

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ALLAN JHONES CERIBELI DA SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE SOJA EM
SECADOR DE LEITO FIXO COM FLUXO DE AR RADIAL**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

ALLAN JHONES CERIBELI DA SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE SOJA EM
SECADOR DE LEITO FIXO COM FLUXO DE AR RADIAL**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Luís César da Silva

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

ALLAN JHONES CERIBELI DA SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE SOJA EM
SECADOR DE LEITO FIXO COM FLUXO DE AR RADIAL**


Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 12 de dezembro de 2023.

Assentimento:



Allan Jhones Ceribeli da Silva
Autor



Luis Cesar da Silva
Orientador

*Aos meus pais, Lauro e Vaina,
pelo apoio e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda a força que Ele sempre me deu. Aos meus pais Lauro e Vaina, pois sem eles nada disso seria possível, principalmente por acreditarem em mim e apoiarem minhas decisões.

A Meggie pelo seu companheirismo, por sempre me encorajar a buscar meus objetivos. Agradeço também a paciência e por sempre estar presente em todos os momentos.

Ao meu orientador Professor Luís César pela confiança depositada em mim, pela orientação e pelos puxões de orelha.

Aos meus amigos e a Universidade Federal de Viçosa, por todos os anos de aprendizado que certamente me fizeram uma pessoa melhor.

A todos que fizeram parte dessa história, meu muito obrigado.

“Até mais, e obrigado pelos peixes”.

Douglas Adams

RESUMO

A soja, mundialmente, é uma das mais importantes culturas por ser crucial nas indústrias de alimentos, rações e biocombustíveis. Portanto, é requerido sementes de soja em quantidade e com qualidade para atender as demandas dos mercados. No beneficiamento de semente, a secagem adequadamente conduzida é fundamental para preservar as propriedades físicas e biológicas das sementes. Sendo assim, determinou-se como objetivo deste trabalho realizar a modelagem e simulação da secagem de semente de soja em secadores de leito fixo com fluxo de ar radial, por tratar-se de um ferramental aplicado a avaliação, projeto e gestão. O modelo computacional foi desenvolvido segundo o Modelo de Thompson e validado empregando resultados experimentais obtidos na secagem de quatro lotes de sementes de soja do cultivar BMX 55I57 RSF IPRO. Foram utilizados quatro secadores com capacidade estática de 126 t instalados em uma Unidade de Beneficiamento de Sementes no município de Mangueirinha – PR, durante a safra 2022/2023. Para validação foram consideradas o tempo de secagem e teor de água final e o procedimento deu-se em duas etapas. Na primeira a condição de parada da simulação foi o teor de água final e na segunda os tempos de secagem obtidos experimentalmente. Desse modo, na primeira etapa constatou-se o erro relativo entre 4,5 e 10,0% enquanto na segunda entre 0,2 e 3,0%.

Palavras-chave: Modelo de Thompson. Secagem a baixa temperatura. Beneficiamento.

ABSTRACT

Soybean, worldwide, is one of the most important crops as it is crucial in the food, feed, and biofuel industries. Therefore, soybean seeds in quantity and quality are required to meet market demands. In seed processing, properly conducted drying is essential to preserve the physical and biological properties. Therefore, the objective of this work was to model and simulate soybean seed drying in fixed bed dryers with radial airflow, as simulation is a tool applied to evaluation, design, and management. The computational model was developed according to the Thompson Model and validated using experimental data from the drying of four batches of soybean seeds BMX 55I57 RSF IPRO cultivar, during the 2022/2023 harvest. Four dryers with a static capacity of 126 t were used, and they belong to a Seed Processing Unit in Mangueirinha – PR, Brazil. For validation, drying time and final moisture content were considered and the procedure was conducted in two stages. In the first, the simulation stopping condition was the final moisture content, and in the second, the obtained experimental drying times. Thus, in the first stage, the relative error was between 4.5 and 10.0%, and in the second stage, it was between 0.2 and 3.0%.

Keywords: Thompson Model. Low-Temperature Dryin. Processing.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Certificação de sementes de soja	12
2.2 Cuidados na produção de sementes	13
2.2.1 Origem da semente.....	13
2.2.2 Escolha da área.....	14
2.2.3 Escolha do cultivar	15
2.2.4 Colheita	15
2.2.5 Recepção e secagem.....	16
2.2.6 Beneficiamento	16
2.2.7 Armazenamento	17
2.3 Secagem em baixas temperaturas	18
2.4 Modelagem e simulação de secagem.....	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Local do experimento	21
3.2 Caracterização do sistema real.....	21
3.2.1 Caracterização das sementes	21
3.2.2 Caracterização do sistema de secagem	21
3.2.3 Condições psicrométricas.....	22
3.2.4 Temperatura do ar de secagem e massa de grãos.....	22
3.2.5 Teor de água das sementes	23
3.2.6 Fluxo de ar.....	23
3.3 Modelo de simulação.....	24
3.3.1 Descrição do programa	25
3.4 Validação do modelo	30

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 Dados coletados do sistema real	32
4.1.2 Condições psicométricas do ar de secagem	32
4.2 Validação do programa.....	33
4.2.1 Tempo de secagem.....	33
4.2.2 Teor de água.....	34
5 CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma das culturas mais importantes e mundialmente cultivada por ser crucial nas indústrias de alimentos, rações e biocombustíveis. Nesse contexto, especificamente para o Brasil, a produção de sementes de soja de alta qualidade é vital para sustentar a competitividade do setor agrícola (Saraiva et al., 2020).

Sob aspecto de preservação da qualidade de sementes de soja, a secagem trata-se de uma etapa crítica no processamento pós-colheita, pois o teor de água excessivo compromete a qualidade e a viabilidade das sementes, impactando diretamente a produtividade agrícola (Santos et al., 2019).

A secagem convectiva é um processo em que ocorre simultaneamente o transporte de calor e massa e a troca de calor e massa entre o ar e o produto. Desse modo, é reduzido o teor de água de grãos ou sementes, permitindo o armazenamento em condições ambiente ou sob refrigeração (Oliveira et al., 2013)

O aporte de calor transferido aos grãos ou sementes é utilizado como calor latente ou calor sensível, sendo o primeiro destinado a promover a dessorção da água aderida a matéria seca do produto, enquanto segundo promove a elevação da temperatura (Reis et al., 2017). Com isso, o controle adequado dos parâmetros temperatura, umidade relativa e vazão do ar de secagem, como também, o tempo de exposição do produto ao ar de secagem é essencial para assegurar a eficiência do processo e a preservar a qualidade de grãos e sementes (Abud et al., 2005).

Na secagem de sementes como soja e trigo frequentemente é empregado o secador de leito fixo com fluxo de ar radial, onde, normalmente, pratica-se a secagem a baixa temperatura. Essa modalidade de secagem caracteriza-se por empregar o ar de secagem aquecido em no máximo 10 °C em relação as condições psicrométricas do ar ambiente e a massa total do produto tender a entrar em equilíbrio higroscópico com o ar de secagem ao final do processo (Oliveira et al., 2008; Irri, 2013).

