

Modelagem de secador do tipo esteira: uma aplicação industrial

Fernanda de Castilhos Corazza^{1*}, Ivo Neitzel¹ e Edson Antonio da Silva²

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ²Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua da Faculdade, 2550, Bloco de Engenharia Química, C.P. 520, 85903-000, Toledo, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: fernandac@uricer.edu.br

RESUMO. Neste trabalho, um modelo transiente para um secador do tipo esteira, utilizado na secagem de gelatina, foi obtido através de balanços de massa e energia, sendo inicialmente consideradas três hipóteses para a isoterma de equilíbrio e duas para a taxa de secagem. A definição dessas expressões foi realizada pelo ajuste do modelo aos dados de uma situação típica de operação com as principais variáveis do processo medidas pelo acompanhamento de um lote de gelatina ao longo do secador. Um ensaio, em laboratório, foi realizado para se obter a curva de secagem, indicando que a secagem da gelatina ocorre essencialmente em uma fase. Assim, o modelo utiliza a isoterma de Henderson e uma expressão para a taxa de secagem de apenas uma fase. Os resultados da simulação do modelo nas condições do processo demonstram que esse é capaz de representar as principais tendências do processo.

Palavras-chave: secagem, modelo, gelatina, secador industrial.

ABSTRACT. Modeling of a conveyor dryer: an industrial application. In this work, a transient model for a conveyor dryer used in gelatin drying is made through mass and energy balances, being initially considered three hypotheses for the equilibrium isotherm and two for the drying rate. The option about these equations was done through the model's fitness to typical operation values with the main process variables measured coming with a small portion of gelatin. An experiment done to get the drying curve suggests the gelatin drying happens in only one phase. As a result, the model uses the Henderson's isotherm and a single phase expression for the drying rate. Model simulation's results at process conditions show it is able to represent the main trends of process.

Key words: drying, model, gelatin, industrial dryer.

Introdução

A secagem de produtos alimentícios requer alguns cuidados devido à possibilidade de alteração da qualidade do produto durante o processo de secagem. São vários os tipos de secadores empregados na indústria alimentícia: rotativos, esteira, *spray dryer*, túnel etc. Vários trabalhos sobre a modelagem desses equipamentos encontram-se disponíveis na literatura (Ben Mabrouk e Belghith, 1994; Péres-Correa e Farias, 1995; Straatsma *et al.*, 1999; Renaud *et al.*, 2000; Cao e Langrish, 2000; Kiranoudis e Markatos, 2000; Iguaz *et al.*, 2003), com exceção do secador do tipo esteira, que é muito utilizado também em outros processos industriais, como na fabricação de borracha e nos filmes de PVC. O trabalho desenvolvido por Kiranoudis e Markatos (2000) para secadores industriais do tipo esteira descreve o comportamento em regime estacionário. Nele, os mecanismos de transferência de massa e de calor

são representados por equações simplificadas e os autores consideram o equilíbrio térmico entre os fluxos de ar e do produto na saída de cada câmara.

A obtenção de modelos em sistemas industriais, especialmente em regime transiente, encontra dificuldades como o tempo necessário ao seu desenvolvimento e, muitas vezes, a falta de um sistema apropriado para a aquisição de dados. Esses fatores contribuem para que a modelagem fenomenológica fique restrita aos processos em escala piloto desenvolvidos em universidades e em institutos de pesquisa.

O objetivo deste trabalho é a obtenção de um modelo para um secador industrial do tipo esteira (Figura 1), representado pelo secador utilizado na secagem de gelatina das Indústrias Gelita do Brasil, na unidade de Maringá. Nesse secador, a gelatina úmida na forma de filamentos é alimentada de maneira uniforme por uma extrusora na esteira transportadora. A altura do leito de gelatina não é

superior a 15cm, sendo controlada pela velocidade da esteira. Ao passar pelas dez câmaras, a gelatina é seca com fluxo de ar quente transversal ao seu leito. O sentido do fluxo de ar é indicado pelas setas na Figura 1. O ar usado para secar a gelatina é previamente filtrado e desumidificado na Central de Tratamento de Ar (CTA). Ao passar de uma câmara para outra, ele é aquecido por um trocador de calor. Dessa forma, sua umidade relativa diminui, aumentando o potencial de secagem. Por ser dividido em câmaras, esse tipo de equipamento permite que o processo de secagem da gelatina seja lento e gradual, pois cada câmara opera em uma temperatura diferente, evitando que a gelatina se liquefaça quando exposta a altas temperaturas.

