

INOVAÇÃO ORIENTADA POR DADOS NA PÓS-COLHEITA: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE UM SECADOR INDUSTRIAL DE GRÃOS

Marcelo Augusto Hickmann¹, Andrea Cristina Biavatti², Luís Eduardo Zarpellon³,
Janete Kraieski⁴, Elciane Regina Zanatta⁵, Marcos Roberto Bombacini⁶,

¹ Pigma Desenvolvidimentos Ltda., Mestrando PROFNIT (externo), Toledo, Brasil
(marcelohcontato@gmail.com)

² Tutela Tech, Toledo, Brasil

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Toledo, Brasil

⁴ Mestrando PROFNIT, Medianeira, Brasil

⁵ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-MD), Medianeira, Brasil

⁶ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-TD), Medianeira, Brasil

Resumo: Avaliou-se a eficiência operacional de um secador industrial de grãos a partir de 77.169 leituras registradas por minuto ao longo de uma safra de milho, soja e sorgo. Corrigida uma inconsistência do sensor de nível por evidência térmica, os ciclos foram reconstruídos pelo acionamento da fornalha e o desempenho descrito por indicadores de transferência de calor, estabilidade e umidade de descarga. Constatou-se baixa aderência às faixas de *setpoint* e dispersão relevante na umidade de descarga.

Palavras-chave: secagem de grãos; eficiência operacional; monitoramento de processo; indicadores de desempenho; controle estatístico de processo.

Data-Driven Post-Harvest Innovation: Evaluation of the Operational Efficiency of an Industrial Grain Dryer

Abstract: The operational efficiency of an industrial grain dryer was evaluated from 77,169 process readings recorded at one-minute intervals over a full harvest season of corn, soybean, and sorghum. After a level sensor inconsistency was corrected through thermal evidence, drying cycles were reconstructed from furnace activation, and performance was described by indicators of heat transfer, stability, and discharge moisture. Low adherence to *setpoint* ranges and relevant dispersion in discharge moisture were found.

Keywords: grain drying; operational efficiency; process monitoring; performance indicators; statistical process control.

INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimentos, rações e matérias-primas de origem agrícola tem sustentado o aumento contínuo da produção de grãos, consolidando os cereais como base da segurança alimentar. Segundo a FAO (FAO, 2026), a produção mundial de cereais atingiu cerca de 3,04 bilhões de toneladas em 2025, 6,1% acima do ano anterior, puxada por milho, trigo e arroz; as projeções da OECD e da FAO (OECD; FAO, 2025) indicam que produção e consumo seguirão em expansão na próxima década, impulsionados pelo crescimento populacional e pela demanda por alimentos, rações e biocombustíveis. Esse mesmo cenário, porém, condiciona o aumento da oferta ao

aprimoramento das operações pós-colheita, de modo a minimizar perdas e preservar a qualidade dos produtos.

O aumento da produção, isoladamente, não assegura maior disponibilidade de alimentos: parcela expressiva das perdas ocorre depois da colheita, nas etapas de secagem, transporte, armazenamento e processamento. Nath et al. (2024) apontam que as perdas pós-colheita seguem entre os principais desafios da segurança alimentar, sobretudo em países de elevada produção, onde limitações de infraestrutura e de monitoramento favorecem a deterioração. Além do prejuízo econômico direto, essas perdas representam desperdício de recursos naturais, energia e água empregados ao longo de todo o ciclo produtivo,



razão pela qual o aprimoramento da pós-colheita é reconhecido como uma das estratégias mais eficientes para ampliar a oferta sem expandir a área cultivada (FAO, 2026).

A secagem é uma das operações unitárias mais críticas da pós-colheita, pois condiciona a estabilidade de armazenamento, a qualidade tecnológica dos grãos e a eficiência das unidades armazenadoras. Grãos recém-colhidos costumam apresentar umidade acima dos limites seguros, condição que intensifica a atividade respiratória e favorece fungos, insetos e a deterioração física e química; a redução controlada do teor de água contém esses mecanismos e preserva as características nutricionais e comerciais do produto (Ziegler; Paraginski; Ferreira, 2021).

Sob o ponto de vista físico, a secagem é um processo acoplado de transferência de calor e massa, cuja eficiência depende da interação entre temperatura do ar, umidade relativa, vazão, tempo de residência e propriedades do material (Mujumdar, 2014). Por isso, pequenas variações operacionais repercutem tanto na qualidade final quanto no consumo energético: sem controle adequado, surgem secagem insuficiente, superaquecimento e distribuição térmica desigual (Jimoh et al., 2023). Compreender esse comportamento e avaliar quantitativamente o desempenho torna-se, então, essencial para elevar a eficiência e subsidiar a otimização do processo (Yu et al., 2025).

No Brasil, o clima predominantemente tropical e subtropical torna a secagem artificial indispensável para conservar a qualidade e viabilizar o armazenamento em larga escala. Nessas condições, os secadores industriais operam por longos períodos, processando grandes volumes e consumindo energia térmica e elétrica em quantidade expressiva. Como observam Lima et al. (2024) e Martins, Franco e Oliveira (1999), a eficiência operacional desses equipamentos é estratégica para a competitividade das unidades, pois afeta ao mesmo tempo a capacidade de processamento, o custo e a qualidade final, de modo que avaliar o desempenho de um secador exige olhar além da simples redução de umidade, incluindo a estabilidade da operação, a uniformidade térmica e o aproveitamento da energia.

O desempenho de um secador industrial resulta da interação dinâmica entre as variáveis que governam a transferência de calor e massa, temperatura do ar de secagem e da massa de grãos, umidade do produto, umidade relativa e temperatura ambiente, além de vazão, tempo de residência e ocupação do equipamento. Conforme a revisão de Jimoh et al. (2023), a estabilidade dessas variáveis influencia diretamente a uniformidade da secagem, a eficiência térmica e a qualidade final, enquanto oscilações excessivas sinalizam perda de eficiência ou falhas de

controle. Compreender esse comportamento é, assim, um dos fundamentos para avaliar o desempenho operacional e propor melhorias contínuas

A instrumentação industrial e a automação passaram a permitir o monitoramento contínuo dessas variáveis ao longo de toda a operação. Sensores distribuídos pelo equipamento, integrados a controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas supervisórios, registram automaticamente as condições térmicas, ambientais e operacionais em intervalos regulares (Hiendro et al., 2025). Os secadores modernos deixaram de ser apenas equipamentos de transformação térmica e tornaram-se fontes de dados capazes de acumular milhares de observações por safra; ainda assim, como registra Zarpellon (2024), esse volume costuma ficar restrito ao acompanhamento em tempo real, pouco explorado para análises quantitativas e para a construção de indicadores de desempenho.

