

SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM CAMADA DELGADA

R. O. DEFENDI¹, R. O. da SILVA¹, P. R. PARAÍSO¹ e L. M. de M. JORGE¹

¹ Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: rafael.defendi@hotmail.com / lmmj@deq.uem.br

RESUMO – A soja é um dos principais grãos produzidos e exportados pelo Brasil. O processo de secagem de soja se faz necessário para garantir as condições ideais de armazenamento deste produto. Uma alternativa para reduzir os gastos durante este processo é o uso da operação periódica, onde se modulam as condições do ar de secagem como sua temperatura ou vazão em dada frequência e amplitude. Observa-se em literatura que esta modulação leva a uma melhora no desempenho dos secadores em relação à operação convencional realizada com temperatura e vazão constantes. Neste contexto, efetuaram-se a modelagem, a simulação e a análise das duas formas de secagem: a convencional e a periódica, destacando-se as vantagens e limitações desta nova modalidade de secagem de soja. As simulações foram realizadas em condições de mesmo gasto energético para ambas as operações por meio de um modelo matemático baseado em dados cinéticos de secagem de soja obtidos em camada delgada.

1. INTRODUÇÃO

O armazenamento de grãos de soja é um processo necessário, uma vez que sua produção é periódica e as demandas das indústrias e do comércio são ininterruptas (Puzzi, 2000). Uma colheita realizada em dois meses pode ser consumida durante um ou mais anos. Contudo, muitos fatores podem prejudicar a qualidade destes grãos enquanto eles estão armazenados. De acordo com Puzzi (2000), estes fatores podem ser um agente físico (temperatura, teor de umidade, danos mecânicos) ou um agente biológico (microorganismos, insetos, fungos). Este autor ainda ressalta que é importante controlar e minimizar os efeitos provenientes destes fatores para garantir a qualidade e a composição química (carboidratos, gorduras, proteínas, fibras, minerais e vitaminas) destes grãos.

Observa-se que o teor de umidade é o fator predominante que controla a qualidade do grão estocado (Puzzi, 2000). Em baixos valores de umidade, as reações enzimáticas são reduzidas como também as taxas de respiração inerentes ao metabolismo do grão que podem levar o material à podridão. O teor de umidade pode ser controlado pelo processo de secagem. Neste contexto, é importante secar grãos colhidos até níveis seguros de umidade para se alcançar um armazenamento ideal sem riscos de deterioração dos grãos (Puzzi, 2000; Martins *et al.*, 2002). O nível seguro de teor de umidade para se armazenar a soja durante um ano é de 12% em base úmida e para períodos superiores a um ano é de 11% em base úmida (Lazzari, 1993).

Muitos produtores brasileiros usam armazéns para estocar grãos e utilizam as condições naturais do ambiente para secar os grãos enquanto estes ainda estão na lavoura (Martins *et al.*, 2002). Embora

as condições do clima brasileiro sejam favoráveis, esta prática de secagem natural não tem sido eficiente para evitar perdas tanto quantitativas quanto qualitativas do material armazenado (Martins *et al.*, 2002). Por outro lado, a secagem forçada com ar quente pode garantir as condições ideais de armazenamento, possibilitando que o grão chegue a níveis de umidade satisfatórios para evitar estas perdas. Embora o processo de secagem com ar quente seja muito utilizado pelas indústrias de grãos, este processo encarece os custos de produção devido a grande demanda de energia necessária para movimentar e aquecer o ar de secagem (Biagi *et al.*, 2002).

Neste contexto, este trabalho visa estudar uma alternativa para reduzir estes custos por meio da operação periódica, a qual pode potencializar os transportes de massa e de energia envolvidos no processo proporcionando uma redução no consumo energético. A operação periódica consiste numa contínua modulação das condições operacionais (como a temperatura e a velocidade do ar) numa específica frequência e amplitude. Como as taxas de secagem não são linearmente dependentes da temperatura do ar, a operação periódica pode alcançar uma eficiência maior em comparação a operação convencional (realizada com temperatura e vazão do ar constantes) em processos em que ambas as operações são tomadas com o mesmo gasto energético e tempo de secagem.

O estudo da secagem periódica de grãos é recente e há poucas referências sobre este assunto atualmente. Contudo, alguns autores estudaram a operação periódica em reatores químicos onde observaram que a modulação das condições dos reagentes pode melhorar o rendimento do reator (Silveston e Hanika, 2004; Lange *et al.*, 1999; Rouge *et al.*, 2001; Tukac *et al.*, 2003; Tukac *et al.*, 2007). De acordo com Silveston e Hanika (2004), a operação periódica em reatores trifásicos pode mudar a seletividade e aumentar tanto a conversão quanto o rendimento. Estes autores ainda acrescentam que as taxas de reação são potencializadas sob a periódica interrupção do fluxo para leitos gotejantes.

