



Projeto de secadores de grãos com recirculação do fluxo de ar por meio de dinâmica de sistemas: uma abordagem a otimização, controle, eficiência energética e exergetica.
Design of grain dryers with air flow recirculation through system dynamics: an approach to optimization, control, energy and exergetic efficiency.

[Waterson dos Santos Soares](#)¹, [Rafael Pinheiro Amantéa](#)², [Keller Sullivan Oliveira Rocha](#)³, José Eduardo Carvalho Monte⁴

¹ Departamento de Engenharia de Processos e Sistemas – Instituto de Educação Tecnológica – IETEC, *Campus* Belo Horizonte – MG. E-mail: [watersonsoares@gmail.com](mailto:watsonsoares@gmail.com).

² Docente do curso de Mestrado em Engenharia, Gestão de Processos e Sistemas – Instituto de Educação Tecnológica – IETEC, *Campus* Belo Horizonte – MG.

³ Docente do curso de Mestrado em Engenharia, Gestão de Processos e Sistemas – Instituto de Educação Tecnológica – IETEC, *Campus* Belo Horizonte – MG.

⁴ Departamento de Engenharia de Automação Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET, *Campus* Ouro Preto – MG.

Resumo

No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo de dinâmica de sistemas para simular secadores em leito fluidizado com recirculação do ar de exaustão. O comportamento do secador de grãos, foi completamente analisado a partir de uma série de cenários. Foi apresentado um estudo envolvendo secagem de grãos de milho, utilizando parâmetros e configurações de exemplos práticos, para obter o controle e estabilidade do processo de secagem, utilizando valores pré-estabelecidos das eficiências energética e exergetica. A metodologia de controle a priori, apresentou resultados otimizados, controlados e estabilizados. Os resultados das simulações, foram analisados até atingir a estabilidade do sistema de controle da variável controlada.

Palavras-chave: Modelagem. Simulação. Sistema de otimização e controle. Energia. Exergia.

Abstract

In this work, a system dynamics model was developed to simulate fluidized bed dryers with exhaust air recirculation. The behavior of the grain dryer was completely analyzed from a series of scenarios. A study involving drying corn grains was presented, using parameters and configurations of practical examples, to obtain control and stability of the drying process, using pre-established values of energy and exergetic efficiencies. The a priori control methodology presented optimized, controlled and stabilized results. The simulation results were analyzed until reaching the stability of the control system of the controlled variable.

Keywords: Modeling. Simulation. Optimization and control system. Energy. Exergy.

Introdução

A demanda por aplicação de processos modernos de secagem como forma de reduzir as perdas na safra (OLIVEIRA et al., 2009) é crescente. Apesar dos esforços governamentais, grandes são os desafios tecnológicos e culturais enfrentados na maioria dos países para melhorar as técnicas de secagem (CROSSON; ANDERSON, 2002; ELFERINK; SCHIERHORN, 2018).

A secagem além de ser um processo de alta relevância é uma operação de consumo de energia altamente intensiva, que pode ter um efeito apreciável na qualidade dos produtos comercialmente secos (MUJUMDAR, 2007; MUJUMDAR; LAW, 2010). Nos países que compõem a União Europeia, os setores industriais ainda são os maiores consumidores de energia. Tal fato torna necessária a criação de novas regulamentações e tecnologias para aprimorar a eficiência energética de processos que envolvam operações de secagem e resfriamento (MALINAUSKAITE et al., 2019). Em busca de menores perdas pós secagem e maiores eficiências energéticas dos processos, experimentos recentes sugerem a aplicação de fontes renováveis, projetos de secadores do tipo rotativos e diferentes estratégias de operação (CAMCI, 2019). Uma análise adequada do processo deve buscar pontos de operações eficientes tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista de engenharia, minimizando os danos no produto final e maximizando o uso eficiente de energia. O consumo de energia é um dos principais parâmetros necessários para projetar qualquer equipamento em processos diretamente associados às definições de sustentabilidade, com isso, faz-se necessário projetarmos equipamentos cada vez mais eficientes energeticamente e de alta confiabilidade.

A modelagem matemática é um instrumento de grande ajuda aos projetistas e cientistas das áreas correlatas à engenharia e agricultura. Os modelos matemáticos permitem o projeto, avaliação de equipamentos e estratégias associadas ao processo de secagem com baixo custo e alta confiabilidade. A literatura sobre a modelagem matemática de processos de secagem e secadores é extensa e muito bem fundamentada tanto para a modelagem de equipamentos (THOMPSON, 1967; BROOKER et al., 1992; HUKILL, 1974) quanto aos fenômenos de transporte inerentes ao processo (LUIKOV, 1966; FORTES; OKOS, 1981; PHILIP; DE VRIES, 1957), semi-teóricos e empíricos (PAGE, 1949; THOMPSON, 1968; HENDORSON; PABIS, 1961).

A aplicação dos modelos para o projeto e estudo de secadores pode envolver problemas relacionados a geometrias complexas e instabilidades geradas pela não linearidade dos modelos, podendo exigir técnicas numéricas robustas e alto poder computacional. Portanto, a escolha de métodos adequados para a solução de determinados problemas, deve sempre buscar quando possível, a utilização de métodos simples, garantindo-se, porém, as condições de estabilidade e acurácia com a realidade do processo (QUEIROZ; NEBRA, 1997). Assim a Dinâmica de Sistemas surge como uma opção de ferramenta para modelos dinâmicos de secagem que permitem o estudo e projetos de secadores de grãos. A técnica é conhecida por utilizar uma linguagem simbólica simples para representar acúmulos, fluxos e variáveis em modelos dinâmicos que envolvem equações diferenciais ordinárias. Adicionalmente a técnica é também conhecida por permitir representar a dinâmica das variáveis dependentes por meio de relações causais de maneira simples e de fácil interpretação (GARCIA, 2006; STERMAN, 2000; BALBINO, 2019).

A utilização racional da energia, é afetada pelas propriedades do produto a ser secado, tipo de secador e estratégia de operação. O acoplamento de modelos termodinâmicos aos modelos de secagem permite assim o estudo e otimização dos parâmetros de secagem para se estabelecer

melhores pontos de operação tendo como objetivo maximizar as eficiências energética e exergética do processo (AMANTÉA et al., 2018).

