

# Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto

Gianini Regina Luz, Cid Marcos Gonçalves Andrade, Luiz Mário de Matos Jorge e Paulo Roberto Paraíso\*

Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. \*Autor para a correspondência. e-mail: paulo@deq.uem.br

**RESUMO.** O farelo de soja é um produto importante do agronegócio brasileiro. A secagem do farelo de soja, uma das etapas da produção, é grande consumidora de energia e, normalmente, se realiza em um secador rotativo de aquecimento indireto. O estudo da secagem do farelo visando à redução de seu consumo de energia é importante para tornar esse produto competitivo. Assim, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento um modelo matemático, em regime estacionário, a fim de avaliar o consumo energético e a eficiência do processo. O modelo foi baseado em balanços de massa, de energia, equações constitutivas e empíricas. A validação do modelo foi feita a partir de dados operacionais de um secador rotativo de contato indireto da Cooperativa Agrícola Mourãoense (Coamo).

**Palavras-chave:** farelo de soja, secagem, modelagem, energia, secador rotativo.

**ABSTRACT.** Soybean meal energetic analysis in the indirect rotary dryer. The soybean meal is an important product of the Brazilian agribusiness. Soybean meal drying, one of the stages of the production, is a great consumer of energy and, normally, it is conducted in a rotary dryer of indirect heating. The study of the soybean meal drying aims to reduce its consumption of energy and it is important to increase market competition of this product. Thus, the objective of this work was to develop a mathematical model, in stationary regimen, in order to evaluate the energy consumption and the efficiency of the process. The model was based on the mass and energy balances, constitutive and empirical equations. The validation of the model was made from operational data of an indirect rotary dryer of Coamo (Cooperativa Agrícola Mourãoense).

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

## Introdução

O farelo de soja constitui um importante produto da indústria de processamento da soja, ocupando lugar de destaque no mercado agropecuário brasileiro e mundial como ração animal e complemento alimentar humano. É obtido por uma série de operações, dentre as quais a secagem, que consome grande quantidade de energia que pode chegar até 80 kg de vapor por tonelada de soja processada, como apresenta Jongeneelen (1976). O aumento do consumo de energia eleva custos operacionais e prejudica o meio ambiente devido ao aumento de perdas de energia, que também promove o aquecimento global (efeito estufa).

Segundo Paraíso *et al.* (2004b), a redução dos custos operacionais pode ser obtida através da modelagem matemática e otimização do secador em condições realistas, favorecendo o aumento da produtividade e da competitividade do produto.

O secador utilizado na secagem industrial do

farelo de soja é do tipo rotativo, com aquecimento indireto. Trabalhos relacionados a modelos matemáticos específicos para a secagem do farelo de soja nesse tipo de secador são raros na literatura; entretanto, pode se citar o de Paraíso *et al.* (2004b), que desenvolveu um modelo e realizou uma análise energética preliminar em regime estacionário e o de Sartori (2001), que desenvolveu um modelo em regime transiente, visando a sua utilização em controle preditivo.

A modelagem matemática genérica do secador industrial rotativo com aquecimento indireto foi estudada por alguns autores, tais como Strumillo e Kudra (1986) e Shene e Bravo (1998), que utilizaram modelos provenientes de balanços de massa e energia para a obtenção de perfis de temperatura e umidade do sólido ao longo desse tipo de secador. Além destes, Canales *et al.* (2000) apresentaram um modelo simplificado, em regime permanente, para simular a secagem de farelo de peixe, considerando que a secagem ocorre à taxa constante.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi modelar e analisar o desempenho energético da secagem industrial de farelo de soja. O modelo matemático desenvolvido foi obtido a partir de balanços de massa e de energia, associados a equações empíricas e constitutivas em regime permanente. Esse modelo foi resolvido numericamente pelo método de Runge-Kutta usando-se o software Matlab7.0<sup>®</sup>. Este trabalho complementa e aperfeiçoa o modelo e análise propostos em Paraíso *et al.* (2004b).

## 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.

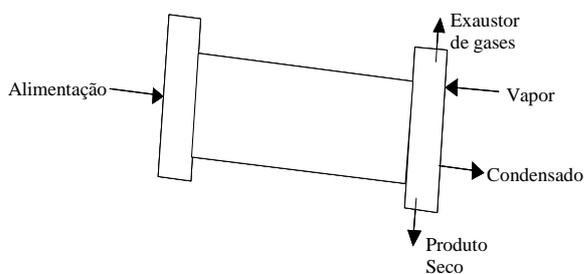


Figura 1. Esquema do secador rotativo indireto.

