

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM DA PIMENTA DE CHEIRO

J. C. S. de MELO¹, E. D. PEREIRA¹, C. H. C COSTA¹ e K. P. de OLIVEIRA¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)

E-mail para contato: carlos.soares@ifrn.edu.br

RESUMO – A secagem é um método de conservação de alimentos muito utilizado para diminuir o teor de umidade do alimento, visando prolongar a sua vida útil durante o armazenamento. Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Este trabalho objetivou-se ajustar modelos matemáticos de secagem em camada fina, aos dados experimentais obtidos na secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas de secagem. As secagens foram realizadas com três repetições, utilizando-se uma estufa sem circulação de ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Os resultados da secagem foram avaliados ajustando-se aos seguintes modelos matemáticos: Newton, Page, Henderson & Pabis, Logaritmico, Dois termos, Wang e Sing, Midilli et al., Henderson & Pabis modificado e de Fick. De acordo com as análises dos dados, a maioria dos modelos utilizados apresentou coeficientes de determinação maiores que 0,98, descrevendo satisfatoriamente a secagem do produto.

1. INTRODUÇÃO

A pimenta de cheiro é caracterizada por ser uma “hortaliça pertencente à família Solanaceae e ao gênero Capsicum L. tendo como centro de origem as américas. O Brasil é conhecido como centro secundário de espécies domesticas de Capsicum, e a região da Amazônia é a que concentra a maior diversidade de pimenta de cheiro (Capsicum chinense), sendo os indígenas desta região, os responsáveis pela domesticação desta espécie” (Cerqueira, 2012). A produção de pimentas vem crescendo consideravelmente no Brasil, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Ceará e Rio Grande do Sul (EMBRAPA, 2007).

Além do fator comercial, a pimenta de cheiro (capsicum) vem sendo utilizado cada vez mais como condimento na culinária do nosso dia-a-dia, principalmente pelo motivo de ter características importantes que dá qualidade aos alimentos, como: aroma marcante, sabor picante e além de possuir propriedades medicinais comprovadas como atividade antioxidante e anticancerígeno que traz benefícios a saúde do ser humano (Santos et al., 2012). As pimentas doces e picantes podem ser processadas na forma de pó, flocos, pickles, escabeches, molhos líquidos, conservas de frutos inteiros, geleias, entre outros (Reis et al, 2011).

A secagem desse produto consiste em reduzir o teor de água da pimenta e, conseqüentemente, a sua atividade de água, com o objetivo de inibir o crescimento microbiano

responsável sua deterioração, além de facilitar o transporte e o armazenamento do produto seco (Gava, 1984).

Segundo Afonso Júnior & Corrêa (1999), o estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por simulação matemática, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem. Vários modelos matemáticos que descrevem o mecanismo de secagem têm sido sugeridas para a otimização do processo de secagem e no desenvolvimento eficaz de projeto de secadores (Darvishi et al., 2013).

Estes modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem; porém, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos produtos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (Resende et al. 2010).

O uso de modelos matemáticos para prever o processo de secagem de algumas pimentas vem sendo o objeto de vários estudos: pimenta de cheiro (Pontes et al., 2009), pimenta malagueta (Santos et al., 2012), pimenta Cambuci (Derlan et al., 2013), pimenta verde (Darvishi et al., 2013), entre outras.

Portanto, esse trabalho objetivou-se determinar as curvas e o tempo de secagem da pimenta e ajustar os modelos matemáticos de secagem em camada fina aos dados experimentais obtidos na secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas de secagem, definindo o melhor modelo matemático.

2. METODOLOGIA

A pimenta de cheiro foi adquirida na feira central da cidade de Caicó/RN e foi selecionada e triturada (Figura 1) no laboratório de química do Instituto Feral do Rio Grande do Norte na cidade de Caicó/RN. As secagens foram realizadas com três repetições, utilizando-se a estufa, sem circulação de ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.



Figura 1: Pimenta de cheiro inteira e triturada.

As curvas de secagem foram ajustadas aos dados experimentais utilizando-se nove diferentes equações empíricas e semi-empíricas, descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos matemáticos utilizados para descrever a secagem da pimenta de cheiro.