Operacionalmente, nos secadores de leito fixo com fluxo de ar radial, o ar de secagem é insuflado na massa de produto por meio de um duto em chapa perfurada e posicionado na parte central. Desse modo, o fluxo do ar distribui-se radialmente pelo produto a ser seco. O estabelecimento do fluxo de ar geralmente dá-se por ventiladores centrífugos, que podem ser equipados com um queimador de gás liquefeito de petróleo ou conectados a fornalhas a lenha ou a cavaco. O sistema de aquecimento do ar de secagem deverá ser acionado quando as condições psicrométricas do ar após a passagem

pelo ventilador não forem ideais para secagem. Ressalta-se que em média o fluxo de ar ao passar pelo secador tem a temperatura aumentada em mais 2 °C.

Nesse contexto, o uso de secador de leito fixo com fluxo de ar radial, além de propiciar a secagem individualizada de lotes de semente, possui alto potencial de possibilitar a condução da secagem sob condições adequadas que permitam a manutenção da qualidade (Souza et al., 2021). Para a otimização do sistema de secagem, é necessário a compreensão das interações entre condições psicrométricas do ar ambiente e de secagem e as características higroscópicas das sementes (Silva et al., 2020).

Com essas considerações, observa-se que o desenvolvimento de modelos para simular a secagem de sementes de soja em secador de leito fixo com fluxo de ar radial torna-se fundamental. Isso se justifica, uma vez que será possível estabelecer parâmetros operacionais que permitam otimizar o desempenho do secador, levando em consideração a preservação da qualidade das sementes. Além disso, ter-se-á disposição uma ferramenta de suporte à tomada de decisão ao que se referem especificamente a secagem, bem como ao planejamento dessa operação, o que contribuirá para a melhoria da eficiência no uso de recursos e promoverá a sustentabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Certificação de sementes de soja

No Brasil, o Sistema Nacional de Sementes e Mudas, criado pela Lei nº 10.711, de 05/08/2003 tem por objetivo principal assegurar a identidade e a qualidade do material de multiplicação e reprodução vegetal em todo o território nacional. Em conformidade com essa legislação, o método adotado para o alcance desse objetivo é a certificação do processo de produção de sementes, ao que se refere às categorias C1 e C2. A qualidade é assegurada por meio de critérios mínimos de germinação, pureza física e varietal, estabelecidos por normas de produção e comercialização controladas pelo governo federal. Além do controle oficial, os agricultores podem contar com o respaldo da "Lei de Proteção do Consumidor" para garantir a qualidade das sementes no comércio (Henning et al., 2021).

Com a promulgação da Lei de Proteção de Cultivares (LPC), o governo brasileiro passou a garantir os direitos dos desenvolvedores de novas variedades vegetais, concedendo certificados de proteção de cultivar, o que se um avanço significativo na proteção dos interesses dos obtentores, reconhecendo e regulamentando os direitos sobre suas criações. (BRASIL, 1997; Franco et al., 2011).

São consideradas obtentoras as empresas, públicas e privadas, que conduzem programas de melhoramento vegetal, culminando no desenvolvimento de novas cultivares. No contexto da Lei de Proteção de Cultivares, cultivares protegidas referem-se àquelas que, após a promulgação da legislação, receberam o certificado de proteção. Esse certificado confere aos obtentores direitos exclusivos quanto à reprodução, produção e comercialização da cultivar, incentivando, assim, a inovação e o investimento em programas de melhoramento genético no setor agrícola (BRASIL, 1997; Franco et al., 2011).

Cultivares de domínio público correspondem as disponibilizadas antes da nova legislação, ou cujos direitos de proteção expiraram. Antes da LPC, os produtores de sementes desfrutavam de livre acesso a essas cultivares para fins de multiplicação. Contudo, com a entrada em vigor da LPC, a multiplicação de cultivares protegidas só é permitida mediante a obtenção de autorização por parte do detentor dos direitos, reforçando o controle sobre a propagação das variedades e a proteção dos interesses dos obtentores (BRASIL, 1997; Franco et al., 2011).

Em 20 de dezembro de 2022 foi estabelecida a portaria n° 358 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que define as normas quanto a produção, certificação, responsabilidade técnica, beneficiamento, reembalagem, armazenamento, amostragem, análise, comercialização e utilização de sementes (MAPA, 2022).

Conforme as diretrizes das portarias n° 45/2013 de e n° 358/2022 do MAPA as sementes podem ser divididas nas classes certificadas e não certificadas. Dentro das classes, elas podem ser divididas em categorias da seguinte forma:

- Semente Genética: semente obtida através do processo de melhoramento genético das plantas, é categoria mais elevada de semente, resultante do desenvolvimento de cultivares e destina-se à produção de sementes básicas e certificadas.
- Semente Básica: é a semente produzida a partir da semente genética, mantendo sua identidade genética e pureza varietal.
- Semente Certificada de Primeira Geração (C1): trata-se da primeira geração de sementes certificadas, sendo produzida a partir de sementes básicas ou genéticas.
- Semente Certificada de Segunda Geração (C2): representa a segunda geração de sementes certificadas, sendo obtidas a partir da C1, semente básica ou genética.
- Semente de Primeira Geração da Certificada (S1): corresponde à primeira geração de sementes produzidas fora do processo de certificação, podem ser derivadas das sementes de todas as classes acima.
- Semente de Segunda Geração da Certificada (S2): refere-se à segunda geração de sementes produzidas fora do processo de certificação, podem ser derivadas de todas as outras classes acima.

2.2 Cuidados na produção de sementes

2.2.1 Origem da semente

A seleção da categoria de sementes na agricultura é uma decisão crucial, uma vez que o plantio deve ser sempre realizado com sementes de uma categoria superior. Essa prática está alinhada com as regulamentações estabelecidas para o controle de geração,

visando preservar a qualidade genética das sementes. As categorias, como básica, certificada e fiscalizada, desempenham um papel fundamental na garantia da origem e da qualidade das sementes agrícolas. Essas diretrizes, conforme destacado por Franco et al. (2011), MAPA (2013) e MAPA (2022), são essenciais para assegurar a produção de culturas saudáveis e de alto desempenho ao longo das sucessivas gerações.

Na aquisição de sementes é imprescindível considerar a qualidade e especificamente no Brasil há uma rede de laboratórios oficiais e privados especializados na análise de parâmetros como a germinação, pureza física e varietal, bem como a qualidade sanitária. É recomendável também estar atento à presença de sementes verdes, um indicativo de qualidade inferior (Henning et al., 2021; MAPA 2022). Segundo França-Neto (2012), sementes verdes podem ser definidas como sementes com os cotilédones da cor esverdeada, sendo o resultado de plantas que sofreram estresse durante a fase de maturação.

