



ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03
de dezembro 2021

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 EXERGÉTICA

Eng. Waterson dos Santos Soares

Departamento de Engenharia de Processos e Sistemas - IETEC

Prof. Dr. Rafael Pinheiro Amantéa

Departamento de Engenharia de Processos e Sistemas - IETEC

Prof. Dr. José Eduardo Carvalho Monte

Departamento de Engenharia de Automação Industrial – CEFET

Prof. Dr. Keller Sullivan Oliveira Rocha

Departamento de Engenharia de Processos e Sistemas - IETEC

Resumo: O conhecimento a priori das técnicas de dinâmica de sistemas aplicada à conservação de energia para projetos de secadores de grãos com recirculação do fluxo ar, já foram apresentados em vários estudos. Entretanto, é sabido que estes estudos são bastantes incompletos em termos de otimização e controle do processo de secagem. 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: sem recirculação do fluxo de ar, níveis variáveis da fração de recirculação do fluxo de ar, temperatura e velocidade de secagem variadas, espessura da camada do leito, tipo de material, teor de umidade inicial do material e teor de umidade final desejada. O modelo dinâmico não linear utilizado neste estudo foi validado com medições de Cil B., Topuz, A. 2008. Posteriormente à validação, 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 determinados valores pré-estabelecidos das eficiências energética e exergética do processo de secagem. A metodologia de controle proposta a priori, apresentou resultados otimizados, controlados e estabilizados. Os resultados das simulações, foram analisados sob o ponto de vista das eficiências energética e exergética, para atender os critérios de projeto, com e sem recirculação do fluxo de ar, até atingir a estabilidade do sistema de controle da variável controlada.

Palavras-chave: Modelagem de secador de grãos, Dinâmica de sistemas, Recirculação do ar de exaustão, Sistema de otimização e controle, Eficiências energética e exergética.

PROJECT OF GRAIN DRYERS WITH AIR FLOW RECIRCULATION THROUGH SYSTEM DYNAMICS: AN APPROACH TO OPTIMIZATION, CONTROL, ENERGY AND EXERGETIC EFFICIENCY

Abstract: The a priori knowledge of system dynamics techniques applied to energy conservation for grain dryer designs with air flow recirculation has already been presented in several studies. However, it is known that these studies are quite incomplete in terms of optimization and control of the drying process. In the present 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: no airflow recirculation, variable levels of the recirculation fraction of the heated airflow, varied drying temperature and speed, bed layer thickness, type of material, initial moisture content of the material, and desired final moisture content. The nonlinear dynamic model used in this study was validated with measurements by Cil B., Topuz, A. 2008. After validation, a study involving drying of corn grains was presented, using parameters and configurations of practical examples, to obtain control and stability of the drying process, using certain pre-established values of energy and exergetic efficiencies of the drying process. The control methodology proposed a priori, presented optimized, controlled and stabilized results. The simulation results were analyzed from the point of view of energy and exergetic efficiency, to meet the design criteria, with and without air flow recirculation, until reaching the stability of the control system of the controlled variable. The simulated system presented satisfactory results and, in addition to validating the proposed model, it showed that the results of energy and exergetic efficiencies can be controlled.

Keywords: Grain dryer modeling, Systems dynamics, Exhaust air recirculation, Optimization and control system, Energy and exergy efficiencies.

1. 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 AND 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; TROJOSKY, 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 e OKOS, 1981; PHILIP e DE VRIES, 1957; KRISCHER, 1963), semi-teóricos e empíricos (PAGE, 1949; THOMPSON, 1968; HENDERSON e 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, M. R., NEBRA, S. A., 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, NESLIHAN e HEPBASLI, 2006).

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 E FERREIRA, 2004; ZIEGLER et al. 2016; ZOHRABI et al. 2020; ZOHRABI et al. 2020).

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.

2. Objetivo

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 leite fluidizado para o estudo

e simulação de uma estratégia de controle que permita obter melhores eficiências termodinâmicas.

3. Metodologia

3.1- Modelagem matemática para processo unidimensional de secagem de camada fina

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 e CHEN, 2009). As seguintes considerações foram adotadas no desenvolvimento e aplicação do modelo: Foi considerada a idealidade da mistura de gás do ar 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, M., e OKOS, M. R., 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; M_e 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.

