



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



ADRIELLE DOMINGOS DOS SANTOS

**MAPEAMENTO DOS PERFIS DE SECAGEM DE UM SECADOR DE LEITO
FIXO UTILIZADO PARA SECAR SEMENTES DE MILHO**

Uberlândia, MG

2025

ADRIELLE DOMINGOS DOS SANTOS

**MAPEAMENTO DOS PERFIS DE SECAGEM DE UM SECADOR DE LEITO
FIXO UTILIZADO PARA SECAR SEMENTES DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia, MG

2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Faculdade de Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP
38400-902
Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br

**ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO**

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	FEQUI31033 - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - Turma C25 - 2025/1				
Data:	04/09/2025	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	10:40
Matrícula do Discente:	11921EQU007				
Nome do Discente:	Adrielle Domingos dos Santos				
Título do Trabalho:	Mapeamento dos perfis de secagem de um secador de leito fixo utilizado para secar sementes de milho				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?		(X) Sim () Não			

Reuniu-se por videoconferência, na sala virtual do GOOGLE MEET, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Química, assim composta: Profa. Yanne Novais Kyriakidis - FEQUI/UFU; Eng. Vinícius Pimenta Barbosa - Pós-doutorando PPGEQ/UFU e Prof. Rubens Gedraite - orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, Prof. Rubens Gedraite, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

(**X**) Aprovada

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/09/2025, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yanne Novais Kyriakidis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/09/2025, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Pimenta Barbosa, Usuário Externo**, em 04/09/2025, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6651389** e o código CRC **210BCF55**.

Referência: Processo nº 23117.061571/2025-75

SEI nº 6651389

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo a Deus, principalmente por me escutar ao longo de todos esses anos. Seu apoio silencioso e força concedida foram muito importantes em toda essa jornada.

À minha mãe, por todo o apoio e amor. A sua presença constante e força para enfrentar o mundo foram uma grande fonte de inspiração, assim como sua capacidade de sempre sorrir e buscar a felicidade. Obrigada por sempre confiar em mim e me inspirar a sempre correr atrás de meus sonhos e ambições.

A minha namorada, Kerolene, que me ajudou na construção desse tcc me dando muito apoio moral, risadas, carinho e comidinhas caseiras deliciosas. Obrigada por me desafiar, me encher de tanto amor e carinho que quase faz o meu coração explodir. E também por encher nossa casa com nossos pets que também são meus amores.

Agradeço aos meus amigos mais antigos Rafa, Nayara, César, Vinícius, Vitor, Bia e Ana Paula que sempre estiveram presentes e acompanharam cada fase. Há muito tempo atrás, conheci vocês e pude construir memórias incríveis. Crescer com vocês foi fundamental para entender a mim mesma e a como eu poderia ver o mundo. E claro, aprender a me divertir muito.

Agradeço também às novas amigas que obtive durante minha graduação, Pri, AnaJu, Natália, Carol, Amanda, Marcos, Higor, Thamires e Gabi. Passar por todos os percalços da graduação com vocês ao meu lado tornou tudo mais fácil e mais leve. Além disso, tive a oportunidade de viver aproximadamente um milhão de experiências novas juntamente a pessoas sensacionais.

Quero agradecer ao meu orientador, o professor Rubens, que foi um excelente orientador. E também um ótimo professor ao longo da graduação, suas aulas me fizeram sentir uma verdadeira engenheira química em formação. Todas nossas interações foram cheias de aprendizados e bom humor, tornando meus horizontes mais amplos e por isso sou muito grata.

Meus agradecimentos seguem para a professora Yanne, que pude conhecer em sala de aula e também através do projeto de extensão o qual ela é tutora, o SWE AS. Sua força e sua vontade de fazer a graduação um ambiente mais igualitário e melhor para todos os alunos a tornam um exemplo a ser seguido. Agradeço-a e ao Vinícius Pimenta por fazer parte de minha banca de defesa do TCC.

Deixo um agradecimento especial aos meus colegas de trabalho, Renata e Milani, que me deram imenso suporte nesse trabalho de conclusão de curso. Seus insights e apoio foram fundamentais para que esse trabalho fosse executado. Agradeço também à Bayer que permitiu o estudo de secagem do secador industrial abordado no presente trabalho.

A graduação foi um momento desafiador e graças a todos vocês guardo em minhas memórias as mais maravilhosas lembranças. Meu muito obrigada a todos!

RESUMO

No presente trabalho foi avaliado a eficiência de secagem de um secador de leito fixo para a secagem de sementes de milho. Notou-se que a eficiência no processamento desse material é crucial para a sustentabilidade da agricultura e a rentabilidade do setor agrícola. Um processo eficiente garante a produção de sementes de alta qualidade, minimizando o desperdício de recursos valiosos como água, energia e insumos agrícolas. Isso não só contribui para a conservação ambiental, como também reduz os custos de produção. A secagem artificial de sementes de milho destacou-se como um método eficiente, permitindo controle preciso sobre a temperatura e a umidade. Essa técnica assegura uma secagem rápida até atingir o nível de umidade ideal para o armazenamento, reduzindo significativamente o risco de perda de qualidade devido a fungos e outros microrganismos, além de preservar as qualidades nutricionais e a capacidade de germinação das sementes. Para alcançar esses resultados, foi fundamental compreender os mecanismos de secagem, selecionar as tecnologias apropriadas e otimizar os parâmetros de secagem. A avaliação da eficiência e desempenho de um secador de leito fixo começou com a coleta das especificações técnicas do equipamento, incluindo sua capacidade de secagem, dimensões, sistema de aquecimento e ventilação. O fluxo de ar ascendente do secador foi medido com um anemômetro digital, permitindo entender as diferenças de rendimento térmico em relação à distribuição das amostras. Seguindo essa fase inicial, o secador foi dividido em seis seções idênticas, cada uma com a mesma quantidade de material, e nessa primeira parte do experimento, foi colocada uma única camada de espigas despalhadas em cada seção, com umidades iniciais semelhantes. A umidade das amostras foi monitorada através de cinco espigas processadas no Analisador de Grãos AM 5200, enquanto a umidade relativa e as temperaturas foram medidas com higrômetros digitais e um termômetro infravermelho, com monitoramento a cada quatro horas até que as amostras atingissem uma umidade abaixo de 12,5%. Na segunda parte, foi analisado um cenário com múltiplas camadas de material nas seções com melhor e pior desempenho, com monitoramento a cada oito horas. Dessa forma, foi observado que o rendimento térmico do secador estudado foi de 29%, que a posição 6 foi a mais eficiente, apresentando as maiores taxas de secagem e temperaturas e em contrapartida a posição 1 apresentou-se como a mais ineficiente. A partir do experimento com múltiplas camadas de espigas, observou-se que a posição 1 praticamente manteve a eficiência de secagem enquanto a posição 6 teve sua taxa de perda de umidade reduzida à metade.

Palavras-chave: Leito fixo; temperatura; simulação; secagem; eficiência.

ABSTRACT

In the present study, the drying efficiency of a fixed bed dryer for drying corn seeds was evaluated. It was noted that the efficiency in processing this material is crucial for the sustainability of agriculture and the profitability of the agricultural sector. An efficient process ensures the production of high-quality seeds while minimizing waste of valuable resources such as water, energy, and agricultural inputs. This not only contributes to environmental conservation but also reduces production costs. The artificial drying of corn seeds proved to be an effective method, allowing precise control over temperature and humidity. This technique ensures rapid drying until the ideal moisture level for storage is reached, significantly reducing the risk of quality loss due to fungi and other microorganisms, as well as preserving the nutritional qualities and germination capacity of the seeds. To achieve these results, it was essential to understand the drying mechanisms, select appropriate technologies, and optimize drying parameters. The evaluation of the efficiency and performance of the fixed bed dryer began with the collection of technical specifications of the equipment, including its drying capacity, dimensions, heating system, and ventilation. The upward airflow of the dryer was measured with a digital anemometer, allowing for an understanding of the differences in thermal performance related to the distribution of the samples. Following this initial phase, the dryer was divided into six identical sections, each containing the same amount of material. In this first part of the experiment, a single layer of shelled ears was placed in each section, with similar initial moisture contents. The moisture of the samples was monitored through five ears processed in the AM 5200 Grain Analyzer, while relative humidity and temperatures were measured with digital hygrometers and an infrared thermometer, with monitoring every four hours until the samples reached a moisture content below 12.5%. In the second part, a scenario with multiple layers of material was analyzed in the sections with the best and worst performance, with monitoring every eight hours. It was observed that the thermal efficiency of the studied dryer was 29%, with position 6 being the most efficient, showing the highest drying rates and temperatures, whereas position 1 was identified as the least efficient. From the experiment with multiple layers of ears, it was noted that position 1 practically maintained its drying efficiency, while position 6 had its moisture loss rate reduced by half.