Lange *et al.* (1999) estudaram a operação periódica num reator de leito gotejante. Eles observaram que houve um aumento no tempo médio de conversão de α -metilestireno para reações conduzidas com modulação periódica do fluxo dos reagentes dependendo dos parâmetros envolvidos na operação. Foi observado que a operação periódica proporcionou um melhor controle e um aumento no rendimento do reator.

Rouge *et al.* (2001) estudaram a desidratação do isopropanol em propeno em operação periódica. Os resultados deste trabalho apontaram que o rendimento do reator em operação periódica aumentou em comparação com o rendimento obtido em operação realizada com as condições em regime permanente.

Outro estudo da operação periódica em reatores de leito gotejante foi feita por Tukac *et al.* (2003). Neste trabalho, foi estudada a remoção de fenol de soluções aquosas a partir da oxidação num catalisador de carvão ativado em operação periódica. Foi possível atingir uma conversão de fenol 10% maior em comparação com as condições em regime permanente. Tukac *et al.* (2007) estudaram a hidrogenação do estireno em reatores de leito gotejante operando tanto periodicamente com a modulação da taxa de alimentação da mistura de reação quanto em regime permanente. Neste estudo, observou-se que a operação periódica proporcionou um aumento na produtividade em 30% da

hidrogenação do estireno em comparação com a operação em regime permanente.

Na secagem de grãos, Romero et al. (2010) estudaram a secagem periódica de soja em leito profundo por meio de um modelo heterogêneo a duas fases. Neste estudo, estes autores observaram que a operação periódica pode melhorar o rendimento do secador e também reduzir o consumo energético em comparação à operação convencional.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi efetuar a modelagem, a simulação e a análise das duas formas de secagem: a convencional e a periódica, destacando-se as vantagens e limitações desta nova modalidade na secagem de soja em camada delgada. As simulações foram realizadas em condições de mesmo gasto energético e mesmo tempo de secagem para ambas as operações por meio de um modelo matemático baseado em dados cinéticos de secagem de soja obtidos em camada delgada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelo Matemático

O modelo matemático está baseado num balanço de massa relacionado à quantidade de água que evapora em um grão ao longo do tempo de secagem. O acúmulo de água dentro do grão é igual a quantidade água que é evaporada com o tempo:

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{K_s.A}{m_s} \cdot (M - M_e) \quad (1)$$

Onde K_s é o coeficiente global de transferência de massa, A é a área superficial do grão, M é o teor de umidade da soja em base seca, M_e é o teor de umidade da soja de equilíbrio, m_s é a massa do grão de soja totalmente seco e t é o tempo. Como o valor da área superficial do grão é difícil de ser estimado, considerou-se a seguinte relação:

$$K = \frac{K_s.A}{m_s} \quad (2)$$

Onde K é um coeficiente global de transferência de massa relativo dado em s^{-1} . Assim, o modelo matemático para secagem de soja em camada delgada resulta em:

$$\frac{dM}{dt} = -K \cdot (M - M_e) \quad (3)$$

Este modelo é uma analogia a Lei de Newton do Resfriamento e este já havia sido proposto por Lewis (1921). Esta equação também foi usada por outros autores na secagem de grãos em camada delgada (Elias et al., 2002). De acordo com Henderson e Perry (1955), esta equação descreve a taxa de remoção de umidade durante o período onde as taxas de secagem são decrescentes. Neste trabalho, este modelo foi usado para simular a operação periódica e convencional em camada delgada. Para isso, uma equação para estimativa de K foi ajustada conforme segue a metodologia abaixo:

2.2. Materiais e Procedimento Experimental

Os equipamentos e materiais utilizados nos experimentos foram uma bandeja quadrada de 42 cm de lado, uma válvula borboleta (usada para regular a velocidade do ar), um ventilador, dois resistores de potência 3000 W, um resistor de potência 2500 W (ligado a um regulador de tensão – VARIAC), um resistor de potência 2200 W, tubulação para o ar isolada com lã, uma caixa de suporte para a bandeja também isolada com lã, um psicrômetro digital, um termopar tipo K, grãos de soja tipo EMBRAPA 48, uma balança, uma peneira (Tyler 9 – abertura de 2 mm) de 20 cm de diâmetro, uma estufa, um anemômetro digital e uma pedaço de papelão de mesma dimensão da bandeja. Um furo circular de mesma dimensão da peneira foi feito no centro do papelão.