Esse secador é caracterizado por uma carcaça cilíndrica com uma pequena inclinação para facilitar o movimento de entrada e saída do farelo de soja. O farelo úmido é proveniente da operação de dessolventização/tostagem e entra no secador por meio de roscas na extremidade mais alta e sai pela extremidade mais baixa.

O sistema de aquecimento do farelo úmido é feito com vapor d'água que circula em tubos dispostos longitudinalmente no interior do secador, como ilustra a Figura 2.

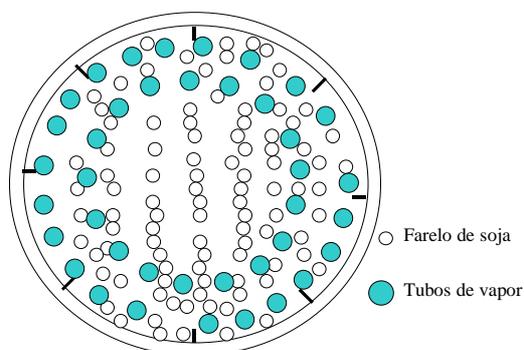


Figura 2. Sólidos em movimento dentro do secador.

O processo de secagem é formado por duas fases: a sólida, composta pelo farelo de soja, e a gasosa, pelo vapor de água e por uma pequena quantidade de ar presente nas zonas de carga e descarga do farelo de soja. O gás formado é removido do secador por um exaustor existente na parte superior da extremidade mais baixa do secador.

O secador industrial utilizado no estudo é da planta da Cooperativa Agrícola Mourãoense (Coamo). Os dados de projeto desse equipamento são os seguintes: 3 m de diâmetro, 18 m de comprimento, 0,04 m/m de inclinação, 6 rpm de rotação, sendo que o aquecimento do farelo úmido se dá através do calor transferido por 96 tubos com diâmetros de 0,076 m. Os dados de operação do equipamento também foram fornecidos e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados operacionais do secador.

| Dados Operacionais  |          |       |
|---|----------|-------|
| Propriedades  | Símbolos | Dados |
| Fluxo de entrada do farelo de soja (kg s <sup>-1</sup> )                          | $M$      | 7,88  |
| Umidade inicial do farelo de soja (kg água /kg sólido seco)                       | $X_{mi}$ | 0,24  |
| Umidade final do farelo de soja (kg água /kg sólido seco)                         | $X_f$    | 0,16  |
| Temperatura do vapor (°C)   | $T_p$    | 100   |
| Temperatura inicial do farelo de soja (°C)  | $T_i$    | 100   |
| Temperatura final do farelo de soja (°C)  | $T_f$    | 95    |
| Capacidade calorífica do farelo de soja (J kg <sup>-1</sup> K)                    | $C_s$    | 837   |
| Coefficiente de transferência de calor vapor-farelo de soja (W m <sup>-2</sup> K) | $h_{ei}$ | 0,1   |
| Densidade do farelo de soja (kg m <sup>-3</sup> )                                 | $\rho_s$ | 400   |
| Fração Volumétrica do farelo de soja dentro do secador                            | $f$      | 0,5   |

### Modelo matemático do secador

O modelo matemático do secador foi desenvolvido a partir de balanços diferenciais de massa e de energia nas fases sólida e fluída, conforme a Figura 3. A fase sólida é constituída pelo farelo de soja, enquanto que a gasosa é constituída pelo vapor de água e pequena quantidade de ar.

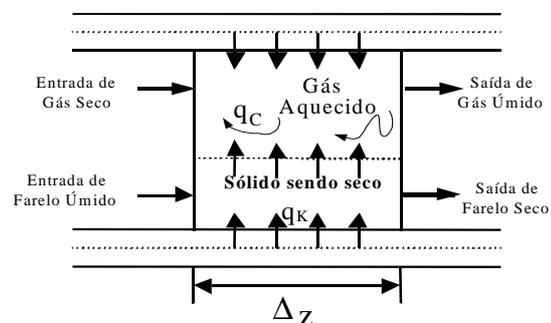


Figura 3. Esquema do volume de controle do secador.