Especificamente para secadores que envolvam a recirculação do ar de exaustão, a literatura apresenta metodologias de alta confiabilidade permitindo que estratégias de secagem com e sem recirculação sejam modeladas e avaliadas inclusive dos pontos de vista da primeira e segunda lei da termodinâmica (FORTES, 2004; FORTES; FERREIRA, 2004; ZIEGLER et al., 2016; ZOHRABI et al., 2020a; ZOHRABI et al., 2020b).

A procura por estratégias de controle para secadores em tipos variados envolvendo diferentes estratégias computacionais não é recente (TTAYAGARAJAN et al., 1998). Entretanto, algoritmos consolidados de otimização, inteligência artificial e aprendizado estatístico têm ganhado atenção dos pesquisadores e engenheiros devido ao aumento considerável da capacidade de processamento de hardware e software nas áreas de computação, modelagem matemática e controle de processos.

Técnicas de Redes Neurais Artificiais (RNA) podem ser utilizadas para solução de problemas de alta complexidade, através de algoritmos de aprendizagem, treinamento adequado da RNA e funções de transferência. Estas técnicas podem prever com boa precisão e acurácia a partir de parâmetros de exergia e energia, relacionados ao processo de secagem. Este processo de secagem inteligente foi demonstrado em (AZADBAKHT et al., 2016). Mujumdar e Martynenko (2020) destacam que o desenvolvimento futuro de tecnologias de secagem se concentrará na necessidade de incorporar a IA e técnicas correlatas nos sistemas de secagem.

Diante da real necessidade de se obter estratégias e pontos de operação eficientes termodinamicamente para secadores de grãos, este trabalho se propõe a implementar um modelo de Dinâmica de Sistemas para simular um secador de leito fluidizado para o estudo e simulação de uma estratégia de controle que permita obter melhores eficiências termodinâmicas. O modelo dinâmico não linear utilizado neste estudo foi validado com medições (CIL; TOPUZ, 2010).

Material e métodos

Foi utilizado uma modelagem matemática unidimensional de secagem em camada fina para o processo de secagem. O sistema de equações foi desenvolvido por meio de um balanço de energia e massa para o ar de secagem e o leito de grãos (BROOKER et al., 1992; FORTES, 2004; ZARE; CHEN, 2009). As seguintes considerações foram adotadas no desenvolvimento e aplicação do modelo: Foi considerada a idealidade da mistura de gás do ar de secagem; As paredes do secador são adiabáticas com capacidade de calor desprezível; A expansão ou contração do leito de secagem é desprezada; A transferência de calor por condução entre os grãos é desprezível; Enquanto a secagem ocorre, cada núcleo se torna uma fonte ou sumidouro de vapor, com gradientes de temperatura interna desprezíveis; A massa de grãos é uniformemente distribuída dentro do secador.

A equação de continuidade para o vapor de ar indica que o balanço de massa no volume de controle é igual ao vapor gerado dentro do volume de controle devido à secagem. Se a taxa de acumulação é negligenciada, então pode-se escrever a equação de entalpia unidimensional para o vapor de ar (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992):

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{\rho_s}{Ga} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1)$$

Onde:

W é a razão de umidade; $G_a = \rho_a V$ é a taxa do fluxo de ar seco; ρ_a e ρ_s são, respectivamente, o ar seco e a densidade da massa seca (produto); V é a velocidade superficial do ar; $\partial M/\partial t$ é a taxa de secagem; M é o teor médio de umidade do produto local (base seca).

A forma agrupada da equação (1) é:

$$m_s \frac{\partial M}{\partial t} = m_a (W_1 - W_2) \quad (2)$$

Onde:

$m_s = \rho_s(1 - \varepsilon)SH_0$ é a massa do leito sólido seco; ε é a porosidade do leito; $m_a = \rho_a VS$ é a taxa do fluxo de massa de ar seco; S é a área da secção transversal do leito; H_0 é a altura do leito. Os subscritos 1 e 2 referem-se aos valores de entrada e saída. Esta equação concentrada aplica-se à análise de leito fluidizado.

A primeira lei da termodinâmica aplicada ao ar de secagem em um volume de controle diferencial pode ser declarada em termos de entalpia, negligenciando a condução de calor, efeitos de viscosidade e pressão. A equação de entalpia pode ser assim escrita:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h' a_v (T - \theta)}{G_a (C_a + W.C_v)} \quad (3)$$

Em que: h' = coeficiente convectivo de transferência de calor; θ = temperatura do produto; c_a e c_v = calor específicos de ar seco e vapor de água a pressão constante.

A taxa de secagem de um único núcleo pode ser obtida a partir de dados empíricos, mecanicistas ou modelos termodinâmicos que permitem descrever a massa interna de um único núcleo e o transporte de energia (FORTES; OKOS, 1980). Foi utilizado a Equação 4 empírica da taxa de secagem de camada única para o milho (FRANÇA et al., 1994).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = f(rh, M_0, T, Va, Me, t) \quad (4)$$

Onde:

rh é a umidade relativa do ar de secagem; M_0 o teor de umidade inicial do milho descascado; T a temperatura do ar de secagem; Me o teor de umidade em equilíbrio de grãos; t o tempo de secagem.

Foi utilizado a equação empírica para valores de umidade de equilíbrio do milho descascado.

$$Me = f(rh, T) \quad (5)$$

Onde:

rh é a umidade relativa do ar de secagem; T é a temperatura do ar de secagem.

A Tabela 1 mostra algumas equações e parâmetros de grão de milho utilizados na modelagem dinâmica para projeto de secadores de grãos.

Conforme Wark (1995), na Equação 6 de exergia, o subscrito “0” é usado para identificar as propriedades do estado morto termomecânico ou restrito e o índice “00” representa as propriedades do estado morto ambiental ou irrestrito. O ambiente circundante é descrito pelas propriedades intensivas T_0, P_0 e μ_{00} onde μ_{00} é o potencial químico da i -ésima espécie no estado conhecido do meio ambiente.

