

Análise energética preliminar da secagem industrial do farelo de soja

Paulo Roberto Paraíso*, Cid Marcos Gonçalves Andrade e Nehemias Pereira Curvelo

Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. tel.: (55 44) 3261-4752, fax: (55 44) 3263-3440, e-mail: paulo@deq.uem.br

RESUMO. O farelo de soja é um produto importante do agronegócio brasileiro. Uma das etapas do processo de produção do farelo é a secagem, a qual é grande consumidora de energia. O estudo da secagem do farelo visando a redução do consumo de energia é vital para a competitividade deste produto. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático, em regime estacionário, do processo de secagem do farelo de soja a fim de avaliar o consumo energético preliminar e a eficiência do processo. O modelo é baseado em balanços de massa e de energia e em equações de transferência de calor. A validação do modelo é confirmada a partir de dados operacionais de um secador rotativo de contato indireto utilizado na indústria da Cooperativa Agrícola Mourãoense (Coamo). Os resultados obtidos mostram que a melhor temperatura do vapor de aquecimento é em torno de 120°C.

Palavras-chave: secagem, farelo de soja, modelagem, secador rotativo com aquecimento indireto, avaliação energética.

ABSTRACT. Preliminary energetic analysis of soybean meal industrial drying.

The soybean meal is an important product of the Brazilian agribusiness. One of the steps of the meal production process is drying, which is a large energy consumer. The meal drying study to reduce the energy consumption is vital to the competitiveness of this product. Thus, the aim of this work is to develop a mathematic modeling, into a stationary regimen of a drying soybean meal process, to evaluate the preliminar energetic consumption and the process efficiency. The model is based on mass and energy balance and heat transfer equations. The validity of the model is confirmed with operational data from an indirect rotary dryer used by the *Cooperativa Agrícola Mourãoense* (Mourãoense Agricultural Cooperative). The final results show that the best steam temperature is around 120°C.

Key words: drying, soybean meal, modeling, indirect rotary dryer, energy evaluation.

Introdução

O farelo de soja é uma importante fonte de proteína e se destaca na pauta das exportações brasileiras. Para ser obtido, o farelo passa por uma série de operações consumidoras de energia, com destaque para a operação de secagem de farelo, cujo consumo de vapor está em torno de 80 kg por tonelada de soja processada, conforme Jongeneelen (1976). A redução deste consumo de vapor e, conseqüentemente, a redução de custos são fundamentais para a manutenção da competitividade do farelo de soja no mercado internacional.

A operação de secagem do farelo de soja é realizada em um secador com aquecimento indireto cujo fluido de aquecimento é o vapor d'água.

O secador rotativo com aquecimento indireto tem aplicações importantes no meio industrial e a

preocupação com a sua eficiência energética e a qualidade dos produtos gerados têm aumentado nos últimos tempos. Uma revisão da literatura mostra que, somente nos últimos anos, surgiram trabalhos sobre o tema, como o de Shene e Bravo (1998), que utilizaram modelos provenientes de balanços de massa e energia para obtenção de perfis de temperatura e umidade do sólido ao longo desse tipo de secador; Canales *et al.* (2001) apresentam um modelo simplificado, em regime permanente, para simular a secagem da farinha de peixe, considerando que a secagem ocorre à taxa constante, e Sartori (2001) desenvolveu um modelo, em regime transiente, visando à sua utilização em controle preditivo.

A avaliação energética do secador rotativo com aquecimento indireto foi pouco estudada, ocorrendo apenas estudos mais gerais sobre secagem, como em Strumillo *et al.* (1987). Assim, o

objetivo deste trabalho é fazer uma análise energética preliminar desse secador, em regime estacionário, a fim de prever o consumo de vapor utilizado e o rendimento da operação de secagem do farelo de soja.

Neste trabalho, desenvolve-se um modelo, em regime permanente, baseado em balanços de massa e energia e em equações empíricas de transferência de calor a fim de avaliar preliminarmente o consumo e o rendimento da operação na secagem do farelo de soja que ocorre com taxa decrescente, como mostrou Meira *et al.* (2003).

A solução numérica deste modelo foi obtida a partir do algoritmo de Runge-Kutta e validada com os dados experimentais do secador de farelo de soja da Coamo (Cooperativa Agrícola Mourãoense).

Material e métodos

O secador

O secador típico utilizado nas indústrias da região noroeste do Paraná é do tipo rotativo com aquecimento indireto, cujo esquema é mostrado na Figura 1.

