

MODELOS MATEMÁTICOS PARA A SECAGEM INTERMITENTE DE ARROZ EM CASCA

Volnei Luiz Meneghetti⁽¹⁾, Mateus Pino⁽¹⁾, Jeferson Cunha da Rocha⁽¹⁾, Willian da Silva Krolow⁽¹⁾, Rodrigo Bubolz Prestes⁽¹⁾, Fabrício da Fonseca Barbosa⁽²⁾, Moacir Cardoso Elias⁽¹⁾. ¹Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos, Pólo de Inovação Tecnológica em Alimentos da Região Sul. Campus Universitário da UFPEL. Email: eliasmc@ufpel.tche.br. ² Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

As recomendações técnicas indicam a faixa de 18 a 24% como a umidade mais adequada para colheita do arroz. Colhidos com umidade elevada, os grãos devem ser submetidos à secagem imediata para possibilitar tanto sua conservação no armazenamento quanto o beneficiamento na agroindústria (Silva et al., 2005; Elias e Franco, 2006). A secagem é o mais antigo e ainda o mais eficiente dentre os métodos de conservação de grãos (Brooker et al., 1992).

O arroz apresenta características próprias na secagem, como a textura da casca que o envolve, e a necessidade da utilização de temperaturas do ar não muito altas, para reduzir a quebra de grãos decorrente de sua sensibilidade aos danos e choques térmicos, diferentemente do que ocorre com grãos de outras espécies. Por essas razões, no sul do país, o método mais usado na secagem de arroz é o intermitente, o qual se caracteriza pela recirculação dos grãos através do conjunto elevador-secador, sendo seu contato com o ar descontínuo. Como método convencional que é, caracteriza-se pela movimentação tanto do ar como dos grãos durante a operação, e tem sido muito estudado por pesquisadores (Milman, 2001; Elias, 2002; Elias et al., 2006) nos últimos anos, cujos trabalhos envolvem predominantemente análises de aspectos econômicos e tecnológicos, havendo as maiores carências nos estudos sobre simulações.

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis na estimativa do tempo necessário para redução do teor de água do produto sob diferentes condições de secagem, auxiliando nas tomadas de decisão e contribuindo na melhoria da eficiência do processo (Andrade et al., 2003).

Objetivou-se, com o trabalho, testar modelos matemáticos que respondam ao comportamento experimental da secagem intermitente de arroz em casca, com vistas a identificar suas adequações na predição operacional do processo.

O projeto foi executado no Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos, do Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, da Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", da Universidade Federal de Pelotas, usando arroz irrigado, em casca, classe grãos longo finos, produzido na região sul do Rio Grande do Sul.

A colheita, mecanizada, foi realizada quando os grãos atingiram umidade próxima a 20%. Seguiu-se a operação de pré-limpeza, sendo reduzidos os teores de impurezas e/ou matérias estranhas até valores próximos a 2%.

Chegando ao Laboratório, as amostras foram submetidas à secagem intermitente sob condição de relação de intermitência 1:4, entre a câmara de secagem e de equalização, em três repetições, com ar em temperatura crescente de $70\pm 5^{\circ}\text{C}$, $90\pm 5^{\circ}\text{C}$ e $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, respectivamente na 1ª, 2ª e da 3ª até a penúltima hora, havendo redução gradual da temperatura do ar na última hora da operação, quando os grãos atingiram próxima a 13% de umidade.

Para a determinação da razão de umidade, foi calculado o equilíbrio higroscópico pela equação proposta por Henderson-Thompson para arroz em casca (Fontana, 1986).

$$UE = 0,01 \left(\frac{\ln(1-UR)}{0,000019187(T + 51,161)} \right)^{0,409}$$

Equação de Henderson-Thompson para arroz em casca, onde: UE é a umidade de equilíbrio (decimal, base seca), T é a temperatura dos grãos (°C) e UR é a umidade relativa do ar no espaço intersticial (decimal).

As diferentes equações mostradas na Tabela 1 foram utilizadas com o objetivo de identificar o modelo mais adequado para a simulação da secagem intermitente de grãos de arroz, sendo que os valores experimentais foram calculados pela equação:

$$RU = \frac{Mt - Me}{Mo - Me}$$

Onde: RU é a razão de umidade (adimensional), Mt, Mo e Me são os valores de umidade medidos no tempo t, no início da secagem e no equilíbrio higroscópico respectivamente.

Os dados experimentais de secagem foram ajustados aos cinco modelos matemáticos de secagem intermitente apresentados na Tabela 1.

Nesse quadro, k, ko, k₁, a, b, c e n, apresentam as constantes dos modelos, RU é a razão de umidade e t é o tempo de secagem. Foram avaliados os seguintes modelos matemáticos.