As seguintes hipóteses simplificadoras foram adotadas no desenvolvimento do modelo: a) o

escoamento unidimensional; b) os coeficientes de transferência de massa e de calor variaram em função da coordenada axial; c) considerou-se apenas a transferência de calor dos tubos de vapor para o farelo; d) a difusão de umidade da fase gasosa para o sólido foi desprezível; e) a transferência de calor por radiação, difusão e condução foi desprezível; f) a fase sólida foi homogênea; g) a perda de carga foi desprezível; h) as capacidades caloríficas foram constantes; i) as velocidades axiais do sólido e do gás foram constantes; j) a temperatura e a umidade da fase sólida foram funções somente da coordenada axial.

#### Balanco de massa

O balanço de massa no elemento diferencial do secador é dado pela equação (1):

$$\frac{dM}{dz} = -\rho_s AR \quad (1)$$

Em que:

$$M = v_s \rho_s A (X_s - X_g) \quad (2)$$

Como  $X_g$  é praticamente constante, equação (2) é simplificada e substituída na equação (1), que fica:

$$\frac{d(v_s \rho_s A X_s)}{dz} = -\rho_s AR \quad (3)$$

Considerando que  $v_s$ ,  $\rho_s$  e  $A$  são constantes, a equação (3) simplificada fica:

$$\frac{dX_s}{dz} = -\frac{R}{v_s} \quad (4)$$

A taxa de secagem,  $R$ , pode ser calculada pela equação (5).

$$R = K(X - X_e) \quad (5)$$

Sendo  $K$  o coeficiente de transferência de massa do farelo de soja para o vapor. No trabalho de Paraíso *et al.* (2004a), o  $K$  foi considerado constante durante o processo, no entanto, este parâmetro varia de forma significativa com a temperatura do farelo conforme mostra-se na Figura 4.

A determinação do coeficiente de transferência de massa foi obtida por meio de ensaios experimentais, em um secador de bancada com escoamento de ar transversal a 1,1 e 2,5 m s<sup>-1</sup>, nas

temperaturas de 50, 74, 85 e 97°C. A partir dos dados de cinética de secagem obtidos, calcularam-se os valores médios de  $K$  para cada condição de temperatura através da relação  $R/(X_s - X_e)$ , visto que a velocidade do ar não interfere no processo de secagem. Esta observação pode ser conferida nas Figuras 5 e 6. Maiores detalhes podem ser verificados em Luz (2006).

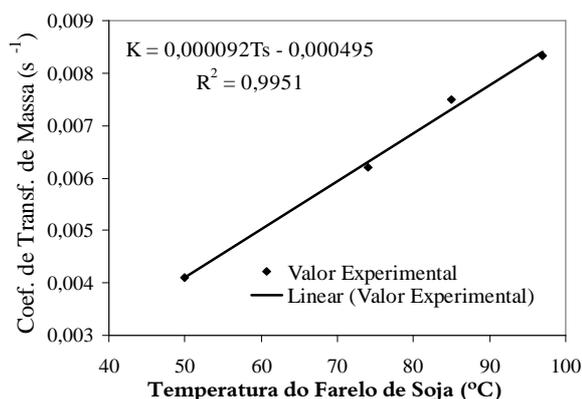


Figura 4. Coeficiente de transferência de massa aproximado.

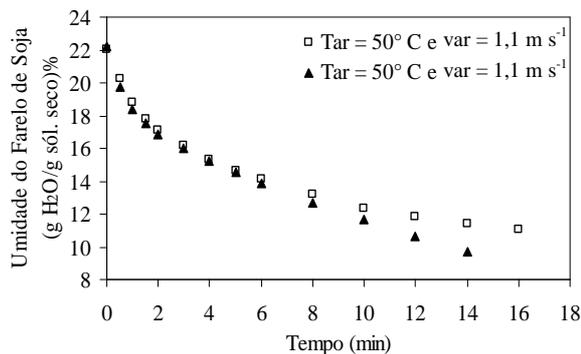


Figura 5. Curvas de secagem do farelo de soja a 50°C e 1,1 e 2,5 m s<sup>-1</sup>.

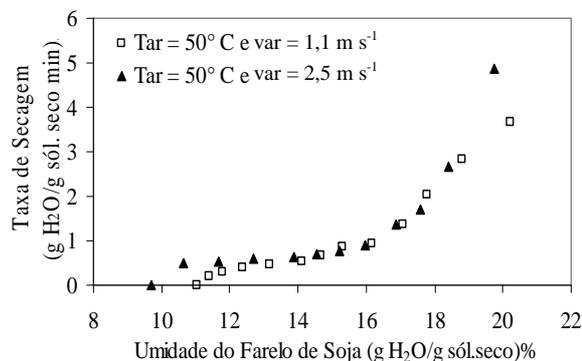


Figura 6. Curvas de taxa de secagem do farelo de soja a 50°C e 1,1 e 2,5 m s<sup>-1</sup>.