Embora a disponibilidade de dados operacionais tenha crescido, a literatura ainda se concentra na modelagem da cinética de secagem, na eficiência energética, no desenvolvimento de novas tecnologias e, mais recentemente, em aprendizado de máquina e controle inteligente (Yu et al., 2025). É reduzido o número de estudos que exploram sistematicamente séries temporais reais para caracterizar o comportamento operacional por meio de indicadores quantitativos. Essa lacuna limita a compreensão da variabilidade do processo e reduz o aproveitamento dos dados já disponíveis nas unidades armazenadoras, abrir esse volume à leitura por indicadores é justamente a oportunidade que este trabalho busca explorar.

A partir das evidências apresentadas, verifica-se a necessidade de abordagens que permitam transformar o grande volume de dados gerados pelos sistemas de monitoramento industrial em informações quantitativas capazes de caracterizar o comportamento operacional dos secadores de grãos. Nesse contexto, este estudo propõe uma metodologia baseada na análise de séries temporais de dados de processo para avaliação da eficiência operacional de um secador industrial, utilizando indicadores derivados de variáveis monitoradas em tempo real durante uma safra agrícola. Diferentemente de estudos centrados na modelagem da cinética de secagem ou no desenvolvimento de algoritmos de Inteligência Artificial, o foco desta pesquisa está na engenharia do processo de secagem, buscando compreender o comportamento operacional do equipamento em condições reais de funcionamento e identificar variáveis críticas capazes de subsidiar ações de otimização do processo. Parte-se da hipótese de que a análise sistemática dos dados operacionais permite identificar padrões de operação, avaliar a estabilidade do processo, reconhecer condições de maior eficiência e estabelecer indicadores objetivos para o



acompanhamento do desempenho operacional. Assim, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficiência operacional de um secador de grãos industrial por meio da análise de dados de processo coletados em tempo real. Especificamente, pretende-se caracterizar o comportamento das principais variáveis operacionais, desenvolver indicadores de desempenho, investigar as relações entre os parâmetros monitorados e comparar os resultados obtidos com referências da literatura, estabelecendo uma base metodológica que possa apoiar futuras pesquisas em monitoramento inteligente, Internet das Coisas, *Digital Twin* e Inteligência Artificial aplicada à pós-colheita de grãos.

REFERENCIAL TEÓRICO

Processo operacional de secadores industriais de grãos

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), o secador industrial é uma das principais unidades operacionais dos sistemas de armazenamento, responsável por reduzir de forma controlada o teor de umidade até níveis compatíveis com a conservação do produto. Em unidades de médio e grande porte, sua operação integra-se às etapas de recepção, limpeza, movimentação e armazenagem, num processo contínuo em que o desempenho do secador condiciona a capacidade operacional de toda a unidade.

Do ponto de vista operacional, a secagem resulta da interação simultânea entre dois fluxos: o de grãos e o de ar aquecido. Enquanto a massa percorre o equipamento por gravidade ou por mecanismos de transporte, o ar atravessa essa massa e fornece a energia necessária à evaporação da água. Como sintetiza Mujumdar (2014), a eficiência do processo depende dessa interação, da distribuição uniforme do ar e da manutenção de condições operacionais adequadas ao longo de todo o percurso do produto.

A automação e a supervisão industrial passaram a permitir o registro contínuo das variáveis operacionais durante toda a secagem. Temperaturas do ar de entrada e saída, temperatura da massa de grãos, condições ambientais e estado do equipamento são hoje armazenadas em bancos de dados históricos, que constituem fonte relevante para a avaliação de desempenho (Hiendro et al., 2025). Esses dados, contudo, são majoritariamente usados para controle e supervisão: sua exploração para a construção de indicadores de eficiência ainda é limitada na literatura, o que abre espaço para metodologias baseadas em análise de dados industriais.

Adota-se, neste trabalho, a perspectiva de compreender o secador não apenas como um equipamento de remoção de água, mas como um sistema de processo continuamente monitorado, em que diferentes variáveis interagem para determinar a

eficiência da secagem. Esse deslocamento de foco, do equipamento para o comportamento do processo, estabelece a base conceitual das variáveis e dos indicadores discutidos nas seções seguintes.

Fenômenos físicos do processo de secagem

A secagem de grãos é uma operação de transferência simultânea de calor e massa, destinada a reduzir o teor de umidade a níveis seguros para o armazenamento. O processo começa com o fornecimento de energia térmica pelo ar, que aquece a superfície do grão e sustenta a evaporação; à medida que a umidade sai, estabelece-se uma troca contínua entre o calor que entra e a água que migra do interior para a superfície. Conforme Yu et al. (2025), trata-se de um processo acoplado, cuja eficiência depende das condições operacionais e das propriedades físicas do material.

A água nos grãos distribui-se sob diferentes formas, com distintos níveis de ligação à estrutura do material. A fração superficial ou fracamente ligada sai com facilidade nas etapas iniciais, ao passo que a água retida nos capilares e na matriz celular exige mais energia para migrar e evaporar. Como mostram Baidhe et al. (2025), por isso a velocidade de secagem cai à medida que o grão se aproxima do equilíbrio higroscópico, tornando o processo cada vez mais dependente dos mecanismos internos de transporte de massa.

Calor e massa transferem-se de forma simultânea e interdependente ao longo de toda a operação. O calor do ar aquecido chega ao grão sobretudo por convecção, elevando sua temperatura e promovendo a evaporação; em seguida, um gradiente de umidade entre interior e superfície impulsiona a migração da água para fora. Segundo Perazzini, Leonel e Perazzini (2021), alterações na temperatura do ar, na umidade relativa ou no fluxo de secagem modificam a intensidade desses fenômenos e afetam tanto a taxa de remoção de água quanto a eficiência energética.

Em escala industrial, o comportamento do processo decorre da interação entre as propriedades do produto e as condições impostas ao secador. Temperatura do ar, umidade relativa, tempo de residência e uniformidade do fluxo de ar estão entre os fatores de maior influência sobre a eficiência da secagem, a qualidade do grão e o consumo energético. Por isso, Chen et al. (2002) e Krumreich, Scharlau e Castelan (2024) recomendam o monitoramento contínuo dessas variáveis, que permite identificar desvios e avaliar o desempenho operacional do sistema.