Na avaliação da qualidade do produto deve-se consultar os seguintes documentos: Boletim de Análise de Sementes, Atestado de Origem Genética, Certificado de Sementes ou o Termo de Conformidade, que devem ser fornecidos pelo produtor e, ou comerciante. Normalmente, esses documentos refletem os resultados válidos por seis meses a partir da data de análise. Ao revisar esses documentos, deve-se avaliar a germinação (%), pureza (semente pura, material inerte, outras sementes) e verificar os índices de sementes de outras espécies cultivadas, sementes silvestres, sementes nocivas toleradas e a conformidade com os padrões nacionais mínimos de qualidade estabelecidos para a soja, conforme definido nos padrões nacionais para a comercialização de sementes de soja (Henning et al., 2021; MAPA 2022).

Além dessas informações, alguns produtores de sementes no Brasil também disponibilizam dados de testes de vigor, como o teste de tetrazólio e o de envelhecimento acelerado, que trazem valiosas informações quanto a comprovação da qualidade das sementes comercializadas (Henning et al., 2021).

2.2.2 Escolha da área

Ao escolher a área para o cultivo de sementes, é crucial evitar o plantio da mesma espécie na safra anterior, a menos que se trate do mesmo cultivar. Essa precaução se justifica pelo fato de que sementes depositadas no solo podem manter sua viabilidade por um ou mais anos, aumentando o risco de contaminação varietal. Além disso, os resíduos

culturais deixados pela safra anterior podem servir como fonte de doenças e pragas, conforme destacado por Franco et al. (2011). Dessa forma, essa abordagem preventiva visa preservar a pureza genética das sementes e mitigar o potencial de problemas fitossanitários no ciclo de cultivo subsequente.

Além da preocupação com contaminação varietal, é importante conhecer as plantas daninhas presentes na área, isso auxilia na tomada de decisão, permitindo prever a dificuldade no controle, com base no grau de infestação. Também é crucial considerar a remoção de sementes nocivas e silvestres durante o processo de beneficiamento (Franco et al.,2011).

2.2.3 Escolha do cultivar

De acordo com Krzyzanowski (1992), a escolha do cultivar apropriado ao local de cultivo traz impacto direto ao potencial produtivo da safra. Portanto, faz-se necessário: escolher a zona de cultivo adequada, utilizar cultivar adaptado à região produtora; definir o ciclo de crescimento adequado a realidade da região o que é pautado principalmente segundo as estações na região; optar por cultivares resistentes a doenças e pragas e aos princípios ativos dos herbicidas a serem utilizados; e verificar a disponibilidade da semente na região e como também o seu potencial produtivo.

2.2.4 Colheita

A colheita da semente de soja trata-se de uma operação crítica no processo produtivo, pois um dos maiores riscos é a mistura varietal. Desse modo, o isolamento entre os campos de produção é imperativo, bem como a limpeza completa das máquinas colhedoras e carretas transportadoras.

A colheita mecanizada apresenta risco de danos mecânicos as sementes, que para ser minimizado requer a adequada regulagem dos mecanismos de trilha. Colhedoras com sistema de trilha axial ou longitudinal normalmente causam menos danos mecânicos a semente quando comparado ao sistema tangencial. Além desses cuidados, é recomendado menores rotações dos sistemas de trilha (França-Neto,2016).

Outro aspecto importante é o teor de água das sementes. Se o teor de água das sementes for inferior a 12% o risco de danos mecânicos aumenta, sendo representados pelo excesso de “bandinha” ou por fissuras na radícula. No entanto, se teor de água for

superior a 14% o risco será a maior presença de amassados e abrasões (França-Neto,2016). Desse modo, para colheita de soja semente o teor de água ideal deve estar entre 13 e 14%.

2.2.5 Recepção e secagem

Após a colheita, as sementes de soja chegam às Unidades de Beneficiamento de Sementes (UBS) onde são amostradas e classificadas e na sequência as cargas são direcionadas as moegas para descarga e dá-se início ao beneficiamento por meio das máquinas de pré-limpeza, com a finalidade de remover as impurezas grosseiras.

Caso o teor de água das sementes da carga recebidas for superior a 13% recomenda-se secagem até atingir 12,5%. Se a secagem imediata não for possível, é aconselhável o acondicionamento das sementes em silos pulmão dotados de sistema de aeração para que seja preservada a qualidade (França-Neto, 2016).

A secagem de sementes de soja pode ser realizada em secadores estáticos ou contínuos, tendo o cuidado de a temperatura do produto não ultrapassar 40 °C. Além disso, também é recomendado que a umidade relativa do ar de secagem não seja inferior a 35%, devido ao risco de elevadas taxas de secagem levarem a depreciação da qualidade das sementes.

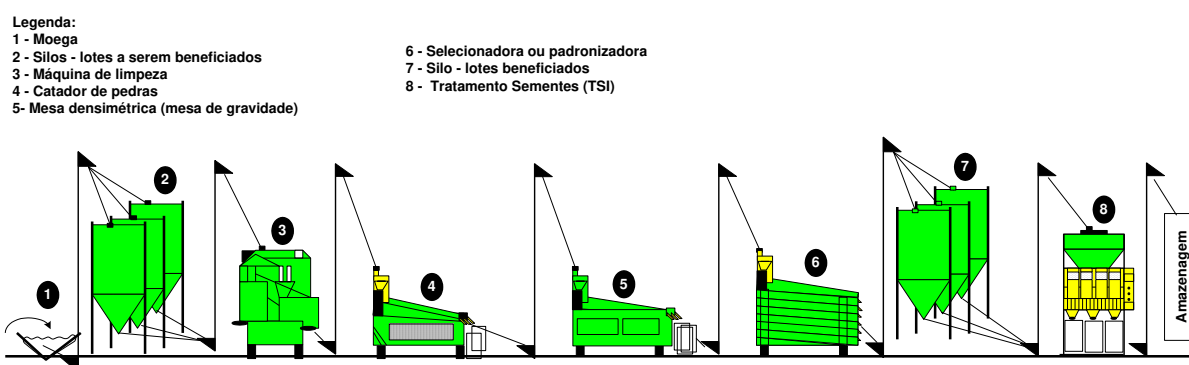
Em secadores estáticos, como os secadores de leito fixo, faz-se necessário a adoção de cuidados para minimizar a ocorrência de danos mecânicos. Dentre os cuidados é recomendado o uso de elevadores específicos para sementes, como os de corrente com descarga positiva ou elevadores de caçambas em que a descarga das caçambas seja conduzida com força centrífuga reduzida. Além disso, a camada de sementes não deve ultrapassar 0,70 m. Pois em secadores de leito fixo é comum observar gradientes do teor de água entre as camadas de sementes próximas à entrada do ar de secagem e saída do ar de exaustão, respectivamente. Portanto, é recomendado o revolvimento periódico da massa de sementes durante o processo a secagem, para que ao final a carga de sementes seca apresente teor de água homogêneo (França-Neto, 2016).

