mais estudadas; por exemplo, dispositivos que usam dados históricos, medições instantâneas e modelos empíricos para estimar o ponto ótimo de secagem em tempo real. (GASPAROTTO; TRICHES, 2020).

Também é cada vez mais comum o uso de sensores de umidade de ambiente e temperatura para ajustar automaticamente a pré-condição do ar de secagem — se necessário, pré-resfriamento ou pré-aquecimento, ou controle de mistura de ar

externo/recirculado — para garantir que o ar que entra esteja nas condições adequadas, reduzindo choques térmicos nos grãos e melhorando a uniformidade de secagem.

2.6. Eficiência Energética do Processo de Secagem

2.6.1. Conceito e indicadores de eficiência energética

A eficiência energética na secagem de soja refere-se à capacidade do sistema em transformar a energia fornecida (geralmente térmica) em remoção efetiva de umidade dos grãos. Indicadores de eficiência energética são fundamentais para avaliar o desempenho de diferentes tecnologias de secagem, e seu uso permite identificar perdas térmicas e oportunidades de melhoria no processo. O conceito baseia-se na proporção entre a energia útil (efetivamente utilizada na evaporação da água) e a energia total fornecida ao sistema (SILVA, 2024).

Dentre os indicadores mais utilizados destacam-se: o rendimento térmico (%), o consumo específico de energia (MJ/kg H₂O evaporada) e o rendimento global do sistema. Essas métricas variam conforme o tipo de secador, as condições operacionais e o tipo de combustível empregado (BOTELHO et al., 2015).

2.6.2. Dados comparativos da literatura por tipo de secador

Diversos estudos comparativos evidenciam diferenças significativas nos indicadores de eficiência energética entre os tipos de secadores utilizados na secagem da soja. Secadores de leito fixo, apesar de simples, apresentam rendimentos térmicos relativamente baixos, com valores típicos entre 25% e 35%. Já os secadores de fluxo cruzado, amplamente utilizados no setor agrícola brasileiro, apresentam rendimento térmico de 30% a 45% dependendo do controle de temperatura e fluxo de ar (BOTELHO et al., 2015).

Secadores de leito de jorro, por sua vez, apresentam os melhores desempenhos energéticos, com rendimento térmico podendo ultrapassar 50%, especialmente quando aliados a sistemas automatizados e controle preciso do tempo de residência (OLIVEIRA et al., 2020). O consumo específico de energia também varia: valores médios vão de 4,5 MJ/kg H₂O (em sistemas contínuos com controle deficiente) a 2,5 MJ/kg H₂O (em secadores intermitentes otimizados) (SILVA, 2024; MACHADO; MENDONÇA, 2016).

Esses dados reforçam a importância de considerar não apenas o tipo de secador, mas também o modo de operação, a qualidade do isolamento térmico e a automação no controle de variáveis para maximizar a eficiência do processo.

2.6.3. Consumo energético e sustentabilidade

O consumo energético é um dos principais componentes do custo operacional da secagem de grãos. Em processos mal dimensionados, as perdas térmicas e o uso ineficiente do combustível elevam consideravelmente o gasto energético, impactando a rentabilidade da produção e o meio ambiente. A busca por maior eficiência energética está, portanto, diretamente relacionada à sustentabilidade econômica e ambiental do setor (SILVA, 2024).

Iniciativas para a redução do consumo energético incluem: a modernização de queimadores, o uso de isolamento térmico adequado, a otimização do tempo de secagem, incluindo a prática da secagem intermitente citada anteriormente, e a adoção de fontes renováveis, como biomassa ou solar térmica. Além disso, estratégias de recuperação de calor e cogeração vêm sendo estudadas para integrar a secagem a outros processos térmicos da agroindústria, aumentando o aproveitamento energético do sistema (GASPAROTTO; TRICHES, 2020).

A incorporação de indicadores de desempenho energético e ambiental nos projetos e operações de secagem pode contribuir significativamente para o cumprimento de metas de sustentabilidade, como a redução do consumo específico de energia e da emissão de gases do efeito estufa, bem como a redução de perdas pós-colheita e otimização do uso de água, isso tudo sem comprometer a qualidade final dos grãos processados (MARTYNENKO, A.; VIEIRA, G. N. A., 2023).

2.7. Efeitos da Secagem na Qualidade da Soja

2.7.1. Qualidade física (quebra, rachaduras, dano térmico)

A secagem da soja, embora essencial para a conservação e comercialização dos grãos, pode causar impactos negativos na qualidade física do produto quando conduzida de forma inadequada. Entre os principais danos físicos observados estão as quebras, rachaduras e o dano

térmico, resultantes principalmente de variações bruscas de temperatura e umidade durante o processo.

As rachaduras ocorrem, geralmente, quando o grão úmido é exposto rapidamente a temperaturas elevadas, provocando uma evaporação intensa da água interna. Esse fluxo de umidade gera tensões mecânicas na estrutura do grão, ocasionando fissuras e quebras da casca. Além de comprometer a aparência, esses danos reduzem o rendimento industrial e aumentam a suscetibilidade dos grãos a infestações e deteriorações durante o armazenamento (BOTELHO et al., 2015).

O dano térmico, por sua vez, refere-se às alterações provocadas pelo calor excessivo, que pode resultar no escurecimento dos grãos, endurecimento da casca e perda de propriedades tecnológicas importantes, especialmente em grãos destinados à produção de sementes ou à alimentação humana (OLIVEIRA et al., 2018).

Estudos como os de Zanin et al. (2016) demonstram que o uso de secagens intermitentes ou de temperaturas moderadas, controladas por automação, podem reduzir significativamente a incidência de rachaduras e preservar a qualidade física da soja. Dessa forma, a escolha dos parâmetros operacionais adequados se torna fundamental para garantir a integridade do grão e o seu valor comercial.

2.7.2. Qualidade química (teor de óleo, proteína, viabilidade fisiológica)

A qualidade química da soja após o processo de secagem está diretamente relacionada à manutenção de seus principais componentes nutricionais, como o teor de óleo, proteína e a viabilidade fisiológica. Esses atributos são fundamentais para o valor comercial da soja, especialmente em indústrias de processamento de alimentos e ração animal.

Estudos indicam que temperaturas excessivamente altas durante a secagem podem provocar degradações químicas nos grãos. O teor de óleo, por exemplo, pode sofrer oxidação ou degradação térmica, comprometendo tanto o rendimento quanto a qualidade do produto extraído (ZANIN et al., 2016).

Já o teor de proteína, embora relativamente estável, pode apresentar perda de solubilidade quando submetido a temperaturas superiores a 60 °C, afetando sua funcionalidade em aplicações industriais (OLIVEIRA et al., 2018).

Além disso, a viabilidade fisiológica embora comumente associada à qualidade fisiológica também depende da integridade química de estruturas internas dos grãos. A desnaturação de proteínas estruturais e a alteração de enzimas essenciais ao metabolismo germinativo podem reduzir a taxa de emergência de plântulas, mesmo quando a aparência física do grão permanece inalterada (PARK et al., 2018).

Assim, o controle rigoroso das condições térmicas durante a secagem é essencial não apenas para evitar perdas visíveis, mas também para preservar a qualidade química dos grãos e garantir seu desempenho nas etapas seguintes da cadeia produtiva.

2.7.3. Impactos da secagem rápida

A secagem rápida ou agressiva, caracterizada pelo uso de temperaturas elevadas e tempos de exposição curtos, é frequentemente aplicada com o objetivo de acelerar o processo de redução da umidade dos grãos, especialmente em operações comerciais de grande escala. No entanto, essa prática pode gerar efeitos adversos significativos sobre a qualidade do produto, comprometendo seu valor econômico e sua viabilidade para determinadas finalidades.

Do ponto de vista físico, a rápida remoção de umidade pode causar rachaduras, trincas e quebras nos grãos de soja, em decorrência das tensões internas provocadas pelo gradiente de umidade entre o centro e a superfície do grão (BOTELHO et al., 2015). Esses danos reduzem a resistência mecânica e facilitam a deterioração durante o armazenamento.

Além disso, a exposição a temperaturas superiores a 55 °C pode provocar o escurecimento dos grãos, a desnaturação de proteínas e a perda de viabilidade fisiológica, especialmente em grãos destinados à produção de sementes (OLIVEIRA et al., 2018; PARK et al., 2018). A degradação de compostos químicos essenciais, como lipídios e enzimas, também compromete o uso industrial da soja.

Portanto, embora a secagem agressiva represente um ganho operacional em termos de tempo e produtividade, ela deve ser cuidadosamente controlada para evitar perdas de qualidade. O uso de temperaturas moderadas e estratégias como a secagem intermitente ou o uso de pré-secagem podem mitigar os impactos negativos e garantir um melhor aproveitamento dos grãos.