Esses fenômenos constituem a base para interpretar as variáveis monitoradas neste estudo. As temperaturas medidas nos diferentes pontos do secador, a temperatura da massa de grãos, a umidade do produto e as condições ambientais são manifestações diretas dos mecanismos de transferência de calor e massa aqui



descritos; compreender essa relação é o que sustenta o desenvolvimento dos indicadores de eficiência propostos nas próximas seções.

Eficiência e desempenho operacional na secagem de grãos

Durante muito tempo, o desempenho de um secador foi julgado quase só pela capacidade de remover água, a redução de umidade por unidade de tempo ou de combustível. Jimoh et al. (2023) e Yu et al. (2025) mostram que essa visão se tornou insuficiente: a eficiência da secagem passou a ser tratada como conceito multicritério, em que produtividade, consumo energético, uniformidade e preservação da qualidade precisam ser considerados juntos. Um secador que atinge rápido a umidade-alvo, mas à custa de temperaturas excessivas ou distribuição térmica desigual, compromete a qualidade física e fisiológica do grão e anula o ganho aparente de produtividade.

Essa relação entre condições operacionais e qualidade é bem documentada. Trabalhos de revisão sobre secagem de sementes mostram que temperatura do ar, velocidade de secagem e uniformidade da distribuição do ar influenciam diretamente a integridade física e o vigor fisiológico do produto, de modo que existe um compromisso permanente entre intensificar a secagem e preservar a qualidade (de Lima *et al.*, 2014; Barrozo; Mujumdar; Freire, 2014). Estudos voltados ao armazenamento reforçam o argumento na direção oposta: umidade, temperatura e tempo são os fatores que governam a conservação dos grãos, e desvios na secagem propagam-se para toda a etapa de pós-colheita (Ziegler; Paraginski; Ferreira, 2021).

O trabalho de Chen *et al.* (2002) é particularmente próximo do presente estudo. Ao monitorar um secador comercial em operação real, os autores registraram temperatura do ar, umidade relativa, fluxo de ar, umidade do grão e energia consumida, e concluíram que a representação correta dessas variáveis é condição necessária para avaliar o desempenho do equipamento, ainda que, diferentemente do presente estudo, tenham medido o consumo de energia de forma direta. É justamente essa a lacuna que se observa na literatura mais recente: apesar da ampla disponibilidade de dados de operação, ainda são poucos os estudos que utilizam séries temporais reais e contínuas para quantificar o comportamento operacional de secadores industriais por meio de indicadores objetivos, predominando as abordagens centradas em modelagem da cinética de secagem e em simulação (Parry, 1985; Yu *et al.*, 2025).

Monitoramento de processos industriais e valorização de dados históricos

A avaliação proposta neste trabalho apoia-se numa tradição consolidada fora da engenharia de secagem: o monitoramento de processos industriais a partir de

dados históricos. Revisões amplamente citadas sobre detecção de falhas (Venkatasubramanian et al., 2003; Das; Maiti; Banerjee, 2012) sistematizaram métodos que exploram o histórico operacional, partindo do princípio de que grandes volumes de dados carregam conhecimento implícito sobre o sistema. Embora o foco original desses métodos seja a detecção de falhas, sua lógica é transferível para a avaliação de desempenho: em ambos os casos, parte-se do registro histórico para distinguir o comportamento normal, estável ou anômalo.

Essa perspectiva ganhou escala com a difusão dos sistemas de controle e supervisão. Ge *et al.* (2017) observam que a adoção generalizada de sistemas de controle distribuído gerou bancos de dados industriais que, inicialmente, serviam apenas ao registro operacional, mas passaram a ser explorados como fonte de informação, modelagem estatística e apoio à decisão. No domínio específico da secagem e do armazenamento, revisões recentes destacam o papel dos sensores e da aquisição automática de dados, mas também alertam que a simples coleta não garante melhoria operacional: os dados precisam ser convertidos em informação útil ao controle e à gestão do processo (Subrot Panigrahi *et al.*, 2020; Krumreich; Scharlau; Castelan, 2024). É essa conversão do registro bruto em indicador interpretável que fundamenta a metodologia aqui adotada.

Indicadores estatísticos para avaliação do comportamento de processos

Todo processo industrial exibe variabilidade, e caracterizá-la é o objeto do controle estatístico de processos. Segundo Montgomery (2009), o comportamento de um processo pode ser descrito por três dimensões complementares, tendência central, dispersão e estabilidade no tempo: média e mediana informam o nível típico de operação; desvio-padrão, amplitude e, sobretudo, o coeficiente de variação descrevem a dispersão; e a análise temporal, apoiada em cartas de controle e em faixas operacionais, indica se o processo se mantém dentro dos limites esperados ou apresenta desvios sistemáticos.

O coeficiente de variação merece destaque por ser adimensional, o que permite comparar a estabilidade relativa de variáveis de escalas distintas, como as temperaturas de entrada e de saída e a divergência entre sensores. A abordagem estatística de monitoramento organizada por Qiu (2014) oferece ainda instrumentos para avaliar a permanência do processo em condição ideal e para identificar, de forma objetiva, os períodos de maior ou menor regularidade. Transpostos para a secagem, esses indicadores deixam de ser meros descritores estatísticos e passam a representar, neste trabalho, propriedades operacionais concretas, a estabilidade térmica da entrada de ar, a uniformidade do ar na



saída, a intensidade da transferência de calor e a aderência às faixas de referência, arcabouço sobre o qual se constroem os indicadores de desempenho adotados na metodologia.

MATERIAL E MÉTODOS

Delineamento da pesquisa

O trabalho caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e finalidade descritiva e exploratória (Yin, 2018). A opção pelo estudo de caso justifica-se pelo objetivo de compreender em profundidade o comportamento operacional de um único secador industrial em condições reais de funcionamento, a partir de dados de processo coletados de forma contínua ao longo de uma safra. Diferentemente de delineamentos experimentais, em que as variáveis são manipuladas sob condições controladas, esta pesquisa trabalha com dados observacionais de operação, o que preserva a validade externa relativa à prática industrial, embora imponha limitações ao controle de fatores intervenientes, discutidas ao final desta seção.