A Equação 6 permite avaliar a exergia total, ψ_{tot} dos processos psicométricos (misturas) e inclui termos para o equilíbrio químico e termo-mecânico (MORAN, 1989; BEJAN, 1997; WARK, 1995).

$$\psi_{tot} = \sum_i y_i (\bar{h}_i - T_{0,abs} \bar{S}_i - \mu_{i,00}) \quad (6)$$

Onde:

y_i é a fração molar do i -ésimo componente; h_i e S_i referencia a entalpia molar parcial e entropia, respectivamente.

Tabela 1 – Propriedades, parâmetros ou equação física do grão de milho

| Propriedade ou Parâmetro | Equação ou valor do parâmetro | | | Fonte |
|---|--|----------------------------------|----------------------|--|
| Equação de secagem em camada fina | $\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_e - M}{3600[A^2 + (1/900)B t]^{1/2}}$ | | | FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Parâmetros A e B para grão de milho | $A = -4,10497 + 0,008784 * T$ $B = 1,66209 * 10^8 \exp(-5,9418 * 10^{-2}T)$ | | | FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Teor de umidade de equilíbrio | $M_e = \left[\frac{\ln(1 - Rh)}{-0,688(T - 227)} \right]^{1/2}$ | | | FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Capacidade térmica específica do milho seco e do vapor de água | Cp = 1122 J kg-1 K-1 Cv = 1880 J kg-1 K-1 | | | BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978; FORTES; OKOS; BARRETT, 1981; FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Entalpia ou calor latente de vaporização da água nos grãos de milho (J kg-1) | $h_{fgp} = 3638548 - 4000720M - 3529,08T$ | | | BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978; FORTES; OKOS; BARRETT, 1981; FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Área do grão de milho por unidade de volume, massa específica ou densidade do milho seco e porosidade do leito de grãos | a = 784 m ² m ⁻³ | $\rho_s = 620 \text{ kg m}^{-3}$ | $\varepsilon = 0,44$ | BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978; FORTES; OKOS; BARRETT, 1981; FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Coefficiente de transferência de calor ou convectivo para grão de milho | $h' = 31,5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ | | | BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978; FORTES; OKOS; BARRETT, 1981; FRANÇA; FORTES; HAGHIGHL, 1994 |
| Equação de secagem em camada fina para taxa de extração de umidade | $MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$ | | | - |

Fonte: Autor

Quando o ar ambiente se comporta como um gás binário ideal, consistindo em ar seco e vapor de água, a Equação 6 leva a seguinte expressão para a exergia total conforme (MORAN, 1989; BEJAN, 1997; WARK, 1995).

$$\psi_{tot} = (C_a + W C_v) \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + (1 + \bar{W}) R_a T_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) + R_a T_0 \left[(1 + \bar{W}) \ln \left(\frac{1 + \bar{W}_{00}}{1 + \bar{W}} \right) + \bar{W} \ln \left(\frac{\bar{W}}{\bar{W}_{00}} \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

R_a é a constante de gás de ar seco; R_v é a constante de gás de vapor de água; \bar{W} é a relação molar de umidade ponderada.

A umidade específica W refere-se ao respectivo valor molar \bar{W} por meios da equação $\bar{W} = 1.608W$. O último termo desta equação é a exergia química. Foi assumido que a Equação 7 é aplicável para o ar de secagem.

Dincer e Sahin (2004) apresentam expressões da eficiência de energia e exergia na secagem de processos, sem considerar as mudanças espaciais e temporais dos parâmetros de secagem. Contudo, a energia e a exergia usadas para evaporar a água do grão dependem diretamente de ambos os fatores espaciais e valores temporais da temperatura dos grãos e do teor de umidade. Esse fato diferencia o tratamento realizado neste trabalho frente a outras literaturas (DINCER; SAHIN, 2004; FORTES, 2004).

Foi definido que a eficiência energética ou rendimento, será calculada pela Equação 8.

$$\eta_1 = \frac{\text{Energia utilizada para evaporar a água do grão}}{\text{Entalpia disponível incorporada na entrada de ar de secagem}} \quad \text{ou} \quad \eta_1 = \frac{m_s h_{fg} (M_1 - M_2)}{m_a c_a (T_s - T_0) \Delta t} \quad (8)$$

Onde:

m_a é a taxa de fluxo de ar seco; M é o teor médio de umidade (1-inicial e 2 final) ; A temperatura do ar de secagem de entrada é igual a T_s .

A eficiência de exergia é definida pela Equação 9.

$$\eta_2 = \frac{\text{Exergia utilizada no processo de evaporação}}{\text{Exergia de entrada do sistema}} \quad \text{ou} \quad \eta_2 = \frac{-\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} m_s}{\dot{m}_a \Delta H_a \Delta t} \quad (9)$$

Onde:

$\dot{m}_a \Delta H_a \Delta t$ refere-se à disponibilidade de exergia na entrada do secador, ou seja, o ar de secagem devido à variação de entalpia no denominador da Equação 9, devido ao uso da eletricidade (por exemplo, pode ser igual ou menor valor de aquecimento de um combustível multiplicado pela eficiência de aquecimento associada). A eficiência da exergia também é chamada de exergia da segunda lei da termodinâmica. Ambas as Equações 8 e 9 serão avaliadas através da simulação dinâmica do projeto de secador de grãos apresentados neste estudo.

Conforme Ameen e Bari (2004) foi utilizado o conceito do fator de extração de umidade na análise de secagem através da bomba de calor. Sua definição foi estendida para avaliar o desempenho de secadores de grãos. A definição da taxa de extração de umidade, aqui denominada (MER), como a quantidade de água evaporada por unidade de consumo energético que é dado em kg/kWh. O (MER) pode ser calculado conforme demonstrado na Equação 10.

$$MER = \frac{\rho_p S \frac{\partial M}{\partial t}}{\dot{m}_a \{c_a (T_{inp} - T_0) + W_{inp} [h_g (T_{inp}) - h_g (T_0)]\} \Delta t} \quad (10)$$

A Figura 1 apresenta o croqui da proposta do projeto do secador de grãos com recirculação do fluxo de ar, bem como as suas respectivas entrada e saída, as quais serão feitas o controle para encontrar o ponto ótimo de operação, através da modelagem utilizando dinâmica de sistemas.