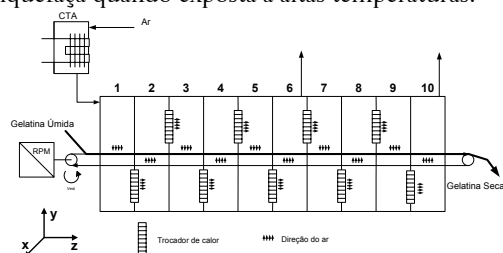


Figura 1. Representação do secador do tipo esteira.

A secagem de gelatina tem sido relatada na literatura. O modelo proposto por Neitzel (1987) para a secagem de gelatina considera uma divisão em duas fases. Na primeira fase, o processo é controlado pela resistência à transferência de massa do vapor da água formado na superfície do sólido até o seio do gás. A segunda fase inicia-se quando a gelatina atinge o valor da umidade crítica. Durante essa etapa, o processo é controlado pela difusão da água no interior do gel. Esse modelo é constituído por equações que descrevem a secagem da partícula cilíndrica de gelatina e a secagem do leito de gelatina que foram acopladas na obtenção da solução do modelo. A simulação do secador esteira a partir desse modelo foi realizada por Silva (1995). Para a resolução das equações resultantes da modelagem das partículas, foi utilizada a técnica de elementos de contorno. Pela discretização da variável altura do leito, um sistema de equações diferenciais ordinárias foi obtido, sendo esse resolvido com a estratégia de Gear. Os resultados obtidos através da simulação, confrontados com os dados experimentais dos ensaios de secagem em batelada, realizados por Neitzel (1987), mostram uma boa concordância para a umidade média do leito. Entretanto, isso não foi verificado para a temperatura de saída do ar. Diversos fatores devem ser considerados, como a ausência de parâmetros

para o sistema gelatina-água na literatura.

Em Canha (2000), os dados de isoterma de equilíbrio para a gelatina foram determinados pelo método estático com o auxílio de soluções salinas saturadas. As isotermas de equilíbrio foram determinadas para as temperaturas 309, 314, 318, 319, 321, 327, 328 e 336K, correspondentes às temperaturas das câmaras de secagem do secador industrial de gelatina das Indústrias Gelita do Brasil - unidade de Maringá. Os dados experimentais foram ajustados a alguns modelos apresentados na literatura. Segundo o autor, os modelos que melhor descrevem as isotermas de equilíbrio de umidade para a gelatina são os modelos de Halsey, o de Henderson modificado e o de Halsey modificado.

Francisco (2000) utilizou a modelagem com redes neurais artificiais, conhecida como “caixa-preta”, para simular um secador industrial de gelatina. Em seu trabalho, as redes neurais prediziam a umidade da gelatina na saída do secador a partir das principais variáveis do processo de secagem. O banco de dados utilizado para o treinamento da rede neural era restrito e não representava todo o domínio desse processo. Segundo o autor, os resultados das simulações indicam grande potencial do uso de redes neurais para modelagem do sistema de secagem.

Modelo para o secador industrial de gelatina

O modelo desenvolvido neste trabalho considera o leito de gelatina como um leito poroso. As equações foram obtidas a partir de balanços de massa e de energia para a água presente no ar e no leito poroso de gelatina. Assim, as equações descrevem a secagem no leito poroso e não na partícula cilíndrica, como proposto por Neitzel (1987). Essa simplificação visa facilitar a resolução do modelo. Segundo Silva (1995), o acoplamento das equações que descrevem a secagem na partícula com as que descrevem a secagem no leito é de difícil resolução.

As equações do modelo foram desenvolvidas para apenas uma câmara do secador, portanto devem ser resolvidas sequencialmente para todas as câmaras do secador. A seguir, serão apresentadas as hipóteses assumidas no desenvolvimento do modelo.

A variação da umidade e da temperatura da gelatina nas direções x e y é desprezível em relação à direção z . Portanto as variáveis da gelatina são função do tempo (t) e do comprimento do secador, como mostra a equação (1):

$$\begin{aligned} X_{gel} &= X_{gel}(z, t) \\ T_{gel} &= T_{gel}(z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

onde X_{gel} é a umidade do leito de gelatina e T_{gel} é a temperatura do leito de gelatina.

A transferência de calor no leito poroso de gelatina por condução é menor do que por convecção e por advecção.