Objeto de estudo e sistema de aquisição de dados

O equipamento analisado é um secador industrial de grãos do tipo torre, de fluxo misto, com carga estática aproximada de 140 toneladas, instalado em uma unidade armazenadora e utilizado para a secagem de milho, soja e sorgo ao longo da safra. O secador é instrumentado por um sistema de monitoramento composto por sensores de temperatura distribuídos na entrada de ar, na massa de grãos e na exaustão, além de sensores de umidade do grão, nível e condições ambientais, integrados a um controlador lógico programável e a uma interface de operação. As leituras são registradas automaticamente em intervalos regulares, constituindo um histórico temporal do processo.

A temperatura de entrada de ar corresponde à mediana de três sensores posicionados no plenum, e a temperatura de saída à maior leitura entre dois sensores de exaustão; um terceiro sensor foi descartado por falha identificada na etapa de auditoria. Às variáveis do equipamento foram associadas variáveis ambientais provenientes da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próxima, incluindo temperatura do ar, umidade relativa, ponto de orvalho e precipitação, permitindo relacionar o comportamento do secador às condições externas.

Base de dados e tratamento

A base analisada reúne 77.169 registros coletados a intervalos de um minuto, entre 17 de julho de 2023 e 4 de fevereiro de 2024, cobrindo o período efetivo de operação da safra. A continuidade temporal é elevada:

99,9% dos intervalos entre leituras correspondem a exatamente um minuto, e as poucas descontinuidades observadas concentram-se em interrupções de operação. As ausências de dados restringem-se essencialmente à leitura de umidade do grão, registrada de forma intermitente, e às variáveis ambientais em janelas pontuais de indisponibilidade da estação, e foram tratadas por exclusão par a par nas análises correspondentes, sem imputação de valores.

Na etapa de auditoria, verificou-se uma inconsistência lógica no sensor de nível, do tipo chave, cujo estado encontrava-se invertido em relação à presença real de grão. A inconsistência foi confirmada por um teste físico independente: com a fornalha acionada, a diferença entre a temperatura do ar de entrada e a de saída manteve-se, em 83% dos minutos, superior a 15 °C, magnitude compatível apenas com a presença de massa de grãos absorvendo o calor fornecido; um secador efetivamente vazio produziria diferença próxima de zero. Diante disso, optou-se por não utilizar o indicador de nível na identificação da operação e por adotar o acionamento da fornalha como critério de secagem ativa, decisão corroborada pela própria assinatura térmica do processo. Esse procedimento aumenta a robustez da análise, por ancorar a definição de estado operacional em uma variável física verificável e não em um sinal discreto sujeito a erro de instalação.

Identificação dos ciclos de secagem

A unidade elementar de análise adotada foi o ciclo de secagem, definido como um bloco temporal contíguo em que a fornalha permaneceu acionada. Interrupções curtas, inferiores a quinze minutos, foram incorporadas ao ciclo em curso, de modo a representar modulações momentâneas do queimador sem fragmentar artificialmente a operação. Foram identificados 56 ciclos substantivos, com duração igual ou superior a trinta minutos de operação efetiva, totalizando aproximadamente 543 horas de secagem. Cada ciclo foi caracterizado quanto à cultura processada, duração e ao conjunto de indicadores descrito a seguir.

Indicadores de desempenho operacional

Os indicadores foram organizados segundo as dimensões consagradas no monitoramento estatístico de processos (tendência central, dispersão e estabilidade) e complementados por indicadores específicos da engenharia de secagem. Como medidas de tendência central e dispersão das variáveis térmicas, empregaram-se média, desvio-padrão, amplitude e coeficiente de variação, este último por permitir a comparação adimensional da estabilidade relativa entre variáveis de escalas distintas. A intensidade da transferência de calor foi representada pela diferença média entre as temperaturas de entrada

e de saída do ar, e a uniformidade da distribuição do ar pela divergência entre os sensores de exaustão. A estabilidade operacional foi avaliada pela variabilidade da temperatura de entrada e pela aderência às faixas de referência definidas para cada cultura (100 a 110 °C para milho e soja e 70 a 90 °C para sorgo), classificando-se cada minuto de operação em abaixo, dentro ou acima da faixa. O controle do produto foi descrito pela umidade de descarga do grão e sua dispersão, e a utilização do equipamento pela razão entre o tempo de operação efetiva e o tempo total monitorado.

Análise dos dados

O tratamento dos dados foi conduzido por meio de rotinas computacionais em linguagem Python, com bibliotecas de análise de dados. Além da estatística descritiva por ciclo e por cultura, calcularam-se coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de processo e as variáveis ambientais, restritos aos períodos de operação efetiva, com o objetivo de identificar relações interpretáveis e não de estabelecer modelos preditivos. A comparação entre culturas foi conduzida em caráter descritivo, sem testes inferenciais, uma vez que os volumes de dados de soja e sorgo são substancialmente menores que o de milho e não sustentam generalização estatística, restrição assumida explicitamente como limitação do estudo.

Cabe registrar três limitações metodológicas adicionais. A primeira é que a avaliação de eficiência apoia-se em indicadores térmicos e operacionais, e não em medição direta do consumo de combustível ou energia, de modo que a transferência de calor é tratada como um indicador de desempenho, e não como um balanço energético fechado. A segunda decorre da natureza contínua do secador de fluxo misto e do registro pontual da umidade do grão, que não permitem reconstruir curvas de secagem por batelada, motivo pelo qual a umidade é analisada como variável de controle da descarga e não como cinética. A terceira refere-se ao caráter de estudo de caso único, que recomenda cautela na extrapolação dos valores absolutos, embora a metodologia de indicadores seja transferível a outros equipamentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização geral da operação e utilização do equipamento

Ao longo do período monitorado, o secador acumulou aproximadamente 543 horas de operação efetiva, distribuídas em 56 ciclos de secagem e 54 dias-calandário de atividade. A operação concentrou-se fortemente no início da safra: julho e agosto de 2023 responderam por cerca de 87% das horas de secagem, restando uma campanha secundária e mais esparsa

entre novembro e janeiro. Essa sazonalidade acentuada é característica das unidades armazenadoras brasileiras, nas quais o secador opera de forma intensa em janelas curtas e permanece subutilizado no restante do ciclo produtivo (Krumreich; Scharlau; Castelan, 2024).