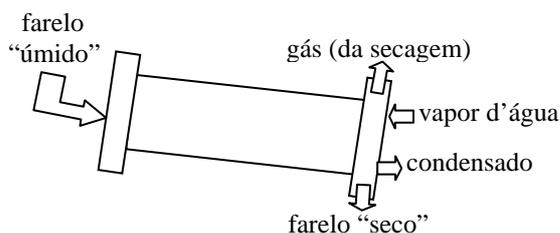


Figura 1. Esquema do secador rotativo com aquecimento indireto.

Esse secador apresenta uma carcaça cilíndrica levemente inclinada para facilitar o movimento do sólido. O farelo “úmido” proveniente da operação de dessolventização/tostagem é alimentado, por meio de roscas, em uma das extremidades do secador e, após a secagem, o farelo “seco” é descarregado pela outra extremidade. O sistema de aquecimento é feito com vapor d’água que circula em tubos dispostos longitudinalmente no interior do secador. A fase gasosa é formada pelo vapor d’água e uma pequena quantidade de ar que entra no secador nas zonas de carga e descarga. Esse gás formado na secagem do farelo é arrastado para a atmosfera por um sistema de exaustão.

A secagem do farelo de soja na Coamo se realiza em um secador com 3,0 m de diâmetro, 18,0 m de comprimento, inclinação de 0,04 m/m e rotação de 6 rpm. O vapor de aquecimento entra saturado a uma pressão de 3,5 kgf/cm², passa por um conjunto

de 96 tubos de 0,076 m de diâmetro interno e sai na forma de condensado. Além disso, os dados operacionais coletados para a validação do modelo proposto são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados operacionais do secador.

Dados operacionais		
Discriminação	símbolo	valor
Vazão mássica de farelo	F_s	28380 kg/h
Umidade do farelo na entrada	X_i	0,24 kgH ₂ O/kgfarelo seco
Umidade do farelo na saída	X_f	0,16 kgH ₂ O/kgfarelo seco
Temperatura do vapor de aquecimento	T_p	140°C
Temperatura do farelo na entrada	T_i	100°C

Modelo matemático do processo de secagem

O desenvolvimento de modelos que descrevem a operação de secagem depende dos fenômenos de transferência considerados, das condições operacionais do tipo de material e do tipo de secador envolvidos. O modelo aqui proposto para a secagem do farelo de soja será o modelo denominado de duas fases e as seguintes hipóteses foram adotadas: a) o escoamento do farelo é unidimensional; b) os coeficientes de transferência de massa e calor ao longo do secador são constantes; c) considera-se apenas a transferência de calor dos tubos de vapor para o farelo; d) a difusão de umidade no sólido na direção axial é desprezível; e) a transferência de calor por radiação é desprezível; f) a fase sólida é homogênea; g) o gradiente de pressão é desprezível no meio poroso; h) as capacidades caloríficas são constantes; i) as velocidades axiais do gás e do sólido são constantes; j) a temperatura e a umidade das fases sólida e gasosa são funções somente da coordenada axial.

A seguir, apresentam-se o modelo matemático com as hipóteses mencionadas e o esquema do elemento de volume do secador. (Figura 2).

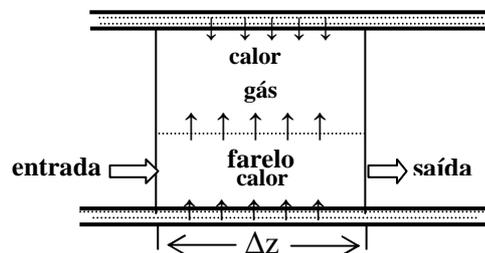


Figura 2. Elemento diferencial do secador na direção z.

O balanço de massa em regime permanente da umidade do sólido em um elemento de volume do secador rotativo apresenta-se da seguinte forma:

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{R}{v_s} \quad (1)$$

sendo R calculada através da seguinte equação:
 $R = K(X - X_e)$ (2)

Os valores da taxa de secagem (R) para o farelo de soja são decrescentes como mostrado experimentalmente por Meira *et al.* (2003) e, a partir dos dados experimentais obtidos neste trabalho, obteve-se o valor do coeficiente médio da taxa de secagem, $K = 0,0025 \text{ s}^{-1}$.