O fluxo de ar é unidirecional e transversal ao leito poroso de gelatina.

O ar comporta-se como gás ideal.

A variação da umidade e da temperatura do ar na direção y é mais significativa do que nas direções x e z (Figura 1). Considerando então apenas as variações na direção y , a mudança ocorrida quando o ar atravessa o leito poroso de gelatina é maior do que as variações na parte superior ou inferior de cada câmara. O modelo utiliza um valor dessas variáveis antes e depois do ar atravessar o leito poroso de gelatina, considerando o ar como uma mistura perfeita nessas regiões. Assim, essas variáveis são funções somente do tempo, conforme equações (2) e (3):

$$\begin{aligned} Y_{ant} &= Y_{ant}(t) \\ T_{ant} &= T_{ant}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_{dep} &= Y_{dep}(t) \\ T_{dep} &= T_{dep}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

onde Y_{ant} é a umidade do ar antes do leito de gelatina, T_{ant} é a temperatura do ar antes do leito de gelatina, Y_{dep} é a umidade do ar depois do leito de gelatina e T_{dep} é a temperatura do ar depois do leito de gelatina.

Como descrito no item anterior, as equações de parâmetros agrupados são consideradas para a umidade e para a temperatura do ar antes e depois do leito de gelatina. Nessas equações, um valor médio de umidade e de temperatura da gelatina ao longo da câmara do secador será usado, como define a equação (4):

$$\begin{aligned} \bar{X}_{gel} &= \frac{\sum_{i=1}^N X_{gel i}}{N} \\ \bar{T}_{gel} &= \frac{\sum_{i=1}^N T_{gel i}}{N} \end{aligned} \quad (4)$$

onde N é o número de pontos em que a umidade e a temperatura da gelatina foram calculadas em cada câmara.

O secador opera à pressão atmosférica.

Para a taxa de secagem, serão consideradas duas expressões. Dentre essas duas equações, o modelo vai utilizar a que melhor se ajustar aos dados de operação do secador. Na primeira expressão, dada pela equação (5), o fenômeno de secagem é dividido em duas fases. A primeira fase ocorre enquanto a umidade da gelatina for maior do que a umidade crítica e a etapa controladora é a transferência de massa do líquido na superfície da gelatina até o seio do gás. Quando a umidade da gelatina atinge a umidade crítica, inicia-se a segunda etapa em que o processo é controlado pela difusão da água no interior do leito até sua superfície, sendo fortemente dependente da temperatura da gelatina e, portanto, dominada pelo fenômeno de transferência de calor. A outra expressão para a taxa de secagem, equação (6), considera que o fenômeno ocorre em apenas uma etapa, onde kx é o coeficiente de transferência de massa no sólido:

$$S = \begin{cases} ky a (Y_{sat} - Y_{ant}) & \text{para } X_{gel} > X_c \\ ky a (Y_{sat} - Y_{ant}) \frac{(X_{gel} - X_e)}{(X_c - X_e)} & \text{para } X_{gel} \leq X_c \end{cases} \quad (5)$$

$$S = kx a (X_{gel} - X_e)^n \quad (6)$$

onde ky é o coeficiente de transferência de massa, a é a área específica, Y_{sat} é a umidade de saturação do ar, X_e é a umidade de equilíbrio, X_c é a umidade crítica da gelatina em base seca. Para a umidade de equilíbrio, serão consideradas as três isotermas de equilíbrio que melhor se ajustaram aos dados experimentais, de acordo com Canha (2000): isoterma de Halsey (equação 7), isoterma de Halsey modificada (equação 8) e isoterma de Henderson modificada (equação 9). Os parâmetros das isotermas podem ser encontrados em Canha (2000):

$$X_e = A \left(\frac{1}{T_{ant}} \ln \left(\frac{1}{1 - Y_{rel}} \right) \right)^{-B} \quad (7)$$

$$X_e = A + B \left(\frac{1}{T_{ant}} \ln \left(\frac{1}{1 - Y_{rel}} \right) \right) \quad (8)$$

$$X_e = \left[\frac{-\exp(AT_{ant} + C)}{\ln(Y_{rel})} \right]^{1/B} \quad (9)$$

onde Y_{rel} é a umidade relativa do ar, T_{ant} é a temperatura do ar antes do leito e A , B , C são os parâmetros.