Keywords: Fixed bed; temperature; simulation; drying process; efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: esquema de secagem de um silo secador-armazenador.....	9
Figura 2: foto das resistências elétricas utilizadas no sistema de aquecimento do secador.....	13
Figura 3: ventiladores, sistema de controle e caixa de resistências elétricas do secador.....	14
Figura 4: divisão do secador de leito fixo estudado.....	14
Figura 5: foto da disposição de sacos de espiga durante a primeira parte do experimento.	16
Figura 6: foto da posição 1 do secador durante a segunda parte do experimento.....	17
Figura 7: foto da posição 6 do secador durante a segunda parte do experimento.....	17
Figura 8: fluxo de ar no secador de leito fixo estudado. Vista em planta.	19
Figura 9: gráfico de perda de umidade por tempo.	20
Figura 10: comportamento de temperaturas ambientes.	23
Figura 11: mapa de calor do secador de leito fixo estudado.....	24
Figura 12: comportamento das umidades relativas ao longo do tempo observado.....	26
Figura 13: gráfico da variação de temperatura nas diferentes posições do secador.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade e fluxo de ar por posição.	18
Tabela 2: informações iniciais do experimento (considerando uma camada de espigas).....	19
Tabela 3: dados de perda de umidade das espigas de milho ao longo do tempo de experimento (considerando uma camada de espigas).....	19
Tabela 4: Taxa de perda de umidade por posição (considerando uma camada de espigas).....	21
Tabela 5: temperaturas ambiente, de entrada e de saída do secador ao longo do tempo (considerando uma camada de espigas).....	21
Tabela 6: temperaturas por posição do secador (considerando uma camada de espigas).....	23
Tabela 7: umidades relativas monitoradas ao longo do experimento (considerando uma camada de espigas)	25
Tabela 8: tabela com as informações finais (considerando uma camada de espigas).....	26
Tabela 9: resultados do cálculo de vazão mássica de água – umidade retirada dos grãos de milho (considerando uma camada de espigas).....	27
Tabela 10: tabela com as informações iniciais (considerando multicamadas de espigas).....	27
Tabela 11: dados de perda de umidade das espigas de milho ao longo do tempo de experimento (considerando multicamadas de espigas).....	28
Tabela 12: Taxa de perda de umidade por posição (considerando multicamadas de espigas)	28
Tabela 13: temperaturas observadas nas espigas de milho ao longo do experimento (considerando multicamadas de espigas).....	29
Tabela 14: informações finais do experimento (considerando multicamadas de espigas)	30
Tabela 15: resultados do cálculo de vazão mássica de água (considerando multicamadas de espigas)	30

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
3.1. Materiais utilizados	12
3.2. Metodologia empregada	12
4. RESULTADOS	18
4.1. Influência do fluxo de ar	18
4.2. Secagem com uma camada de material.....	19
4.2.1. Parâmetros iniciais	19
4.2.2. Perda de umidade por posição	19
4.2.3. Relação entre as temperaturas e as horas do dia.....	21
4.2.4. Temperatura entre posições	23
4.2.5. Influência da umidade do ar	25
4.2.6. Parâmetros finais e análise de rendimento térmico	26
4.3. Secagem com múltiplas camadas de material	27
4.3.1. Parâmetros Iniciais	27
4.3.2. Perda de umidade por posição	28
4.3.3. Temperatura entre posições	29
4.3.4. Parâmetros finais e análise de eficiência	30
5. CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

A agricultura de milho no Brasil vem experimentando um crescimento notável, impulsionada tanto por avanços tecnológicos quanto pela crescente demanda do mercado interno e externo. Com uma combinação de melhorias genéticas nas sementes, práticas agrícolas mais eficientes e uma gestão agrônômica mais sofisticada, os produtores brasileiros têm alcançado rendimentos de produção recordes (CONAB, 2017). O Brasil, já estabelecido como um dos maiores produtores mundiais de milho, continua expandindo sua área cultivada, aproveitando as vastas regiões agrícolas disponíveis e as condições climáticas favoráveis.

A eficiência no processamento de sementes de milho é de suma importância, pois tem um impacto direto na sustentabilidade da produção agrícola e na lucratividade do setor. Um processo eficiente assegura que sementes de alta qualidade sejam produzidas com o mínimo desperdício de recursos, como água, energia e insumos agrícolas, contribuindo para a conservação ambiental e a redução dos custos de produção. Além disso, a eficiência no processamento garante a máxima viabilidade e vigor das sementes, fatores cruciais para o sucesso da germinação e o crescimento das plantas (VILLELA; PESKE, 2003).

Uma etapa fundamental no processo de produção de sementes é a de secagem dos materiais, podendo ser feito por meio de secagem natural ou artificial. A secagem natural envolve a exposição dos grãos ao sol e ao vento em superfícies planas ou em estruturas apropriadas que permitem a circulação do ar. A eficácia da secagem natural depende de fatores climáticos, como a intensidade do sol, a umidade relativa do ar e a ventilação. Embora esse processo seja uma prática de baixo custo, que não requer o uso de energia elétrica ou combustíveis fósseis, ela exige monitoramento constante para evitar a contaminação por fungos, insetos e roedores, além de danos causados por chuvas inesperadas (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001). Para obter um melhor controle operacional e garantir a qualidade das sementes, as indústrias agrícolas optam por realizar a secagem utilizando um fluxo forçado de ar secante em um ambiente controlado.

Diferentemente da secagem natural, que depende exclusivamente das condições climáticas, a secagem artificial permite um controle preciso sobre a temperatura e a umidade, garantindo que o milho seja secado rapidamente até alcançar o teor de umidade ideal para armazenamento. Isso não apenas minimiza o risco de perdas causadas por fungos e outros microrganismos, mas também preserva a qualidade nutricional e a germinação das sementes (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001). Em prol de garantir um produto de alto padrão, o

processo de secagem requer uma compreensão profunda de seus mecanismos, a escolha de tecnologias adequadas e a otimização de parâmetros.

Assim, o objeto de estudo no presente trabalho foi um silo secador-armazenador de secagem estacionária, usado para secar milho em uma usina de pesquisa de produção de sementes. Contudo, para que esse equipamento seja operado em seu ponto ótimo, as condições operacionais devem estar de acordo. Em vista disso, objetivou-se buscar suas especificações e entender a eficiência de secagem do secador estudado através do mapeamento de seus perfis de temperatura e de fluxo de ar, relacionando ambos à disposição espacial do equipamento, entender o impacto da máxima altura de camada de materiais, pensando em garantir uma boa eficiência e demonstrar quais as implicações práticas e recomendações podem ser feitas para otimizar o processo de secagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A secagem, por definição, é um processo de remoção de água ou outro solvente de um material sólido, líquido ou pastoso. Esse processo é geralmente realizado para preservar substâncias ou para reduzir o peso e o volume para transporte. Na secagem de sementes ocorre a remoção de uma determinada porção de água do produto orgânico de maneira natural ou artificial (EVANGELISTA NETO, 2013; MARTINS, 2015). Sendo muito utilizada nas indústrias de agronegócio, a secagem artificial de sementes ganha destaque e sua operação é feita pela ventilação forçada de ar e carrega consigo vários pontos de atenção para que seja garantida a qualidade do material ao final de sua produção e tratamento (PARK; YADO; BROD, 2001; CELESTINO, 2010).

A perda de qualidade fisiológica é causada por mudanças bioquímicas ou fisiológicas adversas que o produto pode sofrer. Alguns exemplos dessas condições irregulares são contaminação por patógenos, danos mecânicos, presença de inibidores e teor de umidade inadequado. As sementes geralmente alcançam a maturidade fisiológica, em campo, com teores de umidade superiores a 30%, o que não é compatível com os percentuais de umidade necessários para armazenagem e venda deste produto (VILLELA & SILVA, 1992). O alto grau de umidade durante o armazenamento sempre resulta em uma perda na qualidade de germinação da semente, sendo que a umidade ideal varia entre as espécies (CHAI, 1998; HU et al., 1998; WALTER; ENGELS, 1998). Em ambientes abertos, a umidade ideal de armazenagem do milho se encontra entre 10% e 13%, pois em umidades maiores ocorre desenvolvimento de microrganismos, principalmente fungos, e deterioração do material (HARRINGTON, 1972).

A maneira como o material é seco também é um importante elemento para que sejam preservadas suas características de germinação e vigor. Para que elas não sejam afetadas negativamente, a temperatura máxima suportada por sementes de milho, com umidade inicial entre 30-40%, é 45°C (PESKE; LILGE, 1998). Porém essa temperatura máxima é uma informação característica de cada tipo de milho e existem linhagens que são sensíveis às temperaturas superiores a 35°C (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001). As indústrias agrícolas estão em constante busca por um equilíbrio entre a qualidade das sementes e a eficiência do processo. O objetivo é assegurar a produção de sementes de alto padrão, mantendo um processo que seja o mais ágil possível, evitando um prolongamento desnecessário do tempo de produção.

O processo de secagem só acontece quando há gradientes de pressões parciais de vapor de água entre o material e o ar de secagem, sendo que o fluxo de vapor de água sempre será no sentido da maior para a menor pressão de vapor. Outro parâmetro a ser considerado é a influência da umidade relativa do ar que, limitada pela saturação do ar, é diretamente proporcional à pressão de vapor do ar (VILLELA, 1991; MORAES, 2000). Equivalentemente, quanto maior a umidade da semente, maior será a pressão de vapor em sua superfície. A direção do fluxo de água é determinada pela pressão de vapor da superfície da semente (P_s) e de vapor do ar (P_v). Ou seja, quando $P_s > P_v$ ocorre a dessorção ou perda de água; quando $P_s < P_v$ ocorre a sorção ou umedecimento dos grãos e quando $P_s = P_v$ atinge-se o ponto de equilíbrio higroscópico (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001).

A taxa de transferência de massa para o estado estacionário que ocorre nesse processo, pode ser descrita pela 1ª Lei de Fick, conforme é apresentado na Equação 1 (KONDO, 2014).

$$\frac{dm}{dt} = -D \frac{dm}{dx} \quad (1)$$

Onde,

$\frac{dm}{dt}$ = taxa de transferência de massa de água;

D = coeficiente de difusão;

$\frac{dm}{dx}$ = gradiente de umidade do material

Já a taxa de transferência de massa para o regime transiente pode ser descrita pela 2ª Lei de Fick, apresentada na Equação 2 (KONDO, 2014).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla u) \quad (2)$$

Onde,

u = teor de umidade;

D_{ef} = difusividade efetiva de massa;

t = tempo.

Dessa forma é possível descrever como a diferença na pressão de vapor e no teor de umidade atuam no fenômeno da difusão, que ocorre pelo movimento de fluidos de uma região de maior concentração para uma de menor concentração.

Por influenciar na eficiência de secagem, a vazão de ar no secador deve ser o suficiente para que o ar não se torne saturado antes de terminar de passar pela massa de sementes, pois o ele deve ser capaz de absorver toda a água retirada das sementes. Na secagem por ar aquecido, vazões inferiores a $6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ prolongam excessivamente o tempo de secagem e vazões acima de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ tornam o processo antieconômico (VILLELA; PESKE, 2003).