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

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.

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; HAGHIGHI., 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; HAGHIGHI., 1994
Teor de umidade de equilíbrio	$M_e = \left[\frac{\ln(1 - Rh)}{-0,688(T - 227)} \right]^{1/2}$			FRANÇA; FORTES; HAGHIGHI., 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; HAGHIGHI., 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; HAGHIGHI., 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	ρs = 620 kg m ⁻³	ε = 0,44	BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978; FORTES; OKOS; BARRETT, 1981; FRANÇA; FORTES; HAGHIGHI., 1994
Coeficiente de transferência de calor ou convectivo para grão de milho	$h' = 31,5 W m^{-2}K^{-1}$			Bakker-Arkema et al. (1978); França et al. (1994).
Equação de secagem em camada fina para taxa de extração de umidade	$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$			-

Fonte: Autor

3.2- Eficiência de energia e exergia

Conforme (WARK, K., 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.

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, I., e SAHIN, A. Z., 2004 e FORTES, M., 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.

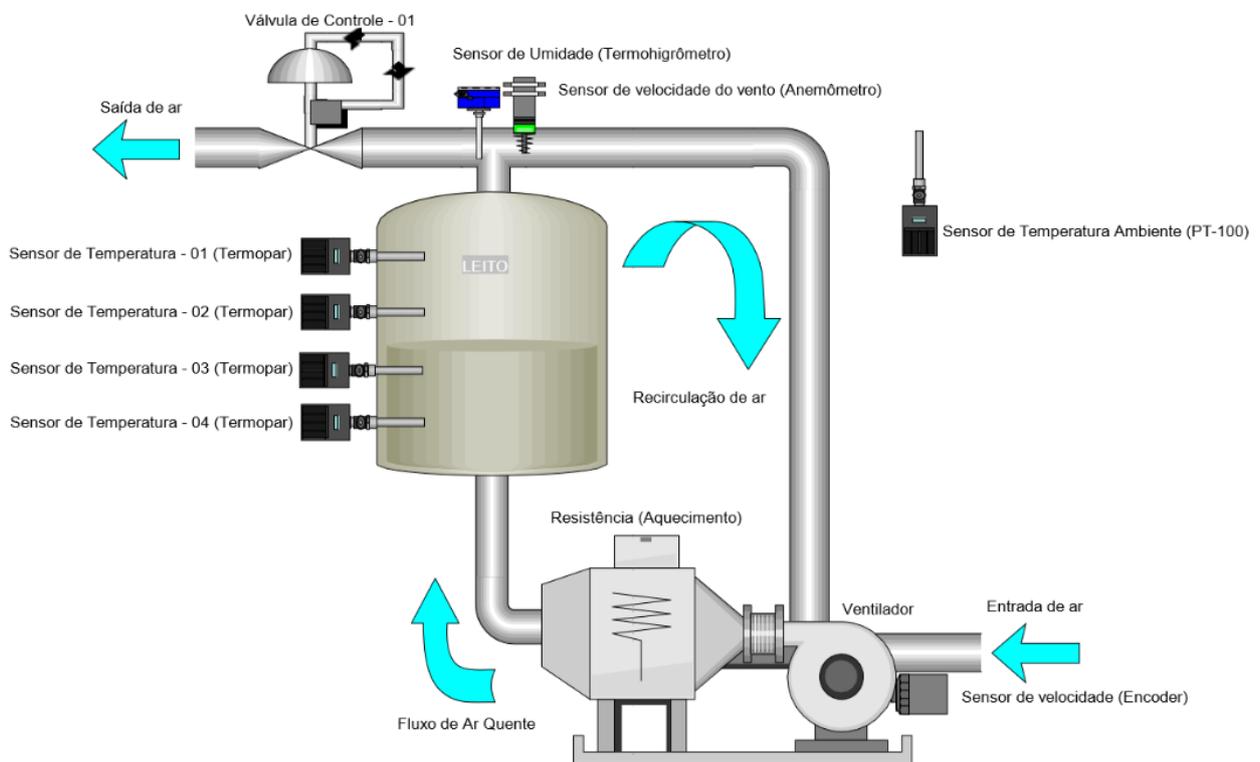
Conforme (AMEEN, A., e BARI, S., 2004) foi utilizado o conceito do fator de extração de umidade na análise de secagem através da bomba de calor. Sua definição foi estendida para avaliar o desempenho de secadores de grãos. A definição da taxa de extração de umidade, aqui denominada (MER), como a quantidade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