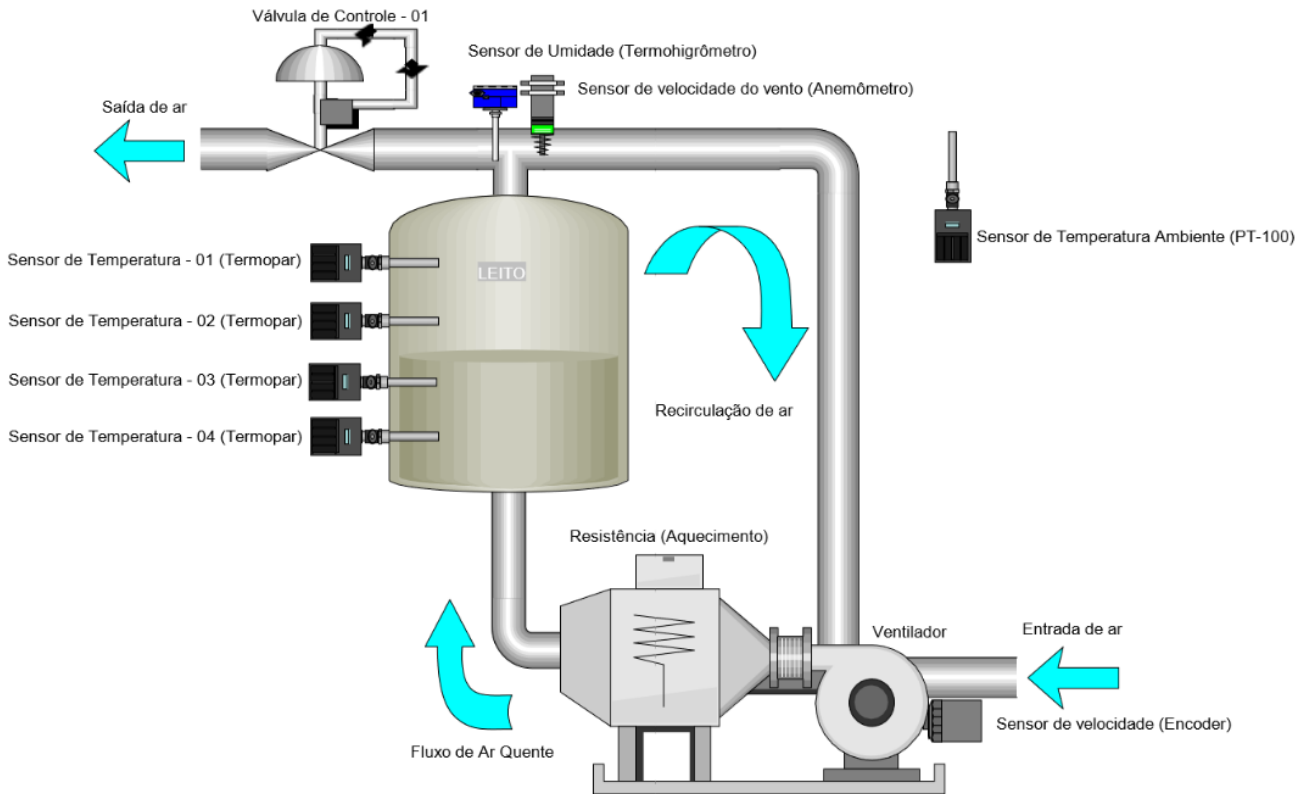


Figura 1 – Diagrama esquemático do projeto de secador de grãos com recirculação de ar

O processo de secagem pode ser representado por um diagrama causal em que este é composto pelas seguintes variáveis: Taxa de secagem $\frac{\partial M}{\partial t}$, teor médio de água do produto M_p , temperatura do produto θ_p , temperatura de set-point, ou seja, do valor desejado T_0 , temperatura de entrada do ar no secador T_s , razão de umidade absoluta do ar W . A Figura 2 mostra o diagrama causal do processo de secagem de grãos de camada fina.

Um incremento no set-point ou temperatura desejada T_0 faz com que a taxa de secagem aumente $\frac{\partial M}{\partial t}$, este aumento na taxa de secagem reduz o teor médio de água do produto M_p , ou seja, a umidade do grão reduz que proporcionalmente reduz a temperatura do produto θ_p e isso faz com que a temperatura dentro do secador também reduza. A redução da temperatura do produto faz com que a temperatura do set-point seja aumentada, fechando assim essa malha de controle do ciclo de secagem. A temperatura do grão e do ar tendem a ficar em equilíbrio, para isso, o grão deve perder água e isso faz com que a temperatura do ar no interior do secador aumente, sempre fechando essa malha feedback do sistema de secagem.

Os laços negativos equalizam a malha de controle através do equilíbrio. Quando a taxa de secagem $\frac{\partial M}{\partial t}$ aumenta, a umidade absoluta do ar W aumenta, ou seja, o vapor de água dentro do secador aumenta e este faz com que a temperatura de set-point T_0 reduza, fechando assim um loop feedback negativo.

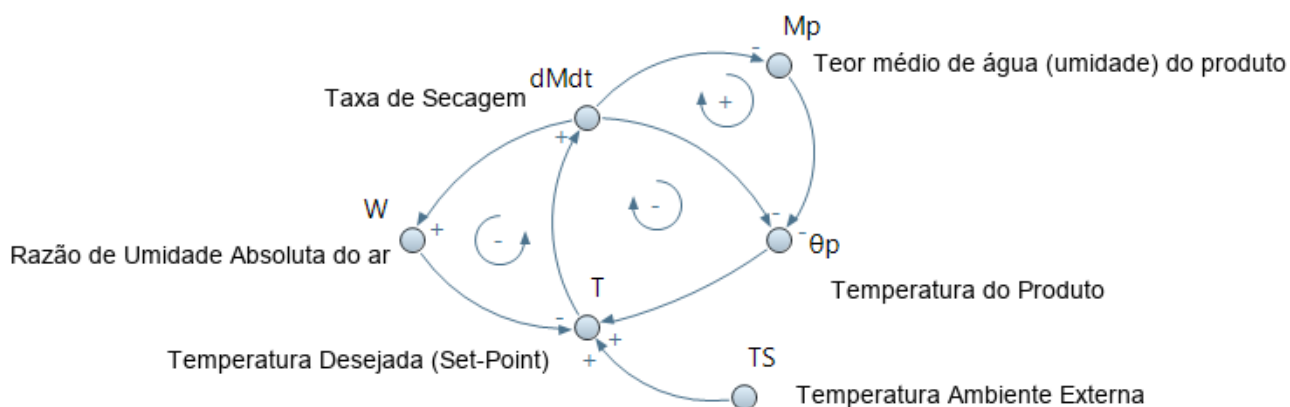


Figura 2 – Diagrama causal do processo de secagem

Resultados e discussão

Validação do modelo dinâmico de secagem

As curvas de secagem e os dados numéricos utilizados neste trabalho estão de acordo com os dados experimentais de secagem utilizados em (CIL; TOPUZ, 2010). A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados e as Figuras 3 e 4 mostram estes resultados validados. Vale ressaltar que o valor de temperatura inicial utilizado é relativamente baixo quando comparado com o padrão nacional.