Uma vez que os grãos são maus condutores de calor e possuem uma estrutura porosa capaz de absorver ou perder água é possível fazer considerações sobre seus mecanismos de secagem. A partir da constância de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar é possível notar que as sementes passam por dois períodos: o de velocidade constante, em que a temperatura do material é a mesma do ar de secagem saturado havendo, portanto, uma compensação entre a transferência de calor e massa (esse processo acontece geralmente quando a espiga de milho ainda está no campo) (HALL, 1980; FOUST et al., 1982; SODHA et al., 1987) e o período de velocidade decrescente, que constitui a maior parte ou, às vezes, todo o processo de secagem da semente que chega na indústria.

A secagem com velocidade decrescente possui um fluxo difusivo de transporte interno de água menor do que o fluxo evaporativo, sendo que o transporte difusivo de massa limita o processo. Esse último período pode ser dividido no estágio de superfície insaturada, em que há um decrescimento da taxa total de evaporação superficial, e no estágio de controle interno de umidade, em que a região de vaporização se situa no interior da semente e o movimento interno de água determina a velocidade de secagem (FORTES, 1978; HALL, 1980). Esses estágios acontecem simultaneamente impactando na eficiência de secagem do grão.

A estimativa do tempo de secagem com velocidade constante (t_c) pode ser feita a partir da relação de massa seca (m_s), área de secagem (A), umidade em base seca inicial (x_0), taxa de secagem crítica (R_c) e umidade crítica em base seca (x_c), como é apresentado na Equação 3. E o tempo de secagem com velocidade decrescente (t_d) pode ser estimado tendo como parâmetros o primeiro ponto de decaimento de umidade (x_1), a umidade de equilíbrio em base seca (x_E), a umidade final desejada (x_f), a massa seca, área de secagem e a taxa de secagem crítica, como é apresentado na Equação 4 (GEANKOPOLIS, 2006).

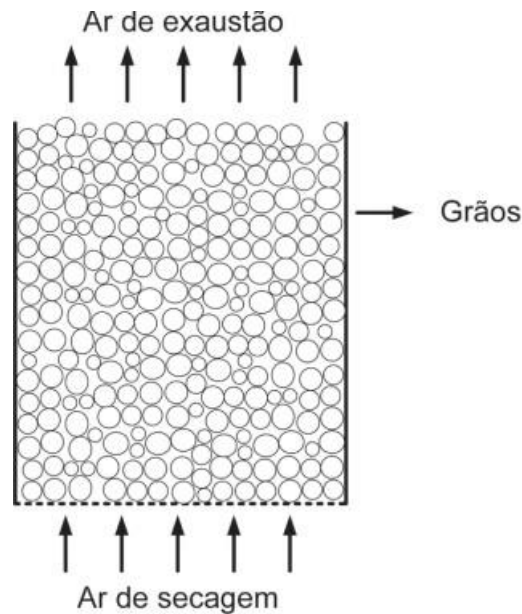
$$t_c = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{x_0 - x_c}{R_c} \quad (3)$$

$$t_d = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{x_1 - x_E}{R_c} \cdot \ln \frac{x_c - x_E}{x_f - x_E} \quad (4)$$

Portanto, o tempo total de secagem pode ser estimado pela soma dos tempos de secagem constante e decrescente.

A escolha do método e do equipamento de secagem adequado é crucial para manter as propriedades físicas, químicas e sensoriais do material seco. Durante esse processo a viabilidade da semente é afetada pela qualidade inicial, temperatura e tempo de exposição do grão. Um modelo amplamente utilizado de secador para produtos agrícolas é o silo secador-armazenador, que se caracteriza por seu fundo perfurado e secagem estacionária. Através das perfurações em sua base, o ar aquecido é insuflado e circula por entre o produto que permanece sem ser movimentado, assim como é mostrado na Figura 1. (GARCIA et al., 2004).

Figura 1: esquema de secagem de um silo secador-armazenador.



Fonte: ARAÚJO et. al, 2020.

Este tipo de secagem de leito fixo possui três camadas de umidade distintas: uma camada com grãos secos que se inicia na parte inferior do silo próxima à entrada de ar, uma camada que está em processo de transferência de água dos grãos para o ar, chamada zona de secagem, e uma camada com grãos ainda úmidos (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001). Quanto maior for o fluxo de ar maior será a velocidade de deslocamento da zona de secagem. Quando toda a massa de grãos se encontra com a umidade em equilíbrio higroscópico com a umidade do ar o processo de secagem é finalizado (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001).

Pensando em se obter uma melhor eficiência de secagem nesse tipo de equipamento, alguns aspectos devem ser considerados. O primeiro deles é a altura de camada de grãos que é responsável pelo gradiente de umidade entre as camadas da massa de material. É necessário se atentar para que não haja uma secagem excessiva dos grãos mais próximos à saída de ar e para não aumentar excessivamente a altura de empilhamento do material, o que diminuiria o poder secante do ar (MIDILLI, et al., 2002; SOUZA et al., 2002; BORTOLAIA, 2011; KHANCH et al., 2013; KUCUK et al., 2014; LIU et al., 2015). O fluxo de ar também é outro aspecto que determina a eficiência de secagem dos grãos, pois se o fluxo de ar for elevado, ele passará mais rapidamente entre a massa de grãos e a diferença de grau de umidade entre as camadas será diminuída. Dessa forma, o fluxo específico do ar pode ser aumentado quando se reduz a altura das camadas de material dentro do secador.

Dado que os grãos permanecem em contato prolongado com o ar de secagem, é crucial utilizar uma temperatura moderada durante o processo. As sementes localizadas mais próximas à entrada de ar podem alcançar a temperatura do próprio ar de secagem, o que pode levar a uma secagem excessivamente rápida e intensa, diminuindo a qualidade do produto. Como o ar de secagem fornecido pelo secador de leito fixo possui temperatura limitada e o tempo de secagem é longo, o sistema estacionário possui baixa capacidade de secagem. Apesar disso, esse sistema se destaca pela sua transferência de calor direta e eficaz, além de que o controle preciso das condições operacionais leva a uma menor quantidade de energia requerida no processo, fatores que contribuem para uma boa eficiência térmica.

O rendimento térmico do processo de secagem é obtido a partir da relação da quantidade de energia efetivamente utilizada para evaporar a água e da energia total oferecida ao sistema. Um método para calcular esse rendimento é primeiramente obter o consumo térmico específico (W_s), ou seja, o calor consumido para evaporar um quilograma de água, através da Equação 5 (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001).

$$W_s = \frac{W_h}{Q_a} \quad (5)$$

Onde,

W_s = consumo térmico específico (kJ/kg de água);

W_h = quantidade de calor liberada pela combustão de combustível (kJ);

Q_a = quantidade de água que será evaporada.

Em seguida, usa-se a quantidade de calor necessária para evaporar um quilograma de água em estado livre (W_e) e o W_s calculado para encontrar o rendimento térmico total do secador (η_t), como é mostrado na Equação 6 (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001)..

$$\eta_t = \frac{W_e}{W_s} \quad (6)$$

Outro método de se obter o rendimento térmico de um secador foi apresentado por Puzzi (1986), que segue o princípio de que o ar de saída do secador possui temperatura mais baixa e umidade relativa mais elevada do que o ar de entrada. Portanto, o rendimento pode ser obtido pela Equação 7.

$$Rendimento (\%) = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_a} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde,

T_a = temperatura de ar ambiente;

T_e = temperatura do ar na entrada da câmara de secagem;

T_s = temperatura do ar de saída.

Nota-se que quanto menor for a umidade dos grãos mais difícil é a extração de água dos mesmos e maior é o gasto térmico por ponto de umidade retirado. Isso é evidenciado pelo rendimento térmico, pois baixas umidades de grãos levam a uma maior temperatura de saída e consequentemente menor rendimento térmico. O arroz e o milho são os grãos que apresentam maior dificuldade na retirada de água, com rendimento entre 45% e 55% (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001). Dessa forma, se caracterizam por demandar maior consumo térmico e ter um menor rendimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados na execução dos experimentos são descritos abaixo.

1. Espigas de milho híbrido fornecidas pela Bayer;
2. Secador industrial de leito fixo;
3. Termômetro infravermelho ST-360;
4. Anemômetro digital MDA-11 da marca Minipa;
5. Analisador de Grãos AM 5200 da marca Perten;
6. Higrômetro digital com precisão de $\pm 3 \%$ UR e $\pm 3^{\circ}\text{C}$;
7. Despalhadeira industrial;
8. Balança analítica.

3.2. Metodologia empregada

O experimento foi conduzido em uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS), situada na zona urbana do município de Uberlândia/MG, ($18^{\circ} 55' 06''$ S e $48^{\circ} 16' 37''$ O) com altitude média de 867 m e clima tropical de altitude. As espigas foram obtidas em uma fazenda próxima a Uberaba/MG, (Latitude: -19,651454, Longitude: -47,626201) com altitude média de 777 m.

Foram utilizadas espigas de milho do tipo híbrido, com ciclo de 130 dias, colhidas manualmente em fevereiro de 2025 para a primeira parte do experimento e em maio de 2025 para a segunda parte. Após a colheita, com teor de água médio de 36%, as espigas foram transportadas imediatamente até a UBS por caminhonete. O produto foi submetido à despalha, separado em sacos de cinquenta espigas cada, foi feito o monitoramento de umidade médio e a pesagem do material. Em seguida os sacos de espiga foram encaminhados ao silo secador e assim deu-se o início da secagem.

A utilização de um único material com a umidade inicial aproximadamente igual foi essencial para garantir a uniformidade dos dados e a redução de variáveis interferentes que poderiam afetar o processo de secagem. Dessa forma foi possível compreender melhor o comportamento do milho sob condições operacionais determinadas, facilitando a comparação entre as diversas posições do secador e permitindo identificar quais áreas apresentaram melhor desempenho.