Tabela 1. Modelos matemáticos avaliados na secagem intermitente de arroz.

Modelo	Equação
Midilli	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$
Newton	$RU = \exp(-k \cdot t)$
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$

Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais de secagem, através de análise de regressão não-linear pelo método Simplex e Quasi-Newton, utilizando o programa computacional STATISTICA® 6.0, sendo os valores dos parâmetros dos modelos estimados em função da temperatura do ar de secagem.

O grau de ajuste do modelo aos dados experimentais foi avaliado em função da magnitude do coeficiente de determinação ajustado (R²), dos menores valores do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. O erro médio relativo e o erro médio estimado para cada um dos modelos foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y - Y_o}{Y} \right|$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_o)^2}{GLR}}$$

Onde: Y é o valor observado experimentalmente, Y_o é o valor calculado pelo modelo, n é o número de observações experimentais e GLR são os graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Para a secagem intermitente de arroz em casca nestas condições de temperatura e relação de intermitência, o valor do coeficiente de determinação ajustado (R²) variou de 0,9961 a 0,9483, o valor do erro médio relativo (P) variou de 1,7843 a 6,0571, e o valor do erro médio estimado (SE) variou de 0,0276 a 0,1717. O modelo Midilli foi o que apresentou o maior valor de R² (0,9961) e os menores valores de P (1,7843) e SE (0,0276), mostrando

ser o modelo que mais se ajusta a estes dados de secagem, resultados estes apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes de determinação (R^2), erros médio relativo (P %), erros médio estimado (SE) e tendência de distribuição dos resíduos (Res), aleatória (A) ou tendenciosa (Td), para os 05 modelos analisados, para a secagem intermitente do arroz

Modelos	R^2	SE	P	Res
Midilli	0,9961	0,0276	1,7843	A
Page	0,9850	0,0933	2,9778	A
Newton	0,9483	0,1717	6,0571	Td
Henderson e Pabis	0,9553	0,1600	5,9832	Td
Henderson e Pabis Modificado	0,9851	0,0415	3,2572	Td

Para a secagem intermitente de arroz em casca analisada, observa-se que os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98 (Tabela 02), indicando, de acordo com Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do processo de secagem, exceto para os modelos Newton e Henderson e Pabis. Para a condição analisada, todos os modelos apresentaram menores valores do erro médio estimado, e magnitudes do erro médio relativo inferior a 10%, indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), serem adequados para a descrição do processo. Verifica-se, ainda, que apenas os modelos Page e Midilli, apresentaram uma distribuição aleatória dos resíduos, resultando, assim, em melhores ajustes aos dados experimentais de secagem intermitente de arroz em casca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ANDRADE, E.T.; BORÉM, F.M.; HARDOIM, P.R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento – Especial Café**, n.7, p.37-43, 2003.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.M. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992. 450p.
- ELIAS, M.C. **Tecnologias para armazenamento e conservação de grãos, em médias e pequenas escalas**. 3ª Ed. Editora Universitária/UFPel. 2002. 218p.
- ELIAS, M. C.; FRANCO, D. F. **Pós-Colheita e Industrialização de Arroz**. In: Ariano Martins de Magalhães Júnior; Algenor da Silva Gomes; Alberto Baêta dos Santos. (Org.). **Sistemas de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. 1 ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006, v.1, p.229-240.
- ELIAS, M.C.; MARTINS, I.; AOSANI, EL.; PRESTES, D.N; DIAS, A.R.G.; SACCHET, F.S. Intermitency relation in drying and period of storage on industrial quality and the mycotoxins occurrence in corn grains (*Zea mays* L.) In: 9th International Working Conference on Stored Product Protection, 2006, Campinas. Proceedings of the 9th International Working Conference on Stored Product Protection, 2006. p. 1003-1011.
- FONTANA, C. **Propriedades físicas e térmicas do arroz**. Edições UFSM. (Caderno didático). 1986. 68p.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.
- MILMAN, M.J. **Manejo da relação de intermitência e da temperatura do ar na secagem industrial do arroz**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 96p. 2001.
- MOHAPATRA, D. RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of food engineering**, n.66, p. 513-518, 2005.
- SILVA, L.H.; COSTA, P.F.P.; DIAS, A.R.G.; ELIAS, M.C. Temperatura de encharcamento no grau de gelatinização e no rendimento do arroz parboilizado. **Tecno-Lógica**, p. 9-18. 2005.

Agradecimentos a CNPq, CAPES, SCT-RS e empresas Real Máquinas e Puro Grão.