O ar é proveniente do ambiente e segue até a peneira por meio do tubo que liga o ventilador e a mesa que dá suporte à bandeja. As resistências dentro do tubo são usadas para aquecer o ar no processo de secagem. A soja é posta dentro da peneira alocada no centro do papelão disposto sobre a bandeja a fim de que o fluxo de ar passe apenas dentro da peneira. Este sistema está esquematizado na Figura 1.

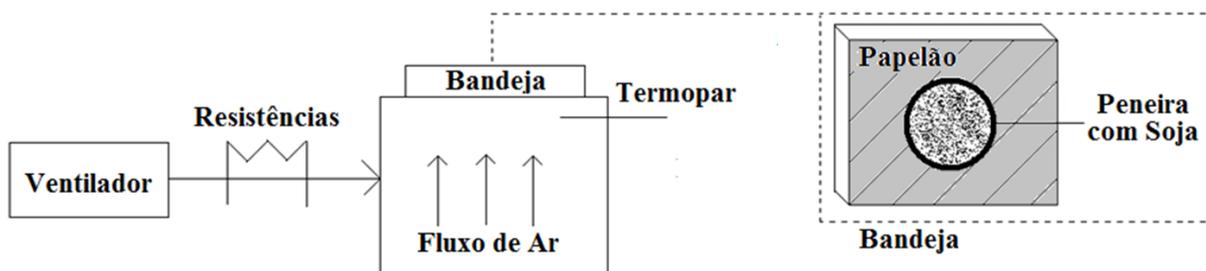


Figura 1 – Secador de Bandeja

Primeiramente, ligam-se o ventilador e as resistências, ajustando a velocidade e a temperatura do ar na peneira nas condições desejadas. Em seguida, mede-se a massa da peneira e com o psicrômetro mede-se a umidade do ar de secagem. Antes de se iniciar o processo de secagem, pesam-se quatro amostras de soja que são levadas em estufa a 105 °C por 24 horas para se determinar o teor de umidade inicial. Cobre-se a superfície da peneira com uma monocamada de soja e mede-se a massa do sistema peneira mais soja. Em seguida, coloca-se a peneira no centro do papelão perfurado e aciona-se simultaneamente o cronômetro, dando início a secagem. A massa do sistema peneira mais soja é medida durante a secagem realizada por 2 horas. Após o término da secagem, quatro amostras da soja seca são pesadas e levadas em estufa em 105 °C por 24 horas. Os ensaios foram realizados variando a temperatura do ar de secagem desde 30 °C até 60 °C, a velocidade do ar de 0,6 a 2,5 m/s e o teor inicial de umidade da soja em base seca de 0,13 a 0,23.

2.3. Ajuste dos Parâmetros

Uma expressão para K foi ajustada em base nos dados experimentais conforme segue abaixo:

$$K = \frac{A.M^2 + B.M + C}{M_0 - M + D} \quad (4)$$

Onde A, B, C e D são os parâmetros do modelo e M_0 é o teor de umidade inicial da soja. Para cada parâmetro, foi tomada a influência da temperatura do ar como uma dependência linear como mostra o exemplo abaixo para o parâmetro A:

$$A = \alpha_A + \beta_A \cdot T \quad (5)$$

Onde T é a temperatura do ar em °C e α e β são os parâmetros do modelo. A umidade de equilíbrio da soja foi calculada por meio da expressão apresentada por Silva (2000), que para umidades relativas do ar menor que 55% é representada por:

$$Me = \frac{0,0396 \cdot UR^{0,492}}{\ln [T(^{\circ}F)]} \quad (6)$$

Onde UR é a umidade relativa do ar e T é dada em °F. Para umidades relativas do ar superior a 55%, o valor da umidade de equilíbrio da soja pode ser estimado por (Silva, 2000):

$$Me = \frac{0,0621 \cdot e^{0,0274 \cdot UR}}{\ln [T(^{\circ}F)]} \quad (7)$$

Os valores dos parâmetros foram ajustados minimizando a seguinte função objetivo:

$$\phi = \sum \left(\frac{\sqrt{(M_{exp} - M_{mod})^2}}{M_{exp}} \right) \cdot \frac{1}{n} \quad (8)$$

Onde M_{exp} é o valor do teor de umidade da soja experimental, M_{mod} é o valor do teor de umidade da soja calculado pelo modelo e n é o número de pontos avaliados.