Para investigar a eficiência e o desempenho do secador de leite fixo, foram capturadas as especificações detalhadas do equipamento em estudo. Isso incluiu a capacidade máxima de secagem, as dimensões do leito, o tipo e a capacidade do sistema de aquecimento, bem como o sistema de ventilação utilizado. Essas informações foram coletadas diretamente do manual do fabricante ou, quando necessário, através de inspeções e medições diretas no local.

As informações do painel de força e controle fornecidas pelo fabricante são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Especificações do painel de força e controle do secador estudado.

Fabricante: Termo Eletro Industria Eireli	
Tensão nominal	380 V
Corrente nominal	37 A
Cap. curto-circuito	5 kA
Potência nominal	23,12 kVA
Frequência nominal	60 Hz
Normatização	NBR IEC 62208:2013
Volume	12 m ³

Fonte: o Autor.

O sistema utiliza resistências elétricas que aquecem o ar que passa por elas como apresentado na Figura 2. Este aquecimento é controlado por termostatos, garantindo uma temperatura constante e adequada para o processo de secagem. Assim como é demonstrado na Figura 3, o secador possui ventiladores que promovem a circulação do ar aquecido através do leito fixo e é equipado com sistemas de controle que monitoram e ajustam a temperatura do ar, o secador pode operar em diferentes faixas de temperatura, dependendo das características do material a ser seco.

Figura 2: foto das resistências elétricas utilizadas no sistema de aquecimento do secador.



Fonte: o Autor.

Figura 3: ventiladores, sistema de controle e caixa de resistências elétricas do secador



Fonte: o Autor.

A velocidade de entrada do ar foi medida em cada ponto do secador utilizando um anemômetro digital. A distribuição do fluxo de ar foi importante para entender as diferenças de rendimento térmico de acordo com a distribuição espacial de amostras dentro do secador. O fluxo de ar utilizado pelo secador é um fluxo ascendente, que passa pela massa de material e faz a retirada da água. O fluxo de ar foi considerado constante por posição ao longo de todo o experimento, para simplificar o sistema analisado e facilitar a análise dos resultados, permitindo, assim, um foco nas flutuações dos dados de temperatura e umidade por tempo considerado.

O secador de leito fixo foi dividido em 6 posições e em cada posição foi feito o perfil de secagem referente. Na Figura 4 é apresentado o esquema de como foi feita essa divisão.

Figura 4: divisão do secador de leito fixo estudado.

Posição 1	Corredor	Posição 2
Posição 3		Posição 4
Posição 5		Posição 6
Porta		

Fonte: o Autor.

As posições dentro do secador possuem dimensões uniformes, com comprimento de 1,3 m, largura de 0,75 m e altura máxima de 0,60 m, resultando em um volume de 0,585 m³ para cada posição. Embora a altura total do secador seja de 2,6 m, a altura disponível para empilhamento de espigas é reduzida devido a uma barreira de proteção que limita o espaço útil. O comprimento total do secador é de 4,0 m, enquanto a largura total, incluindo o corredor, é de 2,0 m. Dessa forma, o volume total do secador atinge 20,80 m³, com um volume efetivamente disponível para uso de apenas 3,51 m³.

O tamanho dos sacos de espigas de milho que são secas neste secador varia, uma vez que, nesta Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS), diversos testes são realizados para avaliar os materiais. O número de espigas por saco varia entre 50 e 80, e suas dimensões também podem diferir. Para fins de cálculo, foi estimada uma média de 0,025 m³ por saco. Considerando o espaço disponível, isso permitiria que o secador comportasse até 140 sacos de espigas de milho.

O secador foi dividido em seis seções de mesmo tamanho, e em cada seção foi colocada a mesma quantidade de material, como é apresentado na Figura 5. Na primeira parte do experimento foi colocado apenas uma camada de amostras, já despalhadas, em cada seção, com umidades iniciais aproximadamente as mesmas. O acompanhamento de umidade das amostras foi feito por amostragem de cinco espigas que foram debulhadas e processadas no equipamento Analisador de Grãos AM 5200, que forneceu a umidade da amostra. A umidade relativa foi monitorada dentro e fora do secador com um higrômetro digital. A temperatura de cada posição ao longo do experimento foi medida utilizando um termômetro infravermelho ST-360, a temperatura do ar de saída do secador e a temperatura ambiente externa foi medida utilizando também um higrômetro digital, com a mesma precisão. Já a temperatura do ar de entrada foi disponibilizada pelo medidor de temperatura presente no próprio secador. Os parâmetros foram monitorados a cada quatro horas até o momento em que as amostras alcançaram uma umidade abaixo de 12,5%.

Figura 5: foto da disposição de sacos de espiga durante a primeira parte do experimento.



Fonte: o Autor.

A temperatura desempenhou um papel crucial no mapeamento do processo de secagem do secador de leito fixo estudado. O set-point estabelecido pelo controlador do equipamento foi de 38°C, e ao longo do experimento, foi possível observar oscilações de temperatura, influenciadas pelas horas do dia e pela distribuição espacial das amostras dentro do secador. A umidade relativa foi outro parâmetro monitorado que se mostrou fundamental na caracterização do processo de secagem do secador industrial, pois influenciou significativamente a taxa de secagem. VILLELA, 1991; MORAES, 2000 mostram que quando a umidade relativa do ar é baixa, ele possui maior capacidade de absorver vapor d'água do material em secagem, aumentando a eficiência do processo.

A altura da camada também foi considerada neste trabalho. Durante a primeira etapa, foi realizado o mapeamento de secagem utilizando apenas uma camada de material, enquanto na segunda parte o experimento aproximou-se mais de um cenário real, em que a capacidade máxima do secador é utilizada. Para a análise do efeito de múltiplas camadas foram consideradas as posições extremas: a que teve o melhor e a que teve o pior desempenho para secar as sementes durante a primeira parte do experimento. A Figura 6 e a Figura 7 mostram como foi feita a disposição dos materiais.

Figura 6: foto da posição 1 do secador durante a segunda parte do experimento.



Fonte: o Autor.

Figura 7: foto da posição 6 do secador durante a segunda parte do experimento.



Fonte: o Autor.

Nessa segunda parte experimental foi simulado um cenário em que múltiplas camadas de material estão sendo secas em uma mesma posição. O monitoramento das condições experimentais foi feito a cada oito horas, utilizando os mesmos equipamentos da primeira parte do experimento e, assim como anteriormente, o fim da secagem ocorreu quando as amostras atingiram umidades inferiores a 12,5%.

4. RESULTADOS

Através da análise da relação entre o tempo de secagem e a umidade do material em diferentes posições do secador de leito fixo analisado, buscou-se compreender as dinâmicas envolvidas no processo de secagem, considerando os efeitos da temperatura, da umidade e da volumetria disponível. Além disso, foram identificados padrões de comportamento do milho durante a secagem e informações sobre a eficiência do sistema, contribuindo, portanto, para a melhoria contínua das práticas operacionais na indústria de secagem de grãos.

4.1. Influência do fluxo de ar

Utilizando um anemômetro, foi possível medir a velocidade do ar que fluiu por cada posição do secador. Cada uma dessas posições apresenta uma área de 0,975 m². Com essas informações foi possível calcular a vazão volumétrica de ar que atravessa cada posição. Esses dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Velocidade e fluxo de ar por posição.

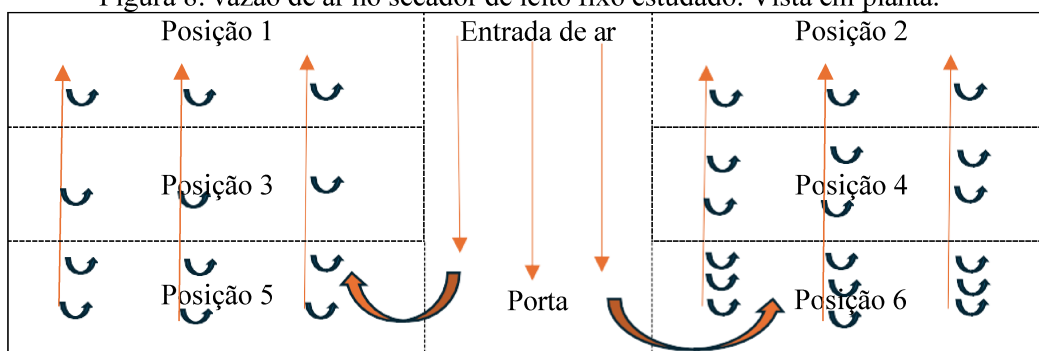
Posição	Velocidade do ar (m/s)	Vazão de ar (m ³ /s)
1	0,15	0,146
2	0,35	0,341
3	0,74	0,722
4	0,86	0,838
5	0,95	0,926
6	1,17	1,141

Fonte: o Autor.

A comparação das posições do secador revela que, à medida que se avança de 1 a 6, tanto a velocidade do ar quanto a vazão de ar aumentam significativamente, refletindo uma melhoria na eficiência do processo de secagem. A posição 1 apresenta a menor velocidade e a menor vazão de ar, com 0,15 m/s e 0,146 m³/s, enquanto a posição 6 se destaca com a maior velocidade de 1,17 m/s e um fluxo de 1,141 m³/s, indicando a melhor eficiência de secagem.

A diferença na vazão de ar nas diferentes posições do secador é resultado da dinâmica de circulação na base do secador antes de entrar em fluxo ascendente, onde seca as espigas de milho. Quando o ar entra no secador, ele flui até o fundo do equipamento colidindo com suas paredes. Essa colisão move o ar para as posições de secagem. Na Figura 8 é possível observar a trajetória do ar secante, em uma vista em planta do secador.

Figura 8: vazão de ar no secador de leito fixo estudado. Vista em planta.



Fonte: o Autor.

Observou-se que essa dinâmica favorece as posições 4, 5 e 6, que receberam mais do que o dobro de vazão de ar quando comparadas às outras posições.

É importante destacar que um fluxo de ar adequado aumenta a transferência de calor e de massa e ajuda a manter a umidade relativa em níveis apropriados, evitando comprometer a qualidade das sementes (SILVA, 2008). Além disso, um sistema de secagem otimizado em termos de fluxo de ar pode resultar em maior eficiência energética, economizando recursos e tempo no processo de secagem.