2.2.6 Beneficiamento

O beneficiamento de sementes normalmente ocorre após a secagem, e basicamente dá-se conforme o fluxograma operacional representado na Figura 1. Em que os lotes de

sementes segregados em silos são individualmente beneficiados empregando sequencialmente: (i) máquina de limpeza que utiliza peneiras e ventiladores para remoção de impurezas, (ii) catador de pedras para remoção de grânulos pedras, (iii) mesa dessimétrica que permite selecionar as sementes semelhantes quanto às dimensões e massa específica unitária, (iv) selecionadoras ou padronizadoras para subdividir o lote sementes segundo dimensões dos furos das peneiras. Esses lotes subdivididos podem ser armazenados em silos, ou em big bags que são acondicionados em armazéns sob refrigeração.

Figura 1 – Fluxograma operacional de uma UBS



Fonte: Autor.

O tratamento das sementes normalmente é realizado quanto da expedição das sementes.

2.2.7 Armazenamento

Segundo França-Neto (2016), para a região centro sul do Paraná, é indicado que sementes de soja sejam armazenadas com teor de água entre 11,5 e 12% e temperatura inferior a 25° C. A observar estas determinações espera-se menor ocorrência de sementes danificadas por fungos ou processos metabólicos (Henning, 2005).

Normalmente, o armazenamento de sementes tratadas e não tratadas ocorre em armazéns convencionais, sendo armazenadas em sacarias feitas de diversas lâminas de papel ou em polipropileno com material flexível, com peso entre 25 e 50kg. Além das embalagens menores, é comum encontrar o armazenamento em big bags, que são sacos feitos em polipropileno com costuras reforçadas, com peso variando entre 700 e 1300kg.

Para minimizar perdas qualitativas durante o armazenamento, é recomendado o uso de refrigeração. Dessa forma, os armazéns convencionais são equipados com sistemas de refrigeração para estabelecer temperaturas próximas a 15 °C no ambiente de armazenagem. Isso resulta na redução da atividade metabólica das sementes, devido aos processos de secagem e refrigeração

2.3 Secagem em baixas temperaturas

A secagem em baixas temperaturas é caracterizada pelo emprego de ar de secagem com aquecimento máximo de 10 °C em relação à temperatura do ar ambiente. Esse processo pode ser conduzido em silos ou em secadores de leito fixo com fluxo de ar radial (IRRI, 2013).

Quando a secagem é conduzida em silos, como por exemplo na secagem de arroz em casca, a secagem tem início na base do silo e progride até a parte superior. No decorrer da secagem faz surgir três regiões diferenciadas segundo o teor de água. Na parte inferior, concentra-se o produto seco, que já atingiu o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem. Na segunda região, chamada de frente de secagem, tem-se produto com teores de água entre o equilíbrio e o teor inicial de água. E nessa região que especificamente está ocorrendo a secagem. Já na região superior o produto apresenta o teor de água inicial (Silva; Afonso; Donzelles, 2008).

O sistema de aquecimento do ar, integrado aos ventiladores, desempenha um papel crucial na garantia da equalização do ar de secagem. Através do aquecimento, busca-se estabelecer uma condição psicrométrica que proporcione um teor de água de equilíbrio próxima ao teor de água final. Desse modo, para cada combinação específica de temperatura e umidade relativa resultará em um teor de água do grão em equilíbrio. Portanto, o processo de equalização do ar de secagem implica na adequação da temperatura e umidade relativa do ar para proporcionar o teor de umidade de equilíbrio apropriado, geralmente fixado em 12,5% para a semente de soja (Díaz Martínez, 2011)

2.4 Modelagem e simulação de secagem

A modelagem e simulação de sistema de secagem traz benefícios na condução de atividades como dimensionamento, avaliação, otimização e proposição de procedimentos para o controle e automação do processo.

Para formulação dos modelos faz-se necessário dispor de modelos matemáticos que descrevam as propriedades físicas dos grãos como calor específico, calor latente de vaporização e perda de matéria seca, bem como a cinética da secagem em camada delgada, Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos de curvas de secagem de camada delgada

Nome do modelo	Modelo	
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(1)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$	(2)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(3)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$	(4)
Newton	$RU = a \exp(-k t)$	(5)

Fonte: Adaptado de Vitorino (2009) e Venturin (2019).

Em que,

RU é a razão de umidade, adimensional;

k, k_0 e k_1 são as constantes de secagem, h^{-1} ;

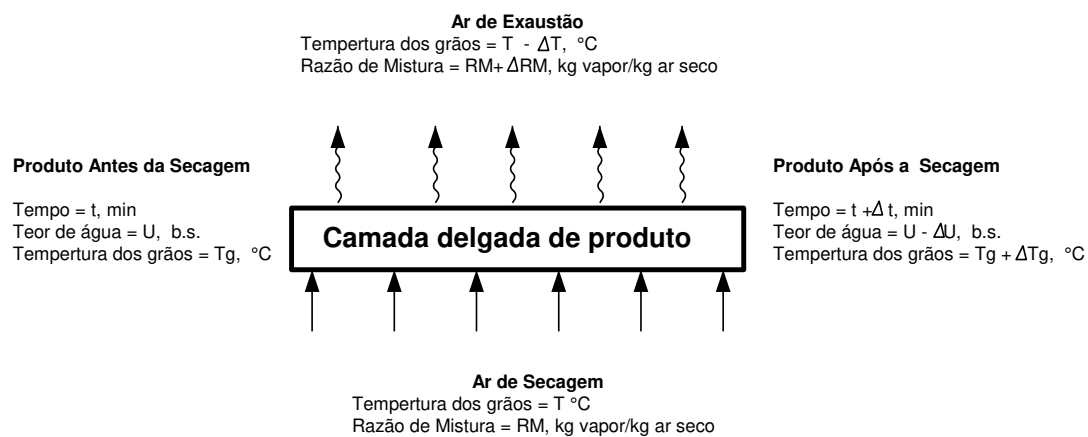
a, b e n são os coeficientes dos modelos;

t é o tempo de secagem, h.

Empregando os modelos matemático citados acima torna-se possível a modelagem de sistemas de secagem como por exemplo o modelo proposto por Thompson, Peart e Foster (1968), denominado Modelo de Thompson. Este modelo é particularmente interessante devido à sua capacidade de estimar variáveis de saída de forma bastante precisa, baseando-se em equações termodinâmicas que descrevem a transferência de massa e energia para descrever uma curva de secagem em camada delgada.

Na aplicação do Modelo de Thompson a modelagem aplica-se a uma camada espessa de grãos que é subdividida em camadas delgadas como demonstrado na Figura 2. A cada período de tempo (Δt) incrementado ao tempo de secagem durante a simulação são procedidos balanços de calor e de massa para o produto e o ar de secagem, pois conforme a Figura 2, a cada Δt o ar de secagem ao cruzar a camada delgada terá a razão de mistura incrementada em ΔRM e a temperatura do reduzida em ΔT . Por outro lado, para o produto ocorre o aumento da temperatura em ΔT_g e redução do teor de água em ΔU (Díaz Martínez, 2011; Venturin, 2019).