2.3. Simulação da Operação Periódica e Convencional

A equação do modelo (Equação 3) foi resolvida numericamente pelo método das diferenças finitas para frente. Nas simulações em operação periódica, foi modulada a temperatura do ar num formato senoidal como apresentado na Figura 2. Para cada simulação em operação periódica, uma simulação em operação convencional foi realizada com a temperatura do ar mantida constante no valor igual à média da temperatura do ar da respectiva operação periódica para garantir que ambas as operações fossem simuladas com o mesmo consumo energético referente ao aquecimento do ar. A expressão usada para o cálculo desse consumo energético está apresentada abaixo:

$$E = Gg \cdot \int_0^t cp_{ar} \cdot T \cdot dt \quad (9)$$

Onde E é o consumo energético, Gg é a vazão mássica de ar e cp_{ar} é o calor específico do ar.

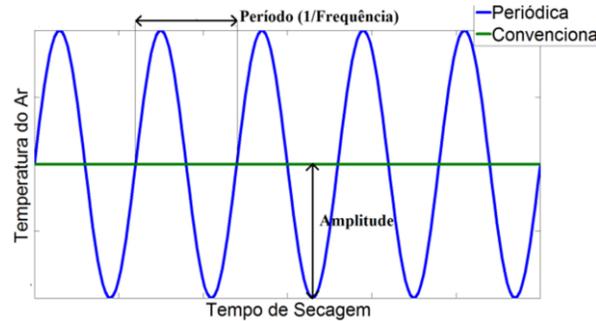


Figura 2 – Modulação da Temperatura do Ar

A equação usada para modular a temperatura do ar em operação periódica foi:

$$T_p = Amp \cdot \text{sen}(fr \cdot t \cdot 2\pi) + T_c \quad (10)$$

Onde T_p é a temperatura do ar em operação periódica, Amp é a amplitude em $^{\circ}\text{C}$, fr é a frequência em s^{-1} e T_c é a temperatura do ar em operação convencional. As simulações foram realizadas para períodos de 6 a 60 minutos e amplitudes de 5 a 15 $^{\circ}\text{C}$. Todas as simulações foram conduzidas com um tempo de secagem de 2 horas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O valor da função objetivo (Equação 8) minimizada resultou em 0,0274. Os valores dos parâmetros ajustados estão apresentados a seguir:

$$A = 3,818 \cdot 10^{-4} - 1,258 \cdot 10^{-5} \cdot T \quad (11a)$$

$$B = 9,274 \cdot 10^{-7} + 7,282 \cdot 10^{-6} \cdot T \quad (11b)$$

$$C = -1,065 \cdot 10^{-5} - 4,840 \cdot 10^{-7} \cdot T \quad (11c)$$

$$D = 3,903 \cdot 10^{-2} - 5,001 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (11d)$$

As figuras 3 e 4 apresentam os perfis de umidade da soja durante a secagem convencional e periódica respectivamente para diferentes valores de amplitude e de período referentes a modulação da temperatura do ar. Observa-se desses resultados que mesmo em situações com mesmo gasto energético, a operação periódica pode ser mais vantajosa, pois o teor de umidade da soja é menor nesta operação no final da secagem indicando uma melhora no rendimento do secador. Estes resultados apontam que as taxas de secagem foram maiores em operação periódica, pois foi maior a quantidade de água evaporada. Da Figura 3, é possível verificar que quanto maior o valor da amplitude da modulação da temperatura do ar, maiores são as taxas de secagem indicando que a operação periódica é mais vantajosa. Por outro lado, valores baixos de amplitude apontam que o comportamento de ambas as operações, periódica e convencional, são similares. Quanto maior a amplitude, maiores são os picos da temperatura do ar, o que permite que se desloque o valor da

umidade de equilíbrio da soja a níveis menores. Enquanto isso, a Figura 4 aponta que diferentes períodos não aparentam interferir no valor da umidade de equilíbrio. Contudo, observa-se que quanto maior o valor do período, mais rapidamente o equilíbrio é atingido.