Tabela 2 – Parâmetros para validação do modelo do secador de milho.

| Medições | (T0) (°C) | (TS) (°C) | Wb Peso das partículas do leito (Kg) | V (m/s) | H0 (m) | RH inicial (%) | M (db) | M0 (db) | t (s) |
|------------------------------|----------------------|----------------------|--|------------|-----------|----------------------|-----------|------------|----------|
| Curva de secagem | 16,1 | 47,1 | 0,7 | 5 - 6,2 | 0,32 | 7 | 10,91 | 23,75 | 5.400 |
| Curva de secagem | 16,1 16,2 16,1 | 36,2 47,1 70,1 | 0,7 | 5 | 0,32 | 7 | 10,91 | 23,75 | 5.400 |
| Curva de umidade do ar | 16,1 | 70,1 | 0,7 | 5 | 0,32 | 7 | 10,91 | 23,75 | 5.400 |

Fonte: CIL; TOPUZ, 2010.

A umidade máxima desejada para estocagem do grão é de 10,91% e antes do início do processo de secagem, os grãos de milho foram umidificados por um período de 4 horas até estes apresentarem um teor de umidificação de 23,75%.

A Figura 3 mostra a curva de secagem do modelo apresentado e seus respectivos valores comparados com Cil e Topuz (2010), para uma temperatura ambiente de 16,1°C. A variação de velocidade não apresentou mudança significativa nos resultados simulados.

A Figura 4 apresenta a curva de secagem para uma altura de camada do leito de H0=0,32m e umidade inicial de 0,07. Estes resultados mostram que quando a temperatura de secagem varia, o

tempo de secagem muda consideravelmente, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem, menor é o tempo de residência.

Comparando os resultados apresentados por Cil e Topuz (2010), podemos afirmar que para 36,2 °C o tempo de secagem foi bem aproximado, mesmo percebendo que a taxa de extração de umidade foi maior nos valores simulados. Em 47,1° C a partir de 1500 segundos os valores do teor de umidade extraídos de Cil e Topuz (2010) estão bem aproximados dos valores simulados.

Quando a temperatura de secagem está em 70,1°C, os valores do teor de umidade simulados acompanharam o perfil da curva de secagem de Cil e Topuz (2010), porém ficaram um pouco maiores.