4.2. Secagem com uma camada de material

4.2.1. Parâmetros iniciais

Para os parâmetros iniciais de cada posição foram monitoradas as umidades iniciais, a quantidade de espigas e a massa de uma amostra pensando em entender a quantidade de água retirada em cada posição. Esses dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: informações iniciais do experimento (para uma camada de espigas).

Posição	Data	Hora	Umidade inicial	Quantidade de espigas	Massa da amostra (kg)
1	25/fev	21:00	37,48	50	14,15
2	25/fev	21:00	35,98	50	16,75
3	25/fev	21:00	37,11	50	17,95
4	25/fev	21:00	38,10	50	16,90
5	25/fev	21:00	36,98	50	16,55
6	25/fev	21:00	36,12	50	14,85

Fonte: Autor

4.2.2. Perda de umidade por posição

Aplicando a metodologia anteriormente apresentada, foi obtido um conjunto de resultados característicos para cada posição do secador estudado, como apresentado na Tabela 3.

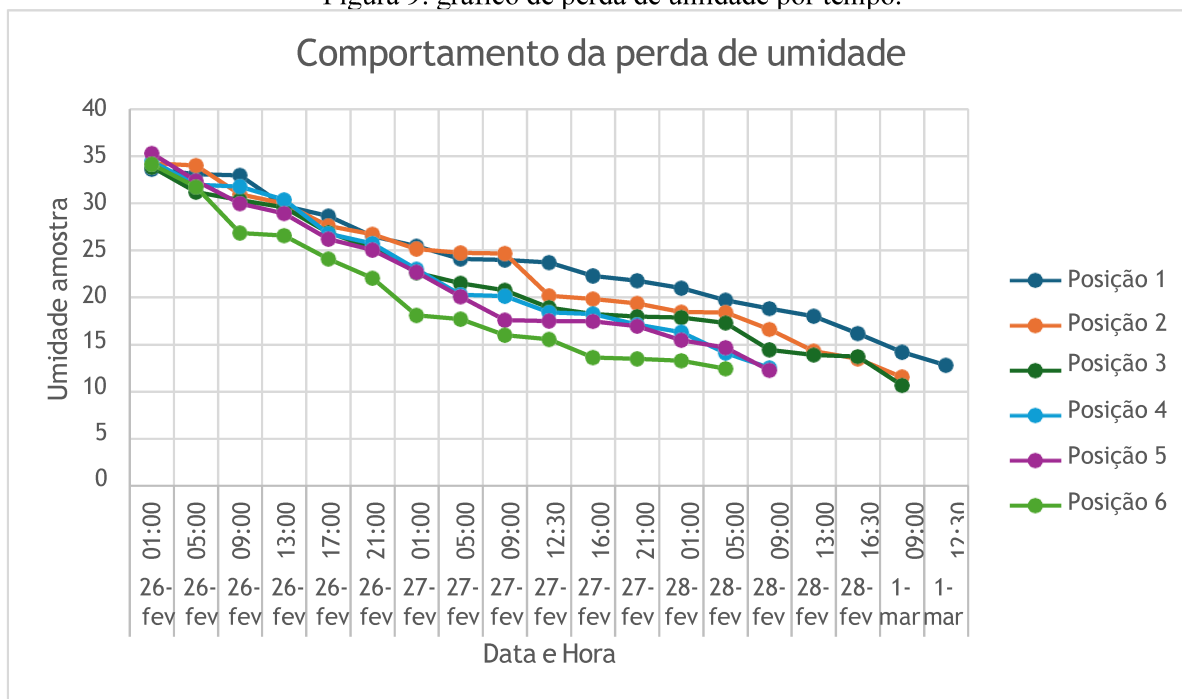
Tabela 3: dados de perda de umidade das espigas de milho ao longo do tempo de experimento (para uma camada de espigas).

Data	Hora	Umidade (%) por posição do secador					
		1	2	3	4	5	6
26/02/25	01:00	33,62	34,26	33,87	34,49	35,32	34,16
26/02/25	05:00	33,12	34,03	31,20	31,97	32,40	31,76
26/02/25	09:00	32,98	30,96	30,34	31,78	29,98	26,84
26/02/25	13:00	29,75	29,99	29,58	30,38	28,91	26,58
26/02/25	17:00	28,66	27,61	26,89	26,78	26,19	24,09
26/02/25	21:00	26,50	26,73	25,32	25,72	25,06	22,05
27/02/25	01:00	25,45	25,14	22,64	23,01	22,72	18,12
27/02/25	05:00	24,10	24,74	21,52	20,30	20,08	17,70
27/02/25	09:00	24,01	24,69	20,78	20,14	17,61	15,99
27/02/25	12:30	23,73	20,18	18,92	18,43	17,50	15,57
27/02/25	16:00	22,30	19,86	18,25	18,25	17,47	13,62
27/02/25	21:00	21,78	19,38	17,98	17,12	16,95	13,49
28/02/25	01:00	21,00	18,44	17,86	16,30	15,45	13,29
28/02/25	05:00	19,70	18,41	17,28	14,11	14,68	12,44
28/02/25	09:00	18,81	16,63	14,43	12,50	12,25	-
28/02/25	13:00	18,00	14,31	13,90	-	-	-
28/02/25	16:30	16,18	13,50	13,74	-	-	-
01/03/25	09:00	14,19	11,54	10,67	-	-	-
01/03/25	12:30	12,50	-	-	-	-	-
01/03/25	12:35	-	-	-	-	-	-

Fonte: o Autor.

A partir dos resultados experimentais obtidos, foi possível construir a curva de secagem para cada posição do secador, mostrada na Figura 9.

Figura 9: gráfico de perda de umidade por tempo.



Fonte: o Autor.

Observou-se nas curvas de secagem traçadas a diminuição da taxa de perda de umidade à medida que as sementes se tornaram mais secas. Inicialmente, nas primeiras horas do experimento, as amostras apresentaram uma taxa de perda de umidade mais elevada. Contudo, conforme o teor de umidade das sementes diminuía, a taxa de evaporação também se reduzia, refletindo uma desaceleração no processo de secagem. Esse comportamento era esperado pois, à medida que a umidade interna das sementes diminui, a diferença de umidade entre o interior das sementes e o ar do secador se torna menor, resultando em uma diminuição na taxa de transferência de umidade. Essa tendência indica que, após um certo ponto, a eficiência do secador pode ser comprometida se a temperatura e o fluxo de ar não forem ajustados adequadamente.

Considerando esse comportamento de perda de umidade e a Equação 8 foi possível calcular a taxa de perda de umidade por posição, apresentada na Tabela 4.

$$\text{Taxa de perda de umidade} = \frac{(\text{umidade inicial} - \text{umidade final})}{\text{Tempo de secagem}} \quad (8)$$

Tabela 4: Taxa de perda de umidade por posição (considerando uma camada de espigas).

Posição	Tempo (h)	Taxa de perda de umidade (%/h)
1	87	0,29
2	84	0,29
3	84	0,32
4	36	0,71
5	36	0,69
6	32	0,74

Fonte: o Autor.

Ao observar o comportamento das diferentes posições do secador, notou-se que houve variações significativas na taxa de secagem. A posição 6 destacou-se como a mais eficiente, apresentando a maior taxa de perda de umidade ao longo do experimento, especialmente nas primeiras horas. Em contraste, a posição 1 apresentou a menor taxa de perda de umidade, sugerindo uma menor eficiência. Essa diferença de comportamento pode ser atribuída à distribuição do fluxo de ar e à exposição das amostras às correntes de ar quente, que foram mais concentradas em algumas regiões do secador. Além disso, a temperatura alcançada pelas espigas durante o processo de secagem também influenciou nesse resultado. Como será apresentado em seguida.

4.2.3. Relação entre as temperaturas e as horas do dia

Os valores medidos de temperatura na entrada e na saída do secador, assim como a temperatura ambiente em cada instante são apresentados na Tabela 5.

Com base nos valores apresentados notou-se uma relação entre as temperaturas alcançadas na entrada do secador e a hora em que as medições foram tomadas o que influencia na compreensão de como as condições ambientais afetam o desempenho da secagem. A temperatura do ar na entrada do secador variou ao longo do experimento, com os seguintes pontos principais a serem considerados:

- Noite (21:00 - 1:00): Durante a noite, a temperatura do ar na entrada do secador foi geralmente mais baixa, variando entre 25,6°C e 30,3°C. Isso pode ser atribuído à diminuição da temperatura ambiente que tipicamente ocorre durante a noite, resultando em um ar menos aquecido.
- Manhã (5:00 - 9:00): As medições realizadas nas primeiras horas da manhã mostraram temperaturas de entrada um pouco mais elevadas, variando entre 25,6°C e 33,9°C. A temperatura do ar começou a aumentar à medida que o sol surgia, proporcionando um ar mais quente para o secador.
- Tarde (13:00 - 17:00): Durante o período da tarde, as temperaturas de entrada do secador foram ainda mais elevadas, variando entre 31,1°C e 38,6°C. Este aumento foi esperado, uma vez que a temperatura ambiente geralmente atinge seu pico nesse período, resultando em um ar mais quente e seco, o que favorece a secagem.

Tabela 5: temperaturas do secador ao longo do tempo (para uma camada de espigas).