O balanço de energia no secador é realizado na fase sólida, em que se considera que o sólido recebe calor sensível da parede dos tubos ao longo do secador e cede calor latente de vaporização da água na secagem do farelo. A equação que representa esse balanço é a seguinte:

$$v_s c_s \frac{dT_s}{dz} = \frac{h_{c1} A_s}{G_s} (T_s - T_p) - \lambda R \quad (3)$$

A equação (3) apresenta o coeficiente de transferência de calor h_{c1} que necessita ser definido e estimado. O coeficiente h_{c1} se refere ao coeficiente do processo de transferência de calor do vapor no tubo para o sólido. Além disso, considerando que as partículas sejam esféricas em contato com uma parede isotérmica, este coeficiente pode ser estimado pela equação de Whitaker (1972):

$$Nu = 2 + (0,4 Re^{1/2} + Re^{2/3}) Pr^{0,4} \quad (4)$$

sendo

$$Nu = h_{c1} d_p / k_v \quad (5)$$

$$Re = d_p v_p \rho_v / \mu_v \quad (6)$$

$$Pr = c_g \mu_v / k_v \quad (7)$$

Nas equações (5), (6) e (7), o diâmetro da partícula, d_p , a massa específica do gás de secagem, ρ_v , e a viscosidade do gás de secagem, μ_v , são valores constantes que podem ser obtidos da literatura. No entanto a velocidade terminal, v_t , da partícula de farelo que cai durante o movimento giratório do secador depende da faixa em que se situa o Re e o Pr . Ou seja, $3,5 < Re < 76000$ e $0,71 < Pr < 380$. A velocidade terminal pode ser estimada através da seguinte equação:

$$v_t = \sqrt{\frac{4d_p g(\rho_s - \rho_v)}{3C_D \rho_v}} \quad (8)$$

sendo que o coeficiente C_D pode ser determinado, para uma faixa específica do Re , através de um processo iterativo proposto por Cutlip e Shachan (1999).

A área superficial do farelo, A_s , é a área de troca térmica e pode ser dada por:

$$A_s = \frac{6}{\Psi_p d_p} f \quad (9)$$

sendo f a fração volumétrica que é definida como relação entre o volume de farelo e o volume do secador e Ψ_p , a esfericidade da partícula que pode ser estimada conforme Geankoplis (1993):

$$\Psi_p = \frac{1}{10^{1,82(1-\varepsilon)}} \quad (10)$$

Como já foi mencionado, o secador industrial de farelo de soja é giratório e tem o eixo inclinado em relação à horizontal. Além disso, esse secador possui, no seu interior, dispositivos que facilitam a movimentação do farelo e seu contato com o gás. Essas características influenciam o movimento e, conseqüentemente, o tempo de residência do material no interior do secador.

A estimativa do tempo de residência para secadores rotativos pode ser feita utilizando a expressão recomendada por Perry e Chilton (1973):

$$t_R = \frac{0,19L}{N^{0,9} DS} \quad (11)$$

A partir de t_R , pode-se calcular a velocidade do sólido v_s da seguinte forma:

$$v_s = \frac{L}{t_R} \quad (12)$$

Uma análise energética preliminar do secador de farelo de soja será feita, neste trabalho, utilizando o fator de eficiência, e_f , que é a relação entre a energia usada para a secagem e a energia total fornecida pelo vapor ao se condensar no interior dos tubos.

A energia usada na evaporação da umidade do farelo, E_s , é dada por:

$$E_s = G_s \lambda R \quad (13)$$

e a energia total consumida, E_T :

$$E_T = G_s v_s c_s \frac{dT_s}{dz} + G_s \lambda R \quad (14)$$

Assim, o fator de eficiência, e_f ,

$$e_f = \frac{\lambda R}{v_s c_s \frac{dT_s}{dz} + \lambda R} \quad (15)$$

Resultados

Validação do Modelo

A validação do modelo foi realizada comparando-se os resultados obtidos nas simulações do modelo com os dados operacionais do secador de farelo de soja da indústria da Coamo.

Nas Figuras 3 e 4, podem-se observar os gráficos que representam os perfis de umidade e temperatura ao longo do secador.

O parâmetro para a validação do modelo é a umidade. Verifica-se que o valor de saída da umidade apresentado no gráfico da Figura 3 se apresenta próximo ao valor operacional da umidade obtido na planta da Coamo, conforme mostra a Tabela 1.

A Figura 4 mostra uma tendência de aumento na temperatura do farelo ao longo do secador. Essa tendência é característica dos materiais que apresentam taxa de secagem decrescente, conforme observa Geankoplis (1993).