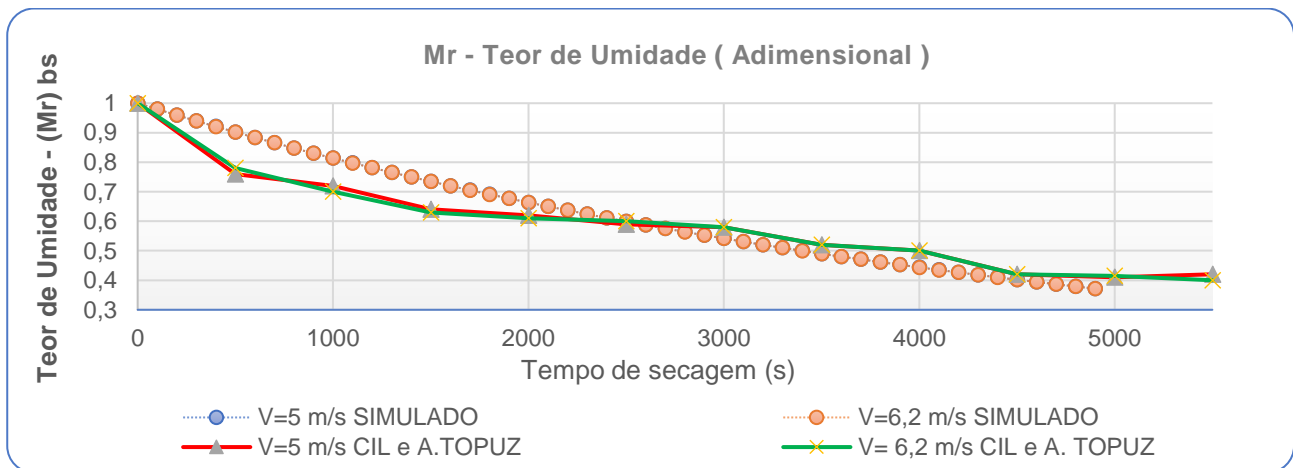


Figura 3 – Curva de secagem T0= 16,1°C, TS=47,1°C, S=0,0314m2

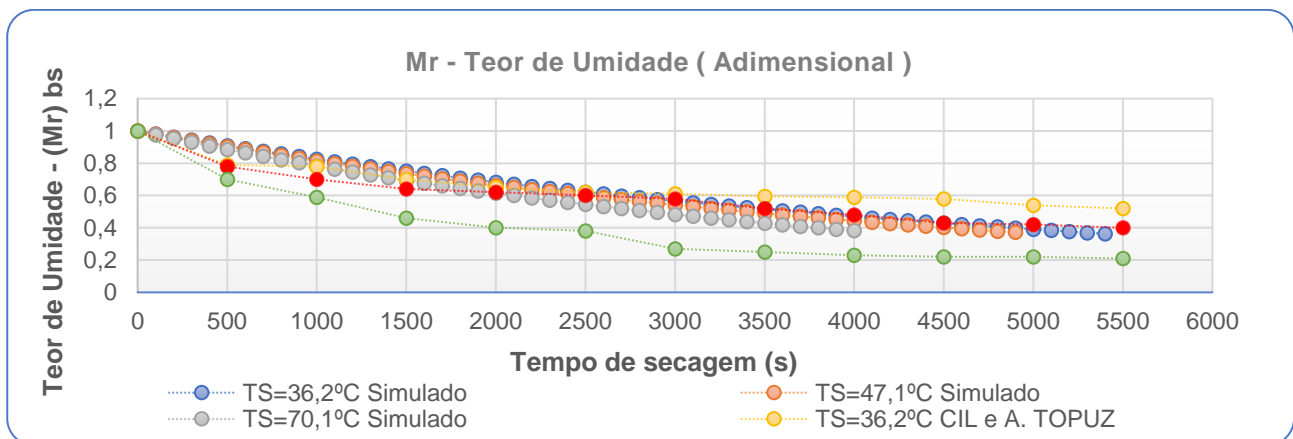


Figura 4 – Curva de secagem T0= 16,1°C, TS=36,2°C, 47,1°C, 70,1°C

Estratégia de controle para estabilizar a eficiência de 1ª lei da Termodinâmica

Objetivando controlar a estabilidade da eficiência energética (1ª lei da Termodinâmica) mínima de 20%, foi variado a velocidade de secagem, a fração de recirculação do fluxo de ar. O valor de 20% de eficiência energética foi escolhido aleatoriamente, preocupando unicamente em estabelecer uma estratégia de controle para alcançar a estabilidade do sistema, durante todo o processo de secagem, até que seja alcançado a umidade de 12% dos grãos de milho. A Figura 5 mostra o controle da eficiência energética e a Figura 6 apresenta o controle feito na FR e na velocidade de secagem para alcançar a estabilidade.

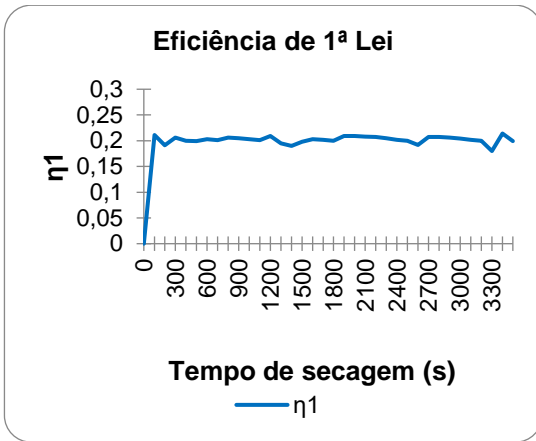


Figura 5 – Eficiência energética

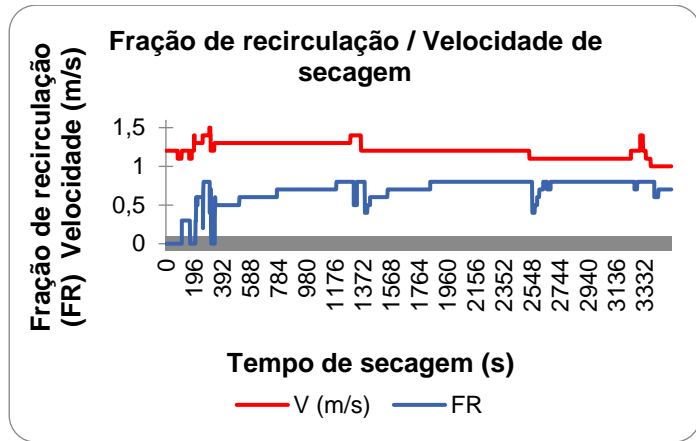


Figura 6 – Fração de recirculação e velocidade de secagem

Estratégia de controle para utilização da máxima eficiência de 2ª lei da Termodinâmica

Observa-se na Figura 7 que a eficiência energética vai aumentando com a fração de recirculação em 80%, fazendo com que seja necessário cada vez menos consumo de energia de secagem, por isso a velocidade do ventilador vai reduzindo conforme apresentado na Figura 9. A eficiência exérgica do ar de secagem reduz gradativamente à medida que se extrai a umidade do grão e o ar vai saturando, Figura 8.

Avaliando a Figura 10, o comportamento da taxa de disponibilidade de fluxo de ar de exergia Ψ , foi observado que uma pequena variabilidade de 10% na taxa de recirculação do fluxo de ar Figura 9, provoca uma mudança abrupta na taxa de exergia Ψ e pequenas intercorrências na velocidade do ventilador de secagem, ocasionam suaves mudanças na taxa de exergia Ψ .