Modelos matemáticos	Equações
Page	$RU = \text{Exp}(-k \cdot t^n)$
Dois termos	$RU = a \cdot \text{Exp}(-k_0 \cdot t) + b \cdot \text{Exp}(-k_1 \cdot t)$
Newton	$RU = \text{Exp}(-k \cdot t)$
Henderson e Pabis modificado	$RU = a \cdot \text{Exp}(-k \cdot t) + b \cdot \text{Exp}(-k_0 \cdot t) + c \cdot \text{Exp}(-k_1 \cdot t)$
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \text{Exp}(-k \cdot t)$
Logarítmico	$RU = a \cdot \text{Exp}(-k \cdot t) + c$
Midilli et al.	$RU = a \cdot \text{Exp}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
Difusão três termos	$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp}\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D}{4L^2} t\right)$
Wong e Sing	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$

Em que: RU – razão de umidade do produto, adimensional; t – tempo de secagem, h; k – coeficientes de secagem, a, b, n – constantes dos modelos.

O ajuste dos modelos foi realizado pelo método Quasi-Newton por meio de análises de regressão não linear. O grau de ajuste de cada modelo foi considerado pela magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e o menor erro médio estimado (SE).

Calculou-se a razão de umidade (RU) do produto para o tempo t, conforme apresentado na Equação 1.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

Sendo:

U – teor de água do produto no tempo, %b.s.

U_e – umidade de equilíbrio, %b.s.

U_0 – teor de água inicial do produto, %b.s

O erro médio estimado para cada modelo foi calculado conforme demonstrado na Equação 2.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (2)$$

Sendo:

n – número de observações

Y – valor observado

Y_0 – valor estimado pelo modelo

GLM – graus de liberdade do modelo

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 têm-se as cinéticas de secagem em camada fina da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas. Nota-se que o aumento da temperatura (50, 60 e 70 °C) do ar de secagem reduziu o tempo de secagem da pimenta, cujos tempos foram iguais a 540, 490 e 400 min, respectivamente. Pontes et al. (2009) estudando a pimenta de cheiro, nas temperaturas de secagem iguais a 50, 60 e 70°C, verificaram que a temperatura de secagem exerce influência sobre a velocidade de secagem do produto, sendo o tempo de secagem menor com o aumento da temperatura, com tempos de secagem iguais a 600, 162 e 138 min, respectivamente. Esse comportamento deve-se ao fato das maiores taxas de remoção de água do produto ocorrerem nas maiores temperaturas, o que reduz o tempo de secagem.

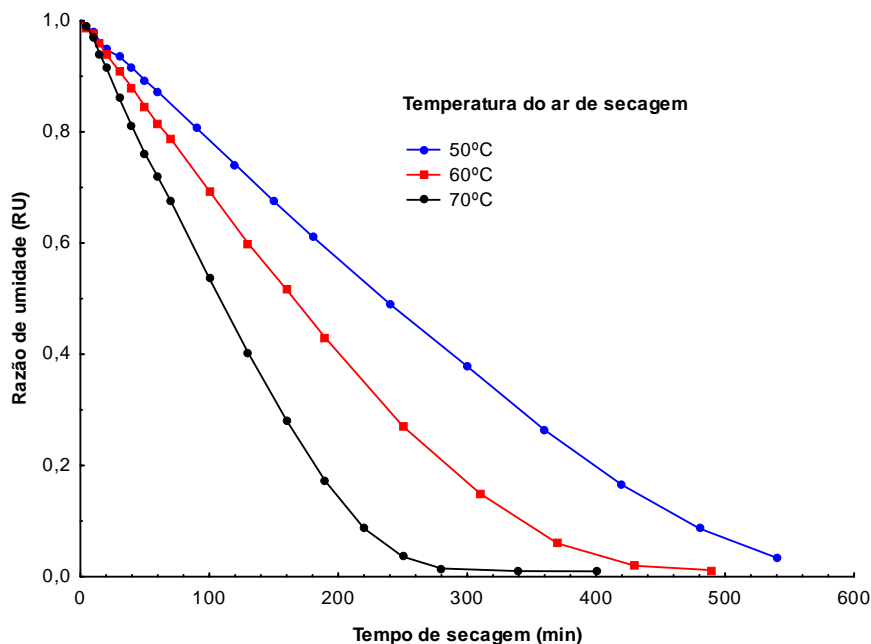


Figura 2. Cinéticas de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas de secagem.