Data	Hora	Temperaturas		
		Entrada do secador (°C)	Saída do secador (°C)	Ambiente (°C)
26/02/25	01:00	36	34,4	27,6
26/02/25	05:00	33,7	34,1	26,9
26/02/25	09:00	37,7	34,7	30,4
26/02/25	13:00	36,2	35,7	31,1
26/02/25	17:00	38,6	35,5	32,6
26/02/25	21:00	38,2	35,2	30,3
27/02/25	01:00	33,4	35	28,9
27/02/25	05:00	33,1	35,4	25,6
27/02/25	16:00	34,6	36,1	33,9
27/02/25	21:00	37,6	34,9	28,2
28/02/25	01:00	36	34,4	26,9
28/02/25	05:00	35,9	34,1	27,1
28/02/25	09:00	37	35,6	30,6
28/02/25	13:00	35	36,9	34
28/02/25	16:30	38	36,2	32,9
01/03/25	09:00	35,6	34,3	28,6
01/03/25	12:30	35,3	34,3	31

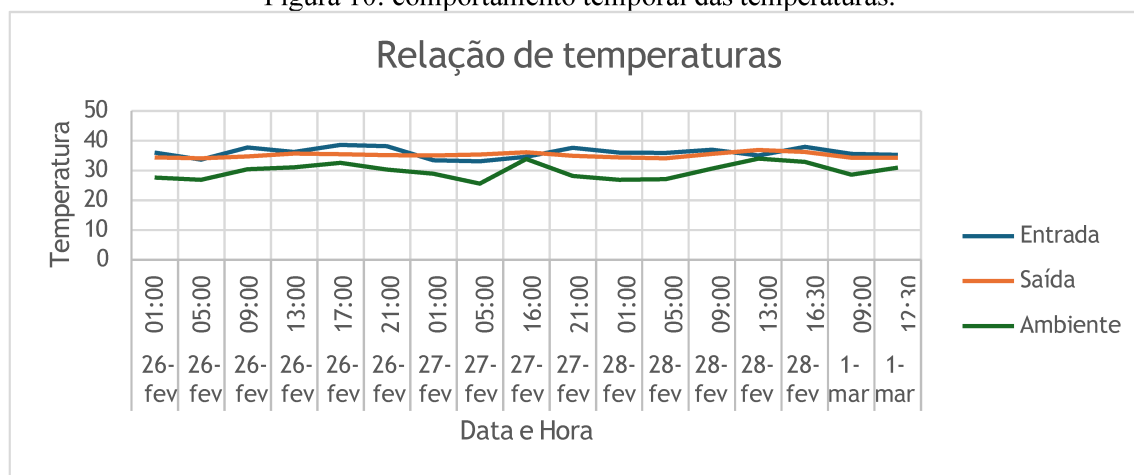
Fonte: o Autor.

Um ponto importante a ser considerado é o funcionamento do sistema de controle do secador, o qual não consegue manter a temperatura estabelecida para *Set Point* durante horas

mais frias do dia. Isso pode ser atribuído ao subdimensionamento da resistência elétrica utilizada para o aquecimento, o que limita a capacidade do sistema de aquecer o ar de forma eficiente quando as temperaturas externas estão mais baixas. Como resultado, a inadequação do sistema de aquecimento pode comprometer a eficiência do processo de secagem, levando a uma maior variação nas temperaturas internas e, conseqüentemente, a uma secagem menos uniforme e eficaz das sementes.

O comportamento das temperaturas do experimento pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10: comportamento temporal das temperaturas.



Fonte: o Autor.

4.2.4. Temperatura entre posições

Os valores de temperatura atingidos em cada uma das posições estudadas no interior do secador são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: temperaturas por posição do secador (considerando uma camada de espigas).

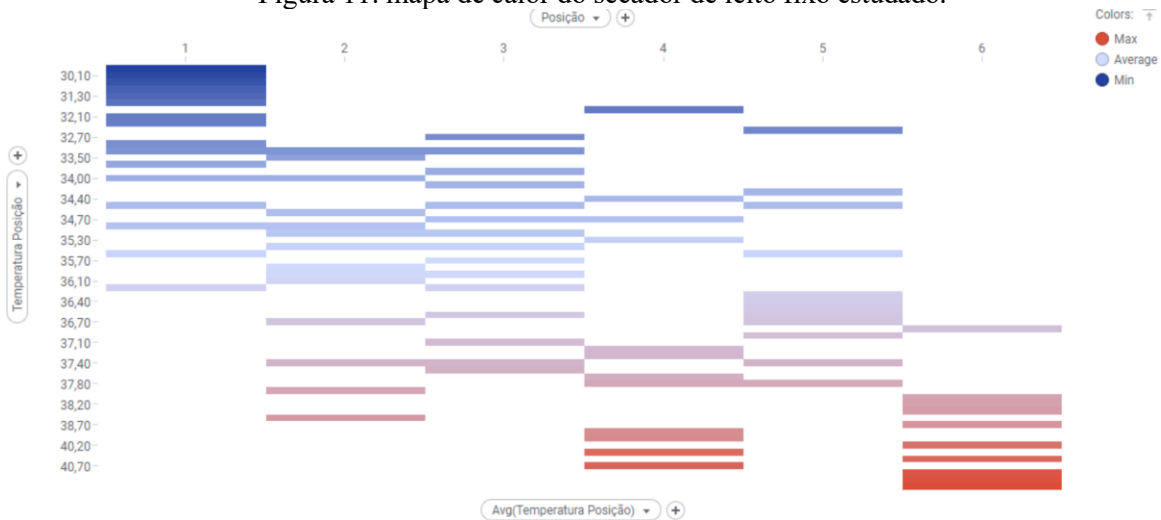
Data	Hora	Temperaturas do secador em cada posição						
		Entrada	1	2	3	4	5	6
26/02/25	01:00	36	29,8	34	33	32	34,3	38,1
26/02/25	05:00	33,7	31	33,5	33,9	37,3	35,5	38,1
26/02/25	09:00	37,7	31,3	36,1	35,4	40,7	36,7	41,3
26/02/25	13:00	36,2	32,8	34,6	35,9	35,3	36,3	38,2
26/02/25	17:00	38,6	36,2	35	34,7	34,7	32,5	36,9
26/02/25	21:00	38,2	30,1	33	34,7	34,4	34,5	38,7
27/02/25	01:00	33,4	30,5	34,8	34,5	37,6	36,5	40,6
27/02/25	05:00	33,1	31,7	33	32,7	40,5	34,3	38,4
27/02/25	09:00	37,5	31,9	35,9	34,4	35,7	35,8	39,6
27/02/25	12:30	37	34,2	37,5	36,9	36,9	38,3	41,2
27/02/25	16:00	34,6	34	34,8	37,4	37,2	36,4	38,7
27/02/25	21:00	37,6	32,2	35,4	35	39	36,6	41,7
28/02/25	01:00	36	31,7	36,7	36,2	37,3	37,4	41,5
28/02/25	05:00	35,9	32,1	35,9	37,1	39,1	37	40,2
28/02/25	09:00	37	33	35,8	35,7	37,8	37,8	-
28/02/25	13:00	35	35,5	37,4	36,6	-	-	-

28/02/25	16:30	38	34,8	38,5	37,5	-	-	-
01/03/25	09:00	35,6	33,7	38	34,2	-	-	-
01/03/25	12:30	35,3	34,5	-	-	-	-	-

Fonte: o Autor.

As análises das temperaturas nas diferentes posições do secador mostraram variações significativas em temperaturas alcançadas durante o processo de secagem. A posição 1 apresentou as temperaturas mais baixas, variando de 29,8°C a 36,2°C, indicando uma menor eficiência na transferência de calor. Em contraste, a posição 6 destacou-se como a mais eficiente, com uma temperatura máxima de 41,7°C, seguida pela posição 4, que alcançou 40,7°C, sugerindo uma significativa eficiência de secagem devido a um maior fluxo de ar. As posições 2, 3 e 5 apresentaram um desempenho intermediário com temperaturas máximas de 38,5°C, 37,5°C e 38,3°C, respectivamente. Um mapa de calor, com temperaturas em °C, é apresentado na Figura 11.

Figura 11: mapa de calor do secador de leito fixo estudado.



Fonte: o Autor.

As temperaturas alcançadas nas amostras também variaram de acordo com as temperaturas de entrada. No padrão de aumento em geral, as temperaturas das amostras aumentaram conforme a temperatura de entrada do secador subia. Por exemplo, em momentos em que a temperatura de entrada foi mais alta (como durante a tarde), as amostras também apresentaram temperaturas mais elevadas. Isso sugere uma boa transferência de calor entre o ar aquecido e as amostras.

Foi observado que as temperaturas alcançadas por algumas posições em vários momentos foram maiores que a temperatura indicada na entrada do secador. Essa condição seria termodinamicamente impossível visto que a Segunda Lei da Termodinâmica, enunciada por Rudolf Clausius, dita que o fluxo de condução de calor sempre acontecerá de forma natural do

corpo de temperatura mais alta para o de mais baixa (OLIVEIRA, 2005). Portanto, é razoável assumir que, nesses momentos, a temperatura do ar de entrada era na verdade mais alta do que a temperatura indicada pelo equipamento.

A incerteza no valor da temperatura do ar de entrada do secador pode ser atribuída a um erro no sensor de temperatura, o que compromete a precisão das medições e, consequentemente, a eficiência do secador. Sensores de temperatura com falhas podem resultar em leituras imprecisas, levando a um controle inadequado do sistema de aquecimento e, por consequência, a uma variabilidade nas condições de secagem. Além disso, um offset nos valores medidos pode indicar que a calibração do sensor não está adequada, impactando a equação do controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) que regula a temperatura. Se o PID não estiver ajustado corretamente, ou se o elemento final de controle estiver falho, isso pode resultar em um maior consumo de energia, pois o sistema tentará compensar as variações de temperatura de forma ineficiente. Como consequência, além do aumento nos gastos energéticos, a qualidade das sementes pode ser comprometida, uma vez que temperaturas inadequadas podem levar à secagem insuficiente ou excessiva, afetando a viabilidade e a integridade do produto.

4.2.5. Influência da umidade do ar

Os valores medidos de umidade relativa ambiente são apresentados na Tabela 7.

