

ESTUDO CINÉTICO E DE EQUILÍBRIO DE SECAGEM PARA PRODUÇÃO DE FARINHA DE BANANA VERDE

**SHINGGIRL SAINT GOURDIN^{1,2*}, GUSTAVO HENRIQUE FIDELIS DOS
SANTOS^{2,3}**

1 Introdução

A banana é uma fruta de importância alimentar e econômica, porém apresenta elevada perecibilidade, o que favorece perdas durante o transporte, armazenamento e comercialização. Essas perdas ocorrem devido ao amadurecimento rápido, danos mecânicos, infecções microbiológicas e falhas no armazenamento. Assim, a busca por tecnologias que prolonguem a vida útil da banana e reduzam o desperdício é fundamental para evitar prejuízos econômicos e melhorar a sustentabilidade da cadeia produtiva.

A secagem é uma operação utilizada para reduzir a quantidade de água disponível no alimento e, dessa forma, aumentar sua conservação (PARK; BIN; BROD, 2002).

A banana verde apresenta interesse para o processamento em farinha devido ao seu teor de amido, incluindo o amido resistente, e a possibilidade de utilização como ingrediente em diferentes produtos alimentícios. A transformação da banana verde em farinha também constitui uma alternativa para reduzir perdas pós-colheita e agregar valor à matéria-prima (VERNAZA et al., 2011; BEZERRA et al., 2013).

Durante a secagem, a temperatura do ar interfere na velocidade de remoção de água e no tempo necessário para que o produto atinja o equilíbrio. O acompanhamento da razão de umidade ao longo do tempo permite obter as curvas de secagem e ajustar modelos matemáticos capazes de representar o comportamento do processo. Além da cinética, o consumo energético deve ser considerado, pois depende das condições de operação e do tempo de secagem. Assim, a avaliação conjunta desses parâmetros auxilia na definição de condições adequadas para a produção de farinha de banana verde.

1 Graduanda em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Laranjeiras do Sul, contato: shinggirlsaintgourdin10@gmail.com

2 Grupo de Pesquisa: Modelagem Teórica e Simulações de Sistemas Físicos

3 Doutor Engenharia Química, Universidade Federal da Fronteira Sul, **Orientador**.

2 Objetivos

Avaliar a cinética de secagem da banana-da-terra verde fatiada em diferentes temperaturas, por meio do ajuste dos modelos matemáticos de Newton e Page, e determinar o consumo energético do secador nas condições avaliadas.

3 Metodologia

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Análise de Alimentos e de Operações Unitárias da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Laranjeiras do Sul. Foram utilizados frutos de banana-da-terra em estágio de maturação verde, adquiridos no comércio local. Após seleção e lavagem, os frutos foram descascados e fatiados longitudinalmente com espessura aproximada de 3 mm.

As amostras foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar forçado (TECNAL, modelo SL-100), nas temperaturas de 25, 45, 65 e 85 °C. A massa foi monitorada em intervalos de 30 minutos até atingir valor constante. O teor de água de equilíbrio foi determinado em estufa a 105 °C por 24 h, conforme Instituto Adolfo Lutz (2008). A cinética foi representada pela razão de umidade (RX) em função do tempo, e os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Newton e Page por regressão não linear.

Para o cálculo da razão da umidade para cada ensaio foi utilizado a equação abaixo:

$$RX = \frac{X(t) - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que:

X(t): teor de água do produto em função do tempo (b.s); X_i: teor de água inicial do produto (b.s); X_e: teor de água de equilíbrio do produto (b.s).

As equações dos modelos matemáticos empíricos de Newton e de Page são apresentados abaixo:

$$\text{Newton:} \quad RX = e^{-k \cdot t} \quad (2)$$

$$\text{Page:} \quad RX = e^{-k \cdot t^n} \quad (3)$$

Em que:

t: tempo de secagem (min); k: coeficiente cinético de secagem (min⁻¹); n: constante do modelo.

O consumo energético do secador foi determinado pela fórmula geral da potência térmica necessária para aquecer o ar (ÇENGEL; BOLE, 2013):

$$E = (\rho \cdot v \cdot A \cdot C_p \cdot \Delta T) \cdot t \quad (4)$$

Em que:

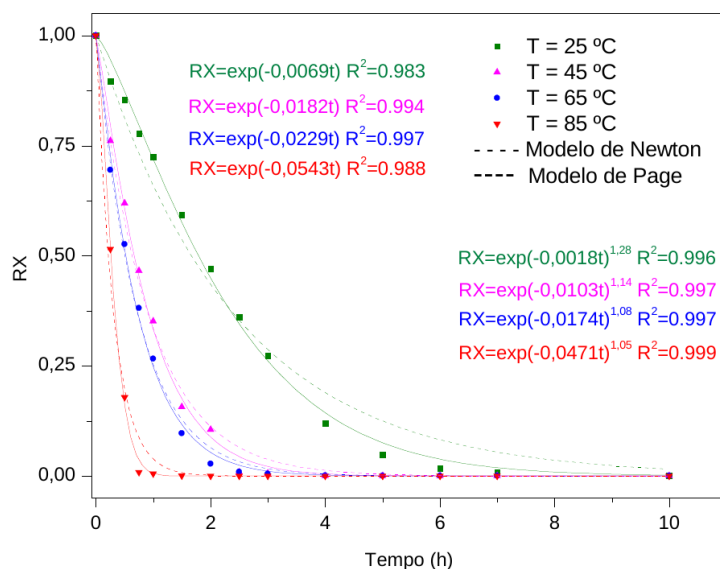
E: energia consumida (kWh); ρ : densidade do ar de secagem (kg m^{-3}); v: velocidade do ar de secagem (m s^{-1}); A: área superficial de secagem (m^2); C_p : calor específico do ar de secagem ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); ΔT : diferença de temperatura do ar de secagem com a temperatura ambiente (K); t: tempo de secagem (h).