Figura 2 – Esquema de secagem em camada delgada



Fonte: Adaptado de Thompson, Peart e Foster (1968).

Ao se aplicar o Modelo de Thompson é necessário definir a condição de parada da simulação. Normalmente, opta-se por um determinado teor de água final médio ou da camada superior de produto, ou pelo tempo de secagem (Venturin, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido em uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS), situada na zona urbana do município de Mangueirinha - PR, (25° 56' 27" S e 52° 10' 33" O) com altitude média de 849 m, clima subtropical úmido.

3.2 Caracterização do sistema real

3.2.1 Caracterização das sementes

Foram utilizadas sementes de soja da cultivar BMX 55I57 RSF IPRO (Zeus), com ciclo de 128 dias, colhidas mecanicamente entre abril e maio de 2023. Após a colheita, com teor de água médio de 15%, as sementes foram transportadas até a UBS por caminhões graneleiros e recebidas em moegas. O produto foi submetido a pré-limpeza, em máquina de ventilador e peneiras (MVP), para remoção de impurezas menores e mais leves. Em seguida os lotes de sementes foram encaminhados aos silos secadores onde aguardam até o início da secagem.

3.2.2 Caracterização do sistema de secagem

Os dados de secagem, foram obtidos a partir de quatro secadores de leito fixo com fluxo de ar radial com especificações destacadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações secadores

Características dos secadores	
Diâmetro (m)	5,3
Área da seção (m ²)	88,24
Altura do cilindro (m)	7,8
Diâmetro duto do ar de secagem (m)	0,6
Volume (m ³)	172
Capacidade estática (t)	126

Fonte: Autor.

Cada sistema de secagem encontra-se equipado com dois ventiladores centrífugos modelo ILS -710 marca Projelmec ligados a uma fornalha a lenha com alimentação automática. Os ventiladores são acionados por motores de 14,9 kW (20 cv), 4 polos, 60 Hz e 1750 RPM. Os ventiladores, em condições normais de rotação de 1750 RPM tem capacidade de aplicar a vazão $300 \text{ m}^3 \text{ de ar} \cdot \text{min}^{-1}$ e pressão estática de 240 mm ca. Os ventiladores são controlados por um quadro de comando próximo aos secadores.

As fornalhas são controladas de maneira independente e os sistemas de alimentação automática são equipados com esteiras transportadoras. O controle do carregamento de lenha dá-se por meio sensores de temperatura posicionados na entrada do ar de secagem dos secadores.

Os dados monitorados durante o experimento foram: (a) condições psicrométricas do ar ambiente, (b) temperatura do ar de secagem, (c) teor de água na massa de sementes, (d) vazões e fluxo de ar fornecidos.

Os secadores operaram com temperatura do ar de secagem máxima de 50° C , sendo recomendado que o ar de secagem não ultrapassasse 40° C . As secagens dos lotes de sementes foram encerradas ao o produto atingir o teor de água igual a 13%.

3.2.3 Condições psicrométricas

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram adquiridos por meio de uma estação meteorológica convencional instalada na unidade armazenadora. Essas informações são registradas e armazenadas pela empresa. A organização desses dados foi conduzida utilizando o Microsoft Excel, sendo coletados nos dias 12/05/23, 13/05/23, 16/05/23 e 19/05/23.

3.2.4 Temperatura do ar de secagem e massa de grãos

As temperaturas do ar de secagem e da massa de sementes foram obtidas por meio de termopares instalados no secador. Esses sensores foram instalados durante a montagem do secador, com o objetivo de auxiliar o controle da secagem e preservação da qualidade das sementes.

3.2.5 Teor de água das sementes

Para as medições do teor de água das sementes, foram obtidas amostras às 8:00 h e às 14:00 h. Ao aproximar-se do final das secagens, a obtenção dos teores de água passam a ser a cada hora. As amostras foram retiradas pelas janelas de inspeção dos secadores e avaliadas em um medidor de umidade de grãos certificado pelo INMETRO, da marca Motomco, modelo 999ESI.

3.2.6 Fluxo de ar

As vazões de ar foram calculadas por meio da medição da velocidade do ar na entrada de ar dos ventiladores, utilizando anemômetro de hélice digital modelo KP-8016 da marca Knap. A entrada de ar foi dividida em 3 seções e a aferição das velocidades consistiu em aproximar o anemômetro das seções e aguardar até que a velocidade de tornasse constante.

Considerando (Q) o volume de ar que passa por uma seção do duto por unidade de tempo. Foi utilizada a Equação 6 para determinar as vazões médias ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) em cada momento a partir das velocidades médias dos pontos de medida. Por meio das Equações 7, 8 e 9, foram calculados os fluxos de ar por área, volume de produto e por tonelada de produto, respectivamente.

$$Q = A \cdot v \quad (6)$$

$$F_{area} = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

$$F_{vol} = \frac{Q}{V_{silo}} \quad (8)$$

$$F_{ton} = \frac{Q}{P_{ton}} \quad (9)$$

Em que:

Q = vazão do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$);

A = área da seção (base) do secador (m^2);

v = velocidade do ar de secagem ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$);

F_{area} = fluxo de ar por área (m^3 de ar $\cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$);

F_{vol} = fluxo de ar por volume de produto (m^3 de ar $\cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ de soja);

V_{silo} = volume de produto no secador (m^3);

F_{ton} = fluxo de ar por tonelada de produto (m^3 de ar. min^{-1} . T^{-1} de soja)

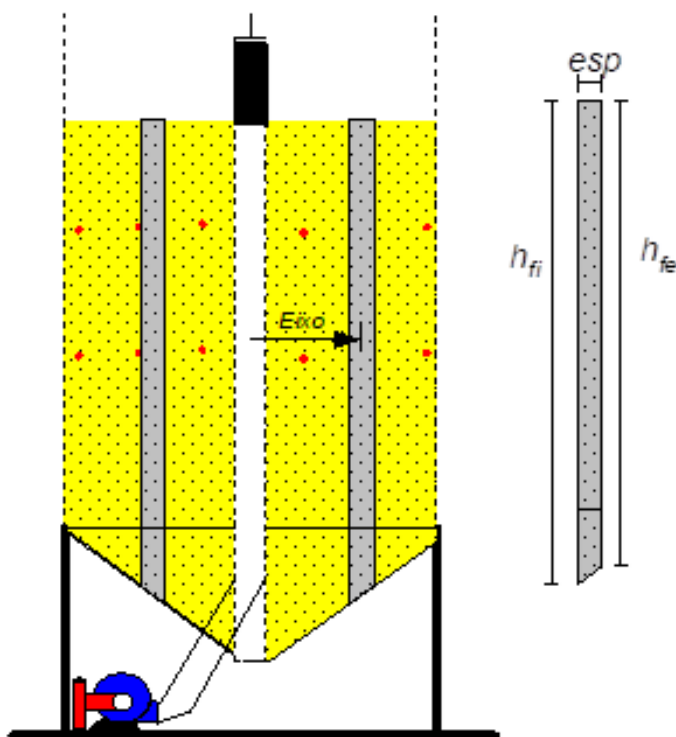
T_{prod} = quantidade de produto (toneladas).