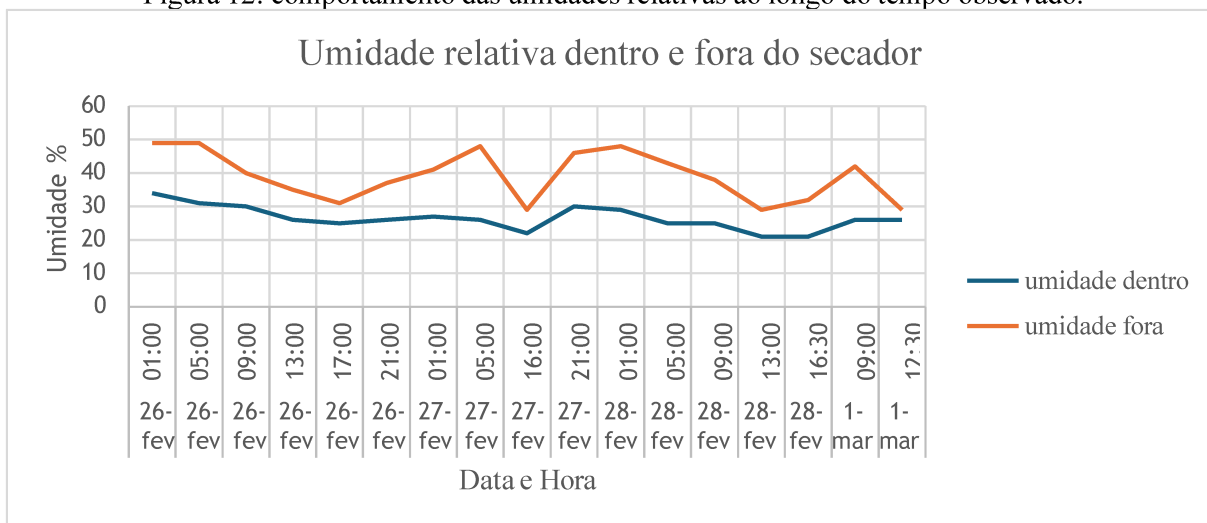
Tabela 7: umidades relativas monitoradas ao longo do experimento (para uma camada de espigas).

Data	Hora	Umidade do ar dentro do secador (%)	Umidade do ar fora do secador (%)
26/02/25	01:00	34	49
26/02/25	05:00	31	49
26/02/25	09:00	30	40
26/02/25	13:00	26	35
26/02/25	17:00	25	31
26/02/25	21:00	26	37
27/02/25	01:00	27	41
27/02/25	05:00	26	48
27/02/25	16:00	22	29
27/02/25	21:00	30	46
28/02/25	01:00	29	48
28/02/25	05:00	25	43
28/02/25	09:00	25	38
28/02/25	13:00	21	29
28/02/25	16:30	21	32
01/03/25	09:00	26	42
01/03/25	12:30	26	29
01/03/25	12:35	Secagem finalizada	Secagem finalizada

Fonte: o Autor.

A partir desses dados foi possível construir um gráfico demonstrando o comportamento das umidades ao longo do tempo do experimento, mostrado na Figura 12.

Figura 12: comportamento das umidades relativas ao longo do tempo observado.



Fonte: o Autor.

Como o teor de umidade no interior do secador foi mantida baixa, isso indicou que o ar estava efetivamente absorvendo a umidade do material em secagem. Um ar com menor umidade relativa tem um maior poder secante, pois a diferença entre a umidade do material e a umidade do ar facilita a evaporação. A umidade relativa do ar introduzido no secador foi mantida suficientemente baixa para que as espigas de milho mantivessem o processo de secagem durante todas as horas do dia, mesmo que em alguns momentos, como durante a madrugada, a umidade do ar empregado na secagem estivesse maior.

4.2.6. Parâmetros finais e análise de rendimento térmico

Para os parâmetros finais de cada posição foram monitoradas as umidades finais, a quantidade de espigas e a massa de uma amostra pensando em estimar a quantidade de água que cada posição do secador foi capaz de retirar. Estas informações são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: tabela com as informações finais (considerando uma camada de espigas).

Posição	Data	Hora	Umidade final	Quantidade de espigas	Massa final da amostra (kg)	Massa de água perdida (kg)
1	01/03/25	12:35	12,8	50	9,31	4,84
2	01/03/25	09:05	11,54	50	10,55	6,20
3	01/03/25	09:05	10,67	50	11,39	6,56
4	28/02/25	09:05	12,50	50	11,3	5,60
5	28/02/25	09:05	12,25	50	10,79	5,76
6	28/02/25	05:05	12,44	50	9,5	5,35

Fonte: o Autor.

Para calcular a vazão de água sendo removida no processo de secagem foi feita a relação da quantidade de água removida e o tempo de secagem através da equação 9.

$$\dot{m} = \frac{\text{Massa de água removida}}{\text{Tempo de secagem}} \quad (9)$$

Esses valores são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: resultados do cálculo de vazão mássica de água – umidade retirada dos grãos de milho (considerando uma camada de espigas).

Posição	Tempo (h)	Vazão mássica (Kg/h)
1	87	0,06
2	84	0,07
3	84	0,08
4	36	0,16
5	36	0,16
6	32	0,17

Fonte: o Autor.

A eficiência de secagem, que se traduz na capacidade do sistema de secagem em remover a umidade do material em um determinado tempo, pôde ser determinada a partir dos valores de vazão mássica apresentados. Como o esperado, a posição 6 apresentou a melhor eficiência de secagem seguida das posições 4 e 5, enquanto as posições iniciais do secador tiveram resultados inferiores. No entanto, mesmo o desempenho mais eficaz ainda foi considerado lento, uma vez que a perda de água por hora foi inferior a 0,5 kg/h, sugerindo que o sistema de secagem opera de maneira ineficiente.

Para calcular o rendimento térmico foi utilizada a equação 7, apresentada inicialmente na introdução do presente trabalho e lembrada logo abaixo.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_a} \cdot 100 \quad (7)$$

Dessa forma, o rendimento térmico geral do secador foi de apenas 29%.

4.3. Secagem com múltiplas camadas de material

4.3.1. Parâmetros Iniciais

Para os parâmetros iniciais das posições que tiveram o melhor e o pior desempenho térmico foram monitoradas as umidades iniciais, a quantidade de espigas e a massa de uma amostra pensando em entender a quantidade de água que essas posições do secador retirariam. Esses dados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: tabela com as informações iniciais (considerando multicamadas de espigas).

Posição	Data	Hora	Umidade inicial	Quantidade de espigas	Massa da amostra (kg)
1	19/05	18:00	37,48	50	7,30
6	19/05	18:00	36,75	50	7,60

Fonte: Autor.

4.3.2. Perda de umidade por posição

Os dados do monitoramento de umidade durante o experimento com múltiplas camadas são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: dados de perda de umidade das espigas de milho ao longo do tempo de experimento (considerando multicamadas de espigas).

Data	Hora	Umidade (%) por posição do secador	
		1	6
19/05/25	22:00	36,52	35,98
20/05/25	02:00	39,24	35,04
20/05/25	06:10	37,85	35,43
20/05/25	12:12	30,75	29,10
20/05/25	18:50	29,40	24,02
21/05/25	00:00	29,97	25,29
21/05/25	12:20	23,50	18,23
21/05/25	19:50	22,18	18,39
22/05/25	05:30	19,82	16,12
22/05/25	12:00	21,04	13,59
22/05/25	19:00	18,61	10,03
22/05/25	19:05	18,60	Secagem finalizada
23/05/25	12:00	18,22	-
23/05/25	18:25	16,90	-
24/05/25	00:50	16,17	-
24/05/25	11:45	14,37	-
24/05/25	18:30	12,49	-
24/05/25	18:35	Secagem finalizada	-

Fonte: o Autor.

A partir desses dados e da equação 8, foi possível aferir a taxa de secagem, apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: Taxa de perda de umidade por posição (considerando multicamadas de espigas).

Posição	Taxa de perda de umidade (%/h)	
	1 camada	Múltiplas camadas
1	0,29	0,21
6	0,74	0,37

Fonte: o Autor.

Mais uma vez a posição 6 teve uma melhor taxa de secagem do que a posição 1. Contudo a sua eficiência de secagem caiu pela metade quando comparada ao experimento com uma camada, aumentando-se assim o tempo de secagem do material e diminuindo a eficiência do

processo. Já a posição 1 teve a sua eficiência diminuída ligeiramente em comparação à secagem com uma única camada de grãos, essa quase constância na taxa de secagem relaciona-se a alguns fatores tais como a distribuição do fluxo de ar, temperatura do ar e propriedades dos grãos.

Mesmo com a taxa de secagem reduzida, a distribuição do ar quente pode ainda ser suficiente para atingir as camadas superiores, permitindo uma evaporação contínua. Além disso, a umidade liberada das camadas inferiores pôde ser rapidamente removida pelo fluxo de ar, e a umidade relativa dentro do secador não aumentou significativamente, facilitando a secagem. A temperatura do ar de entrada, como será apresentada logo em seguida, foi tamanha a ponto de manter uma taxa de evaporação eficaz, apesar de reduzida.

4.3.3. Temperatura entre posições

A temperatura dos materiais também foi monitorada ao longo do experimento. Os dados observados foram disponibilizados na Tabela 13.

Tabela 13: temperaturas observadas nas espigas de milho ao longo do experimento (considerando multicamadas de espigas).