3. ESTUDOS DE CASO

A realização deste estudo de caso tem como objetivo aprofundar a compreensão sobre a eficiência energética e os impactos qualitativos envolvidos na secagem de grãos de soja, com base em exemplos reais documentados na literatura científica. Apesar da ampla quantidade de pesquisas existentes sobre fundamentos teóricos da secagem, a aplicação prática de diferentes tecnologias em contextos operacionais distintos oferece oportunidades valiosas para comparação de desempenho, análise de variáveis críticas e avaliação da viabilidade técnica e econômica.

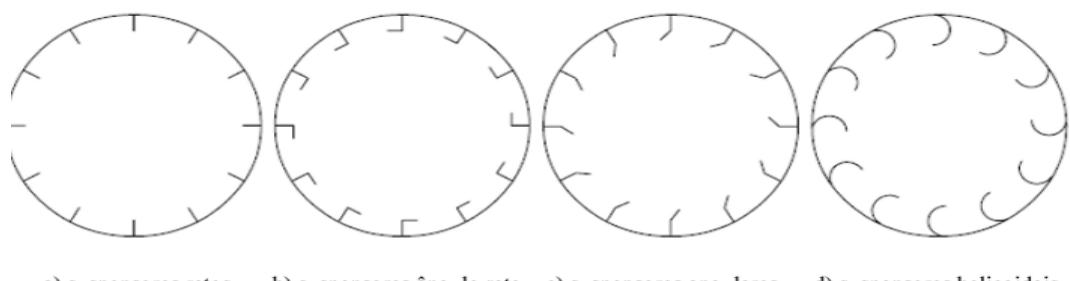
Neste capítulo, são apresentados estudos de caso selecionados com base em critérios de relevância metodológica, diversidade de tipos de secadores e variedade de condições operacionais. Foram priorizados trabalhos desenvolvidos nos últimos 10 anos por instituições de ensino, pesquisa e unidades agroindustriais, com dados suficientemente robustos para permitir análise comparativa. Além disso, buscou-se incluir estudos que explorassem diferentes fontes de energia, métodos de controle térmico e formas de operação (contínua e intermitente), a fim de representar a realidade técnica encontrada no setor agrícola brasileiro.

A motivação para incluir estudos de caso em um trabalho de revisão bibliográfica reside na necessidade de conectar a teoria com a prática, evidenciando como os conceitos discutidos nos capítulos anteriores se comportam em situações reais. Espera-se, com isso, oferecer subsídios para futuras decisões técnicas e acadêmicas relacionadas à escolha de sistemas de secagem mais eficientes, sustentáveis e adequados à preservação da qualidade dos grãos de soja.

3.1. Secagem de grãos de soja em tambor rotativo com infravermelho auxiliado por convecção

O primeiro estudo de caso analisado neste trabalho consistiu em uma avaliação energética detalhada da secagem de grãos de soja em um secador rotativo, utilizando fontes de energia térmica por convecção forçada (ar quente), radiação infravermelha e uma combinação de ambas. O objetivo central da pesquisa foi avaliar a eficiência térmica e a qualidade da secagem de grãos de soja utilizando diferentes potências de aquecimento e variações de fração de enchimento no tambor rotativo, com e sem a presença de suspensores internos (JOANAS, 2022). A Figura 7 detalha os principais tipos de suspensores internos em secadores rotativos.

Figura 7 - Tipos mais comuns de suspensores em secadores rotativos.

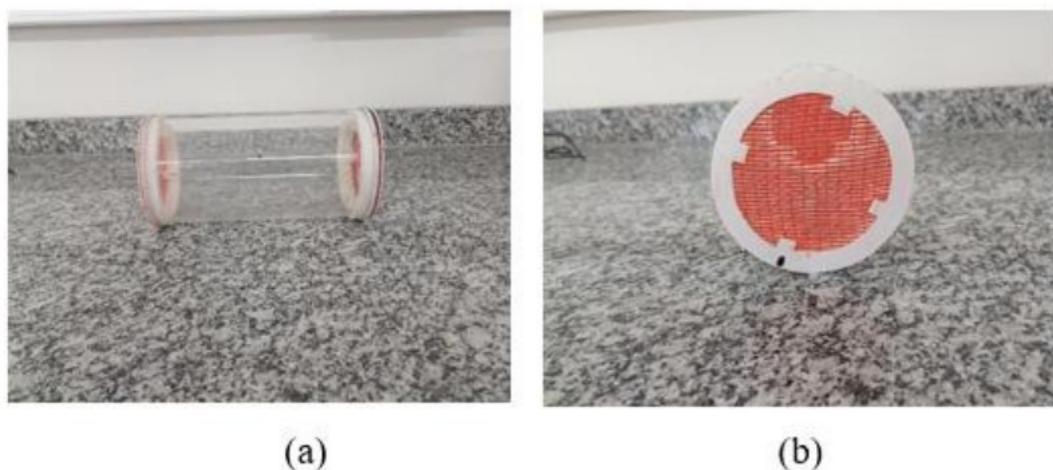


a) suspensores retos b) suspensores ângulo reto c) suspensores angulares d) suspensores helicoidais

Fonte: (FERNANDES,2008).

O experimento foi conduzido em um secador de tambor rotativo de bancada, com alimentação por resistências elétricas e uso de radiação infravermelha, operando em regime descontínuo. A Figura 8 representa o secador utilizado.

Figura 8 - Tambor rotativo (a) visão lateral e (b) visão frontal.



Fonte: (JOANAS, 2022).

As condições de operação foram variadas conforme os seguintes parâmetros: potência aplicada (141,86 W, 178,92 W e 217,26 W), fração de enchimento do tambor (10 %, 20 % e 30 %), e presença ou não de suspensores internos.

Foram analisados os efeitos dessas variáveis sobre o teor de umidade final dos grãos, tempo de secagem, rendimento térmico e consumo energético.

A autora aplicou as equações clássicas para cálculo da umidade base seca, rendimento térmico e consumo energético. O rendimento térmico (η) foi calculado pela Equação 12, relacionando a massa de água removida, o calor latente da água (aproximadamente 2257 kJ/kg) e o total de energia fornecida ao sistema.

Os resultados obtidos demonstram variações significativas nos valores de umidade final da soja conforme os parâmetros operacionais aplicados. Conforme apresentado na Tabela 3.1, os menores valores de umidade final foram observados nas condições com potência de **178,92 W**, fração de enchimento de **20%** e com a **presença de suspensores internos**, atingindo **12,27%** (base seca).

Esse valor destaca-se como o mais eficiente dentre os ensaios realizados, evidenciando a influência positiva da movimentação interna promovida pelos suspensores sobre a homogeneidade da secagem e o aproveitamento térmico.

Além disso, outras combinações com suspensores também apresentaram reduções consistentes na umidade residual, reforçando a importância do seu uso no processo.

A Tabela 3 permite ainda observar que, em condições com maiores frações de enchimento ou sem suspensores, os valores de umidade final tendem a se elevar, indicando menor eficiência do processo e possível necessidade de maior tempo de secagem ou consumo energético.

Tabela 3 - Teor de umidade final da soja (%) obtido em diferentes condições de potência, fração de enchimento e presença de suspensores no tambor rotativo.

Teste	Sem suspensores				Com suspensores			
	P(W)	f(%)	UR(%)	T(°C)	Xb.s.,final(%)	UR(%)	T(°C)	Xb.s.,final(%)
1	141,86	10	87	16,2	13,88	87	12	16,24
2	141,86	20	70	11	15,9	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	15,5
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

Fonte: (JOANAS, 2022).

Este estudo reforça a importância de considerar tecnologias híbridas na secagem de grãos como alternativa para aumento da eficiência energética.

A combinação de técnicas pode reduzir o tempo de processo, melhorar o aproveitamento do calor e preservar melhor a qualidade dos grãos. Em contextos industriais, os dados servem de referência para a implementação de sistemas mais econômicos e sustentáveis.

3.2. Efeitos da Temperatura na Qualidade Física dos Grãos de Soja

Este estudo de caso tem como base o trabalho de **Botelho et al. (2015)**, desenvolvido na Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) em parceria com a Embrapa Agrossilvipastoril, com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de secagem sobre diversas propriedades físicas dos grãos de soja.

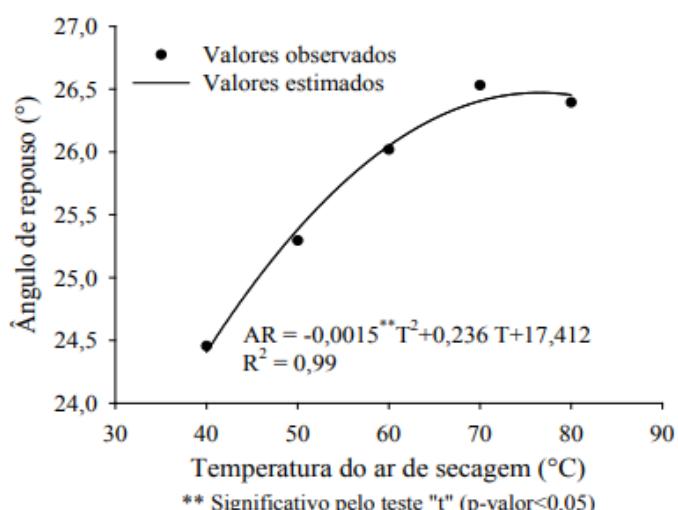
Foram analisadas características como massa específica aparente e unitária, massa de mil grãos, ângulo de repouso, cor e condutividade elétrica, com foco na conservação da qualidade dos grãos após o processo de secagem.