O milho dominou amplamente a operação, com 416 horas, contra 76 do sorgo e 50 da soja. Esse desequilíbrio não é apenas uma característica da unidade, mas condiciona toda a análise subsequente: os indicadores do milho apoiam-se em uma amostra robusta, enquanto os de soja e sorgo devem ser lidos em caráter exploratório. A própria capacidade de reconstruir o histórico operacional a partir de dados de processo, sem instrumentação adicional além da já instalada, ilustra o argumento de que grandes volumes de dados industriais carregam conhecimento operacional que costuma permanecer inexplorado (Venkatasubramanian *et al.*, 2003; Ge *et al.*, 2017).

Perfil térmico e transferência de calor

A Tabela 1 sintetiza o comportamento térmico do processo por cultura, considerando apenas os períodos de operação efetiva.

Tabela 1. Indicadores térmicos e operacionais do secador industrial de grãos por cultura processada (milho, soja e sorgo), calculados sobre os períodos de operação efetiva com fornalha acionada.

Indicador	Milho	Soja	Sorgo
Horas de operação	416,5	50,1	75,9
Temp. de entrada média (°C)	86,6	65,3	70,4
Temp. de entrada máxima (°C)	125,3	104,4	116,3
Coefficiente de Variação (CV) da temp. de entrada (%)	18,5	21,7	11,0
Temp. de saída média (°C)	52,0	52,6	46,2
Gap térmico médio (°C)	34,6	12,7	24,2
Divergência entre sensores (°C)	1,6	4,0	1,3
Temp. média do grão (°C)	47,4	51,5	43,8
Umidade de descarga média (%)	14,7	13,5	15,8

Fonte: Autoria própria (2026).

O *gap* térmico, definido como a diferença entre as temperaturas de entrada e de saída do ar, é o indicador que melhor expressa a intensidade da transferência de calor para a massa de grãos, e é justamente nele que as culturas mais se distinguem. No milho, o ar cedeu em média 34,6 °C ao atravessar a coluna; no sorgo, 24,2 °C; e na soja, apenas 12,7 °C. Essa hierarquia acompanha diretamente a temperatura de entrada empregada em cada cultura e reflete o compromisso, amplamente reconhecido na literatura recente, entre intensificar a secagem e preservar a qualidade do produto (Jimoh *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2025). A soja, mais sensível a danos térmicos e a fissuras, foi conduzida com ar substancialmente mais frio, o que

reduz a energia transferida por passagem e, previsivelmente, resulta em menor *gap*. O comportamento observado é coerente com o que estudos sobre secagem de sementes descrevem quanto à necessidade de temperaturas mais brandas para grãos oleaginosos (Barrozo; Mujumdar; Freire, 2014).

Um resultado menos evidente, decorrente da distribuição observada na Figura 1, diz respeito ao amortecimento térmico da saída. Embora a temperatura de entrada varie amplamente, de pouco mais de 50 °C a mais de 125 °C no milho, a temperatura de saída manteve-se contida em torno de 50 °C, com coeficiente de correlação de Pearson (r) praticamente nulo entre entrada e saída ($r = 0,13$) e correlação quase perfeita entre entrada e *gap* ($r = 0,96$). Em termos físicos, isso indica que a massa úmida de grãos e a evaporação associada funcionam como um amortecedor térmico: as oscilações do queimador são absorvidas pela carga e não se propagam integralmente ao ar de exaustão. Esse acoplamento entre transferência de calor e de massa é o mecanismo central descrito na modelagem clássica da secagem (Parry, 1985; de Lima *et al.*, 2014), e sua manifestação em dados reais de operação reforça a leitura de que o *gap*, e não a temperatura de saída isoladamente, é o indicador pertinente para avaliar o desempenho térmico.

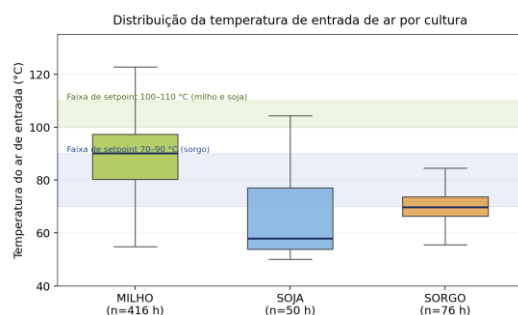


Figura 1. Distribuição da temperatura do ar de entrada do secador industrial por cultura processada (milho, soja e sorgo), comparada às faixas de *setpoint* configuradas para cada cultura.

Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 1 apresenta a distribuição da temperatura do ar de entrada por cultura, confrontada com as faixas de referência configuradas no sistema, evidenciando tanto a amplitude da variação térmica imposta ao processo quanto o posicionamento típico da operação em relação ao *setpoint*.

Estabilidade térmica e aderência às faixas de operação

A avaliação da estabilidade, apoiada na tradição do controle estatístico de processos (Montgomery, 2009; Qiu, 2014), revelou o resultado operacionalmente mais relevante do estudo. A Tabela 2 apresenta a

permanência de cada cultura em relação à sua faixa de referência.

Tabela 2. Proporção do tempo de operação do secador abaixo, dentro e acima da faixa de *setpoint* de temperatura do ar de entrada definida para cada cultura (milho, soja e sorgo).

Cultura	Faixa (°C)	Abaixo (%)	Ideal (%)	Acima (%)
Milho	100–110	82	15	3
Soja	100–110	99	1	0
Sorgo	70–90	52	46	2

Fonte: Autoria própria (2026).

O secador operou a maior parte do tempo abaixo da faixa definida como ideal. No milho, apenas 15% da operação ocorreu dentro da faixa de 100 a 110 °C, apesar de o equipamento ter atingido, em picos, temperaturas superiores a 125 °C, o que demonstra que a limitação não é de capacidade térmica da fornalha, mas de sustentação da temperatura ao longo da operação. O caso da soja é o mais expressivo: com a mesma faixa configurada para o milho, a soja foi conduzida 99% do tempo abaixo dela, a uma temperatura média de 65 °C. Aqui a interpretação precisa ser cautelosa. A leitura mais consistente com a prática de secagem é a de que o *setpoint* configurado para a soja não corresponde à condução efetivamente adotada pelos operadores, que optaram, deliberadamente, por temperaturas mais baixas para proteger o grão. Trata-se de uma decisão tecnicamente correta, porém dissociada do parâmetro de referência registrado no sistema. Em termos de controle de processo, trata-se de um processo estável, porém sistematicamente descentrado em relação ao alvo nominal (Montgomery, 2009).