Data	Hora	Temperatura (°C) por posição do secador		
		Entrada	1	6
20/05/25	12:12	37	29,3	33,5
20/05/25	18:50	33,4	28,2	34,2
21/05/25	00:00	35,4	28,6	35,5
21/05/25	12:20	34,7	29,7	34,7
21/05/25	19:50	37,9	29,2	35,8
22/05/25	05:30	36,5	32,7	38,9
22/05/25	12:00	38,0	31,0	36,0
22/05/25	19:00	38,0	31,6	36,7
22/05/25	19:05	38,0	31,6	Secagem finalizada
23/05/25	12:00	38,0	33,9	-
23/05/25	18:25	37,7	32,0	-
24/05/25	00:50	32,8	32,2	-
24/05/25	11:45	37,6	33,3	-
24/05/25	18:30	37,0	33,1	-
24/05/25	18:35	37,0	Secagem finalizada	-

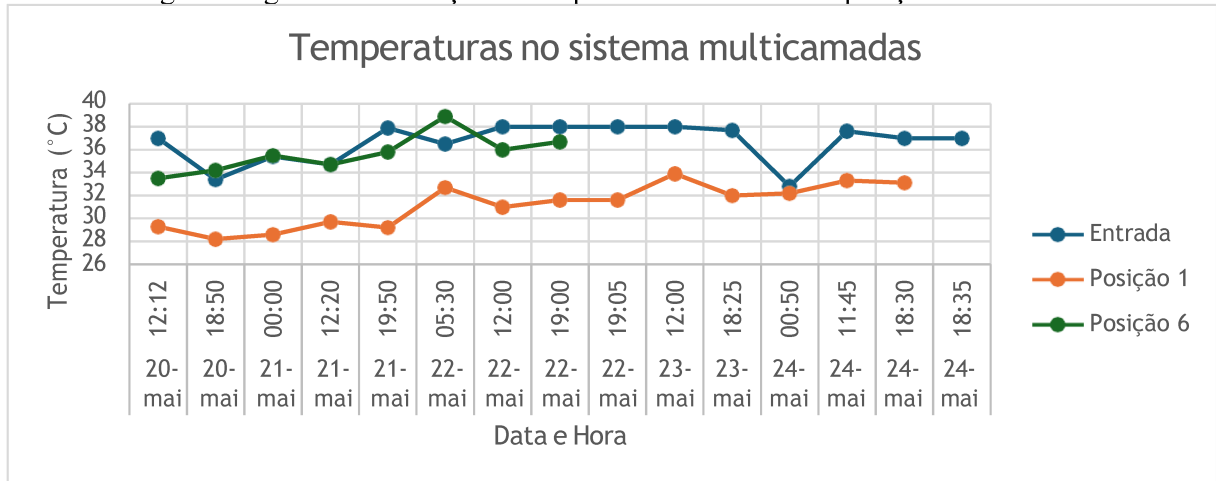
Fonte: o Autor.

A partir desses dados foi possível plotar um gráfico apresentado na Figura 13, tornando possível observar o comportamento da temperatura atingida pelos grãos em cada posição analisada e do ar na entrada do secador.

Para o experimento com uma camada de material a posição 1 apresentou temperaturas variando de 29,8°C a 36,2°C e a posição 6 apresentou uma temperatura máxima de 41,7°C. No experimento com multicamadas de grãos as temperaturas na posição 1 oscilaram entre 28,2°C

e 33,9°C e a posição 6 teve temperaturas que variaram de 33,5°C a 38,9°C. Ou seja, a transferência térmica do ar para os grãos se manteve praticamente a mesma, independentemente da quantidade de material adicionado ao secador.

Figura 13: gráfico da variação de temperatura nas diferentes posições do secador.



Fonte: o Autor.

Para o experimento com uma camada de material a posição 1 apresentou temperaturas variando de 29,8°C a 36,2°C e a posição 6 apresentou uma temperatura máxima de 41,7°C. No experimento com multicamadas de grãos as temperaturas na posição 1 oscilaram entre 28,2°C e 33,9°C e a posição 6 teve temperaturas que variaram de 33,5°C a 38,9°C. Ou seja, a transferência térmica do ar para os grãos se manteve praticamente a mesma, independentemente da quantidade de material adicionado ao secador.

4.3.4. Parâmetros finais e análise de eficiência

Assim como no experimento de uma única camada de espigas, foram monitorados os parâmetros finais de cada posição apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: informações finais do experimento (considerando multicamadas de espigas).

Posição	Data	Hora	Umidade final (%)	Quantidade de espigas	Massa final da amostra (Kg)	Massa de água perdida (Kg)
1	22/05/25	19:05	12,49	50	5,02	2,28
6	28/02/25	18:35	10,03	50	4,96	2,64

Fonte: o Autor.

A partir da massa de água perdida foi calculada a vazão mássica de água perdida, através da equação 9, apresentada anteriormente. Os valores obtidos no experimento com uma camada de material são comparados com o de experimento multicamadas na Tabela 15.

Tabela 15: resultados do cálculo de vazão mássica de água (para multicamadas de espigas).

Posição	Vazão mássica (Kg/h)	
	1 camada	Múltiplas camadas
1	0,06	0,02
6	0,17	0,04

Fonte: o Autor.

Como era esperado, a eficiência de secagem caiu no ambiente que explora a máxima capacidade volumétrica do secador. Contudo, corroborando com o resultado obtido pela taxa de secagem, a perda de eficiência de secagem da posição 1 foi significativamente menor que a perda observada na posição 6, mesmo que essa última posição ainda apresente uma melhor eficiência de secagem.

5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos ao longo do presente trabalho permitiu compreender as dinâmicas envolvidas no processo de secagem de espigas de milho em um secador de leito fixo. Sua capacidade máxima calculada foi de 140 sacos de espiga de milho. Através do mapeamento das temperaturas, umidades e vazões mássicas, foi possível identificar padrões de comportamento e a eficiência do sistema nas diferentes posições. A posição 6 destacou-se como a mais eficiente, apresentando as maiores taxas de secagem e temperaturas, o que indica uma boa transferência de calor e um fluxo de ar otimizado. Em contrapartida, a posição 1 apresentou a menor eficiência, refletindo limitações na circulação de ar e na remoção de umidade.

Além disso, a comparação entre os experimentos com uma camada e múltiplas camadas de grãos revelou que, embora a posição 6 continuasse a ser a mais eficiente, sua taxa de secagem caiu significativamente ao adicionar mais material, aumentando o tempo de secagem e diminuindo a eficiência do processo. Essa constatação enfatiza a importância de otimizar o fluxo de ar e a disposição das camadas de material para maximizar a eficiência do secador.

Outros fatores que influenciaram no sistema de secagem foram as temperaturas e umidades ambientes, visto que em horas mais frias e úmidas o secador mostrou-se incapaz de manter o Set Point, devido a um possível subdimensionamento do sistema de aquecimento do ar. O sensor de temperatura do ar de entrada também apresentou oportunidades de melhorias que impactariam no PID do secador e otimizariam os gastos energéticos do equipamento.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C.S. et al. **Princípios da secagem de alimentos**. Vice-reitor, v. 29075, p. 233.
- BORTOLAIA, L. A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 161 f. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- CHAI, J. **Optimum moisture content of seeds stored at ambient temperatures**. Seed Science Research, New York, v.1, n.8, p.23-28, 1998.
- CONAB. **Estimativa do escoamento das exportações do complexo soja e milho pelos portos nacionais safra 2016/17**. CONAB -Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília. 2017.
- Dall'Agnol, A., Hirakuri, M. H. **Realidade e Perspectivas do Brasil na Produção de Alimentos a Agroenergia, com Ênfase na Soja**. Circular Técnica 59. Embrapa Soja. Londrina, PR, 2008.
- EVANGELISTA NETO, A. A. **Secagem de grãos de girassol em leito fixo e em leito de jorro**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- FORTES, M. A. **Non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods** West Lafayette, Purdue University, 1978. 172p. Tese de Ph.D.
- FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias** Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982. 670p.
- GARCIA, D. C. et al. **A secagem de sementes**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, mar./abr. 2004.
- GEANKOPLIS, C. J., **Transport Processes and Unit Operations**. 3a ed. Prentice-Hall International, Inc., 2006. 921 p.
- HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops** Westport. AVI Publishing, 1980. 382p.
- HARRINGTON, J.F. **Seed storage and longevity**. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). Seed biology. New York: Academic Press, 1972. v. 3, p. 145-245.
- HU, X.; ZHANG, Y.; Hu, C.; TAO, M.; CHEN, S. **A comparison of methods for drying seeds: vacuum freeze-drier versus silica gel**. Seed Science Research, New York, v.1, n.8, p. 29-33, 1998.
- KHANCHI, A.; JONES, C. I.; SHARMA, B.; HUHNKE, R. L.; WECKLER, P.; MANESS, N. O. **An empirical model to predict infield thin layer drying rate of cut switchgrass**. Biomass and bioenergy, v. 58, p. 128 - 135, 2013.
- KONDO, M. Y. **Simulação numérica do processo de secagem em madeiras**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Guaratinguetá, SP.
- KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER I. **A review of thin-layer drying curve equations**. Drying Technology, v.32, p.757–773, 2014.

LIU, Z.; WU, Z.; WANG, X.; JIA SONG, J.; WU, W. **Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential**. Hindawi publishing Corporation, Mathematical problems in engineering, v. 2015, Article ID 539846, 13 p., 2015.

MARTINS, E. A. S. **Dimensionamento e experimentação de um secador e de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. **A new model for single-layer drying**. Drying Technology, v. 20, p.1503–1513, 2002.

MORAES, M.L.B de. **Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz**. 2000. 50f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) -UFPel.

OLIVEIRA, M. J. **Termodinâmica**. Editora Livraria da Física, 2005, p. 45.

PESKE, S.T.; LILGE, C. **Alta temperatura de secagem na qualidade de semente de milho (*Zea mays* L.)** In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., FEIRA DE IC, 7., 1998, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS. v.1,p.120.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Secagem de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 194 p.

SILVA, J.S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. 2.ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008, 560 p.

SODHA, M.S.; BANSAL, N.K.; KUMAR, A.; BANSAL, P.K.; MALIK, M.A.S. **Solar crop drying** Boca Raton, CRC Press, 1987. v.1. 141p.

SOUZA, C. M. A; QUEIROZ, D. M. FILHO, A. F. L. **Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa**. Scientia Agrícola, v. 59, n. 4, p. 653 – 660, 2002.

VILLELA, F.A; PESKE, S.T. **Secagem de sementes**. In : PESKE, S.; ROSENTHAL, M; ROTA G. (Ed.) **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas: UFPel, 2003. p. 283-321.

VILLELA, F.A ; SILVA, W.R. **Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente**. Scientia Agrícola, Piracicaba, v.49, n.1, p.145-153,1992.

VILLELA, F.A. **Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho**. 1991. 104f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP.

WALTER, S.C.; ENGELS, J. **The effect of storing seeds under extremily dry conditions**. Seed Science Research, New York, v. 8, n.1, p. 3-8, 1998. Supplement.