O experimento foi conduzido utilizando estufa com circulação forçada de ar, com temperaturas de secagem controladas em 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Os grãos foram secos de um teor de água inicial de 0,244 (b.s.) até 0,136 (b.s.).

As análises compreenderam propriedades físicas importantes para a armazenagem e comercialização dos grãos, como o ângulo de repouso, massa específica, porosidade, e condutividade elétrica.

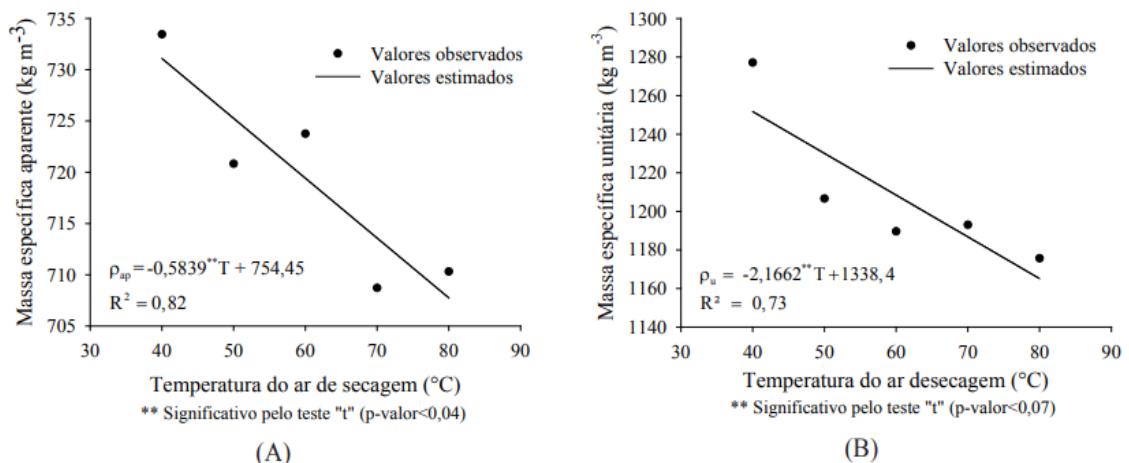
Os resultados obtidos indicam que o aumento da temperatura de secagem provoca alterações significativas nas propriedades físicas dos grãos de soja, conforme o que se demonstra nas Figuras 9 a 13 e a Tabela 4 faz o resumo analítico dos gráficos.

Figura 9 - Valores observados e estimados do ângulo de repouso de grãos de soja secados em diferentes temperaturas do ar.



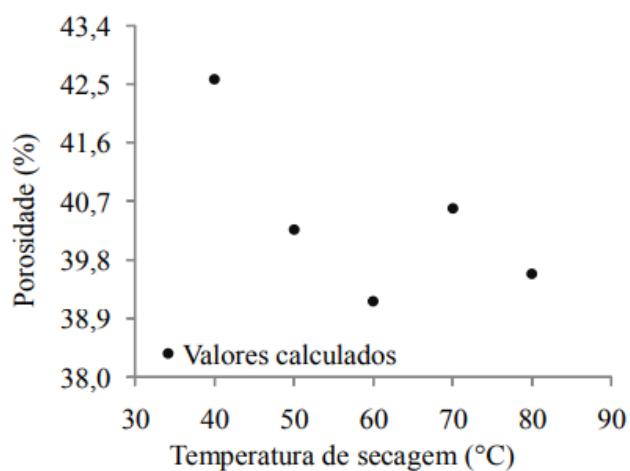
Fonte: (BOTELHO et al., 2015).

Figura 10 - Valores observados e estimados da massa específica aparente (A) e massa específica unitária.



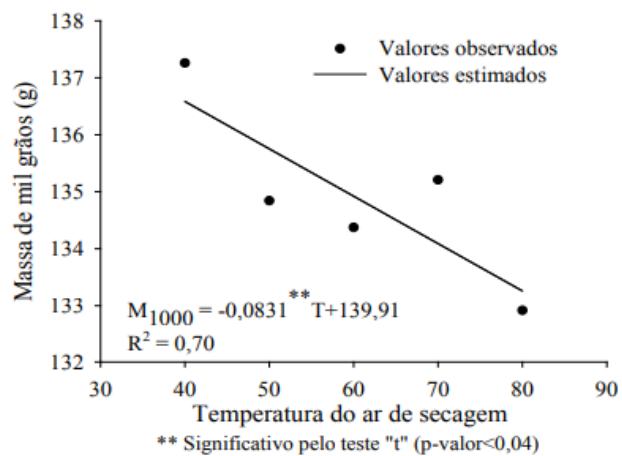
Fonte: (BOTELHO et al., 2015).

Figura 11 - Valores calculados da porosidade dos grãos de soja em função da temperatura do ar de secagem.



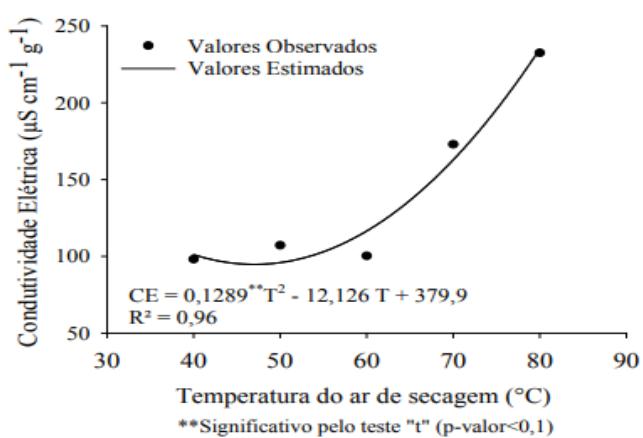
Fonte: (BOTELHO et al., 2015).

Figura 12 - Dados observados e estimados da massa de mil grãos de soja em função da temperatura do ar de secagem.



Fonte: (BOTELHO et al., 2015).

Figura 13- Valores observados e estimados da condutividade elétrica do exsudato de grãos de soja secados em diferentes temperaturas do ar de secagem.



Fonte: (BOTELHO et al., 2015).

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de secagem.

Parâmetro	Tendência com o aumento da temperatura
Ângulo de repouso	Aumentou de 24,4° para 26,5°
Massa específica aparente	Reduziu de 733,4 para 710,3 kg/m ³
Massa específica unitária	Reduziu de 1277 para 1175 kg/m ³
Massa de mil grãos	Redução de 137,2 g para 132,9 g
Condutividade elétrica	Aumentou de 98,2 a 232,5 µS/cm.g ⁻¹

Fonte: Adaptado de (BOTELHO et al., 2015).

O aumento da temperatura acima de 60 °C reduziu significativamente a massa de mil grãos, alterou a coloração e aumentou a condutividade elétrica, o que indica danos celulares.

Essas mudanças físicas comprometem a qualidade do grão para beneficiamento, germinação e comercialização. A redução da massa específica e o aumento da porosidade também influenciam negativamente na armazenagem.

Conclui-se que a secagem de soja deve ser realizada com temperaturas moderadas, preferencialmente abaixo de 60 °C, para preservar as características físicas do grão, o que está de acordo com o referenciado na literatura teórica. Temperaturas elevadas, apesar de promoverem maior velocidade de secagem, comprometem a qualidade e viabilidade dos grãos. Esse estudo reforça a importância do controle térmico durante a secagem como fator decisivo para a eficiência pós-colheita.

3.3. Viabilidade da Secagem de Soja com Ar Ambiente em Mato Grosso

O presente estudo de caso baseia-se na pesquisa de Silva et al. (2017), que avaliou a viabilidade da secagem de soja com ar ambiente em quatro municípios do Estado de Mato Grosso: Diamantino, Rondonópolis, Sinop e Campo Verde.

A técnica de secagem com ar ambiente é uma alternativa de baixo custo energético, adequada principalmente a pequenos e médios produtores, sendo dependente das condições climáticas locais, especialmente da umidade relativa e temperatura do ar.

O objetivo foi avaliar a viabilidade da secagem de grãos de soja até os limites de umidade para comercialização (14%) e armazenamento (12%) em diferentes municípios mato-grossenses, com base nos dados climáticos históricos e nas condições de ventilação contínua e intermitente.