3.3 Modelo de simulação

Foi implementado um modelo computacional para simular a secagem de sementes de soja em secador de leito fixo com fluxo de ar radial. O modelo desenvolvido baseia-se no Modelo de Thompson para secagem a baixa temperatura.

Conforme o proposto pelo Modelo de Thompson o leito de produto foi dividido em camadas, que para o presente estudo foi definido em dez camadas concêntricas em relação ao duto central do ar de secagem, Figura 3. Para o cálculo do volume de produto em cada camada foram empregadas as Equações 10 e 11.

Figura 3 – Corte longitudinal da seção do secador



Fonte: Autor.

$$Eixo = rfi + \frac{esp.(2.h_{fe}+h_{fi})}{3.(h_{fe}+h_{fi})} \quad (10)$$

$$V = 2. \pi. Eixo. Ap \quad (11)$$

Em que

Eixo =eixo de revolução da seção transversal da camada, m; e

Rfi =raio da seção interna da camada, m;

Esp =espessura da camada de grãos, m;

Hfe =altura da face externa da camada de grãos, m;

Hfi =altura da face interna da camada de grãos, m;

Ap = Área da seção da camada, m².

V = volume da camada de produto, m³; e

Ap =Área da seção da camada, m².

3.3.1 Descrição do programa

O programa é dividido em cinco janelas de diálogo: “Ar de secagem”, “Configuração do silo secador”, “Programação de enchimento”, “Simulação”, “Resultados”. As primeiras janelas estão relacionadas a entrada de dados no sistema, as duas últimas apresentam resultados da simulação.

Na primeira janela, Figura 4, o usuário poderá dividir o dia em até cinco períodos, informando para cada período a temperatura e umidade relativa ao ar ambiente naquele momento. Além disso, o usuário deverá informar a altitude local, o teor de água final do produto a temperatura de secagem e o horário de pico do uso de energia. Ao clicar em “Calcular”, serão calculados: (1) temperatura de bulbo úmido e a umidade de equilíbrio de acordo com a condição do ar ambiente; (2) aquecimento necessário para equalizar as condições psicométricas do ar de secagem; (3) temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Figura 4 – Primeira janela de diálogo do programa “Ar de Secagem”

Simulador de secagem a baixa temperatura.

SBT - Semente: Soja

Ajuda | Créditos | Fechar

Ar de Secagem | Configuração do Silo Secador | Programação do Enchimento | Simulação | Resultados | Monitor

Condições Ambiente

Sim	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	HH:MM
<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> : <input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> : <input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> : <input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> : <input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> : <input type="text"/>

Altitude (m):

Uso de Energia

Sim Horário de Ponta: : : Duração (h):

Poder calorífico do GLP (kcal/kg):

Ar de secagem

Umidade de equilíbrio (%):

Temperatura ar de secagem (°C):

Pré-definido | Limpar | Calcular

Ar ambiente / Ar aquecido

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Fonte: Autor.

Na segunda janela de diálogo, Figura 5, o usuário deverá escolher o produto e o programa irá sugerir a massa específica e o teor de água final ideal. Depois de determinado o produto, o usuário irá preencher as características do sistema de secagem, como dimensões do secador, características dos ventiladores e do sistema de queimadores GLP. Ao clicar em “Calcular”, o programa retorna as áreas e volumes do secador, quantidade de produto, a vazão de ar e a estimativa da perda de carga em relação ao plenum.

Figura 5 – Segunda janela de diálogo do programa “Configuração do Silo Secador”

Simulador de secagem a baixa temperatura.

SBT - Semente: Soja Ajuda | Créditos | Fechar

Ar de Secagem | **Configuração do Silo Secador** | Programação do Enchimento | Simulação | Resultados | Monitor

Característica do produto:

Produto armazenado: Pré definido

Teor de água final ideal (%): Limpar

Massa específica (kg/m³): Calcular

Fator compactação (%):

Características do Silo Secador

Diâmetro Externo (m):

Diâmetro Duto Interno (m):

Altura de Cilindro (m):

Inclinação Cone (°):

Fluxo (m³ de ar/min.t):

Majoração P. estática:

Resultados Características Silo Secador:

Área Superfícil Interna (m²):

Área Superfícil Externa (m²):

Altura Central (m):

Altura de Produto Face Interna (m):

Altura Produto Face Externa (m):

Volume Produto Cone (m³):

Volume Produto Cilindro (m³):

Volume Produto Total:

Quantidade de produto (kg):

Quantidade de produto (t):

Quantidade de produto (sc 60kg):

Vazão total (m³/min):

Perda de carga (mm ca):

Ventiladores

Nº de ventiladores:

Voltagem:

Corrente de linha (A):

Rendimento (%):

Potência (cv):

Queimadores GLP

Nº de queimadores:

Voltagem:

Corrente (A):

Rendimento (%):

Potência (cv):

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Fonte: Autor.

Na terceira janela de diálogo, Figura 6, o usuário deverá entrar com os dados do enchimento total do secador, além da data e horário do início da secagem. Ao clicar em “Calcular”, o programa divide o volume do secador em dez parcelas, necessárias para utilizar o modelo de Thompson, e retorna as vazões de ar, a pressão estática e o aquecimento causado pelo ventilador.

Figura 6 – Terceira janela de diálogo do programa “Programação de Enchimento”

Simulador de secagem a baixa temperatura.

SBT - Semente: Soja

Ajuda | Créditos | Fechar

Ar de Secagem | Configuração do Silo Secador | **Programação do Enchimento** | Simulação | Resultados | Monitor

Limpar

Dia / Mês	HH:MM	Ui (%)	kg
13 / 3	8 : 0	18.0	2999,43

Sacas 50 kg
 Sacas 60 kg

Fixar aquecimento pelos ventiladores em + (°C)

Vazões / Pressão estática / Aquecimento ventilador

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Fonte: Autor.

Na quarta janela de diálogo Figura 7, o usuário pode escolher qual método de simulação ele prefere, Thompson ou Hukill e então selecionar a condição de parada da simulação, que poderá ser umidade final média do produto (%), tempo de secagem (h) ou umidade da camada externa do produto (%). Durante a simulação, é apresentado o fluxo de ar expresso em relação ao volume do produto, tonelada de produto e área; tempo acumulado em horário de ponta; tempo de secagem, com e sem aquecimento; consumo de GLP e água evaporada. Também é apresentado o perfil de umidade das 10 camadas de produto no silo, quanto a posição, umidade e temperatura do produto, umidade relativa do ar de exaustão e percentual de perda de madeira seca.

Figura 7 – Quarta janela de diálogo do programa “Simulação”

Simulador de secagem a baixa temperatura.