Como os dados experimentais do coeficiente de transferência de massa são diferentes para cada

temperatura, os mesmos foram ajustados por uma equação linear, a qual apresentou um bom coeficiente de ajuste de 99,51% para a faixa de temperaturas exploradas de 50 a 100°C (Figura 4). O coeficiente de transferência de massa,  $K$ , está representado pela equação (6).

$$K = 0,000092T_s - 0,000495 \quad (6)$$

Luz et al. (2006), ao estudarem as isotermas de equilíbrio do farelo de soja utilizando correlações existentes na literatura, verificaram que a umidade de equilíbrio variou de forma significativa com umidade relativa do ar,  $ur$ , e observaram ainda que a influência da temperatura é desprezível. Assim, a umidade de equilíbrio do farelo de soja pode ser estimada pela equação (7), que apresentou simplicidade de aplicação, um dos melhores coeficientes de correlação de 97% e menores somatórios dos desvios quadráticos de 0,005.

$$X_e = 0,066 \left( \ln \left( \frac{1}{ur} \right) \right)^{-0,867} \quad (7)$$

#### Balço de energia

O balanço de energia no elemento diferencial do secador, mostrado na Figura 3, é dado pela equação (8), sendo que  $M$  e  $C_{ps}$  foram admitidos constantes.

$$MC_{ps} \frac{dT_s}{dz} = \frac{\rho_s A a_s h_{c1} (T_v - T_s)}{\rho_s} - \rho_s A \lambda R \quad (8)$$

Ao considerar-se que a transferência de massa ocorre da fase sólida para a fase vapor, ou seja, não há entrada de umidade do meio secante, a equação (8) pode ser reescrita sob a forma:

$$\frac{dT_s}{dz} = \left( \frac{1}{MC_{ps}} \right) \left( \frac{\rho_s A a_s h_{c1} (T_v - T_s)}{\rho_s} - \rho_s A \lambda R \right) \quad (9)$$

Em que:

$$C_{ps} = C_s + X_{ini} C_w \quad (10)$$

$$M = v_s \rho_s A \quad (11)$$

Reescrevendo a equação (9):

$$\frac{dT_s}{dz} = \left( \frac{1}{v_s (C_s + X_{ini} C_w)} \right) \left( \frac{a_s h_{c1} (T_v - T_s)}{\rho_s} - \lambda R \right) \quad (12)$$

As equações constitutivas necessárias para a solução das equações diferenciais são dadas pelas equações (13) a (25).

A área superficial do farelo de soja,  $a_s$ , apresentada por Cutlip e Shachan (1999), foi calculada em função do diâmetro da partícula que foi determinado experimentalmente de 0,0015 m em Luz (2006).

$$a_s = \frac{6f}{\psi d_p} \quad (13)$$

A esfericidade do farelo,  $\Psi$ , pode ser estimada a partir da equação (14) apresentada por Geankoplis (1993):

$$\Psi = \frac{1}{10^{1,82(1-\varepsilon)}} \quad (14)$$

A fração de vazios,  $\varepsilon$ , foi calculada pela equação (15):

$$\varepsilon = \frac{V_{sec} - V_s}{V_{sec}} \quad (15)$$

O volume de sólido,  $V_s$ , foi calculado como pela equação (16):

$$V_s = \frac{M_s t_r}{\rho_s} \quad (16)$$

Já o volume do secador pode ser calculado em função do diâmetro efetivo do secador, como na equação (17), em que  $D$  é a diferença entre o diâmetro do secador e dos tubos e tem uma estimativa de 1,84 m.

$$V_{sec} = \frac{L\pi D^2}{4} \quad (17)$$

O tempo de residência,  $t_r$ , calculado foi apresentado por Marshall e Friedman (1949) pela equação:

$$t_r = \frac{0,19L}{N^{0,9} DS} \quad (18)$$

O coeficiente de transferência de calor por condutividade,  $h_{c1}$ , foi estimado segundo a equação (19) apresentada por Whitaker (1972):

$$N_u = 2 + (0,4R_e^{0,5} + 0,06R_e^{2/3})P_r^{0,4} \quad (19)$$

Sendo:

$$N_u = h_{cl}d_p / k_v \quad (20)$$

$$R_e = d_p v_t \rho_v / \mu_v \quad (21)$$

$$P_r = C_v \mu_v / k_v \quad (22)$$

Nesse caso, o número de Reynolds,  $R_e$ , deve estar na faixa de  $0,35 < Re < 76000$  e o número de Prandtl,  $P_r$ , deve estar entre  $0,71 < Pr < 380$ .