A área superficial, a velocidade do ar e a temperatura ambiente foram mantidas em $0,006649 \text{ m}^2$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $20 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Os valores de densidade e calor específico do ar foram obtidos da literatura (INCROPERA; DEWITT, 2003; SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2007).

4 Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta as curvas de secagem da banana verde fatiada nas temperaturas de 25, 45, 65 e 85 $^\circ\text{C}$, juntamente com os ajustes dos modelos de Newton e Page. Observou-se redução contínua da razão de umidade durante o processo. O aumento da temperatura reduziu o tempo necessário para atingir o equilíbrio: a secagem foi mais lenta a 25 $^\circ\text{C}$, enquanto a 85 $^\circ\text{C}$ ocorreu a maior velocidade de remoção de água. Esse comportamento está relacionado ao aumento da energia térmica disponível em temperaturas mais elevadas, favorecendo a transferência de água do interior do produto para o ar de secagem (MODENESE, 2011).

Figura 1. Cinética de secagem nas temperaturas de 25, 45, 65 e 85 $^\circ\text{C}$ com ajustes dos modelos matemáticos de Newton e Page.



Os dois modelos apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação superiores a 0,98. O modelo de Page apresentou os maiores valores de R^2 nas quatro temperaturas, variando de 0,996 a 0,999. Para esse modelo, o coeficiente cinético k aumentou de $0,0018 \text{ min}^{-1}$, a 25°C , para $0,0471 \text{ min}^{-1}$, a 85°C , confirmando o aumento da velocidade de secagem com a elevação da temperatura. O modelo de Newton também representou adequadamente os dados, com R^2 entre 0,983 e 0,997, porém com ajuste ligeiramente inferior ao modelo de Page. Nos ensaios não foi observada a presença de um período de taxa constante, sendo a secagem predominante controlada pela difusão interna da umidade, característica comum em alimentos ricos em amido, como a banana verde.

O consumo energético e o tempo de secagem nas diferentes temperaturas são apresentados na Tabela 1. A 25°C , o consumo calculado foi de 0,360 kWh, com tempo de secagem de 7 h. Nas temperaturas de 45 e 65°C , os consumos foram de 0,734 e 1,021 kWh, com tempos de 3 e 2,5 h, respectivamente. A 85°C , o tempo foi reduzido para 0,75 h e o consumo foi de 0,410 kWh.

Tabela 1. Valores dos parâmetros operacionais e da energia consumida pelo secador na secagem da farinha de banana verde fatiada nas temperaturas de 25, 45, 65 e 85°C .

Temperatura de Secagem ($^\circ\text{C}$)	Densidade do ar de secagem (kg m^{-3})	Calor específico do ar de secagem ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Tempo de secagem (h)	Energia do secador (kW h)
25	1,184	1,005	7	0,360
45	1,127	1,005	3	0,734
65	1,044	1,006	2,5	1,021
85	0,967	1,007	0,75	0,410

Embora 25°C tenha apresentado o menor consumo energético, essa condição exigiu o maior tempo de processo. A 85°C , o consumo foi aproximadamente 12% superior ao observado a 25°C , mas o tempo de secagem foi reduzido de 7 h para 0,75 h. Por outro lado, 45 e 65°C apresentaram consumos maiores sem alcançar o menor tempo de secagem. Estes resultados indicam que conduzir a secagem em 45 ou 65°C talvez não seja a melhor estratégia, pois possuem maior custo energético e não possuem os menores tempos de secagem. Por outro lado, conduzir a secagem a 25°C se mostrou a estratégia mais econômica, porém com um processo lento. Por fim, entre as quatro temperaturas testadas, a secagem a 85°C foi a condição de maior velocidade de secagem, com custo energético não tão elevado em comparação a mais

econômica, conciliando menor tempo de processo e melhor desempenho energético, conforme também observado por Modenese (2011).

5 Conclusão

A temperatura influenciou a cinética e o consumo energético da secagem da banana-da-terra verde fatiada. O aumento da temperatura acelerou a remoção de água e reduziu o tempo de processo. Os modelos de Newton e Page apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, com melhor desempenho do modelo de Page. Entre as temperaturas avaliadas, 85 °C apresentou o menor tempo de secagem, de 0,75 h, e consumo energético de 0,410 kWh, mostrando melhor relação entre velocidade de secagem e energia consumida.

Referências Bibliográficas

- BEZERRA, C. V. et al. Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed: effect of drying on physicochemical, functional and morphological characteristics of the starch. *Industrial Crops and Products*, v. 41, p. 241-249, 2013.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Termodinâmica*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.
- MODENESE, D. Efeito da radiação gama e de tratamentos hidrotérmicos sobre as características físico-químicas, funcionais e nutricionais da farinha e do amido de banana verde (*Musa acuminata* cv. Nanica). 2011. Dissertação - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2011.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 2002.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- VERNAZA, G. V. et al. Addition of green banana flour to instant noodles: rheological and technological properties. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1157-1165, 2011.

Palavras-chave: Cinética de secagem; banana verde; modelo de Page; consumo energético.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2025-0225

Financiamento: Fundação Araucária