A umidade relativa do ar é a função da temperatura e da umidade do ar antes do leito,

conforme Brooker et al. (1975):

$$Y_{rel} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (10)$$

onde P_v é a pressão de vapor definida pela equação (11), P_{vs} é a pressão de vapor saturado definida pela equação (12) e P é a pressão.

$$P_v = \frac{Y_{ant} P}{0.622 + Y_{ant}} \quad (11)$$

$$P_{vs} = v_8 \exp \left[\frac{((v_5 T_{ant} + v_4) T_{ant} + v_3) T_{ant} + v_2) T_{ant} + v_1}{(v_6 - v_7 T_{ant}) T_{ant}} \right] \quad (12)$$

Os valores das constantes da equação (12) encontram-se em Brooker et al. (1975).

A umidade de saturação do ar é definida como:

$$Y_{sat} = \frac{P_{vs}}{P} \quad (13)$$

Uma área efetiva de seção transversal ao fluxo de ar será considerada. A área efetiva leva em conta a porosidade do leito, para corrigir o valor da área de seção transversal à vazão de ar e, conseqüentemente, o valor da velocidade do ar, nas expressões (16) e (17).

$$Area_{eff} = Area(1 - E_{ff}) \quad (14)$$

onde $Area$ é a área de seção transversal ao fluxo de ar e E_{ff} é a porosidade do leito de gelatina.

A porosidade do leito de gelatina não é constante ao longo do secador, uma vez que, conforme a gelatina seca, ocorre uma contração no volume do leito poroso de gelatina. Então, considerou-se que a porosidade do leito aumenta de forma linear com a diminuição da umidade no leito de gelatina, conforme a equação (15):

$$E_{ff} = EE(1 + \alpha(1 - X_{gel})) \quad (15)$$

onde EE e α são parâmetros iguais a 0,528 e a 0,054, respectivamente. Com esses parâmetros, o valor da porosidade do leito de gelatina encontra-se entre 0,49 e 0,55. No trabalho de Neitzel (1987), foi encontrado um valor de 0,53 para a porosidade da gelatina.

A velocidade do ar, antes e depois do leito, é definida pelas seguintes equações:

$$V_{ant} = \frac{Q_{mar seco} - purga}{\rho_{ant} Area_{eff}} \quad (16)$$

$$V_{dep} = \frac{Q_{mar seco} - purga}{\rho_{dep} Area_{eff}} \quad (17)$$

onde $Q_{mar seco}$ é a vazão mássica de ar seco que entra na primeira câmara do secador, $purga$ é a vazão mássica de ar seco que sai pela câmara 6 e ρ_{ant} , ρ_{dep} são as massas específicas do ar antes e depois do leito.

O calor de desorção (ΔH_s) do sistema água-gelatina é igual ao calor de vaporização da água:

$$\Delta H_s = \Delta h_o + (C_{pv} - C_{pl}) T_{gel} \quad (18)$$

onde Δh_o é a energia de vaporização da água a 273 K, igual a 2.162×10^6 J/kg água, C_{pv} é a capacidade calorífica do vapor d'água a 300 K, igual a 2000 J/kg K e C_{pl} é a capacidade calorífica da água líquida a 300 K, igual a 4000 J/kg K.

A capacidade calorífica da gelatina é definida pela correlação encontrada por Skuratov e Shkitov (1946):

$$C_{p gel} = C_{ps} + X_{gel} C_{pl} \quad (19)$$

onde C_{ps} é a capacidade calorífica da gelatina seca, igual a 1192 J/kg gel seco K.

A capacidade calorífica do ar foi considerada igual a:

$$C_{par} = \frac{C_{par seco} + Y_{ant} C_{pl}}{M_{ar}} \quad (20)$$

onde $C_{par seco}$ é a capacidade calorífica do ar seco a 300 K, igual a 29220 J/kg ar seco K e M_{ar} é a massa molecular do ar, igual a 28,96 kg/kmol.

A expressão da altura do leito poroso de gelatina é o resultado da aplicação do balanço de massa no leito e na saída do gelificador:

$$h = \frac{A_{gelif} V_{gelif}}{larg V_{est}} \quad (21)$$

onde A_{gelif} é a área de seção transversal na saída do gelificador, V_{gelif} é a velocidade da gelatina na saída do gelificador, $larg$ é a largura do leito poroso de gelatina e V_{est} é a velocidade da esteira do secador.

A dinâmica da transferência de calor nos trocadores de calor existentes entre as câmaras é mais rápida do que a dinâmica da secagem, então o modelo não utiliza as equações para a transferência de calor nos trocadores de calor.