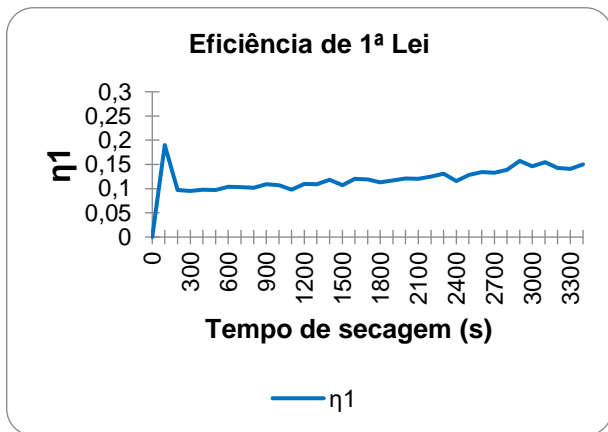


Figura 7 – Eficiência de 1ª Lei da termodinâmica

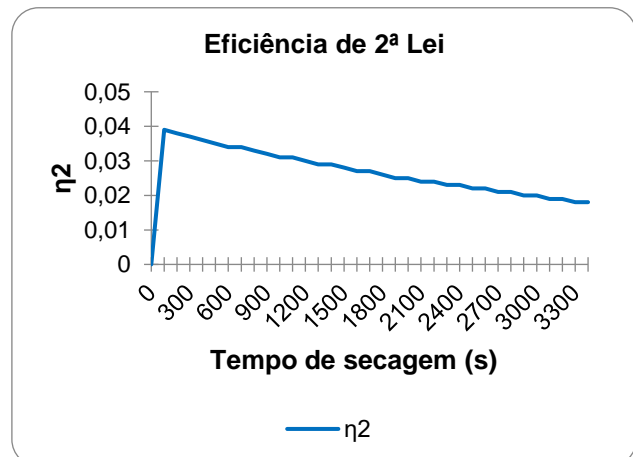


Figura 8 – Eficiência de 2ª Lei da termodinâmica

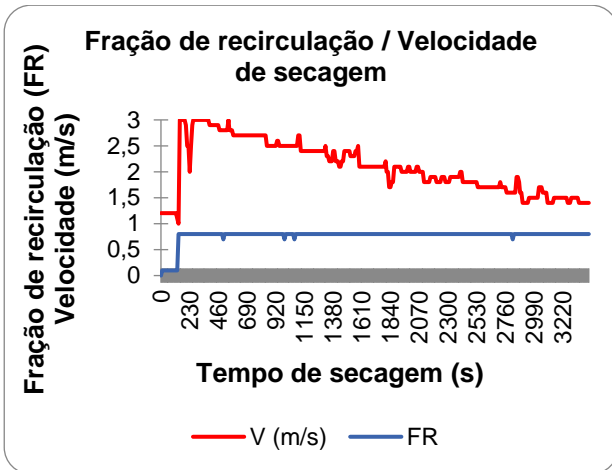


Figura 9 – Fração de recirculação e velocidade de secagem

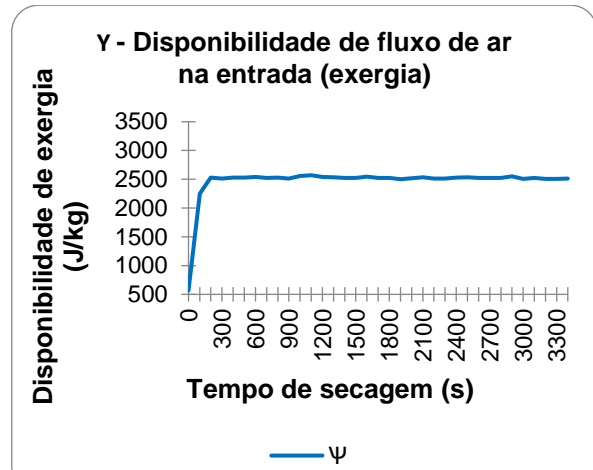


Figura 10 – Disponibilidade de fluxo de ar – Exergia

Estratégia de controle para manter estável a taxa de extração de umidade MER

Para se manter um controle em regime permanente e baixa variabilidade da taxa de extração de umidade, foi necessário manter a disponibilidade de exergia estável em torno dos 3500 J/kg.

A velocidade de secagem Figura 12, mostra que os tempos do degrau de subida e descida são diferentes, ou seja, a dinâmica de controle não é constante e o atraso de transporte do controle da velocidade e resposta do processo de secagem é totalmente não linear. Essa não linearidade dificulta bastante o processo de obtenção de ganhos para alcançar a estabilidade do secador de grãos, e através da Figura 11, pode-se verificar que a estabilidade foi alcançada a partir de 600s de secagem.

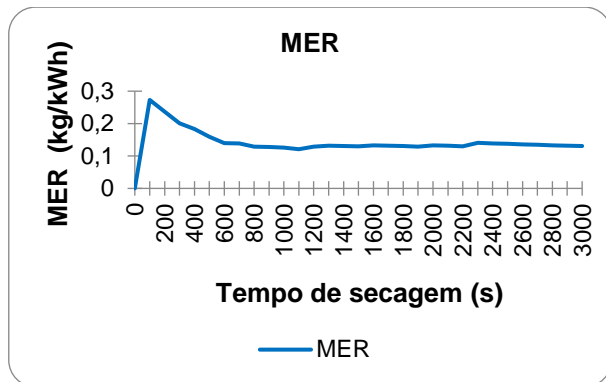


Figura 11 – Taxa de extração de umidade - MER



Figura 12 – Velocidade de secagem

Conclusão

O projeto do secador de grãos deste estudo, apresentou relativa acurácia quando foram variados os parâmetros dimensionais do secador, parâmetros de secagem e comparados com resultados reais. Os resultados obtidos permitiram efetuar a validação do modelo.

No processo de secagem com recirculação pode-se ter a exaustão do ar, sendo assim necessário o controle da válvula de maneira que não sature o ar de secagem e faz com que a secagem seja deste modo mais eficiente. Com o controle da válvula de forma automática, consegue-

se encontrar o ponto ótimo de operação termodinâmico do sistema de forma a atingir o objetivo do controle, que pode ser o de secar mais rápido e com maior eficiência energética ou com maior eficiência exergética do processo de secagem. A estratégia de controle a ser utilizada para atuar na válvula de controle, será através de monitoramento das eficiências energética, exergética, ou da taxa de extração de umidade MER. O comportamento de uma dessas variáveis ou o conjunto destas são a realimentação para atuar no controle da válvula.

Conflitos de interesse

Não houve conflito de interesses dos autores.

Contribuição dos autores

Waterson dos Santos Soares – ideia original, leitura e interpretação das obras e escrita; Rafael Pinheiro Amantéa – orientação, correções e revisão do texto; José Eduardo Carvalho Monte – correções e revisão do texto; Keller Sullivan Oliveira Rocha – correções e revisão do texto.

Referências bibliográficas

- AMANTEA, R. P.; FORTES, M.; FERREIRA, W. R.; SANTOS, G. T. Energy and exergy efficiencies as design criteria for grain dryers. **Drying Technology**, v. 36, n. 4, p. 491-507, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1409232>
- AMEEN, A.; BARI, S. Investigation into the effectiveness of heat pump assisted clothes dryer for humid tropics. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 9-10, p. 1397-1405, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.001>
- AZADBAKHT, M.; AGHILI, H.; ZIRATBAN, A.; TORSHIZI, M. V. Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes. **Energy**, v. 120, p. 947-958, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.006>
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; BROOK, R. C.; LEREW, L. E. Cereal grain drying. In: POMERANZ, Y. (Ed.). **Advances in Cereal Science and Technology**, vol. II, American Association of Cereal Chemists, 1978.
- BALBINO, G. P. A. **Análise da dinâmica da qualidade dos grãos de milho durante a secagem em secadores de leito fluidizado: uma abordagem por dinâmica de sistemas**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Educação Tecnológica, IETEC, Belo Horizonte, 2019. <https://ietec.com.br/banco-de-dissertacao/analise-da-dinamica-da-qualidade-dos-graos-de-milho-durante-a-secagem-em-secadores-de-leito-fluidizado-uma-abordagem-por-dinamica-de-sistemas/>
- BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 2nd ed. New York, NY: Wiley, 1997.
- BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York, NY: The AVI Publishing Co, 1992.
- CAMCI, M. Thermodynamic analysis of a novel integration of a spray dryer and solar collectors: a case study of a milk powder drying system. **Drying Technology**, v. 38, n. 3, p. 350-360, 2019. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1570935>
- CIL, B.; TOPUZ, A. Fluidized bed drying of cor, bean and chickpea. **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, n. 6, p. 1079-1096, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00327.x>