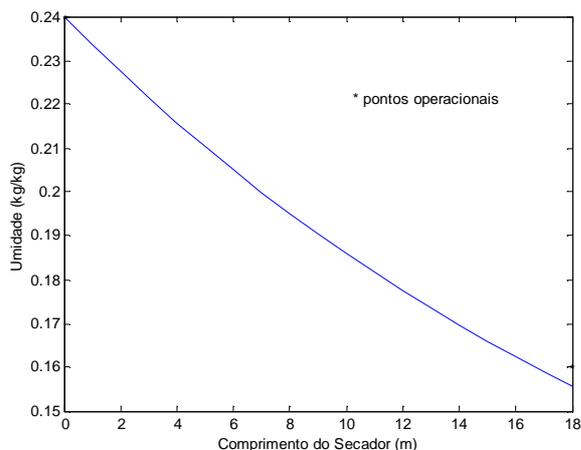


Figura 3. Perfil de umidade do farelo no secador com umidade inicial de 0,24 (kg/kg) e temperatura inicial de 100°C.

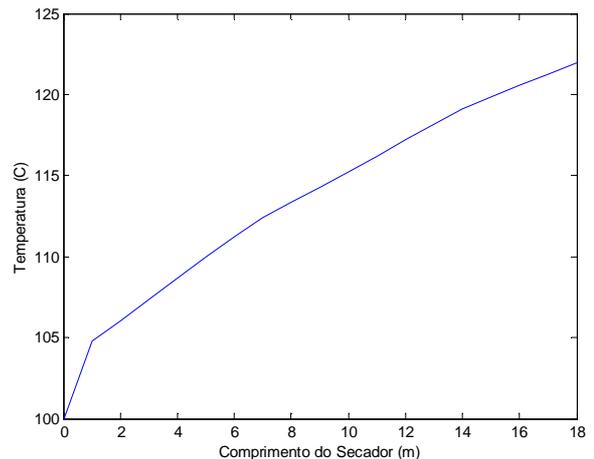


Figura 4. Perfil de temperatura do farelo no secador com umidade inicial de 0,24 (kg/kg) e temperatura inicial de 100°C.

Avaliação Energética

As Figuras 5 e 6 apresentam gráficos que possibilitam uma avaliação energética do secador. Nessas figuras, os pontos, resultados das simulações, aparecem unidos sem ajuste, apenas para visualizar melhor a tendência.

A Figura 5 mostra a variação do consumo de energia total na secagem, E_s versus a temperatura do vapor de secagem. Observa-se que, com exceção do primeiro e do segundo pontos para a condição de entrada do farelo $X_i = 0,24$ e $T_i = 100^\circ\text{C}$, em que os gastos energéticos permanecem constantes, nos outros pontos e condições, tem-se aumento do consumo energético com aumento da temperatura do vapor.

A Figura 6 mostra o gráfico do fator de eficiência energética versus temperatura do vapor. Observa-se que, para a condição $X_e = 0,24$ e $T_i = 100^\circ\text{C}$, tem-se um pico no fator de eficiência energética, o que caracteriza uma situação operacional favorável, do ponto de vista de aproveitamento energético.

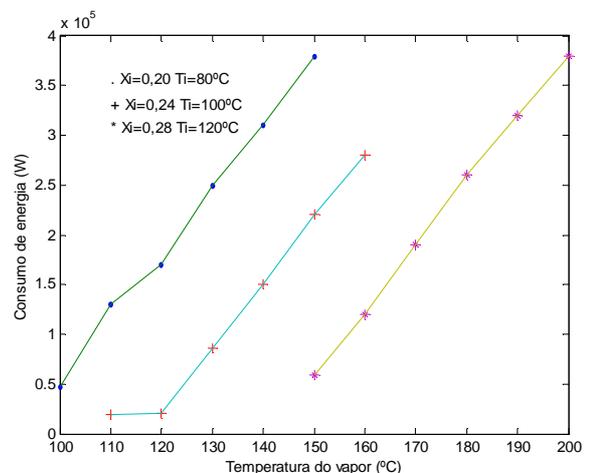


Figura 5. Consumo de energia (W) para várias condições de umidade de entrada e temperatura de entrada.

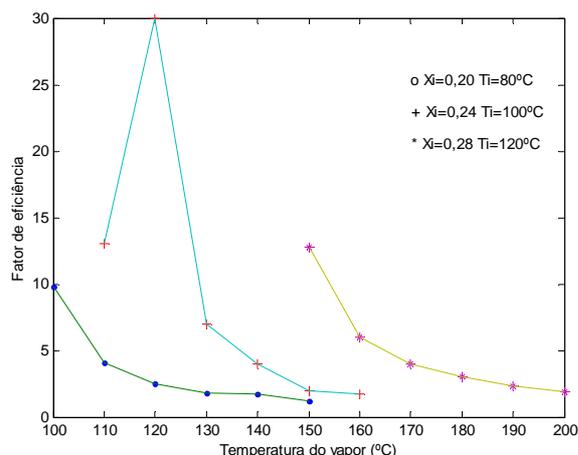


Figura 6. Eficiência do secador para várias condições de umidade de entrada e temperatura de entrada.