Foram utilizados dados climáticos fornecidos pelo INMET (temperatura e umidade relativa do ar) e calculadas a umidade de equilíbrio dos grãos por meio da equação de Henderson-Thompson (equação 25):

$$U_e = \left[\frac{(\ln(1 - U_r))}{-k \times (T_s + c)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (25)$$

Para a soja, os parâmetros utilizados foram:

- $k = 30,5327 \times 10^{-5}$;
- $c = 134,136$;
- $n = 1,2164$.

O estudo considerou dois regimes de escoamento de ar (contínuo e intermitente) para a secagem, analisando a viabilidade de secagem em diferentes períodos do ano.

Para avaliar a viabilidade da secagem com ar ambiente nos municípios de Diamantino, Rondonópolis, Sinop e Campo Verde, o estudo de Silva et al. (2017) utilizou o cálculo do Potencial Adiabático de Secagem (PSA), indicador psicrométrico que expressa a diferença entre a umidade de equilíbrio higroscópica do grão e a umidade atual do ar.

Esse cálculo é importante para prever a efetividade do ar natural como agente de secagem sem necessidade de aporte térmico adicional.

O PSA foi calculado utilizando dados horários de temperatura do ar e umidade relativa (8h, 14h e 20h), com base em equações psicrométricas extraídas de Gonçalves (1984), Tubelis e Nascimento (1980) e ASABE (2008).

O valor de PSA expressa a diferença de capacidade de retenção de vapor do ar entre as condições de bulbo seco e bulbo úmido, ponderada pela temperatura e altitude locais.

Algumas das equações utilizadas no cálculo foram as seguintes:

a) Equação 26 para o cálculo do potencial Adiabático de Secagem (PSA):

$$PSA = \frac{\left[\frac{(0,6219 \times P_{su})}{(P_{atm} - P_{su})} \right] - \left[\frac{(0,6219 \times P_v)}{(P_{atm} - P_v)} \right]}{\left[\frac{(287 \times T_s)}{(P_{atm} - P_v)} \right]} \quad (26)$$

Onde, tem-se:

- PSA = Potencial adiabático de secagem (kg de vapor m-3 de ar úmido);
- P_{su} = Pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo úmido (Pa);
- P_{atm} = Pressão atmosférica do local (Pa);
- T_s = Temperatura de bulbo seco (K);
- P_v = Pressão atual de vapor (Pa).

b) Equação 27 para o cálculo da pressão atmosférica local (P_{atm}):

$$P_{atm} = 101,3 \times \left[\frac{(293 - 0,0065 \times z)}{293} \right]^{5,2568} \quad (27)$$

Onde, tem-se:

- P_{atm} = Pressão atmosférica do local (kPa);
- z = Altitude do local em relação ao nível do mar (m).

c) Equação 28 para o cálculo da pressão de vapor atual (P_v):

$$P_v = U_r \times P_{ss} \quad (28)$$

Onde, tem-se:

- P_v = Pressão atual de vapor (Pa);
- U_r = Umidade relativa do ar (decimal);
- P_{ss} = Pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo seco (Pa).

d) Equação 29 para o cálculo da pressão de vapor saturado (P_{ss}):

$$\begin{aligned} P_{ss} \\ = 22105649,25 \\ \times e^{\left[\frac{(-27405,526 + 97,5413 \times T_s - 0,146244 \times T_s^2 + 1,2558 \times 10^{-4} \times T_s^3 - 4,8502 \times 10^{-8} \times T_s^4) \times (293 - 0,0065 \times z)}{(4,34903 \times T_s - 0,0039381 \times T_s^2)} \right]} \end{aligned} \quad (29)$$

Onde, tem-se:

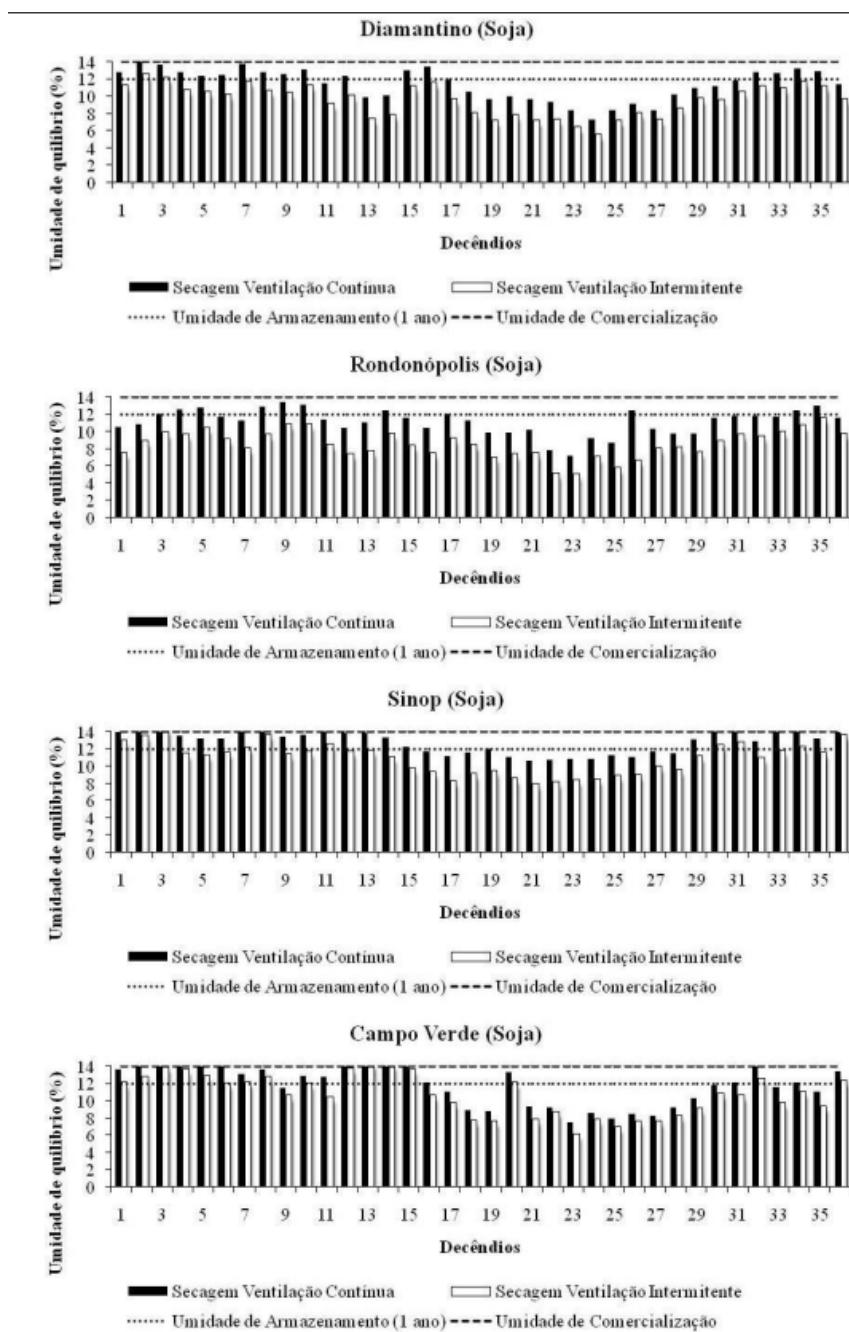
- P_{ss} = Pressão de vapor do ar saturado a temperatura de bulbo seco (Pa)
- T_s = Temperatura de bulbo seco (K).

Com base nesses cálculos, o estudo concluiu que Diamantino e Rondonópolis apresentaram os maiores valores de PSA, especialmente nos meses mais secos, o que indica boas condições climáticas para a secagem natural. Já Sinop e Campo Verde apresentaram limitações devido à umidade relativa mais alta, sendo recomendadas estratégias híbridas ou térmicas.

Os resultados mostraram que todos os municípios analisados permitiram a secagem da soja até 14% de umidade (nível máximo para comercialização).

No entanto, a secagem até 12% (nível recomendado para armazenamento) foi viável apenas em Diamantino e Rondonópolis. Em Sinop e Campo Verde, a umidade relativa elevada e as temperaturas mais amenas impediram que o grão atingisse tal nível sem apporte térmico adicional como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Períodos decendiais com possibilidade de secagem de soja com ar ambiente, com ventilação contínua e intermitente, nos municípios de Diamantino, Sinop, Rondonópolis e Campo Verde.



Fonte: (Gl. Sci Technol, Rio Verde, v.10, n.02, p.67-83, mai/ago. 2017).

O estudo também destacou que a ventilação intermitente (8h às 18h) foi suficiente em diversos períodos, favorecendo a economia de energia. No entanto, a secagem contínua mostrou-se mais eficiente nos períodos com clima menos favorável, principalmente no sexto e sétimos decêndios do ano.