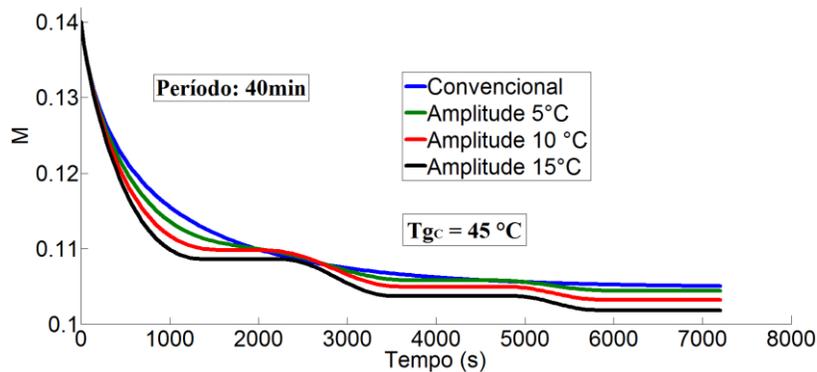


Figura 3 – Perfil de Umidade da Soja Para Diferentes Amplitudes

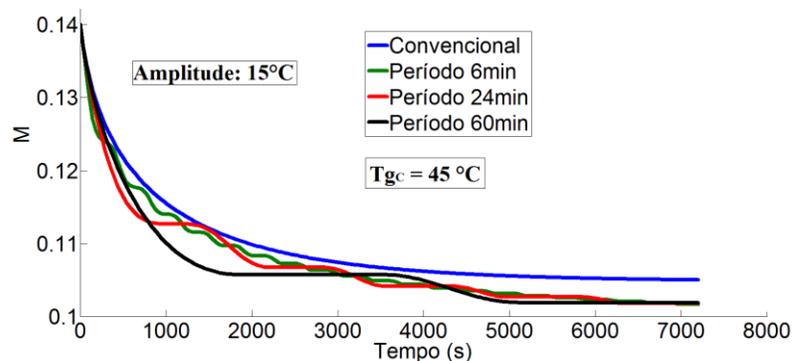


Figura 4 – Perfil de Umidade da Soja Para Diferentes Períodos

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, verificou-se que a modulação da temperatura do ar na secagem de soja pode aumentar as taxas de secagem em comparação à secagem com temperatura do ar constante em casos em que ambas as operações são realizadas com o mesmo consumo energético. Foi possível observar que quanto maior a amplitude da modulação da temperatura, maior é a quantidade de água evaporada do processo. Estes resultados apontam que para se atingir um determinado valor de teor de umidade seguro para armazenamento da soja, a operação periódica pode demandar menos energia que a convencional.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – e com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de

Nível Superior – CAPES – Brasil.

6. REFERÊNCIAS

- BIAGI, J. D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M. C. Secagem de grãos para unidades centrais de armazenamento. In *Armazenagem de Grãos*. LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M.; Campinas: Instituto Bio Geneziz, 2002; 289–307.
- ELIAS, R. N.; BARBOSA, A. L. S.; MANCINI, M. C. Secagem de Grão de Bico em Leito Fixo. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*, v. 21 (1), p. 113-119, 2002.
- HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. *Agricultural process engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1955.
- LANGE, R.; GUTSCHE, R.; HANIKA, J. Forced Periodic Operation of a Trickle-Bed Reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 54, p. 2569-2573, 1999.
- LAZZARI, F. A. Umidade, fungos e micotoxinas na qualidade de sementes, grãos e rações. Curitiba: Ed. Do Autor, 1993.
- LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 13, p. 427-432, 1921.
- MARTINS, R. M.; FRANCO, J. B. da R.; OLIVEIRA, A. V.; ANGONESE, C. Armazéns para propriedade familiar. In *Armazenagem de Grãos*. LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M.; Campinas: Instituto Bio Geneziz, 2002; 117–155.
- PUZZI, D. *Abastecimento e Armazenagem de Grãos*. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000.
- ROMERO, J. A. da S.; OMOTO, E. S.; CONCEIÇÃO, W. A. dos S.; COUTINHO, M. R.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Estudo da secagem de soja em operação periódica. COBEQ XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Foz do Iguaçu, Brasil, Setembro, 2010.
- ROUGE, A.; SPOETZL, B.; GEBAUER, K.; SCHENK, R.; RENKEN, A. Microchannel reactors for fast periodic operation: the catalytic dehydration of isopropanol. *Chemical Engineering Science*, v. 56, p. 1419-1427, 2001.
- SILVA, J. S.; BERBERT, P. A.; AFONSO, A. D. L.; RUFATO, S. Qualidade dos Grãos. In *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. SILVA, J. S. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000; 63–105.
- SILVESTON, P. L.; HANIKA, J. Periodic Operation of Three-Phase Catalytic Reactors. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 82, p. 1105-1142, 2004.
- TUKAC, V.; HANIKA, J.; CHYBA, V. Periodic state of wet oxidation in trickle-bed reactor. *Catalysis Today*, v. 79-80, p. 427–431, 2003.
- TUKAC, V.; SIMICKOVÁ, M.; CHYBA, V.; LEDERER, J.; KOLENA, J.; HANIKA, J.; JIRICNY, V.; STANEK, V.; STAVÁREK, P. The behavior of pilot trickle-bed reactor under periodic operation. *Chemical Engineering Science*, v. 62, p. 4891–4895, 2007.