Na Tabela 2 encontram-se os valores dos coeficientes de determinação (R^2) e dos erros médios relativos (SE), calculados para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem da pimenta nas temperaturas de 50, 60 e 70°C. Observa-se que a maioria dos modelos apresentou coeficientes de determinação (R^2) superior a 0,98 e erro médio estimado (SE) menor que 0,07, sendo considerado um ajuste satisfatório.

Porém, dentre os modelos matemáticos analisados, o modelo de Midilli et al. foi o que se ajustou melhor aos dados experimentais, por apresentar coeficiente de determinação com valores superiores a 0,998 e valores de erro médio estimado (SE) menor que 0,02, para todas as temperaturas estudadas. Barbosa et al. (2011) e Darvishi et al. (2013), estudando a secagem de pimentas observaram que o modelo de Midilli et al. foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais ao comparar com os outros modelos estudados.

Tabela 2. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) e do erro médio estimado (SE) dos modelos matemáticos da secagem da pimenta de cheiro nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Modelos Matemáticos	Temperatura (°C)	R^2	SE
Page	50	0,9972	0,0233
	60	0,9979	0,0220
	70	0,9983	0,0232
Dois termos	50	0,9875	0,0535
	60	0,9889	0,0585
	70	0,9893	0,0620
Newton	50	0,9839	0,0547
	60	0,9837	0,0626
	70	0,9835	0,0702
Henderson e Pabis modificado	50	0,9875	0,0581
	60	0,9880	0,0629
	70	0,9893	0,0666
Henderson e Pabis	50	0,9875	0,0498
	60	0,9880	0,0550
	70	0,9893	0,0583
Logarítmico	50	0,9997	0,0068
	60	0,9978	0,0249
	70	0,9951	0,0380
Midilli et al.	50	0,9999	0,0044
	60	0,9993	0,0124
	70	0,9987	0,0210
Difusão três termos	50	0,9261	0,1156
	60	0,9373	0,1247
	70	0,9429	0,1292
Wong e Sing	50	0,9998	0,0061
	60	0,9985	0,0185
	70	0,9975	0,0271

Na Tabela 3, observa-se os valores estimados dos parâmetros do modelo de Midilli et al. para a pimenta de cheiro em diferentes temperaturas de secagem. Observa-se que as constantes n e b aumentaram com o aumento da temperatura; enquanto a constante a e k diminuem com o aumento da temperatura do ar de secagem. Radünz et al (2010) estudando a secagem da folha de sálvia nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, também observaram que a magnitude da constante de secagem (k), que representa o efeito das condições externas de secagem, diminuiu com a elevação da temperatura do ar de secagem; enquanto as constantes n e b aumentaram com o aumento da temperatura.

Tabela 3. Valores dos coeficientes do modelo de Midilli et al. ajustados para a secagem da pimenta de cheiro em diferentes condições de temperatura do ar.

Parâmetro	Modelos matemáticos		
	Midilli et al.		
	50 °C	60 °C	70 °C
k	0,001140	0,000918	0,000763
a	1,000852	0,993254	0,987480
b	-0,000529	-0,000179	-0,000061
n	1,106080	1,287393	1,463779

Tem-se na Figura 3 as curvas de secagem ajustada pelo modelo de Midilli et al. nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C. Nota-se o bom ajuste deste modelo nas descrições dos resultados experimentais.