A aplicação dos balanços de massa e de energia

resulta no conjunto de equações abaixo:

$$\frac{\partial X_{gel}}{\partial t} = -V_{est} \frac{\partial X_{gel}}{\partial z} - S \rho_{gel seco} \quad (22)$$

$$\frac{\partial T_{gel}}{\partial t} = -V_{est} \frac{\partial T_{gel}}{\partial z} + \frac{1}{\rho_{gel seco} C_{p gel}} \left[\frac{hc a (T_{ant} - T_{gel})}{E_{ff}} - S \Delta H_s \right] \quad (23)$$

$$\frac{dY_{dep}}{dt} = \frac{V_{ant} Y_{ant} - V_{dep} Y_{dep}}{h} + \frac{S}{\rho_{ar seco}} \quad (24)$$

$$\frac{dT_{dep}}{dt} = \frac{V_{ant} T_{ant} - V_{dep} T_{dep}}{h} + \frac{1}{\rho_{ar seco} C_{p ar}} \left[\frac{hc a (T_{ant} - T_{gel})}{E_{ff}} - S \Delta H_s \right] \quad (25)$$

onde $\rho_{gel seco}$ é a massa específica da gelatina seca, hc é o coeficiente de transferência de calor e $\rho_{ar seco}$ é a massa específica do ar seco.

As condições iniciais são obtidas igualando-se as equações de (22) a (25) a zero. Para a umidade e a temperatura da gelatina, a condição inicial é um perfil dessas variáveis ao longo do secador.

$$X_{gel}(z,0) = X_{gel}(z) \quad (26)$$

$$T_{gel}(z,0) = T_{gel}(z) \quad (27)$$

$$Y_{dep}(0) = Y_{dep0} \quad (28)$$

$$T_{dep}(0) = T_{dep0} \quad (29)$$

As condições de contorno são constantes, pois referem-se à umidade e à temperatura da gelatina na entrada de cada câmara:

$$X_{gel}(0,t) = X_{gel0} \quad (30)$$

$$T_{gel}(0,t) = T_{gel0} \quad (31)$$

Material e métodos

Dados de operação do secador industrial de gelatina

Dados experimentais de uma situação típica de operação foram medidos no secador 01 das Indústrias Gelita do Brasil, unidade de Maringá.

O acompanhamento de um lote de gelatina foi realizado ao longo do secador, respeitando-se o tempo de permanência da gelatina em cada câmara. As principais variáveis do processo como umidade da gelatina e do ar, temperatura da gelatina e do ar, velocidade da esteira, vazões de ar e de gelatina, entre outras, foram medidas com a finalidade de se conhecer o comportamento qualitativo do secador e não de realizar uma amostragem bem definida, sendo dificultada principalmente pela falta de um sistema de aquisição de dados no equipamento.

Para se obter um perfil da umidade da gelatina ao longo do secador, amostras de gelatina foram retiradas na entrada do secador, no meio e no final de cada câmara, totalizando 21 posições de coleta.

Em cada posição de coleta, duas amostras foram retiradas. A determinação da umidade dessas amostras foi realizada em laboratório, seguindo os procedimentos-padrão adotados pelo controle de qualidade da Gelita do Brasil.

A temperatura da gelatina foi medida no início, no meio e no final de cada câmara, em triplicata, com um pirômetro (marca Raytek, modelo RAYST3LXB). A umidade relativa e a temperatura do ar foram medidas na parte superior e inferior de cada câmara com um medidor TESTO 625 (marca Gilmont Instruments Division).

Curva de secagem de gelatina

Uma curva de secagem da gelatina foi obtida em um secador de bandeja em escala piloto disponível no Laboratório de Engenharia Química II - DEQ/UEM. A gelatina foi depositada sobre a bandeja de maneira uniforme. O secador piloto utiliza ar aquecido para a secagem, através de um ventilador. Assim, o fluxo de ar é transversal ao leito de gelatina. As condições do ar ambiente, da temperatura e da umidade relativa foram medidas com o auxílio do instrumento TESTO 625 (marca Gilmont Instruments Division).

A massa da gelatina na bandeja foi lida em balança, em intervalos regulares de tempo que aumentaram com o decorrer do experimento. A umidade da gelatina foi determinada a partir dessas medidas e do valor do peso seco, determinado pela medida da massa de uma amostra de gelatina, antes e depois de permanecer 24 horas em estufa a 378K.