SBT - Semente: Soja Ajuda | Créditos | Fechar

Ar de Secagem | Configuração do Silo Secador | Programação do Enchimento | **Simulação** | Resultados | Monitor

Configuração da simulação:

Modelo de Hukill

Modelo de Thompson

Condição de parada da simulação:

Umidade final média (%)

Tempo de secagem (h)

Umidade da camada externa (%)

Valor:

Limpar Padrão Sim Simular

Aquecimento - Queimador (°C)

Mínimo Médio Máximo

Aquecimento - Ventilador (°C)

Mínimo Médio Máximo

Taxa consumo GLP (kg/h)

Mínimo Médio Máximo

Umidade do produto (%)

Mínimo Médio Máximo

Temperatura do produto (°C)

Mínimo Médio Máximo

Perda de matéria seca (%)

Mínimo Médio Máximo

Fluxos de ar

m³ de ar/min. m³ de produto:

m³ de ar/min. t de produto:

m³ de ar/min. m² (área):

Operação sistema

Tempo de residência (h):

Tempo horário de ponta (h):

Tempo de secagem(h):

Tempo c/ aquecimento (h):

Tempo s/ aquecimento:

Consumo GLP (kg):

Água evaporada (t):

Data & Hora:

Perfil -Umidade e Temperatura do Produto

Energia

Energia elétrica ventiladores (kWh):	<input type="text"/>
Energia elétrica aquecedor (kWh):	<input type="text"/>
Energia térmica GLP (Mcal):	55,13
Energia térmica total (Mcal):	181,42
Consumo específico (kcal/ kg água)	892,27

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Fonte: Autor.

Na quinta janela de diálogo, Figura 8, o usuário tem acesso aos dados compilados pelo programa. São exibidos os consumos de energia elétrica, a quantidade de produto úmido e seco, perda por super secagem, percentual médio de perda de matéria seca, tempo de residência do produto no secador, tempo de exposição ao ar de secagem, tempos acumulados em horário de ponta,

Figura 8 – Quinta janela de diálogo do programa “Resultados”

Simulador de secagem a baixa temperatura.

SBT - Semente: Soja

Aiuda | Créditos | Fechar

Ar de Secagem | Configuração do Silo Secador | Programação do Enchimento | Simulação | Resultados | Monitor

Propriedades	Parcela #1	Parcela #2	Parcela #3	Parcela #4	Parcela #5	Parcela #6	Parcela #7	Tota/Médias
Nº de camadas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Altura da Parcela (m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Quantidade úmida (t)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1541,41
Quantidade seca (t)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1436,13
Água evaporada (t)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	105,28
Perda matéria seca (%)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹
Perda supersecagem(t)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,78
Tempo de residência (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exposição ao fluxo de ar(h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tempo horário de Ponta (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tempo c/ aquecimento (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,00
Tempo s/ aquecimento (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00
Umidade máxima (%)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	13,05 ¹
Umidade média (%)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	11,98 ¹
Umidade mínima(%)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	11,09 ¹
Temperatura máxima (°C)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	24,09 ¹
Temperatura média (°C)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	23,61 ¹
Temperatura mínima(°C)	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	23,08 ¹
Consumo GLP(kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,01
Energia elétrica-total(kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1175,77

¹: Valores médios

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Fonte: Autor.

3.4 Validação do modelo

A validação do modelo de simulação foi conduzida comparando os resultados experimentais obtidos para os secadores 01, 02, 03 e 04 com os dados simulados sob as mesmas condições. Na validação foram consideradas as variáveis tempo de secagem e teor de água final. E os procedimentos ocorreram em duas etapas. Na primeira foi escolhido como condição de parada da simulação o teor de água final do produto, enquanto na segunda foram os tempos de secagem experimentais obtidos para os secadores 01, 02, 03 e 04.

Os resultados foram comparados através de erro relativo percentual, Equação 12, que expressa a diferença entre um valor real e o valor simulado, dividida pelo valor real.

$$Erro = \frac{|V_S - V_R|}{V_R} 100 \quad (12)$$

Em que:

Erro = erro relativo entre o valor simulado e o valor real;

V_S = valor simulado;

V_R = valor real.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados coletados do sistema real

Os carregamentos dos secadores foram realizados conforme a demanda da unidade durante a safra, Tabela 3, que traz as datas das recepções das cargas, com os respectivos teores de água iniciais. Durante a secagem, por meio das janelas de inspeção, foram coletadas amostras para monitoramento do teor de água.

Tabela 3 – Enchimento dos secadores

Secador	Parcela	Data	Teor de água		Quantidades de produto	
			Parcela anterior (%)	Parcela nova (%)	Adicionado (t)	Acumulado (t)
1	1	12/05/23	-	13,8	36	36
	2	12/05/23	13,8	14,1	30	66
	3	12/05/23	14,1	14,5	24	90
2	1	13/05/23	-	15	21	21
	2	13/05/23	15	14,9	40	61
	3	13/05/23	14,9	14,7	33	94
3	1	16/05/23	-	15,8	30	30
	2	16/05/23	15,8	15,5	33	63
	3	16/05/23	15,5	15,9	28	91
4	1	19/05/23	-	14,1	34	34
	2	19/05/23	14,1	14,0	40	74

Fonte: Autor.

O início da secagem em cada um dos secadores deu-se após o acréscimo da última parcelas e o fim foi programado para o momento em que o teor de umidade médio atingisse 13%. Desse modo, para os secadores 1, 2, 3 e 4 ao final da secagem foram obtidos os seguintes teores de água 13,2, 12,8, 13,1, e 12,7%, respectivamente.

4.1.2 Condições psicométricas do ar de secagem

As condições psicométricas foram obtidas de acordo com os dados da estação meteorológica da unidade, aferidos em quatro momentos durante o dia, Tabela 4.

Tabela 4 – Condições psicométricas do ar ambiente

Data	Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)
12/05/2023	07:30h	7,0	90
	11:30h	20,1	86
	15:30h	22,0	83
	18:00h	16,0	86
13/05/2023	07:30h	5,6	89
	11:30h	16,9	84
	15:30h	20,3	79
	18:00h	19,0	86
16/05/2023	07:30h	2,9	91
	11:30h	16,2	86
	15:30h	20,0	84
	18:00h	15,0	86
19/05/2023	07:30h	7,3	88
	11:30h	20,0	87
	15:30h	24,8	83
	18:00h	21,0	84

Fonte: Autor.

4.2 Validação do programa

Para a validação do programa foram comparados o tempo de secagem e o teor água final para os secadores 01, 02, 03 e 04 obtidos experimentalmente e simulados.

4.2.1 Tempo de secagem

A comparação dos dados de tempo de secagem obtidos experimentalmente e simulados, assim como os erros relativos são apresentados na Tabela 5. Na simulação a condição de parada foram os teores de água final obtidos experimentalmente para os secadores 1, 2, 3 e 4.

Tabela 5 – Comparação dos tempos de secagem experimental e simulado

Secador	Tempo experimental (h)	Tempo simulado (h)	Erro relativo (%)
1	79	74	6,3
2	91	84	7,6
3	87	83	4,5
4	66	60	10,0

Fonte: Autor.