A pesquisa evidencia que a aplicação da secagem com ar ambiente é tecnicamente viável em municípios com condições climáticas adequadas, como Diamantino e Rondonópolis. Essa alternativa permite a redução de custos energéticos e pode contribuir para a sustentabilidade da produção agrícola. Por outro lado, regiões com alta umidade relativa, como Sinop, requerem estratégias híbridas ou o uso de fontes térmicas para garantir a secagem adequada da soja.

O estudo reforça a importância do planejamento das épocas de semeadura e colheita, de forma a coincidir com períodos mais secos do ano. A adaptação de sistemas de secagem às condições locais é essencial para garantir a eficiência e a preservação da qualidade dos grãos.

3.4. Uso de exaustores eólicos em silos de armazenamento de soja: Impacto na redução do custo de armazenamento e na redução de perdas de massa dos grãos

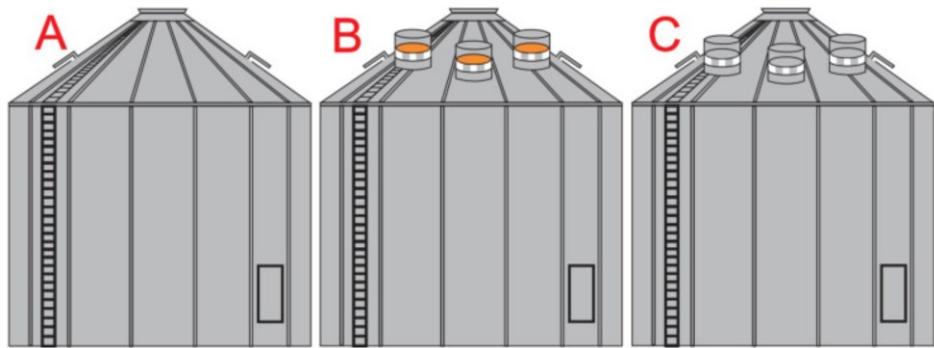
A produção brasileira de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) na safra 2022/2023 alcançou 154,6 milhões de toneladas em 44 milhões de hectares cultivados (CONAB, 2023). Por ser amplamente destinada à indústria de óleo e proteína, o armazenamento prolongado dos grãos é essencial, mas expõe a soja a fatores bióticos e abióticos que comprometem sua qualidade (ZIEGLER et al., 2018). Esse processo representa elevado custo operacional, principalmente pelo consumo energético dos sistemas de aeração (CAÑIZARES et al., 2021). A aeração, tecnologia mais empregada no armazenamento, busca reduzir a temperatura da massa de grãos e inibir a proliferação microbiana (CORADI et al., 2020). Contudo, em regiões com altas temperaturas, esse sistema pode ser insuficiente, demandando alternativas complementares como o uso de exaustores.

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da exaustão eólica, com e sem iluminação natural, no armazenamento de grãos de soja por 0, 3 e 6 meses. Foram analisados parâmetros relacionados ao custo de energia, à temperatura da massa de grãos, à perda de massa e à qualidade dos grãos, a fim de verificar a eficiência dessa tecnologia em comparação ao sistema tradicional de aeração (CÂNIZARES; JAPPE; DE LEON et al., 2023).

O experimento foi conduzido na unidade Valinhos da Cotrijal Cooperativa Agropecuária e Industrial, em Passo Fundo (RS), utilizando soja proveniente de lavouras comerciais da região. Os grãos foram previamente secos até aproximadamente 13,5% de umidade e armazenados em três silos metálicos de 4.500 t, todos equipados com sistema de aeração de 50 kW. O silo 1 não possuía exaustão, o **silô 2** foi equipado com seis exaustores eólicos com entrada de luz, e o **silô 3** recebeu seis exaustores sem entrada de luz, conforme

mostra a Figura 15. Amostras foram coletadas nos tempos de 0, 3 e 6 meses de armazenamento, em diferentes profundidades e posições, garantindo representatividade da massa de grãos.

Figura 15 - Silo de armazenamento de grãos utilizado, em destaque (A) silo sem exaustão, (B) silo com exaustão e luz e (C) silo com exaustão e sem luz



Fonte: (CÁNIZARES et al., 2023).

A caracterização dos grãos incluiu teor de umidade (ASAE, 2000), incidência de defeitos (BRASIL, 2007a; 2007b), acidez (AACC, 2000) e proteína solúvel (Liu et al., 1992). Também foram monitorados a temperatura da massa, o tempo de aeração e o consumo de energia, por meio de sistema de termometria com 32 sensores distribuídos nos silos. A perda de massa foi calculada pela Equação 30, considerando a diferença de umidade inicial e final dos grãos.

$$PM = MI - \frac{(100 - UI)}{(100 - UF)} \times MI \quad (30)$$

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que o silo sem exaustão apresentou maior tempo de aeração (191 h), maior consumo de energia (9.550 kW) e maior perda de massa (105 t), associados a uma maior redução no teor de umidade (11,29%).

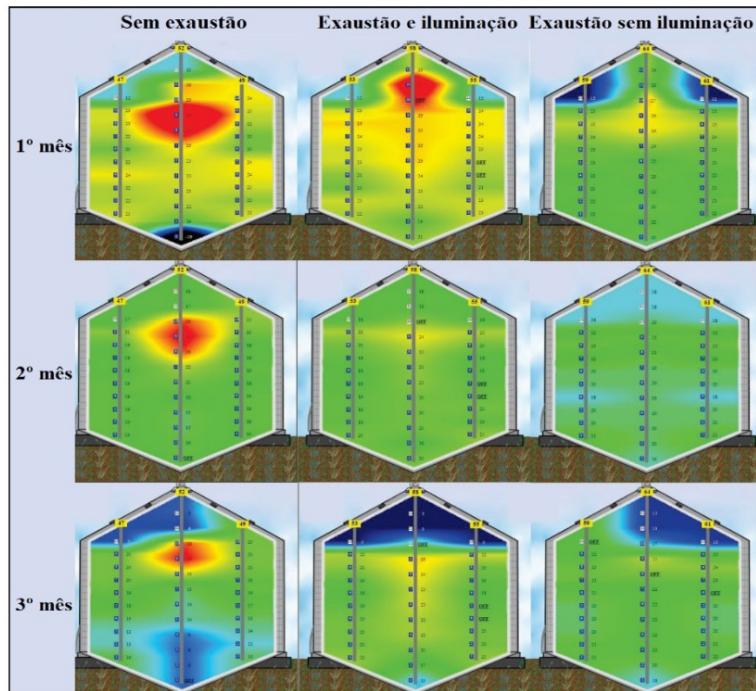
Tabela 5 - Resultados dos parâmetros de análise dos grãos de soja armazenados por 0, 3 e 6 meses em diferentes silos.

Silo			
	Sem exaustão	Exaustão e iluminação	Exaustão sem iluminação
Umidade (%)			
Inicial (0 mês)	13,36	13,44	13,61
3 meses	11,35	12,41	12,51
6 meses	11,29	12,02	12,17
Perda de massa			
Inicial (0 mês)	-	-	-
3 meses	102,03	52,92	56,58
6 meses	2,97	19,71	17,21
Total	105,00	72,63	73,79
Tempo de aeração (h)			
Inicial (0 mês)	-	-	-
3 meses	191	115	112
6 meses	0	37	51
Total	191	152	163
Consumo energético (kW)			
Inicial (0 mês)	-	-	-
3 meses	9550	5750	5600
6 meses	0	1850	2550
Total	9550	7600	8150

Fonte: (Adaptado de CÂNIZARES et al., 2023).

Nos silos com exaustão, a temperatura da massa foi corrigida mais rapidamente nos primeiros três meses, o que reduziu a necessidade de aeração e contribuiu para menor perda de massa. Não foram observadas diferenças significativas entre os exaustores com e sem entrada de luz. A Figura 16 mostra as imagens de termometria para os três silos.

Figura 16 - Imagens de termometria para os três silos, de 1 a 3 meses



Fonte: (CÁNIZARES et al., 2023).

Quanto à qualidade dos grãos, não houve diferenças entre os sistemas para acidez, incidência de grãos ardidos/fermentados e teor de proteína solúvel, como pode ser observado na Tabela 6. Contudo, ao longo do armazenamento, observou-se tendência de aumento da acidez e dos defeitos, e redução da proteína solúvel, em linha com o metabolismo dos grãos e a ação de microrganismos.

Tabela 6 – Incidência de grãos fermentados e ardidos, acidez do grão e proteína solúvel de grãos de soja armazenados por 0, 3, 6 meses em diferentes silos.