Estimação de parâmetros de transferência de massa e calor

Os parâmetros de transferência de massa e de calor foram estimados pelo ajuste do modelo proposto aos dados de operação obtidos no secador. Esses dados referem-se a uma situação típica de operação e, portanto, as equações do modelo foram utilizadas em *regime estacionário* na estimação dos parâmetros.

O problema de estimação dos parâmetros de transferência de calor convectivo e de massa pode, então, ser assim escrito:

minimizar

$$F = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i F_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (32)$$

sujeita a

$$\frac{\partial X_{gel}}{\partial z} = \frac{-S}{\rho_{gel} \sec o V_{est}} \quad (33)$$

$$\frac{\partial T_{gel}}{\partial z} = \frac{1}{V_{est} \rho_{gel} \sec o C_{p_{gel}}} \left[\frac{hc a (T_{ant} - T_{gel})}{E_{ff}} - S \Delta H_s \right] \quad (34)$$

$$\frac{V_{ant} Y_{ant} - V_{dep} Y_{dep}}{h} = \frac{S}{\rho_{ar} \sec o} \quad (35)$$

$$\frac{V_{ant} T_{ant} - V_{dep} T_{dep}}{h} = \frac{1}{\rho_{ar} \sec o C_{p_{ar}}} \left[\frac{hc a (T_{ant} - T_{gel})}{E_{ff}} - S \Delta H_s \right] \quad (36)$$

A função-objetivo a ser minimizada F , descrita pela equação (32), é uma média ponderada de quatro fatores F_i , cada um referente ao erro em uma variável de estado, onde w_i são pesos atribuídos aos fatores da função-objetivo. Os fatores F_1 , F_2 , F_3 e F_4 correspondem à média dos erros percentuais da umidade e da temperatura da gelatina e da umidade e da temperatura do ar depois do leito, respectivamente. Os pesos atribuídos foram de 10,0 (dez) para a umidade da gelatina e do ar, 5,0 (cinco) para a temperatura da gelatina e 1,0 (um) para a temperatura do ar depois do leito. Esses valores foram atribuídos de acordo com a importância da variável para um sensor virtual que se encontra em desenvolvimento.

Um programa na linguagem Fortran 90 foi desenvolvido para a estimação dos parâmetros. Rotinas da biblioteca IMSL foram utilizadas na solução das equações diferenciais ordinárias, nas equações algébricas não-lineares e na estimação dos parâmetros.

Resultados e discussão

Dados de operação do secador industrial

Além das propriedades do ar e da gelatina, outras variáveis foram medidas, como a velocidade da esteira de 5,52m/h, a vazão de ar seco na entrada do secador, igual a 90000m³/h, a vazão de gelatina saindo da extrusora de 400kg/h, a vazão de purga de ar na câmara 6 de 60000m³/h e a concentração da gelatina na entrada do secador, igual a 28kg/100 L de solução.

Curva de secagem

As condições do ar ambiente foram temperatura de 301K e umidade relativa de 53,2%. A corrente de ar utilizada no experimento estava a 303K e a uma velocidade de 2,3m/s. A Figura 2 ilustra a curva de secagem. Os resultados obtidos com esse ensaio sugerem que a taxa de secagem seja descrita por apenas uma etapa decrescente, de acordo com a equação (6), e não por uma etapa à taxa constante seguida de outra decrescente, conforme a equação (5).

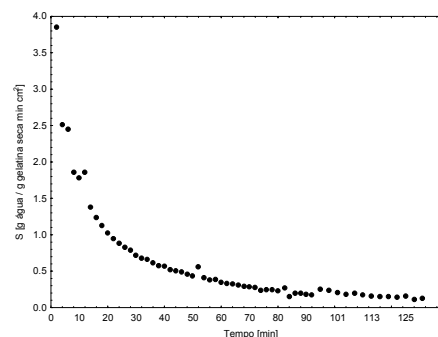


Figura 2. Curva de Secagem.

Ajuste dos parâmetros transferência de massa e transferência de calor

Como mencionado nas considerações para o modelo, três equações de isoterma de equilíbrio e duas expressões de taxa de secagem para a gelatina foram consideradas. As equações do modelo foram ajustadas considerando-se cada isoterma e as expressões para a taxa de secagem. Pela Tabela 1, observa-se que a mudança na expressão da taxa de secagem entre uma ou duas fases é mais significativa do que a alteração da equação da isoterma de equilíbrio. A partir desse ajuste e do resultado obtido no ensaio de secagem, o modelo utilizará a expressão que considera uma única etapa de secagem e a isoterma de Henderson modificada, que ajustaram melhor os dados de operação do secador, levando a um valor da função-objetivo menor.