A velocidade terminal das partículas,  $v_p$ , foi estimada por Cutlip e Shachan (1999) e está representada pela equação (23), sendo que a constante  $C_D$  é de 0,44 quando o regime é admitido como turbulento:

$$v_t = \left( \frac{4d_p g(\rho_s - \rho_v)}{3C_D \rho_v} \right)^{0,5} \quad (23)$$

A velocidade do sólido,  $v_s$ , foi calculada pela equação (24) expressa por Marshall e Friedman (1949):

$$v_s = \frac{L}{t_r} \quad (24)$$

A vazão mássica do farelo de soja,  $M_s$ , foi calculada em função da umidade inicial do farelo como a equação (25) apresentada por Canales *et al.* (2000):

$$M_s = \frac{M}{1 + X_{ini}} \quad (25)$$

**Equações para avaliação do desempenho energético do secador**

Para a avaliação da potência total consumida pelo secador,  $P_c$ , e da eficiência,  $e$ , do mesmo, usaram-se as equações (26) e (27), sendo que o fator de eficiência é um valor que possibilita avaliar a quantidade de energia fornecida ao secador que está sendo utilizado efetivamente no processo.

$$P_c = \frac{\int_{T_w}^{T_s} \rho_s V_s v_s (c_s + X_{ini} c_w) dT_s + \int_0^z \rho_s V_s \lambda R dz}{z} \quad (26)$$

$$e = \frac{\int_0^z \rho_s v_s \lambda R dz}{P_c} \quad (27)$$

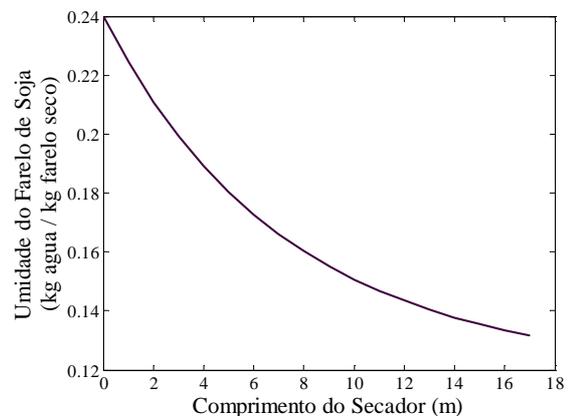
Essas equações (26 e 27) são formas integradas das equações apresentadas por Paraíso *et al.* (2004b), visto que estes autores utilizaram formas pontuais para o cálculo da energia total gasta e eficiência do processo.

**Resultados e discussão**

**Validação do modelo**

A validação do modelo matemático proposto foi obtida através da solução numérica das equações (4), (6), (7), e (12) simultaneamente no Matlab7.0<sup>®</sup> pelo método de Runge-Kutta, aplicando-se os dados de operação da planta industrial da Coamo, disponibilizados na Tabela 1. Além disso, utilizou-se o valor da umidade relativa média igual a 60% para a região da Coamo.

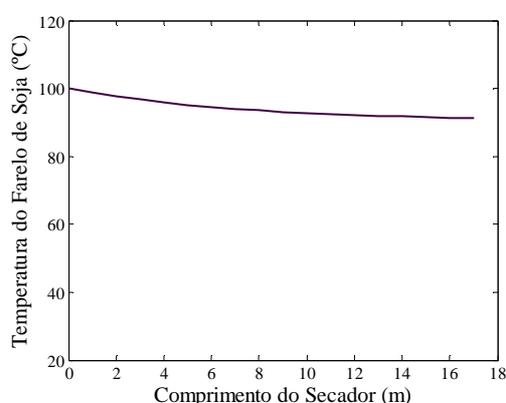
Os resultados dos perfis de umidade e temperatura que validam o modelo são mostrados nas Figuras 7 e 8.



**Figura 7.** Perfil de umidade do farelo de soja ao longo do secador para umidade e temperatura iniciais do farelo de 0,24 (b.s.) e 100°C e, umidade relativa anual de 60%.