Tempo de armazenamento	Silo de armazenamento		
	Sem exaustão	Tempo de armazenamento	Sem exaustão
Grãos fermentados (%)			
Inicial (0 mês)	0,71 ± 0,32 ^{B*}	0,99 ± 0,58 ^B	0,71 ± 0,21 ^C
3 meses	1,48 ± 0,26 ^A	1,71 ± 0,48 ^A	1,33 ± 0,41 ^B
6 meses	1,89 ± 0,64 ^A	1,65 ± 0,35 ^A	1,84 ± 0,42 ^A
Grãos ardidos (%)			
Inicial (0 mês)	0,10 ± 0,10 ^A	0,06 ± 0,09 ^A	0,05 ± 0,06 ^B
3 meses	0,16 ± 0,15 ^A	0,12 ± 0,08 ^A	0,12 ± 0,08 ^{AB}
6 meses	0,19 ± 0,06 ^A	0,12 ± 0,03 ^A	0,14 ± 0,06 ^A
Acidez (%)			
Inicial (0 mês)	0,52 ± 0,13 ^B	0,60 ± 0,09 ^B	0,54 ± 0,09 ^B
3 meses	0,54 ± 0,08 ^A	0,61 ± 0,13 ^B	0,59 ± 0,09 ^B
6 meses	0,65 ± 0,14 ^A	0,82 ± 0,12 ^A	0,72 ± 0,14 ^A
Proteína solúvel (%)			
Inicial (0 mês)	60,87 ± 5,30 ^A	64,89 ± 10,08 ^A	61,48 ± 4,66 ^A
3 meses	56,83 ± 2,7 ^B	58,37 ± 3,17 ^B	56,28 ± 3,01 ^{AB}
6 meses	55,28 ± 3,24 ^B	57,12 ± 2,32 ^B	53,53 ± 9,34 ^B

*Letras maiúsculas comparam os tempos de armazenamento.

Fonte: (Adaptado de CÁNIZARES et al., 2023).

O estudo demonstrou que a ausência de exaustão implicou maior consumo energético e perdas de massa, tornando o processo de armazenamento menos eficiente. A presença de exaustores eólicos, independentemente da entrada de luz, reduziu o tempo de aeração, o consumo energético e as perdas de massa, sem comprometer a qualidade dos grãos. Em termos práticos, o uso de exaustores proporcionou economia de energia e maior estabilidade térmica da massa armazenada, destacando-se como uma alternativa viável para reduzir custos operacionais e perdas pós-colheita em sistemas de armazenamento de soja em larga escala.

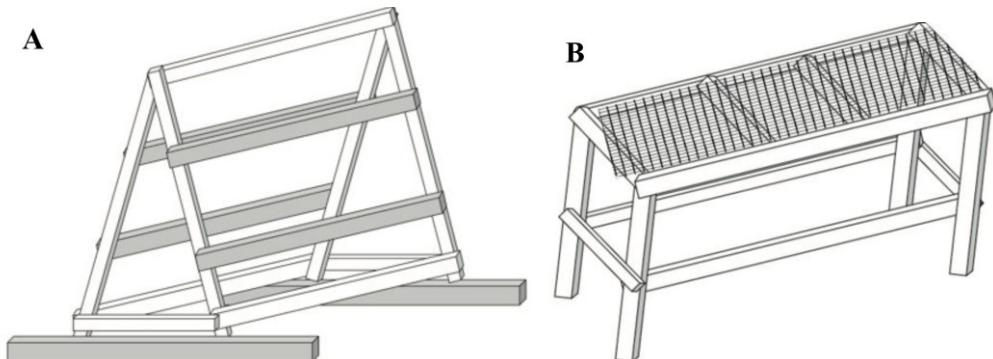
3.5. Terreiro suspenso: uma alternativa para secagem de grãos na agricultura familiar

A agricultura familiar no Brasil desempenha papel fundamental na segurança alimentar e na geração de renda no meio rural, evitando a migração para áreas urbanas (GUILHOTO et al., 2007). Segundo o Censo Agropecuário de 2017, cerca de 23% da produção agropecuária

nacional é oriunda desse setor, com destaque para culturas como feijão, milho, arroz e café (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2019; IBGE, 2022).

Entre os métodos disponíveis, a secagem natural, em terreiros convencionais, ainda é amplamente utilizada pela agricultura familiar devido ao baixo custo, mas apresenta limitações quanto ao tempo e risco de contaminação (GARCIA et al., 2004; REINATO et al., 2012). Como alternativa, neste estudo foi desenvolvido um terreiro suspenso utilizando materiais reciclados e de baixo custo, denominado “Cama Africana”, visando melhorar a eficiência da secagem de grãos em propriedades familiares (SANTANA; BORGES; VIANA et al., 2023). A Figura 17 mostra a estrutura de uma “Cama Africana”.

Figura 17 - (A) Estrutura externa de proteção da Cama Africana e (B) bancada da Cama Africana

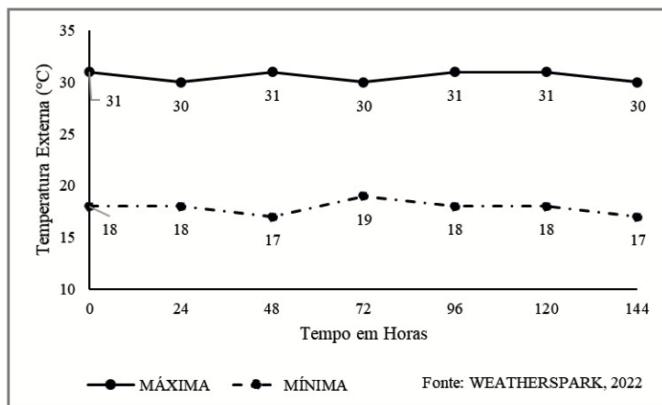


Fonte: (Adaptado de SANTANA et al., 2023).

O experimento foi realizado no campo experimental da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco – UFAPE, em Garanhuns-PE. Para a construção, utilizou-se madeira reaproveitada e lona plástica, associada a exaustores confeccionados com garrafas PET e canos de PVC. O sistema foi testado com grãos de soja da cultivar “BRS Domínio”, avaliando-se o teor de água inicial pelo método de estufa. As amostras foram analisadas em intervalos de 48, 96 e 144 horas, registrando-se a variação de temperatura, umidade interna e teor de água ao longo do processo (SANTANA et al., 2023).

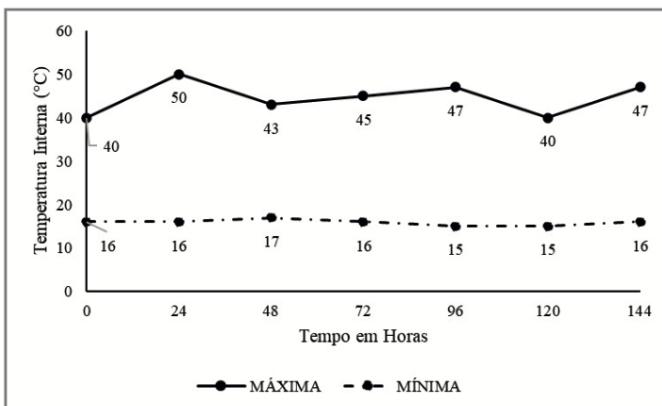
As Figura 18 até 21 representam os gráficos de temperatura externa, temperatura interna, umidade do interior do terreiro suspenso e teor de água dos grãos de soja durante esse experimento.

Figura 18 - Gráfico da temperatura externa no interior do terreiro suspenso



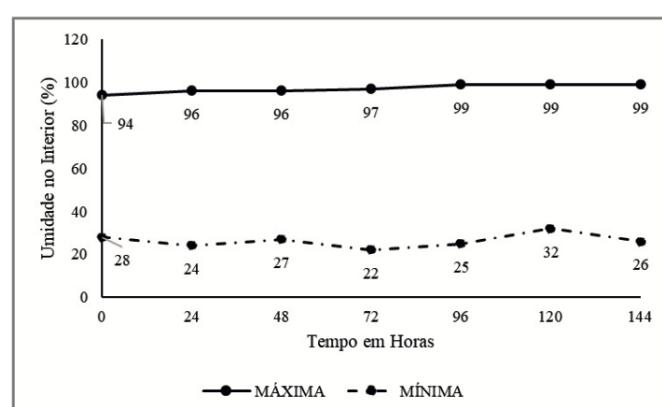
Fonte: (Adaptado de SANTANA, 2023).

Figura 19 - Gráfico da temperatura interna no terreiro suspenso



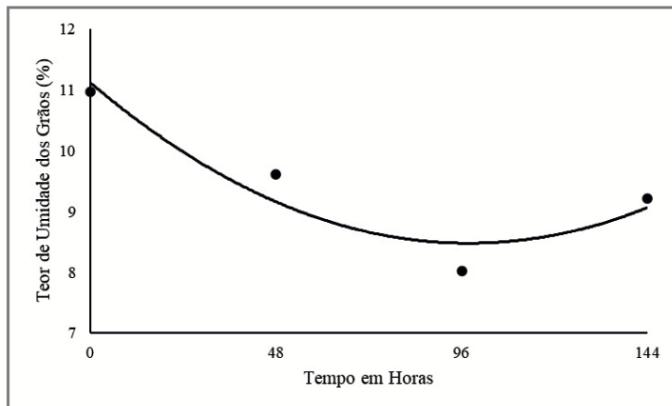
Fonte: (Adaptado de SANTANA, 2023).