Dessa forma, conclui-se que o modelo de simulação descreveu de maneira consistente os processos de secagem. Pois foi constatado erro relativo médio de 7,3% e o intervalo de variação do erro relativo entre 4,5 a 10,0. Desse modo, foi certificado que valores simulados subestimam o tempo de secagem entre 4,0 e 6,0 h, o que factível de aceitação tendo em vista a duração do tempo de secagem

4.2.2 Teor de água

A comparação dos teores de água final experimentais e simulados, assim como o erro relativo são apresentados na Tabela 6. Na simulação a condição de parada selecionada foi o tempo de secagem com valores iguais aos tempos de secagem obtidos experimentalmente.

Tabela 6 – Comparação entre os teores de água final experimentais e simulados.

Secador	Teor de água experimental (%)	Teor de água simulado (h)	Erro relativo (%)
1	13,2	13,0	0,2
2	12,8	12,7	0,9
3	13,1	12,8	1,6
4	12,7	13,1	3,0

Fonte: Autor.

Com isso, constatou-se que o modelo descreveu de maneira consistente o processo de redução do teor de água nas sementes, enfatizando os resultados específicos do secador 1. Além disso, os desvios identificados podem ser justificados pela complexidade inerente ao sistema de secagem. No contexto da simulação de secagem de grãos, a precisão do erro relativo é considerada satisfatória, demonstrando a eficácia do modelo em simular o teor de água final da secagem.

5 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram a viabilidade técnica de uso do modelo computacional desenvolvido para previsão do tempo de secagem e o teor de água final na secagem de lotes de sementes de soja em secador de leito fixo com fluxo de ar radial

Ao comparar os dados experimentais e simulados foi constatado que modelo computacional desenvolvido se trata de uma ferramenta valiosa na tomada de decisões durante o processo de beneficiamento das sementes de soja bem como no planejamento operacional de Unidades de Beneficiamento de Sementes. Além disso, destaca-se que o modelo computacional desenvolvido apresenta adaptações que o tornam compatível com outros tipos de produto, ampliando sua utilidade. Essa versatilidade confere ao modelo uma posição estratégica como uma alternativa eficaz na tomada de decisões em diferentes contextos do beneficiamento de sementes.

Essa estudo não só propiciou a validação do modelo proposto, como também ressalta o potencial de contribuição significativamente para a otimização e eficiência dos processos de secagem, particularmente no setor de beneficiamento de sementes de soja.

REFERÊNCIAS

ABUD, Y. B.; SILVA, R. L.; LIMA, L. R. Influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem de grãos de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 30, n. 2, p. 45-52, 2005.

ARAÚJO, Pedro Vitor Lopes. **Influência da condição de armazenamento na qualidade fisiológica de sementes de soja**. 2016. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Agronomia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BARRETO, F.A.; DEMITO A. Processo de resfriamento de sementes. **SEED News**, Pelotas, n.3, 2009.

BAUDET, L.; VILLELA, F. Unidades de beneficiamento de sementes. **Revista SEED News**, Pelotas, v.11, n.2, p. 22-26, 2007

BRASIL, 2013. **Portaria MAPA nº 45, de 17 de setembro de 2013**. Estabelece os padrões de identidade e qualidade para a produção e a comercialização de sementes. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/sementes-e-mudas/publicacoes-sementes-e-mudas/copy_of_INN45de17desetembrode2013.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

BRASIL, 2022. **Portaria MAPA nº 538, de 20 de dezembro de 2022**. Estabelece as normas para a produção, a certificação, a responsabilidade técnica, o beneficiamento, a reembalagem, o armazenamento, a amostragem, a análise, a comercialização e a utilização de sementes. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-mapa-n-538-de-20-de-dezembro-de-2022-*453277126>. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

BRASIL. **Lei Nº 9.456, de 25 de abril de 1997**. Dispõe sobre A proteção dos direitos relativos à propriedade intelectual referente a cultivar. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 1997.

DÍAZ MARTÍNEZ, J. A. **Modeling of grain dryers: thin layers to deep beds**. 2011. 88 f. Dissertação (M. Sc) - Bioresource Engineering Department, McGill University, Montreal, Canadá, 2011.

FRANÇA-NETO, J. B. et al. **Semente esverdeada de soja: causas e efeitos sobre o desempenho fisiológico-Série Sementes**. Londrina: Embrapa Soja, 2012b. 15p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 91).

FRANÇA-NETO, J. de B. et al. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82p. (Embrapa Soja. Documentos, 380).

FRANCO, Daniel Fernandez et al. **Produção e avaliação da qualidade de sementes de arroz irrigado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. 31p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 350).

HENNING, A.A. **Patologia e tratamento de sementes: noções gerais**. 2.ed. Londrina: Embrapa Soja, 2005. 52p. (Embrapa Soja. Documentos, 264).

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE (IRRI). **Paddy drying**. Postharvest Unit, CESD, ver. 2, 2013. Disponível em: <
<http://www.knowledgebank.irri.org/images/docs/training-manual-paddy-drying.pdf>.>
Acesso em: 10 de novembro de 2023.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANCA NETO, J. de B.; HENNING, A. A. **Semente de soja: cuidados na aquisição e na utilização**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1992. 7p. (EMBRAPA-CNPSO. Comunicado Técnico, 52).

KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA-NETO, J.B.; COSTA, N.P. da **Teste do hipoclorito de sódio para semente de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2004. 4p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 37).

KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA-NETO, J.B.; MESQUITA, C. de M. **Kit medidor de sementes partidas de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 12p. 1 folder.

OLIVEIRA, J. A. et al. Secagem de grãos em secador de fluxo radial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 251-256, 2008.

OLIVEIRA, M. E.; SILVA, M. A.; PEREIRA, P. A. P. Processos de secagem de grãos e sementes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 657-665, 2013.

REIS, E. F.; SOUZA, L. A. S.; SANTOS, T. O. Estudo da secagem convectiva de sementes de milho. In: **Congresso Brasileiro de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Anais...** Fortaleza, CE, 2017.

SANTOS, R. C. et al. Impacto da umidade na qualidade de sementes de soja durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Tecnologia Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 78-84, 2019.

SARAIVA, A. M. et al. Importância econômica da produção de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 45-56, 2020.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e secadores. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008, cap. 5, p. 107-138.

SILVA, M. A. et al. Modelagem matemática da secagem de sementes de soja: uma abordagem para otimização do processo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, n. 4, p. 90-102, 2020.

SOUZA, J. L. et al. Secadores estáticos de fluxo radial: uma revisão da tecnologia e sua aplicabilidade na secagem de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 1, p. 56-68, 2021.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transaction of the ASAE**, v. 11, n. 04, p. 582-586, 1968.

VENTURIN, A. C. Z. **Modelagem e simulação de secagem em baixa temperatura para arroz com casca**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) — Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2019.

VITORINO, R. B. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) — Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2009.