A Figura 7 apresenta um perfil de umidade que decai suavemente ao longo do secador, típico da secagem de sólidos porosos, semelhante ao mostrado por Canales *et al.* (2000) na secagem de farelo de peixe, por Iguaz *et al.* (2003) na secagem de produtos vegetais e, por Paraíso *et al.* (2004a e b) na secagem de farelo de soja. Observou-se ainda que a umidade final do farelo de soja obtida foi próxima a 0,13 (b.s), o que representa um erro de 18,75% em relação à umidade final encontrada na indústria, que é de 0,16.

A temperatura na Figura 8 apresentou um pequeno declínio ao longo do secador, sendo a temperatura final do farelo de soja obtida de 91°C, enquanto que a temperatura final do farelo de soja obtida industrialmente se mantém em torno de 95°C. A justificativa para esse efeito deve ser desconsiderada devido ao fato do desvio calculado ser muito baixo, de 4,21%. Um comportamento similar também foi apresentado por Iguaz *et al.* (2003). Já esse resultado não pode ser comparado com o apresentado por Paraíso *et al.* (2004a e b), visto que os autores desconsideraram um sinal negativo no termo de calor por convecção na equação do balanço de energia.



**Figura 8.** Perfil de temperatura do farelo de soja ao longo do secador para umidade e temperatura iniciais do farelo de 0,24 (b.s.) e 100°C e, umidade relativa anual de 60%.

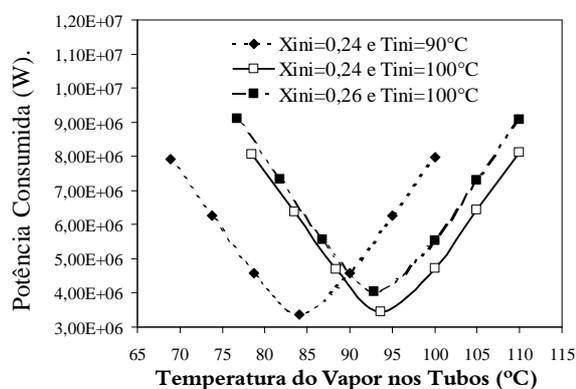
#### Avaliação do desempenho energético do secador

A potência consumida pelo secador e a eficiência da secagem foram calculadas em função do calor necessário à evaporação da água contida no farelo de soja e do calor necessário para aquecer o sólido, como foi demonstrado nas equações (26) e (27). A avaliação dessas variáveis foi realizada a partir do estudo da influência das condições operacionais na secagem, aplicando-se os resultados em que as umidades e as temperaturas finais do farelo de soja estavam mais próximas ao resultado operacional da Coamo de 0,16 (b.s.) e 95°C.

Assim, calculou-se a potência consumida para as condições de umidade e de temperatura de entrada do farelo de soja a 0,24 (b.s.) e 90°C, a 0,26 (b.s.) e 100°C, e, para efeito de comparação, a condição operacional de 0,24 (b.s.) e 100°C, considerando-se em todos os casos, a umidade relativa do ar de 60%. O resultado das condições citadas pode ser verificado na Figura 9.

Na Figura 9, observou-se que ao variar a temperatura do vapor nos tubos, encontrou-se um

comportamento que descreve uma parábola com concavidade para cima. O ponto mínimo da parábola indica a temperatura do vapor no tubo na qual é a potência consumida pelo secador necessária é a mínima para efetuar a secagem do farelo de soja sem desperdícios da mesma. Ao aumentar-se a temperatura da parede a partir do ponto mínimo para cada condição, aumenta-se o consumo total de energia que é utilizado para superaquecer o farelo ao longo do secador. Por outro lado, ao diminuir a temperatura na parede a partir do ponto mínimo de cada condição, o consumo de energia a aumenta devido à transferência do calor ocorrer do farelo de soja para a parede.



**Figura 9.** Consumo total de energia para várias temperaturas do vapor nos tubos.

Do ponto de vista energético, as condições propostas de umidade e de temperatura iniciais do farelo de soja de 0,24 (b.s.) e de 90°C foram as que apresentaram o menor consumo de energia, de 3,38 MW, seguidas das condições de 0,24 e 100°C e, 0,26 e 100°C com 3,46 e 4,03 MW, respectivamente. A primeira condição, além de exigir pouco consumo de energia, preserva a qualidade do produto em termos de umidade.

A avaliação da eficiência do secador também pode ser medida nas mesmas condições na determinação da potência consumida e está representada pela Figura 10.

A Figura 10 ilustra a eficiência da secagem do farelo de soja com a temperatura da parede do tubo de vapor. Como pode ser observado, a concavidade da curva se apresenta para baixo; isto ocorre porque a eficiência ser calculada a partir da potência consumida na secagem de farelo.