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

3.3- Modelagem de secagem de milho em leito fluidizado sob recirculação

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



Fonte: Autor

3.4- Modelagem Dinâmica de Sistemas

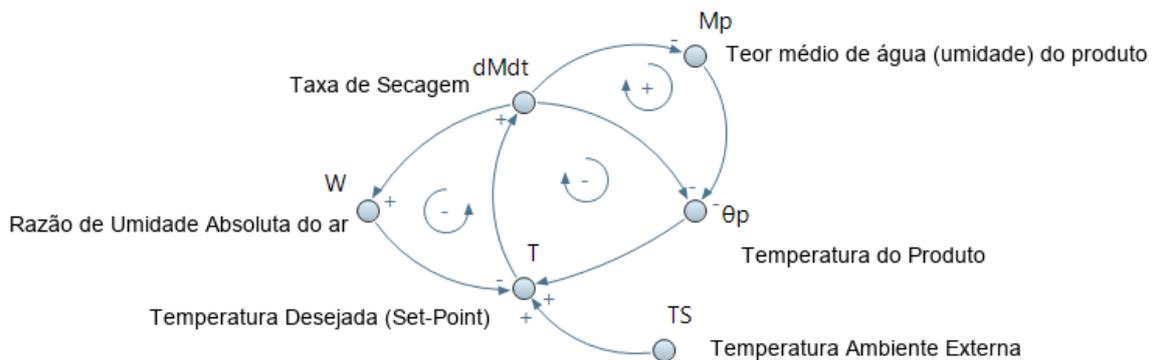
3.4.1- Diagrama causal do processo de secagem

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



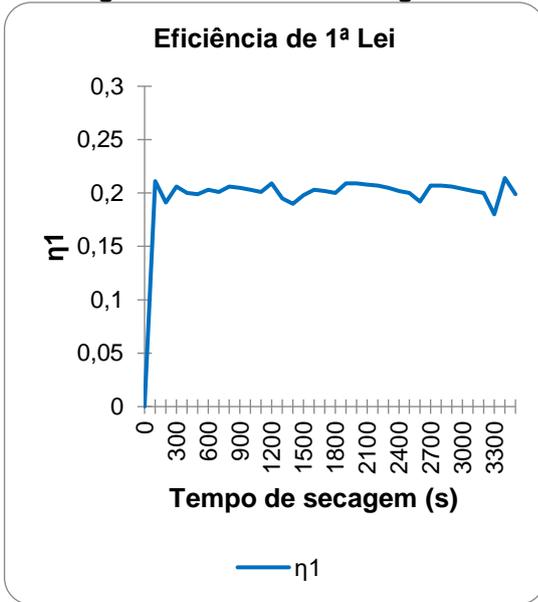
Fonte: Autor

4. Resultados

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

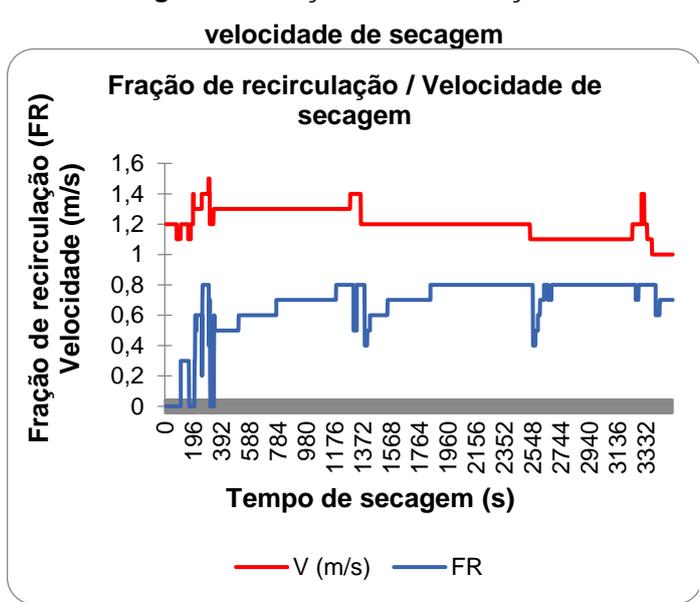
Objetivando controlar a estabilidade da eficiência energética mínima de 20%, foi variado a velocidade de secagem, a fração de recirculação do fluxo de ar. O valor de 20% de eficiência energética foi escolhido aleatoriamente, preocupando unicamente em estabelecer uma estratégia de controle para alcançar a estabilidade do sistema, durante todo o processo de secagem, até que seja alcançado a umidade de 12% dos grãos de milho. A Figura 3 mostra o controle da eficiência energética e a Figura 4 apresenta o controle feito na FR e na velocidade de secagem para alcançar a estabilidade.