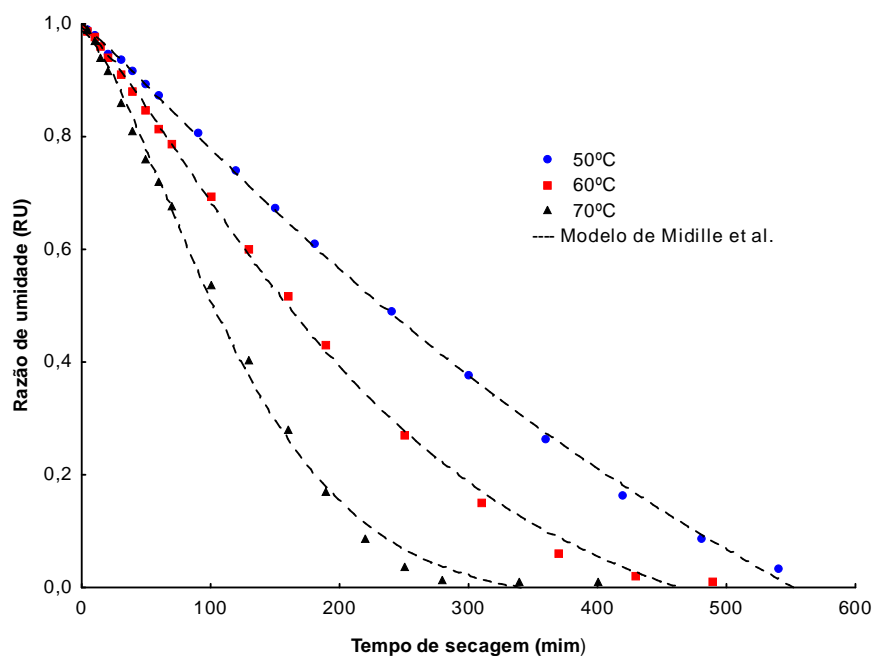


Figura 3. Curvas de secagem determinadas pelo modelo de Midilli et al. nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C.

4. CONCLUSÃO

O tempo de secagem da pimenta de cheiro diminui com o aumento da temperatura do ar de secagem de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. A maioria dos modelos matemáticos apresentou coeficientes de determinação (R^2) superior a 0,98 e erro médio estimado menor que 0,07, representando satisfatoriamente os dados experimentais. Porém, o modelo Midilli et al. foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

5. REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient*, v.3, n.3, p.349-53, 1999.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of Brazilian lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (Mill) n.e. Brown). *Rev. bras. prod. agroind.*, v.9, n.1, p.73-82, 2007.

CERQUEIRA, P.A. Conservação pós colheita de pimentas de cheiro (capsicum chinense) armazenadas sob atmosfera modificada e refrigeração. Tese de Mestrado, Universidade de Tocantins, Gurupi-GO, 4.p, 2006.

DARVISHI, H.; ASL, A. R.; AGHARI, A.; AZADBAKHT, M.; NAJAFI, G.; KHODAEI, J. Study of the drying kinetics of pepper, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, J. Saudi Soc. For Agric. Sci., 2013.

DERLAN, J. M.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; LEITE, A. L. M. P.; PASTRO, D. C. Análise da cinética de secagem de pimenta Cambuci em diferentes temperaturas e formas de processamento. *R. Encicl. Biosf.*, v.9, n.17, p. 97-107, 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de produção. Pimenta (*Capsicum* spp.). Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pimenta/Pimenta_capsicum_spp/importanciaeconomica.html> Acesso em 20 de abril de 2014.

GAVA, J.A. *Princípios da Tecnologia de Alimentos*, São Paulo: Nobel, 1984

PONTES, S.F.O, SANTOS, C.T., FERREIRA, R.C, PONTES, V.L, FONTAN, R.C.I. Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (capsicum chinense) a diferentes temperaturas. *Rev. bras. prod. agroind.*, v.11, n.2, p.143-148, 2009.

SANTOS, B.A.J, SILVA, F.G, PAGANI, C, A, A, Estudo Cinético de secagem da pimenta malagueta (capsicum spp) cultivado no estado de Sergipe, *Rev. GEINTEC*, v.2, n.5, p. 465-471, 2012.

REIS, R.C.; BARBOSA, L.S.; LIMA, M.L.; REIS, J.S.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R. Mathematical modeling of drying kinetics of pepper Cumari do Para. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient*, v.15, n.4, p.347–353, 2011.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient*, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RADUNZ, L.L., A.J. MOSSI, C.A. ZAKRZEWSKI, A.S. AMARAL, AND L. GRASSMANN. Drying kinetics analysis of sage leaves. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient*, v.14, n.9, p.979–986, 2010