Tabela 1. Valores da função-objetivo com as expressões para a isoterma de equilíbrio e a taxa de secagem.

Taxa de Secagem	Isoterma de Halsey	Isoterma de Henderson	Isoterma de Halsey modificada
1 fase	5,86 %	5,54 %	5,86 %
2 fases	12,0 %	10,81 %	12,92 %

Os valores dos parâmetros de transferência de massa e de calor obtidos com a isoterma de Henderson modificada e a taxa de secagem em uma única fase foram os seguintes:

$$hc = 32,299 \text{ J / m}^2 \text{ K h ;}$$

$$ky = 2,1655 \cdot 10^{-4} \text{ kg / m}^2 \text{ h } \Delta Y ;$$

$$n = 1,05022.$$

Os pontos experimentais considerados fora da tendência das curvas foram eliminados para melhorar o ajuste. Esses pontos estão sinalizados com um retângulo nas Figuras 3 a 6. Nessas figuras, encontram-se também os valores calculados pelas equações do modelo e o erro percentual relativo. Na Figura 4, o perfil de temperatura da gelatina no secador apresenta-se como uma série de degraus, um para cada câmara, revelando a mesma tendência em

todas as câmaras. No início de cada câmara, a gelatina entra em contato com um fluxo de ar de temperatura mais elevada e a sua temperatura aumenta até se estabilizar próximo da temperatura do ar de secagem.

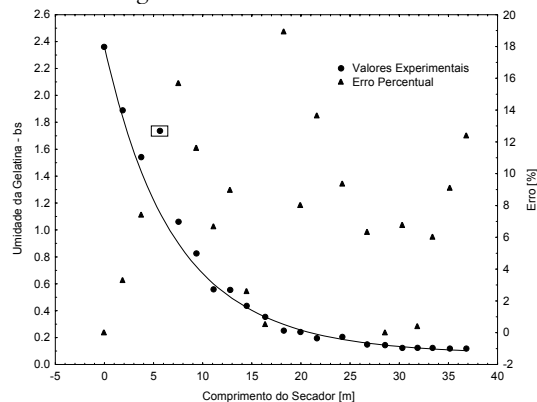


Figura 3. Perfil de umidade da gelatina - valores experimentais, valores calculados e erro percentual de uma situação típica.

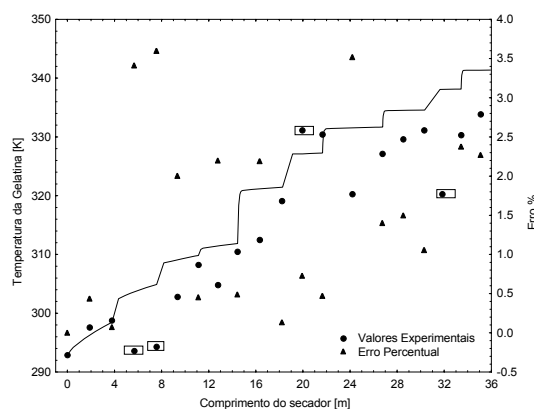


Figura 4. Perfil de temperatura da gelatina - valores experimentais, valores calculados e erro percentual de uma situação típica.

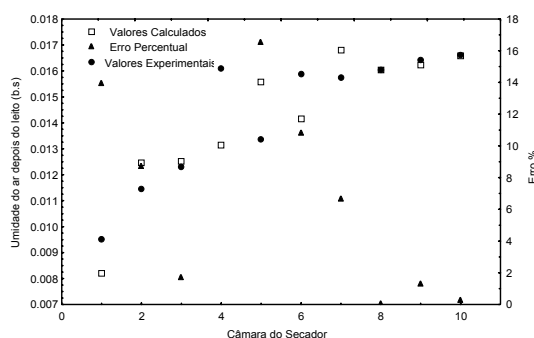


Figura 5. Perfil de umidade do ar depois do leito de gelatina - valores experimentais, valores calculados e erro percentual de uma situação típica.