Figura 3 – Eficiência energética



Fonte: Autor

Figura 4 – Fração de recirculação e velocidade de secagem



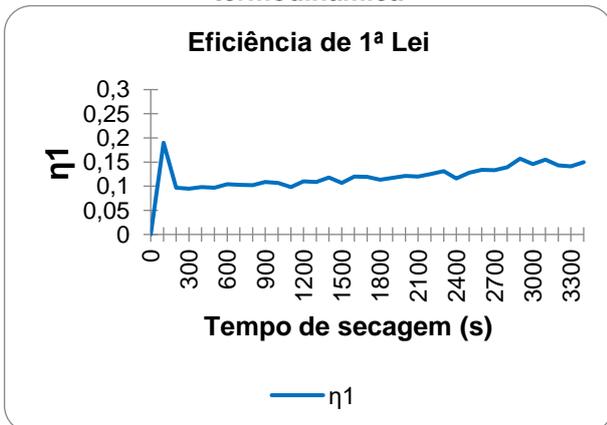
Fonte: Autor

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

Observa-se na Figura 5 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 7. A eficiência exergética do ar de secagem reduz gradativamente à medida que se extrai a umidade do grão e o ar vai saturando, Figura 6.

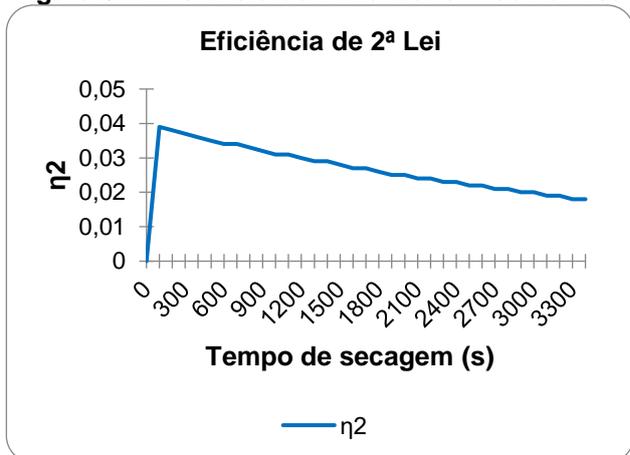
Avaliando a Figura 8, o comportamento da taxa de disponibilidade de fluxo de ar de exergia Ψ , foi observado que uma pequena variabilidade de 10% na taxa de recirculação do fluxo de ar Figura 7, provoca uma mudança abrupta na taxa de exergia Ψ e pequenas intercorrências na velocidade do ventilador de secagem, ocasionam suaves mudanças na taxa de exergia Ψ .