O sorgo, com faixa de referência mais baixa (70 a 90 °C) e mais compatível com a operação real, apresentou a melhor aderência (46% do tempo na faixa) e a menor variabilidade relativa de entrada (coeficiente de variação (CV), de 11%, contra 18,5% do milho e 21,7% da soja). Esse contraste sugere que boa parte do desempenho de estabilidade observado decorre menos do equipamento e mais da adequação entre o *setpoint* configurado e as condições praticáveis, o que aponta um ponto de melhoria imediata e de baixo custo, obtido pela simples recalibração das faixas de referência por cultura. É precisamente esse tipo de diagnóstico, orientado por indicadores extraídos do histórico, que a literatura de monitoramento aponta como o passo que converte o dado bruto em decisão operacional (Ge *et al.*, 2017; Krumreich; Scharlau; Castelan, 2024). A Figura 2 sintetiza essa distribuição do tempo de operação em relação às faixas de referência, tornando visível o padrão sistemático de operação abaixo do *setpoint* nas três culturas. A eficiência operacional, portanto, não é um atributo do equipamento isoladamente, mas do processo conduzido dentro de faixas adequadas.

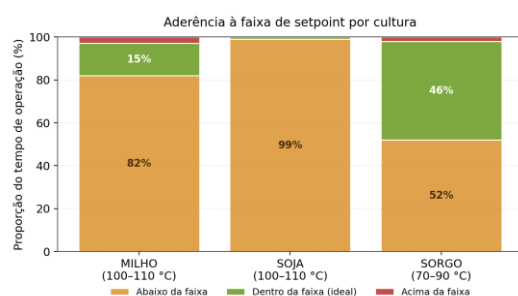


Figura 2. Proporção do tempo de operação do secador abaixo, dentro e acima da faixa de *setpoint* de temperatura do ar de entrada, por cultura processada (milho, soja e sorgo).

Fonte: Autoria própria (2026).

Uniformidade da distribuição do ar

A divergência entre os sensores de exaustão foi adotada como indicador de uniformidade da secagem, sob a premissa de que diferenças persistentes entre pontos de saída sinalizam distribuição desigual do ar e, portanto, secagem heterogênea (Khatchatourian; Vielmo; Bortolaia, 2013). Milho e sorgo apresentaram boa homogeneidade, com divergências médias de 1,6 e 1,3 °C, respectivamente. A soja destacou-se negativamente, com divergência média de 4,0 °C, mais que o dobro, apesar de operar com temperaturas mais baixas. Como a soja foi processada na campanha secundária, em volume reduzido e possivelmente com cargas parciais, a maior divergência pode refletir preenchimento incompleto da coluna, condição em que a distribuição do ar tende a se deteriorar. Observou-se ainda correlação moderada entre a temperatura de saída e a divergência ($r = 0,49$): quanto mais quente a operação, maior a dispersão entre sensores, o que é compatível com a intensificação de gradientes térmicos sob maior carga energética.

Controle da umidade de descarga

A umidade de descarga do grão manteve-se, no conjunto, em torno de 14,7%, valor coerente com os limites recomendados para armazenamento seguro (Ziegler; Paraginski; Ferreira, 2021), com pouco mais da metade das leituras (53%) na faixa de 13 a 15%. A dispersão, contudo, não é desprezível: o coeficiente de variação de 12,6% e a presença de 11% das leituras acima de 17% indicam que parte do produto deixou o secador ainda acima do teor desejável. Por se tratar de secador de fluxo contínuo, esse resultado não descreve uma curva de secagem, mas a regularidade do produto entregue, e sinaliza que a variabilidade da umidade de descarga é, ela própria, um indicador de desempenho a ser monitorado, tão importante quanto as variáveis térmicas. A soja apresentou a descarga mais homogênea (CV de 6,9%), o que, combinado à sua condução mais fria, sugere uma operação deliberadamente conservadora dessa cultura.

Relações com as condições ambientais

As correlações entre as variáveis de processo e as condições ambientais mostraram-se, em geral, fracas, o que já era esperado em um processo cuja variável de entrada é ativamente controlada pelo operador. A relação mais expressiva foi a correlação negativa moderada entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente ($r = -0,35$), compatível com o ajuste do queimador em resposta ao clima, com temperaturas de entrada mais elevadas em períodos mais frios. A margem de condensação, definida como a diferença entre a temperatura do grão e o ponto de orvalho, manteve-se sempre confortavelmente positiva (mínimo de 17 °C), indicando ausência de risco de condensação sobre o grão nas condições observadas. Esses resultados delimitam o alcance da análise: o comportamento do secador é governado sobretudo pela condução operacional, e as condições ambientais atuam como fator secundário, o que reforça a centralidade dos indicadores de estabilidade e aderência discutidos anteriormente.

IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

A principal contribuição prática deste trabalho não está nos valores absolutos obtidos para um secador específico, mas na demonstração de que indicadores operacionais úteis podem ser extraídos do histórico de processo que as unidades armazenadoras já geram, sem instrumentação adicional. O conjunto de indicadores empregado reúne o *gap* térmico como medida de transferência de calor, a divergência entre sensores como medida de uniformidade, o coeficiente de variação e a aderência a faixas como medidas de estabilidade e a umidade de descarga como medida de controle do produto, e é diretamente transferível a qualquer secador dotado de aquisição contínua de dados. Trata-se de uma metodologia de avaliação, e não de um resultado isolado, o que amplia seu alcance para além do estudo de caso (Ge *et al.*, 2017; Krumreich; Scharlau; Castelan, 2024).

O resultado com maior consequência prática é a baixa aderência às faixas de referência, especialmente no caso da soja, conduzida 99% do tempo abaixo do *setpoint* configurado. Esse achado aponta para um ganho de baixíssimo custo: a recalibração das faixas de referência por cultura, de modo que o parâmetro registrado no sistema reflita a condução tecnicamente adequada. Um *setpoint* que não corresponde à operação real esvazia o próprio conceito de controle: o operador passa a conduzir o processo à revelia da referência, e o sistema de monitoramento perde a capacidade de sinalizar desvios. Corrigir essa distância é uma intervenção gerencial, não tecnológica.