- CROSSON, P.; ANDERSON, J. R. Technologies for meeting future global demands for food. **Resources for the Future**, p. 1-32, 2002. <https://media.rff.org/documents/RFF-DP-02-02.pdf>
- DINCER, I.; SAHIN, A. Z. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 4, p. 645-652, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.013>
- ELFERINK, M.; SCHIERHORN, F. **A demanda global por alimentos está aumentando. Podemos conhecê-lo?** Disponível em: <<https://hbr.org/2016/04/global-demand-for-food-is-rising-can-we-meet-it>>. Acesso em: 14 jun. 2018.
- FORTES, M. Second law analysis of drying; modeling and simulation of fluidized bed grain drying. **Proceedings...** 14th International Drying Symposium, p. 18-32, 2004.
- FORTES, M.; OKOS, M. R. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 756-760, 1981. <https://doi.org/10.13031/2013.34334>
- FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their basis and limitations as applied to foods and grains. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Advances in Drying**, Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 119-154, 1980.
- FORTES, M.; OKOS, M. R.; BARRETT, J. R. Heat and mass transfer analysis of intra-kernel wheat drying and rewetting. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 26, n. 2, p. 109-125, 1981. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(81\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(81)90063-9)
- FORTES, M.; FERREIRA, W. R. Second law analysis of drying; modeling and simulation of fluidized bed grain drying. **Proceedings...** 14th International Drying Symposium, p. 301-308, 2004.
- FRANÇA, A. S.; FORTES, M.; HAGHIGHIL, K. Numerical simulation of intermitente and continuous deep-bed drying of biological materials. **Drying Technology**, v. 12, n. 7, p. 1537-1560, 1994. <https://doi.org/10.1080/07373939408962186>
- GARCIA, J. M. **Theory and practical exercises of system dynamics**. 2nd ed. Barcelona: Independently Published, 2006, 294p.
- HENDORSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory – I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 32, p. 169-174, 1961. <https://www.semanticscholar.org/author/S.-M.-Hendorson/1450730646>
- HUKILL, W. V. Drying of grain. In: CRISTENSEN, C. M. (Ed.). **Storage of cereal grains and their products**. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, p. 481-508, 1974.
- LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies**. Oxford: Pergamon Press, 1966, 523p.
- MALINAUSKAITE, J.; JOUHARA, H.; AHMAD, L.; MILANI, M.; MONTORSI, L.; VENTURELLI, M. Energy efficiency in industry: EU and national policies in Italy and the UK. **Energy**, v. 172, p. 255-269, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.130>
- MORAN, M. J. **Availability analysis: A guide to eficiente energy use**. New York, NY: ASME Press, 1989.
- MUJUMDAR, A. S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. **Transport in Porous Media**, v. 66, p. 3-18, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9018-y>
- MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. **Food and Bioprocess Technology**, v. 3, n. 6, p. 843-852, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>
- MUJUMDAR, A.; MARTYNENKO, A. Intelligent drying systems. **Drying Technology**, v. 38, n. 10, p. 1245-1246, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1650452>

- O OLIVEIRA, E. B. de; CASTRO, A. C. F. de; RAIMUNDINI, S. L.; STRUMIELLO, L. D. P. O Desenvolvimento sustentável e produção mais limpa: um estudo de caso no setor moveleiro. **ConTexto - Contabilidade em Texto**, v. 9, n. 16, p. 1-12, 2009. <https://seer.ufrgs.br/index.php/ConTexto/article/view/11702>
- PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of drying shelled corn in layer**. Thesis (Agricultural Engineering Msc). Agricultural Engineering Department, Purdue University, West Lafayette, 1949.
- PHILIP, J. R.; DE VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 2, p. 222-232, 1957. <https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222>
- QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Soluções analítica e numérica do modelo de difusão aplicadas à secagem de bananas. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 1, p. 74-83, 1997.
- STERMAN, J. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000, 982p.
- THOMPSON, T. L. **Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers**. Thesis (Agricultural Engineering Msc). Agricultural Engineering Department, Purdue University, West Lafayette, 1967.
- THOMPSON, T. L.; PERT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968. <https://doi.org/10.13031/2013.39473>
- TTAYAGARAJAN, T.; PONNAVAIKKO, M.; SHANNMUGAN, J.; PANDA, R. C.; RAO, P.G. Artificial neural networks: principle and application to model based control of drying systems – a review. **Drying Technology**, v. 16, n. 6, p. 931-966, 1998. <https://doi.org/10.1080/07373939808917449>
- WARK, K. **Advanced Thermodynamics for Engineers**. McGraw-Hill, Inc., New York, 1995.
- ZARE, D.; CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 78-87, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.04.007>
- ZIEGLER, T.; JUBAER, H.; SCHUTZ, M. Increasing the Energy Efficiency of Batch-Type Drying with Partial Air Recirculation. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 88, n. 1-2, p. 208-214, 2016. <https://doi.org/10.1002/cite.201400150>
- ZOHRABI, S.; AGHBASHLOC, M.; SEIEDLOU, S.; SCAARB, H.; MELLMANN, J. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394>
- ZOHRABI, S.; SEIEDLOU, S. S.; AGHBASHLO, M.; SCAAR, H.; MELLMANN, J. Enhancing the exergetic performance of a pilot-scale convective dryer by exhaust air recirculation. **Drying Technology**, v. 38, n. 4, p. 518-533, 2020b. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1587617>

Recebido em 22 de junho de 2022

Retornado para ajustes em 17 de setembro de 2022

Recebido com ajustes em 7 de outubro de 2022

Aceito em 15 de outubro de 2022