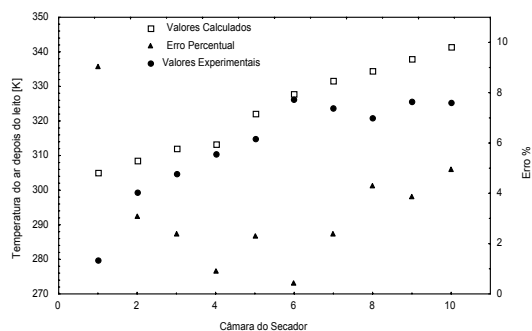


Figura 6. Perfil de temperatura do ar depois do leito de gelatina - valores experimentais, valores calculados e erro percentual de uma situação típica.

Conclusão

Neste trabalho, um modelo em regime transiente para o secador industrial do tipo esteira, cuja solução numérica não apresentou grandes dificuldades, foi desenvolvido.

A estratégia adotada para a modelagem desse equipamento foi escrever equações de balanço para cada câmara, o que pode ser aplicado para outros sistemas cuja operação ocorre em equipamentos em série. Assim, o modelo foi construído por câmara, para utilização sucessiva, descrevendo o secador industrial. As condições iniciais de cada câmara foram calculadas a partir das condições finais da câmara anterior, convertendo-se, assim, numa sucessão de problemas de valor inicial.

Na elaboração do modelo, foram consideradas três hipóteses para a isoterma de equilíbrio e duas para a taxa de secagem. A investigação acerca dessas hipóteses foi realizada através do ajuste de dados operacionais do secador ao modelo proposto, sendo as principais variáveis do processo medidas em uma condição típica de operação.

Os resultados do ensaio de secagem e da estimação de parâmetros sugerem um comportamento sem distinção nítida entre as duas primeiras fases de secagem, o que permitiu o uso de uma equação única e simples para o fenômeno. O comportamento das isotermas de secagem foi semelhante para os modelos recomendados por Canha (2000), sendo que nenhum deles se sobressaiu em relação aos demais. A investigação acerca dessas possibilidades contribuiu para uma melhor performance do modelo. A importância dessas expressões para o modelo do processo de secagem é evidente, pois elas refletem características inerentes do material.

Considerando as idealizações usadas para descrever o secador industrial, os resultados podem ser considerados bons, representando as principais

tendências do processo e permitindo o seu uso para simular o secador em regime transiente e em tempo real.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Gelita do Brasil, pelo fornecimento de Gelatina e à Capes, pelo apoio financeiro.

Referências

- BEN MABROUK, S.; BELGHITH, A. Simulation and design of a tunnel drier, *Renew. Energ.*, New York, v. 5, n.1-4, p. 469-473, 1994.
- BROOKER, D. B. *et al. Drying Cereal Grains*. Westport: Avi Publishing Company, 1975.
- CANHA, M. A. *Estudo da transferência de massa na secagem de gelatina - determinação de isothermas de equilíbrio de umidade*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.
- CAO, W. F.; LANGRISH, T. A. G. The development and validation of a system model for a countercurrent cascading rotary dryer. *Dry. Technol.*, New York, v.18, n.1, p. 99-115, 2000.
- FRANCISCO, C. O. *Modelagem e simulação de um secador industrial de gelatina através de redes neurais artificiais*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- IGUAZ, A. *et al.* Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *J. Food Eng.*, New York, v. 59, n. 2-3, p. 151-160, 2003.
- KIRANOUDIS, C. T.; MARKATOS, N. C. Pareto design of conveyor-belt dryers. *J Food Eng.*, New York, v. 46, p.145-155, 2000.
- NEITZEL, I. *Secagem de gelatina*. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 1987. (Relatório interno).
- PÉREZ-CORREA, J. R.; FARÍAS, F. Modeling and control of a spray dryer: a simulation study. *Food Control*, New York, v. 6, n.4, p. 219-227, 1995.
- RENAUD, M. *et al.* Solid transportation model of an industrial rotary dryer. *Dry. Technol.*, New York, v.18, n.4, p. 843-865, 2000.
- SILVA, E. A. *Secagem de gelatina - análise do perfil de concentração e temperatura no interior do gel*. 1995. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1995.
- SKURATOV, S. M.; SHKITOV, M. S. Specific heat of water bound by high polymeric substances. *Phys. Chem.*, New York, v.53, n.7, p.627-329, 1946.
- STRAATSMA, J. *et al.* Spray drying of food products: 1.Simulation model. *J. Food Eng.*, New York, v.42, n.2, p. 67-72, 1999.

Received on April 20, 2003.

Accepted on November 27, 2003.