Conclusão

O objetivo deste trabalho foi apresentar um modelo capaz de avaliar o consumo energético da secagem do farelo de soja em tambor rotativo com aquecimento indireto.

O modelo proposto foi validado através dos dados operacionais do secador da Coamo, mostrando-se apto para a avaliação do consumo energético e no cálculo do fator de eficiência da operação de secagem do farelo de soja.

Através da Figura 6, conclui-se que, para as condições de operação do processo, a melhor temperatura para o vapor de aquecimento a ser utilizada é de 120 °C e não a que é utilizada, isto é, 140 °C.

Nomenclatura

A	área transversal do secador (m ²)
AS	área superficial do farelo por volume do secador (m ² /m ³)
AT	área de transferência de calor dos tubos (m ²)
CD	coeficiente de atrito
cg	calor específico do gás de secagem (J/kg K)
cs	calor específico do sólido (J/kg K)
D	diâmetro interno do secador (m)
de	diâmetro externo do tubo (m)
dp	diâmetro da partícula esférica (m)
ef	fator de eficiência da secagem
Es	energia para a secagem (W)
ET	energia total de secagem (W)
F	fração volumétrica do sólido no secador
Fs	vazão mássica do farelo (kg/h)
F	fração volumétrica do farelo no secador
G	aceleração da gravidade (m/s ²)
GS	massa específica do farelo (kg/m ³)
hc1	coeficiente de transferência de calor vapor-farelo (W/m ² K)
K	coeficiente de transferência da taxa de secagem (1/s)
kg	condutividade térmica do gás de secagem (W/m K)
L	comprimento do secador (m)
N	rotação do secador (rpm)
NNu	número de Nusselt
Pr	número de Prandtl

R	taxa de secagem do farelo (kg de água/kg de farelo seco s)
Re	número de Reynolds
S	inclinação do secador (m/m)
tR	tempo de residência (s)
Tf	temperatura final do farelo (K)
Ti	temperatura inicial do farelo (K)
Tp	temperatura da parede do secador (K)
TS	temperatura do farelo (K)
vs	velocidade linear do sólido (m/s)
vt	velocidade terminal de queda das partículas (m/s)
X	umidade do farelo de soja (kg de água/kg de farelo seco)
Xe	umidade de equilíbrio do farelo de soja (kg de água/kg de farelo seco)
Xf	umidade final do farelo de soja (kg de água/kg de farelo seco)
Xi	umidade inicial do farelo de soja (kg de água/kg de farelo seco)
z	dimensão na direção axial do secador (m)
ε	porosidade do leito do farelo de soja
λ	calor latente da água (J/kg)
μv	Viscosidade do gás de secagem (kg/m s)
ρv	massa específica do gás de secagem (kg/m ³)
ρv	massa específica do farelo de soja (kg/m ³)
Ψp	Esfericidade das partículas

Referências

CANALES, E. R. *et al.* Steady state modelling and simulation of an indirect rotary dryer. *Food Control*, Guildford, v. 12, p. 77-83, 2001.

CUTLIP, M. B.; SHACHAN, M. *Problem solving in Chemical Engineering with numerical methods*. Ney Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.

GEANKOPLIS, C. J. *Transport processes and unit operations*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

JONGENELEN, H. P. J. Energy conservation in solvent extraction plants. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, Chicago, v. 53, p. 291, June, 1976.

MEIRA, R. L. *et al.* Levantamento de dados cinéticos e de equilíbrio da secagem do farelo de soja. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, Foz de Iguaçu. , Anais... Foz do Iguaçu: Universidade Estadual do Oeste do Paraná/CNPq, 2003. (CD ROOM).

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Chemical Engineers' Handbook*. 5. ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1973.

SARTORI, A. E. R. *Modelagem, Simulação e Controle de um Secador Rotativo Industrial*. 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001.

STRUMILLO, C. *et al.* Energy aspects in drying. In: MUJUNDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. New York: Marcel Dekker, 1987. Cap. 40, p.1241-1275.

SHENE, C.; BRAVO, S. Mathematical modelling of indirect contact rotary dryers, *Dry. Technol.*, New York, v.16, n.8, p.1567-1583, 1998.

WHITAKER, S. Forced convection head transfer correlations for flow in pipes, tast flat plates, single cylinders, single spheres, and flow in packed pees and tube bundles *AIChE Journal*, New York, v.18, p.361-371, 1972.

Received on July 23, 2004.

Accepted on December 03, 2004.