A dispersão da umidade de descarga expõe um custo de oportunidade que costuma passar despercebido



porque não aparece na média. Cerca de 11% do produto deixou o secador acima de 17% de umidade, condição que favorece a deterioração durante o armazenamento e frequentemente exige re-secagem, um retrabalho que consome combustível e ocupa o secador justamente no período de maior demanda da safra, deslocando capacidade que seria destinada a grão novo. No extremo oposto, cerca de 10% da descarga saiu abaixo de 13%, caracterizando supersecagem: além do consumo energético desnecessário, a remoção de água abaixo do teor-alvo representa perda de massa comercializável, já que o grão é vendido por peso, e eleva o risco de trincas e quebras que resultam em deságio na classificação comercial. Como ambos os desvios coexistem, o problema não se resolve ajustando a temperatura média; ele exige a redução da variabilidade do processo, que é precisamente o que a leitura por indicadores de estabilidade permite identificar e acompanhar (Montgomery, 2009; Ziegler; Paraginski; Ferreira, 2021). Os episódios de temperatura de entrada acima da faixa (2,8% do tempo no milho, com picos superiores a 125 °C) reforçam essa preocupação, por serem o mecanismo mais direto de dano térmico e de comprometimento da qualidade física do grão (Barrozo; Mujumdar; Freire, 2014; Jimoh *et al.*, 2023).

Há, ainda, uma dimensão de disponibilidade. Como o secador é o gargalo do fluxo pós-colheita, cada hora de parada não programada durante a safra carrega um custo de oportunidade elevado, associado ao grão que aguarda secagem, ao *spread* de preço no período e à capacidade de processamento perdida. Uma estimativa ilustrativa, a valores médios de mercado e assumindo uma parada de três dias sobre a carga estática do equipamento, situa esse custo na ordem de centenas de milhares de reais por evento, com magnitude ainda maior para culturas de valor unitário mais alto, como a soja. Os números específicos dependem de parâmetros externos à base analisada (capacidade horária, *spread* e custo de secagem) e devem ser tomados como ordem de grandeza, não como resultado do estudo; ainda assim, ligam de forma tangível o indicador de disponibilidade, mensurável a partir dos dados, à decisão de investir em confiabilidade e em detecção precoce de anomalias. Em conjunto, esses elementos sustentam que o monitoramento contínuo, quando convertido em indicadores, deixa de ser um registro passivo e passa a subsidiar decisões de operação, manutenção e comercialização.

CONCLUSÃO

O objetivo de avaliar a eficiência operacional de um secador de grãos industrial por meio da análise de dados de processo coletados em tempo real foi alcançado, e a hipótese de que a exploração

sistemática do histórico operacional revela padrões de operação, variáveis críticas e ineficiências invisíveis ao acompanhamento convencional foi confirmada.

No que se refere à caracterização das variáveis operacionais, concluiu-se que o comportamento do secador é governado pela condução operacional, e não pelas condições ambientais, que atuam como fator secundário. A operação concentra-se em janelas curtas e intensas, padrão típico das unidades armazenadoras brasileiras, e a temperatura do ar de entrada apresenta ampla variação, enquanto a temperatura de saída permanece amortecida pela massa de grãos. Essa assimetria constitui evidência, obtida em condições reais de operação, do acoplamento entre transferência de calor e de massa descrito pela modelagem clássica da secagem.

Quanto aos indicadores de desempenho desenvolvidos, o gap térmico mostrou-se a medida que melhor discrimina a intensidade da secagem entre culturas, superando qualquer temperatura isolada. A aderência às faixas de referência revelou o achado de maior consequência prática: o equipamento operou predominantemente abaixo do setpoint configurado, indicando descolamento entre o parâmetro registrado no sistema e a condução efetivamente praticada pelos operadores. A umidade de descarga, adequada em média, apresentou dispersão relevante, com frações simultâneas de grão subsecado e supersecado, um problema de variabilidade, e não de nível médio, com desdobramentos diretos em retrabalho, perda de qualidade e custo de oportunidade.

A contribuição central do trabalho é metodológica e conecta-se diretamente à inovação de processo. Ao demonstrar que indicadores interpretáveis de transferência de calor, uniformidade, estabilidade e controle do produto podem ser derivados do histórico que as unidades armazenadoras já produzem, sem instrumentação adicional nem modelagem complexa, o estudo converte um ativo informacional subutilizado em instrumento de gestão, trajetória de transformação de conhecimento em solução aplicada ao setor produtivo que constitui o escopo do PROFNIT. A recalibração das faixas de referência por cultura, identificada como ganho imediato e de baixo custo, exemplifica como a leitura sistemática dos dados converte melhoria operacional em inovação incremental na pós-colheita. A correção documentada de uma inconsistência de sensor, resolvida por evidência física em vez de descartada, ilustra ainda o rigor exigido no uso de dados industriais reais, nos quais a auditoria da qualidade do dado é parte inseparável da análise.

As conclusões devem ser lidas dentro dos limites do delineamento adotado: trata-se de estudo de caso



único, apoiado em indicadores térmicos e não em balanço energético fechado, com registro pontual da umidade do grão e volumes reduzidos das culturas secundárias, que permanecem em plano exploratório. As relações identificadas têm natureza correlacional e descritiva, sem pretensão causal.

TRABALHOS FUTUROS

A linha de base operacional estabelecida neste estudo constitui o pré-requisito para etapas mais avançadas de digitalização da pós-colheita. Três desdobramentos são considerados prioritários: a integração dos indicadores a plataformas de Internet das Coisas, permitindo o acompanhamento remoto e contínuo do desempenho do secador; a construção de um gêmeo digital do equipamento, capaz de simular cenários de operação e antecipar o efeito de ajustes nas faixas de referência; e o desenvolvimento de estratégias de controle inteligente e preditivo, apoiadas em técnicas de Inteligência Artificial, orientadas à redução da variabilidade da umidade de descarga e à aproximação da operação às condições de referência. Complementarmente, a replicação da metodologia em outros equipamentos e unidades armazenadoras permitirá avaliar a generalização dos indicadores e consolidar referências setoriais de desempenho, e a incorporação da medição direta do consumo energético permitirá evoluir dos indicadores térmicos para um balanço energético fechado do processo.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES E ORIGEM DOS DADOS

Os dados analisados neste estudo são provenientes do sistema de monitoramento instalado no secador objeto da pesquisa. Um dos autores possui vínculo societário com a empresa responsável pelo desenvolvimento desse sistema de monitoramento, o que se declara em atenção à transparência. Para mitigar eventual viés, a análise apoiou-se exclusivamente em dados de processo verificáveis, submetidos a auditoria de qualidade, e as interpretações foram confrontadas com a literatura científica independente. Os autores declaram não haver outros conflitos de interesse.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Em atenção à transparência, declara-se que ferramentas de Inteligência Artificial foram empregadas como apoio em etapas específicas da elaboração deste trabalho, a saber: a organização e a conferência das referências bibliográficas, o processamento e a análise estatística da base de dados de processo, a geração das figuras e o apoio à redação e ao refinamento linguístico do texto. As decisões metodológicas, a interpretação dos resultados e a verificação das informações, dos dados e das citações foram conduzidas e revisadas integralmente pelos

autores, que assumem total responsabilidade pelo conteúdo científico apresentado.