Figura 5 – Eficiência de 1ª Lei da termodinâmica



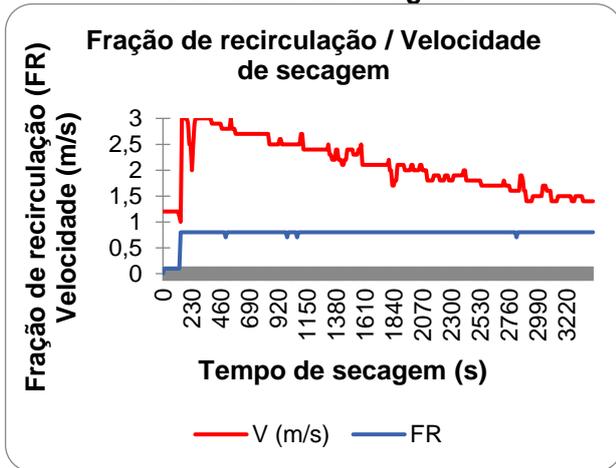
Fonte: Autor

Figura 6 – Eficiência de 2ª Lei da termodinâmica



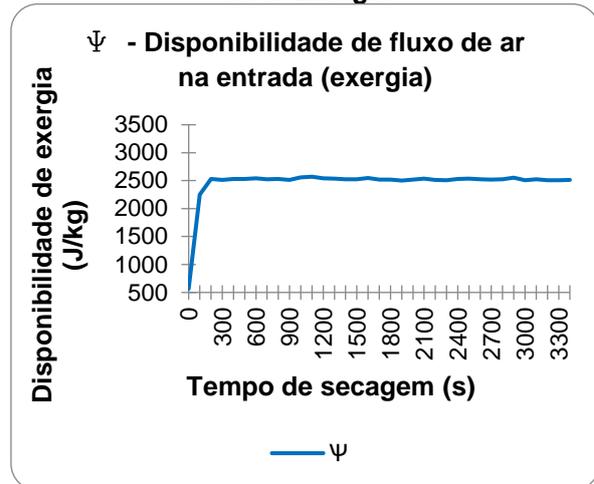
Fonte: Autor

Figura 7 – Fração de recirculação e velocidade de secagem



Fonte: Autor

Figura 8 – Disponibilidade de fluxo de ar Exergia



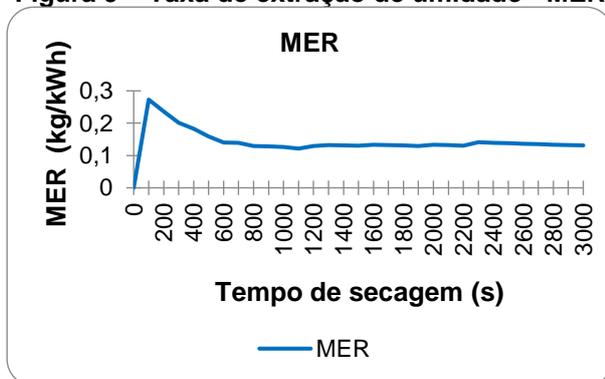
Fonte: Autor

4.3 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.

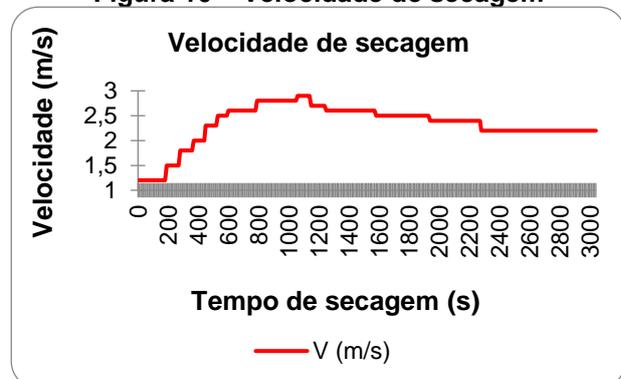
A velocidade de secagem Figura 10, mostra que os tempos do degrau de subida e descida são diferentes, ou seja, a dinâmica de controle não é constante e o atraso de transporte do controle da velocidade e resposta do processo de secagem é totalmente não linear. Essa não linearidade dificulta bastante o processo de obtenção de ganhos para alcançar a estabilidade do secador de grãos, e através da Figura 9, pode-se verificar que a estabilidade foi alcançada a partir de 600s de secagem.

Figura 9 – Taxa de extração de umidade - MER



Fonte: Autor

Figura 10 – Velocidade de secagem



Fonte: Autor

5. Conclusões

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 exérgica do processo de secagem. A estratégia de

controle a ser utilizada para atuar na válvula de controle, será através de monitoramento das eficiências energética, exergetica, 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.

Referências

AMANTEA, R.P., FORTES, M., FERREIRA, W. R., SANTOS, G.T. Energy and exergy efficiencies as design criteria for grain dryers, *Drying Technology*, 36:4, 491-507, 2018.

AMEEN, A., BARI, S., Investigation into the effectiveness of heat pump assisted clothes dryer for humid tropics. *Energy Conversion and Mgmt.*45: 1397–1405, 2004.

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, 2016.