Ainda na Figura 10, observa-se que a eficiência é máxima para as mesmas temperaturas de vapor no tubo em que ocorrem os valores de mínima potência consumida que foram verificados na Figura 9. Ao aumentar ou diminuir a temperatura do vapor no

tubo a partir da temperatura em que a eficiência é máxima, a eficiência tende a diminuir.

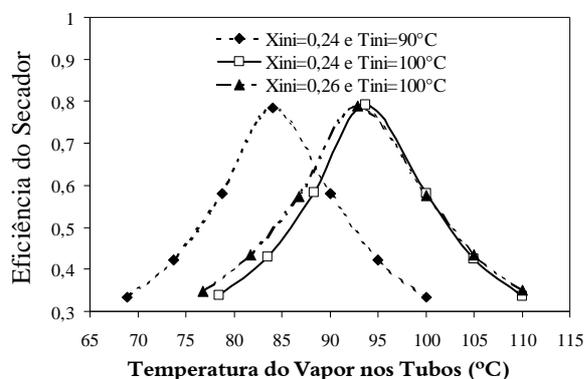


Figura 10. Fator de eficiência do secador para várias temperaturas do vapor nos tubos.

Nas condições avaliadas, a eficiência máxima calculada foi em torno de 80%, este é um valor próximo ao sugerido em revisões realizadas por Strumillo e Kudra (1986), que é de 90% para o secador de contato indireto.

Ressalta-se que não obrigatoriamente a temperatura da parede que leva a uma melhor eficiência energética é aquela que deve ser usada, uma vez que isto pode comprometer a qualidade do produto em termos de umidade.

## Conclusão

O modelo matemático proposto para o secador rotativo industrial de farelo de soja foi validado e pode ser aplicado na predição da umidade final do farelo de soja, haja vista os dados de umidade e de temperatura finais resultantes se comportaram como previsto na literatura e próximos aos obtidos industrialmente na Coamo.

A avaliação energética do secador foi realizada para cada uma das condições que mais se aproximaram da condição operacional, sendo possível estimar a temperatura da parede em que a eficiência foi máxima. Assim, para a umidade e a temperatura iniciais do farelo de soja de 0,24 (b.s.) e 90°C, a temperatura da parede em que a eficiência foi máxima foi de 84°C; enquanto que para a umidade e a temperatura iniciais do farelo de soja de 0,24 (b.s.) e 100°C, a temperatura ideal da parede foi de 94°C; sendo que para a umidade e a temperatura iniciais do farelo de soja de 0,26 (b.s.) e 100°C, a temperatura da parede foi de 93°C. Apesar da primeira condição ser satisfatória do ponto de vista energético, não é necessariamente a melhor do ponto de vista operacional.