REFERÊNCIAS

- BAIDHE, E.; CLEMENTSON, C. L.; HELLEVANG, K. et al. Comprehensive Analysis of Drying Kinetics, Heat and Mass Transfer, and Thermodynamic Properties in High-Temperature Drying of High-Moisture Corn. *Journal of Food Process Engineering*, v. 48, n. 6, e70159, 2025. DOI: 10.1111/jfpe.70159.
- BARROZO, M. A. S.; MUJUMDAR, A.; FREIRE, J. T. Air-Drying of Seeds: A Review. *Drying Technology*, v. 32, n. 10, p. 1127-1141, 2014. DOI: 10.1080/07373937.2014.915220.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- CHEN, G.; ANDERSON, J. A.; BANNISTER, P.; CARRINGTON, C. G. PH --- Postharvest Technology: Monitoring and Performance of a Commercial Grain Dryer. *Biosystems Engineering*, v. 81, n. 1, p. 73-83, 2002. DOI: 10.1006/bioe.2001.0001.
- DAS, A.; MAITI, J.; BANERJEE, R. N. Process monitoring and fault detection strategies: a review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 29, n. 7, p. 720-752, 2012. DOI: 10.1108/02656711211258508.
- DE LIMA, A. G. B.; DE FARIAS, R. P.; FARIAS NETO, S. R. et al. Grain Drying Simulation: Principles, Modeling and Applications. In: *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*. Cham: Springer, 2014. p. 45-67. DOI: 10.1007/978-3-319-04054-7_3.
- FAO — FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Cereal Supply and Demand Brief*. Roma: FAO, jun. 2026. Disponível em: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>. Acesso em: jun. 2026.
- GE, Z.; SONG, Z.; DING, S. X.; HUANG, B. Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning. *IEEE Access*, v. 5, p. 20590-20616, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756872.
- HIENDRO, A.; SYAIFURRAHMAN; WIGYARIANTO, F. P. et al. Real-time paddy grain drying and monitoring system using long range-internet of things. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 15, n. 1, p. 448-454, 2025. DOI: 10.11591/ijece.v15i1.pp448-454.
- JIMOH, K. A.; HASHIM, N.; SHAMSUDIN, R. et al. Recent Advances in the Drying Process of Grains. *Food Engineering Reviews*, v. 15, n. 3, p. 548-576, 2023. DOI: 10.1007/s12393-023-09333-7.
- KHATCHATOURIAN, O. A.; VIELMO, H. A.; BORTOLAIA, L. A. Modelling and simulation of cross flow grain dryers. *Biosystems Engineering*, v. 116, n. 4, p. 335-345, 2013. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2013.09.001.
- KRUMREICH, C. R.; SCHARLAU, C. C.; CASTELAN, E. B. Monitoramento e Controle para Secagem e Armazenamento de Grãos. In: *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Automação (CBA 2024)*. Sociedade



- Brasileira de Automática, 2024. p. 1180-1187. DOI: 10.20906/CBA2024/4329.
- LIMA, R. E.; CORADI, P. C.; RODRIGUES, D. M. et al. Drying and storage technologies to minimize quality losses in soybeans in the southern regions of Brazil. *Engenharia Agrícola*, v. 44, e20230180, 2024. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v44e20230180/2024.
- MARTINS, R. R.; FRANCO, J. B. da R.; OLIVEIRA, P. A. V. de. *Tecnologia de secagem de grãos*. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 1999.
- MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- MUJUMDAR, A. S. (ed.). *Handbook of Industrial Drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. DOI: 10.1201/b17208.
- NATH, B.; CHEN, G.; O'SULLIVAN, C. M.; ZARE, D. Research and Technologies to Reduce Grain Postharvest Losses: A Review. *Foods*, v. 13, n. 12, 1875, 2024. DOI: 10.3390/foods13121875.
- OECD; FAO. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*. Paris: OECD Publishing, 2025. DOI: 10.1787/601276cd-en.
- PARRY, J. L. Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 32, p. 1-29, 1985.
- PERAZZINI, H.; LEONEL, A.; PERAZZINI, M. T. B. Energy of activation, instantaneous energy consumption, and coupled heat and mass transfer modeling in drying of sorghum grains. *Biosystems Engineering*, v. 210, p. 181-192, 2021. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.08.025.
- QIU, P. *Introduction to Statistical Process Control*. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- SUBROT PANIGRAHI, S.; SINGH, C. B.; FIELKE, J. et al. Modeling of heat and mass transfer within the grain storage ecosystem using numerical methods: A review. *Drying Technology*, v. 38, n. 13, p. 1677-1697, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2019.1656643.
- VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; YIN, K.; KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods. *Computers & Chemical Engineering*, v. 27, n. 3, p. 293-311, 2003. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00160-6.
- YIN, R. K. *Case study research and applications: design and methods*. 6. ed. Thousand Oaks: SAGE, 2018.
- YU, P.; ZHU, W.; SHEN, C. et al. Current Status of Grain Drying Technology and Equipment Development: A Review. *Foods*, v. 14, n. 14, 2426, 2025. DOI: 10.3390/foods14142426.
- ZARPELLON, L. E. Dispositivo de detecção de incêndios incipientes em secadores de grãos através de técnicas de Redes Neurais Artificiais (RNA). 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Química) --- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2024.
- ZIEGLER, V.; PARAGINSKI, R. T.; FERREIRA, C. D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality --- A review. *Journal of Stored Products Research*, v. 91, 101770, 2021. DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101770.