Figura 20 - Gráfico da umidade no interior do terreiro suspenso



Fonte: (Adaptado de SANTANA, 2023).

Figura 21 - Gráfico do teor de umidade dos grãos no interior do terreiro suspenso



Fonte: (Adaptado de SANTANA, 2023)

Os resultados mostraram que a estrutura promoveu aumento médio de até 20 °C na temperatura interna em relação ao ambiente, com valores diurnos próximos de 44,5 °C, favorecendo a evaporação da umidade. A umidade relativa interna variou entre 24% e 96%, sendo reduzida pela ação dos exaustores improvisados, que auxiliaram na circulação do ar (AMPESSAN et al., 2010; PENA, 2022). A secagem dos grãos ajustou-se a um modelo quadrático, atingindo teor final de 8,52% em aproximadamente 83 horas, dentro da faixa ideal para comercialização e armazenamento (SANTANA et al., 2023).

Conclui-se que o terreiro suspenso construído com materiais recicláveis se mostrou eficiente, de baixo custo e viável para agricultores familiares, pois reduziu o tempo de secagem e garantiu condições adequadas de conservação dos grãos, representando uma alternativa sustentável e acessível de tecnologia agrícola (SANTANA et al., 2023).

4. CONCLUSÃO

A secagem da soja é uma etapa crucial no pós-colheita, influenciando diretamente a qualidade final dos grãos e a viabilidade econômica do armazenamento e comercialização. Através da presente revisão bibliográfica, observou-se que os fundamentos termodinâmicos da secagem, com destaque para os mecanismos de transferência de calor e massa, são amplamente consolidados, sendo a base para o desenvolvimento e otimização de diferentes tecnologias de secadores.

Os tipos de secadores mais empregados, como os de leito fixo, fluxo cruzado, leito de jorro e sistemas contínuos ou intermitentes, apresentam vantagens e limitações específicas. Fatores como temperatura de secagem, umidade relativa do ar, tempo de residência e tipo de energia utilizada foram identificados como variáveis críticas para o desempenho térmico e para a manutenção das características físicas e químicas da soja. A escolha dessas condições deve ser feita de forma estratégica, considerando não apenas a eficiência energética, mas também os impactos sobre a integridade fisiológica e nutricional dos grãos.

A análise dos estudos de caso permitiu validar e ilustrar os conceitos abordados teoricamente. No primeiro estudo, conduzido na UFLA, o uso de infravermelho combinado à convecção em tambor rotativo demonstrou ganhos significativos de eficiência térmica (acima de 40%) quando utilizado em condições otimizadas (suspensores, enchimento moderado e potência intermediária), reduzindo o tempo de secagem sem comprometer a qualidade dos grãos.

O segundo estudo, da UFMT, destacou os efeitos da temperatura sobre as propriedades físicas da soja. Verificou-se que temperaturas acima de 60 °C impactam negativamente a massa de mil grãos, condutividade elétrica e porosidade, comprometendo o valor de mercado e a capacidade de armazenamento da produção.

Ademais, o estudo realizado em Mato Grosso demonstrou a viabilidade da secagem com ar ambiente em determinadas regiões e épocas do ano, especialmente nos municípios de Diamantino e Rondonópolis. O uso do Potencial Adiabático de Secagem (PSA) como indicador psicrométrico revelou-se eficaz na previsão da eficiência do ar natural na remoção de umidade dos grãos, sem necessidade de aporte térmico adicional.

O terceiro estudo, de Cañizares et al. (2021), evidencia diferenças relevantes entre os sistemas de armazenamento com e sem exaustão forçada. Os silos com exaustão apresentaram melhor estabilidade térmica, pois a remoção de calor ocorreu de forma mais rápida e eficiente

devido ao diferencial de pressão entre o interior e o exterior do silo. Isso reduziu tanto o tempo de aeração quanto o consumo energético, sem comprometer os parâmetros de qualidade dos grãos.

Ainda que a redução da umidade no silo sem exaustão tenha sido maior, tal condição também esteve associada à maior perda de massa, confirmando que o prolongamento do metabolismo dos grãos intensifica o consumo de matéria seca (CAÑIZARES et al., 2021).

Com relação à qualidade tecnológica, não foram verificadas diferenças significativas entre os sistemas de exaustão quanto à incidência de grãos ardidos e fermentados, teor de proteína solúvel e acidez. Entretanto, ao longo do armazenamento, constatou-se tendência de aumento da acidez e de grãos defeituosos, bem como redução da proteína solúvel, fenômenos relacionados ao metabolismo natural dos grãos e à atividade microbiana (CAÑIZARES et al., 2021).

Diante desses resultados, conclui-se que o uso de exaustão em silos de soja é recomendado, pois reduz o consumo energético, as perdas de massa e o tempo de aeração, sem comprometer a qualidade final dos grãos. Esse achado reforça a importância da adoção de técnicas de manejo pós-colheita mais eficientes, capazes de otimizar o armazenamento, minimizar custos e preservar a qualidade da soja, especialmente em sistemas de larga escala.

Por fim, o estudo de Santana et al. (2023) demonstra que a adoção de tecnologias alternativas para secagem de grãos, como os terreiros suspensos, demonstra potencial relevante para agricultores familiares, uma vez que promove condições adequadas de temperatura e circulação de ar, reduzindo a umidade relativa interna e, consequentemente, o risco de proliferação de microrganismos.

Além disso, a utilização de materiais recicláveis e de baixo custo na construção da estrutura evidencia uma alternativa sustentável e acessível, alinhada com a busca por maior eficiência energética e redução de custos operacionais na pós-colheita. Nesse sentido, a tecnologia do terreiro suspenso contribui não apenas para a preservação da qualidade dos grãos, mas também para a otimização do processo de secagem em sistemas agrícolas de menor porte, fortalecendo a autonomia e a competitividade da agricultura familiar (SANTANA et al., 2023).

A partir dessas análises, conclui-se que:

- A **temperatura de secagem** deve ser mantida abaixo de 60 °C para fins comerciais e até 40 °C para sementes;
- Sistemas intermitentes, embora mais lentos, **preservam melhor a qualidade**;
- O uso de **tecnologias híbridas e controle automatizado** contribui para o aumento da eficiência e sustentabilidade;
- A **adaptação às condições climáticas locais** é fundamental para maximizar o aproveitamento energético e reduzir custos.

A presente revisão bibliográfica, complementada por estudos de caso aplicados, permitiu avaliar de forma abrangente os efeitos das condições operacionais sobre a eficiência energética e a qualidade dos grãos de soja durante o processo de secagem. As evidências reunidas indicam que há uma relação direta entre as variáveis de operação como temperatura do ar, fluxo de ar, tempo de residência, tipo de secador e fonte de energia, e os resultados obtidos em termos de desempenho térmico e preservação das características físicas, químicas e fisiológicas da soja.

Temperaturas elevadas, acima de 60 °C, embora acelerem o processo de secagem, foram associadas à redução da massa de mil grãos, aumento da condutividade elétrica e alterações de cor, o que compromete a viabilidade comercial e a qualidade industrial do produto. Por outro lado, estratégias como a secagem intermitente, uso de infravermelho combinado com convecção e controle automatizado do processo demonstraram maior eficiência energética e melhor preservação dos grãos, especialmente quando associadas a configurações otimizadas (como fração de enchimento e uso de suspensores).

Além disso, a avaliação de indicadores psicrométricos, como o Potencial Adiabático de Secagem (PSA), mostrou-se uma ferramenta relevante para prever o desempenho do ar ambiente em processos naturais de secagem, especialmente em regiões agrícolas com clima seco durante o período de colheita. Essa abordagem é promissora para produtores de pequeno e médio porte que buscam alternativas mais sustentáveis e de baixo custo energético.

Diante do exposto, pode-se concluir que o sucesso da secagem da soja depende não apenas do tipo de equipamento utilizado, mas principalmente da escolha criteriosa dos parâmetros operacionais em função do tipo de produto, objetivo (sementes ou grãos para venda) e condições ambientais.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprofundar os conhecimentos e aprimorar as práticas de secagem da soja no contexto industrial e rural, recomenda-se:

- O desenvolvimento de **modelos matemáticos e computacionais** que integrem variáveis operacionais e energéticas para prever o comportamento do processo e apoiar decisões em tempo real;
- A investigação do uso de **energias renováveis** (biomassa, solar térmica, biogás) como fonte de calor para secagem em regiões remotas;
- O estudo da influência de **pré-tratamentos** como aeração ou condicionamento dos grãos antes da secagem;
- A aplicação de **tecnologias de automação, sensores inteligentes e IoT** para monitoramento e controle contínuo das variáveis de secagem, aumentando a eficiência e reduzindo perdas;
- A análise do impacto do processo de secagem na **qualidade nutricional e germinativa** dos grãos destinados à produção de sementes;
- A realização de estudos econômicos e ambientais para comparação entre sistemas tradicionais e híbridos de secagem, considerando **custos operacionais, pegada de carbono e retorno sobre o investimento**.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACC, Fat Acidity and General Method. Method 02-01A: **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists**, St. Paul, MN, USA (2000), pp. 11-12.