## Nomenclatura

|               |   |
|---------------|---|
| $A$           | Área de troca térmica ( $\text{m}^2$ )  |
| $a_s$         | Área superficial do farelo de soja pelo volume do secador ( $\text{m}^2\text{m}^{-3}$ )           |
| $C_D$         | Coefficiente de arraste   |
| $C_s$         | Capacidade calorífica do farelo de soja ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}$ )                            |
| $C_v$         | Capacidade calorífica do vapor ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}$ )                                     |
| $C_w$         | Capacidade calorífica da água líquida ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}$ )                              |
| $D$           | Diâmetro efetivo do secador (m)   |
| $d_p$         | Diâmetro da partícula (m)   |
| $e$           | Fator de eficiência do secador  |
| $f$           | Fração volumétrica do farelo de soja no secador   |
| $M$           | Fluxo alimentado de farelo de soja  |
| $M_s$         | Fluxo de farelo de soja seco ( $\text{kg h}^{-1}$ )   |
| $h_{cl}$      | Coefficiente de transferência de calor entre vapor e farelo de soja ( $\text{W m}^{-2}\text{K}$ ) |
| $K$           | Coefficiente de transferência de massa entre farelo e vapor ( $\text{s}^{-1}$ )                   |
| $k_v$         | Condutividade térmica do vapor ( $\text{W m}^{-1}\text{K}$ )                                      |
| $L$           | Comprimento total do secador (m)  |
| $N$           | Velocidade de rotação do secador (rpm)  |
| $N_u$         | Número de Nusselt   |
| $P_c$         | Potência consumida pelo secador (W)   |
| $P_r$         | Número de Prandtl   |
| $R$           | Taxa de secagem do farelo de soja ( $\text{kg água/kg farelo seco s}$ )                           |
| $R_e$         | Número de Reynolds  |
| $S$           | Inclinação do secador (m/m)   |
| $t_r$         | Tempo de residência do farelo de soja no secador (s)  |
| $T_{mi}$      | Temperatura inicial do farelo de soja ( $^{\circ}\text{C}$ )                                      |
| $T_f$         | Temperatura final do farelo de soja ( $^{\circ}\text{C}$ )  |
| $T_s$         | Temperatura do farelo de soja ( $^{\circ}\text{C}$ )  |
| $T_v$         | Temperatura do vapor ( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $T_{vt}$      | Temperatura do vapor nos tubos ( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $ur$          | Umidade relativa do ar (%)  |
| $V_s$         | Volume do farelo de soja ( $\text{m}^3$ )   |
| $V_{sec}$     | Volume efetivo do secador ( $\text{m}^3$ )  |
| $v_s$         | Velocidade linear do farelo de soja ( $\text{m s}^{-1}$ )   |
| $v_t$         | Velocidade terminal do farelo de soja ( $\text{m s}^{-1}$ )                                       |
| $X_{mi}$      | Umidade inicial do farelo de soja ( $\text{kg água/kg sólido seco}$ )                             |
| $X_e$         | Umidade de equilíbrio do farelo de soja ( $\text{kg água/kg sólido seco}$ )                       |
| $X_s$         | Umidade contida do farelo de soja ( $\text{kg água/kg sólido seco}$ )                             |
| $z$           | Comprimento do secador (m)  |
| $\varepsilon$ | Porosidade do leito de farelo de soja   |
| $\lambda$     | Entalpia of vaporização da água na temperatura do farelo de soja ( $\text{J kg}^{-1}$ )           |
| $\mu_v$       | Viscosidade do vapor ( $\text{kg m}^{-1}\text{s}$ )   |
| $\rho_s$      | Densidade do farelo de soja ( $\text{kg m}^{-3}$ )  |
| $\rho_v$      | Densidade do vapor ( $\text{kg m}^{-3}$ )   |
| $\psi$        | Esfericidade das partículas   |

## Agradecimentos

À Coamo que disponibilizou as amostras e os dados operacionais de farelo de soja e, à Capes pelo suporte financeiro.

## Referências

- CANALES, E.R. *et al.* Steady state modeling and simulation of an indirect rotary dryer. *Food Control*, Guildford, v. 12, p. 77-83, 2000.
- CUTLIP, M.B.; SHACHAN, M. *Problem solving in Chemical Engineering with numerical methods*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.
- GEANKOPLIS, C. *Transport processes and unit operations*. USA: Prentice Hall PTR, 1993.
- JONGENELEN, H.P.J. Energy conservation in solvent

- extration plants. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, Chicago, v. 53, p. 291, 1976.
- IGUAZ, A. et al. Mathematical modeling and simulation for the drying of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *J. Food Eng.*, Oxford, v. 59, p. 151-160, 2003.
- LUZ, G.R. et al. Estudo das isotermas de equilíbrio do farelo de soja. *Cienc. Technol. Alim.*, Campinas, v. 26, n. 2, p. 408-413, 2006.
- LUZ, G.R. *Modelagem matemática e análise do secador rotativo de farelo de soja*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.
- MARSHALL, Jr.; FRIEDMAN, S. Studies in rotary drying. Part I: Holdup and dusting *Chem. Eng. Progress*, New York, v. 45, p. 482-573, 1949.
- PARAÍSO, P.R. et al. Modelagem e Simulação de um secador industrial de farelo de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15., 2004, Curitiba. *Anais...* Curitiba, 2004a. CD-Rom.
- PARAÍSO, P.R. et al. Análise energética preliminar da secagem industrial de farelo de soja. *Acta Sci.*, Maringá, v. 26, n. 2, p. 91-95, 2004b.
- SARTORI, A.E.R. *Modelagem, simulação e controle de um secador rotativo industrial*. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001.
- SHENE, C.; BRAVO, S. Mathematical modeling of indirect contact rotary dryers. *Dry. Technol.*, New York, v. 16, n. 8, p. 1567-1583, 1998.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: Principles, applications and design*. Topics in chemical engineering, v. 3. Montreux: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- WHITAKER, S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, flat plates, single cylinders, single spheres, and flow in packed beds and tube bundles. *AIChE J.*, New York, v. 18, p. 361-371, 1972.

Received on November 08, 2005.

Accepted on September 12, 2006.