BAKKER-ARKEMA, F.W, BROOK, R.C., LEREW, L.E. Cereal grain drying. In *Advances of Cereal Science and Technology*. Vol. II: American Association of Cereal Chemists, 1978.

BALBINO, G. Análise da dinâmica da qualidade dos grãos de milho durante a secagem em secadores de leito fluidizado: Uma abordagem por dinâmica de sistemas. Dissertação, Programa de Mestrado do Instituto de Educação Tecnológica, IETEC. Belo Horizonte, 2019.

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*, 2019.

CIL, B., TOPUZ, A. Fluidized bed drying of cor, bean and chickpea. *J. of Food Process Eng.* 33: 1079-1096, 2008.

CROSSON, P.; ANDERSON, J. R. Technologies for Meeting Future Global Demands for Food. Discussion Paper, v. 02, n. January, 2002.

DINCER, I., SAHIN, A. Z. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *Intl. J. of Heat and Mass Transfer.* 47: 645–652, 2004.

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 modeling of deep bed drying processes with a Simulation study of wheat air-recirculated fluidized-bed drying. In 14th Intl. Drying Symposium. A: 18-32, 2004.

FORTES, M; OKOS, M.R. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. *Transactions of the ASAE*, vol.24, n.3, pp.756-760, 1981.

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, New York. , pp. 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, p.109-125, 1981.

FORTES, M., FERREIRA, W. R. Second law analysis of drying: - modeling and simulation of fluidized bed grain drying. In 14th Intl. Drying Symposium. 301-308, 2004.

FRANÇA, A. S., FORTES, M., HAGHIGHI, K. Numerical simulation of intermitente and continuous deep-bed drying of biological materials. *Drying Tech.* 12: 1537-1560, 1994.

GARCIA, J. M. *Theory and practical exercises of system dynamics*. 2. ed. Barcelona: Independently

Published, 294 p., 2006.

HENDERSON, S.M., PABIS, S. Grain drying theory – I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Wrest Park, Silsol, Gedfor, vol.6, n.32, p.169-174, 1961.

HUKILL, W. V. Drying of grain. In: Cristensen, C.M Ed. *Storage of cereal grains and their products*. 2 ed. American Society of cereal and Chemists, p.481-508, 1974.

LUIKOV, A. V. *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. Oxford: Pergamon Press, 523p., 1966.

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*, vol.172, p.255-269, 2019.

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, *Transp. Porous Med*, Vol. 66(1-2), pp. 3–18, 2007.

MUJUMDAR, A. S., LAW, C. L. *Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing*, Food Bioprocess Tech., Vol. 3(6), pp. 843–852, 2010.

MUJUMDAR, A., Martynenko, A. Intelligent drying systems, *Drying Technology*, 38:10, 1245-1246, 2020, DOI: 10.1080/07373937.2019.1650452

OLIVEIRA, E. B. DE et al. O Desenvolvimento Sustentável e as Implicações da Produção Mais Limpa: um estudo de caso no setor moveleiro. *ConTexto*, v. 9, n. 16, p. 12, 2009.

PAGE, C. Factors influencing the maximum rates of drying shelled corn in layer. Thesis (Agricultural Engineering Msc). Agricultural Engineering Department. Ind. Purdue University, West Lafayette, 1949.

PHILIP, J. R; DE VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys.* Vol. 38, p.222-231, 1957.

STERMAN, J. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 982 p., 2000.

THOMPSON, T. L. *Predicted Performances and Optimal Designs of Convection Grain Dryers*. PhD Thesis, 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.

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*, 16:6, 931-966, 1998 DOI: 10.1080/07373939808917449

WARK, K., *Advanced Thermodynamics for Engineers*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995.

ZARE, D., CHEN, G. *Advanced Thermodynamics for Engineers*. , New York, NY: McGraw-Hill., 2009.

ZARE, D., CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agric.* 68: 78–87, 2009.

ZOHRABI, S., AGHBASHLOC, M., SEIIEDLOU, 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*, Volume 257, 2020.

ZOHRABI, S., SADEGH, S., SEIIEDLOU, AGHBASHLO, SCAAR, H., MELLMANN, J. Enhancing the exergetic performance of a pilot-scale convective dryer by exhaust air recirculation, *Drying Technology*, 38:4, 518-533, 2020, DOI: 10.1080/07373937.2019.1587617