ASABE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASAE D271.2 DEC2008: Psychrometrics. St. Joseph: ASABE, 2008.

MARCOS, L. L. et al. **Cinética de secagem de soja em leito fixo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 1, p. 55–61, 2015.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Moisture Measurement-Unground Grain and Seeds**. in: Standards, St. Joseph: ASAE (2000), p. 563

BISSAO, C. A.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; et al. Modelagem da cinética de secagem de grãos de soja em diferentes condições de ar de secagem. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 5, p. 849-861, 2012.

BOTELHO, F. M. et al. **Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja**. In: CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2015. Anais [...]. UFMT, 2015.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI Publishing, 1992.

CAÑIZARES, Lázaro da Costa Corrêa; JAPPE, Silvia Naiane; DE LEON, Maria Antônia Fagundes; RIVERO MEZA, Silvia Leticia; ELIAS, Moacir Cardoso; DE OLIVEIRA, Maurício. **Uso de exaustores eólicos em silos de armazenamento de soja: impacto na redução do custo de armazenamento e na redução de perdas de massa dos grãos**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-COLHEITA, 8., 2023, Rio Verde.

CONAB: Companhia nacional do abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. V.10 - Safra 2022/23 – Décimo primeiro levantamento, Brasília, p.1-102, agosto 2023.

Coradi, P. C.; Oliveira, M. B.; Oliveira, C. L.; Souza, G. A. C.; Elias, M. C.; Brackmann, A.; TEODORO, P. E. **Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units**. J. Stored Prod. Res., v. 87, p. 10162, 2020.

CORRÊA, P. C.; et al. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2007.

DALPASQUEL, V. A., PEREIRA, D. A M., SINICIO, R., FILHO, D. O. **Secado de granos a altas temperaturas**. Santiago: FAO, 1991.

EMBRAPA. **Armazenagem de grãos a granel e sacarias**. Coleção 52 – SENAR/MT. Cuiabá: 2023. Disponível em: <https://sistemafamato.org.br/senarmt/wp-content/uploads/sites/2/2023/10/Colecao-52-MT-Armazenagem-de-graos-a-granel-e-sacarias.pdf>. Acesso em: 06 set. 2025.

EMBRAPA. **Características da soja**. Embrapa — Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre>

producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-soja. Acesso em: 23 set. 2025.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja**. Brasília: Embrapa, 2020. Cap. Colheita e Pós-colheita e capítulo sobre secagem. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1123928/1/SP-17-2020-online-1.pdf>. Acesso em: 23 set. 2025.

FERNANDES, N. J. **Estudo da fluidodinâmica e da Secagem de um Secador rotatório da Indústria de Fertilizantes**. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L.D.E. **A secagem de grãos**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; JÚNIOR, L. C. A. **Modelagem matemática da secagem de produtos agrícolas**. In: SILVA, J. S. (org.). Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2016. p. 65-96.

GUILHOTO, J.J.M.; ICHIHARA, J.J.M.; SILVEIRA, S.M.; DINIZ, F.G.; AZZONI, B.P.C.; MOREIRA, C.R.; CALDO, G.R. **A Importância da agricultura familiar no Brasil e em seus estados (Family Agriculture's GDP in Brazil and in It's States)**. V Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. LSPA - **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemático-da-produção-agrícola>. Acesso em: 23 set. 2025.

JOANAS, Pâmela Cristine Amorim. **Análise energética e da eficiência da secagem de soja em tambor rotativo com infravermelho e convecção**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.

LIU, K.; MCWATTERS, K. H.; PHILLIPS, R. D. **Protein insolubilization and thermal destabilization during storage as related to hard-to-cook defect in cowpeas**. J. Agric. Food Chem., v. 40, p. 2483-2487. 1992.

MARTYNENKO, A.; VIEIRA, G. N. A. “**Sustainability of drying technologies: system analysis**”. *Sustainable Food Technology*, 2023. Analisa secagem considerando energia, exerxia, ambiental e econômico, propondo métricas como consumo específico de energia e exerxe por kg de água evaporada.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2002.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. **A technique for contacting gases with coarse solid particles**. *AIChE Journal*, v. 1, n. 2, p. 157-164, 1955.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Agricultura Familiar**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 23 set. 2025.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**, 3a Edição, 2006.

OLIVEIRA, D. E. de; MENDES, C. F.; OLIVEIRA, D. M. C. **Secagem da soja: influência da temperatura na qualidade dos grãos**. Revista Nucleus, v. 15, n. 1, p. 157–170, 2018.

PARK, K. J. et al. **Avaliação da qualidade de grãos de soja submetidos à secagem intermitente e contínua**. Engenharia Agrícola, v. 38, n. 1, p. 113–120, 2018.

FILHO, A. F. L. et al. Avaliação energética de secadores de soja. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 21, n. 3, p. 173–178, 2017.

PARK, K. J.; BROD, F. P. R.; NUNES, R. V. **Modelagem matemática da secagem de grãos: aplicação a soja e milho**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 4, n. 1, p. 85-93, 2002.

REINATO, C.H.R.; BOREM, F.M.; CIRILLO, M.Â.; OLIVEIRA, E.C. **Qualidade Do Café Secado Em Terreiros Com Diferentes Pavimentações E Espessuras De Camada**. Coffee Science, Lavras, v. 7, n. 3, p. 223-237, 2012.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M. **Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem de sementes de soja (Glycine max L.)**. Ciência e Agrotecnologia, v. 32, n. 2, p. 464-470, 2008.

RIBEIRO, A. M.; ANDRADE, R. **Secagem em leito de jorro: aspectos fundamentais e aplicações**. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 21, n. 3, p. 45-62, 2004.

ROSA, D. P. da et al. **Avaliação da eficiência energética de secadores industriais de grãos no estado do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 2020. Anais [...].

SANTANA, Weslley Nunes; BORGES, João Paulo Goes da Silva; VIANA, Jeandson Silva; GONÇALVES, Edilma Pereira; ARAUJO, Vanyelle Raquel Pereira de; SANTOS, Danilo de Lima; SILVA, Maria Beatrice Gueiros; SILVA, Jessica Lidiane da; SILVA, Maria Camila Cordeiro da. **Terreiro suspenso: uma alternativa para secagem de grãos na agricultura familiar**. In: AGROECOLOGIA: PRODUÇÃO E SUSTENTABILIDADE EM PESQUISA. v. 4. Editora Científica Digital, 2023. ISBN 978-65-5360-309-7.

SANTOS, C. A.; OLIVEIRA, D. E. C.; COSTA, C. F.; LIMA, J. C. **Eficiência energética e qualidade de grãos em diferentes tipos de secadores utilizados na pós-colheita de soja**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 24, n. 5, p. 357-364, 2020.

SILVA, F. S. da; MOSSINI JUNIOR, D.; DALLACORT, R. **Análise das condições climáticas dos municípios do Estado de Mato Grosso para secagem de grãos com ar ambiente**. Global Science and Technology, v. 10, n. 2, p. 67–83, 2017.

GONÇALVES, J. L. M. Secagem de grãos. In: Curso sobre Pós-Colheita de Grãos. Campinas: Fundação Cargill, 1984.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; RESENDE, O. **Pós-colheita de grãos**. 2. ed. rev. ampl. Viçosa: UFV, 2014. 600 p.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, H. T. S. **Tabelas para cálculo da umidade relativa, ponto de orvalho e pressão de vapor d'água**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1980.

COMPAGNON, A. M. et al. Estudo da influência da temperatura e umidade relativa do ar sobre o desempenho da secagem de milho em silo secador. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Lavras, v. 12, n. 1, p. 75–81, 2010.

ZANIN, C. G. et al. **Qualidade fisiológica de sementes de soja submetidas à secagem com ar aquecido**. *Revista Ciência Agronômica*, v. 47, n. 4, p. 682–690, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n. 11, de 15 de maio de 2007. Estabelece o regulamento técnico para os padrões oficiais de classificação da soja.

ZHANG, X. et al. **Automatic Control System for Grain Drying Process**. *Journal of Control Science and Engineering*, v. 2013, p. 1–7, 2013.

ZIEGLER, V.; FERREIRA, C. D.; HOFFMANN, J. F.; DE OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C. **Effects of moisture and temperature during grain storage on the functional properties and isoflavone profile of soy protein concentrate**. *Food Chem.*, v. 242, p.37-44, 2018.