



Análise da cinética e modelagem matemática da secagem da polpa de buriti (*mauritia flexuosa l*)

Analysis kinetics and mathematical models of the buriti's pulp drying

Ila Raquel Mello Cardoso¹

Abraham Damian Giraldo Zuniga²

Pãmella Fronza³

Amanda Galvão Maciel⁴

Jéssica da Silva Ferreira⁵

Resumo: A planta do buriti *Mauritia flexuosa L.* de origem amazônica é também encontrado nas regiões brasileiras do Tocantins, Goiás, Maranhão entre outros. A desidratação é considerada uma tecnologia relativamente simples, contribuindo para a remoção da umidade do alimento aos níveis de conservação, o aumento da vida de prateleira, a diminuição do peso do produto final para o transporte entre outros benefícios. O presente trabalho teve como objetivos: estudar a cinética de secagem da polpa de buriti nas temperaturas de 40°C ±2°C, 50°C ±2°C e 60°C ±3°C, aplicar e ajustar modelos matemáticos para estes dados experimentais. Foram utilizados frutos do buriti colhidos frescos e maduros da cidade de Palmas - TO. Para determinar a cinética de secagem, a polpa do buriti foi modelada em 3 (três) formatos distintos de cilindros (discos), cubos e losangos. Quando comparado os modelos matemáticos de Henderson e Pabis e de Newton para o estudo da cinética de secagem, aquele apresentou os melhores ajustes para todos os coeficientes de diferentes temperaturas e formatos, com os valores dos coeficientes de determinação (R²) superiores a 0,9982 e erro médio relativo (P) inferior a 10%. A polpa do buriti no formato de cilindros apresentou umidade de equilíbrio com o tempo de 22h, 17h e 13h para as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C respectivamente. A polpa de buriti no formato de cubos ,para as temperaturas de 60°C, 50°C e 40°C,

¹ UFT – Universidade Federal do Tocantins

² UFT – Universidade Federal do Tocantins

³ UFT – Universidade Federal do Tocantins

⁴ UFT – Universidade Federal do Tocantins

⁵ UFT – Universidade Federal do Tocantins

apresentou tempo de equilíbrio de 12h, 16h e 18h respectivamente. Já a modelagem de losangos apresentou equilíbrio de umidade de 11h, 16h e 20h para as respectivas temperaturas de 60°C, 50°C e 40°C.

Palavras-chave: Desidratação; curva de secagem; umidade de equilíbrio.

Abstract: Espaçamento de 1,5, Times New Roman 12. Máximo de vinte linhas. The buriti plant (*Mauritia flexuosa* L) has an amazonic origin and can also be found on the brazilian regions of Tocantins, Goiás, Maranhão and other states. The dehydration is considered a relatively easy technology, contributing to the removal of the food moisture to the levels of conservation, the validity of the food on the shelf, the diminishing of the product's final weight for the transportation and other benefits. This work has as goals: study the kinetics of the buriti's pulp drying at the temperatures of 40°C \pm 2°C, 50°C \pm 2°C and 60°C \pm 3°C, apply and adjust mathematical models for these experimental data. Were used mellow and fresh buriti's fruits harvested on the city of Palmas – TO. In order to determine the drying kinetic, the buriti pulp was modeled in 3 (three) distinct shapes of cylinders (discs), cubes and rhombuses. When comparing the mathematical models of Henderson and Pabis and the one of Newton for the study of drying kinetic, the one who has shown the best adjusts for all the coefficient of different temperatures and shapes, with the values of the determination coefficients (R^2) higher than 0,9982 and mean relative error lower than 10%. The buriti's pulp in the cylinder shape showed equilibrium moisture content within the time of 22h, 17h and 13h for the temperatures of 40°C, 50°C and 60°C, respectively. The buriti's pulp in the shape of cubes for the temperature of 60°C, 50°C and 40°C, showed a balance time of 12h, 16h and 18h respectively. When it comes to the rhombuses modeling, it showed equilibrium moisture content of 11h, 16h and 20h for the respective temperatures of 60°C, 50°C and 40°C.

Keywords: Dehydration; drying curve; equilibrium moisture content.

1. Introdução

A planta do buriti *Mauritia flexuosa* L. é encontrado nas regiões da Colômbia, Venezuela, Equador, Peru, Bolívia e no Brasil nos estados do Amazonas, Bahia, Ceará, Goiás, Maranhão, Minas Gerais, Pará, Piauí, Roraima, São Paulo e Tocantins. Tendo como origem na região amazônica (BRASIL, 2005).

As frutas e hortaliças produzidas no estado do Tocantins assim como na Amazônia legal, em alguns períodos do ano apresentam dificuldades de comercialização devido ao grande volume de produção, falta de tecnologias adequadas e de processamentos viáveis na produção; contribuindo para maior perda e desperdício destes alimentos ainda na colheita. (DARNET, 2011).

Como a desidratação é um processo de conservação de fácil aplicação quando relacionado a outros processamentos em alimentos, este método aumenta a vida de prateleira, diminui o peso do produto final para o transporte, diminui o espaço necessário para o armazenamento e melhora a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos (GUIMARÃES et al., 2008).

A desidratação é considerada um dos processos mais importantes de preservação de alimentos associado a diminuição da atividade de água, tendo como finalidade a redução do teor de umidade do produto, a nível adequado à sua estocagem por um período prolongado, mantendo ao máximo a qualidade do produto final (ZUNIGA et al, 2004).

Em escala industrial a desidratação é definida como a retirada de água pela aplicação de calor sob condições controladas de temperatura, umidade e corrente de ar, para manter as características sensoriais de aparência, cor, textura e valor nutricional do alimento. Por meio desta tecnologia as frutas desidratadas, ricas em fibras, potássio, ferro, cálcio, vitamina A e carboidratos conservam e concentram estes compostos, devido à redução da quantidade de água (FELLOWS, 2006).

Por meio da análise do tempo de secagem, temperatura de desidratação, dimensionamento e características dos alimentos realiza-se o estudo da cinética de secagem. As taxas de secagem estão associadas ao produto e a operação (processo e equipamento), sendo assim, pode-se avaliar, projetar e otimizar a qualidade do produto em função das variáveis do processo de secagem. Assim as curvas de secagem demonstram um comparativo entre a velocidade de secagem e conteúdo de umidade do alimento em um período de tempo, cuja finalidade principal é compreender o comportamento que o equipamento apresenta durante o processo de secagem (VALENTAS; ROTSTEIN; SINGH, 1997).

Para descrever adequadamente o estudo da cinética de secagem ajustam-se diferentes modelos matemáticos, entre estes existem o Lewis, de Page, de Thompson, de Midilli Modificado, de Verma, de Resíduos Sucessivos e de Henderson e Pabis modificado (ALVES et

al., 2012). Estes modelos se baseiam, de modo geral, na Lei de Newton para resfriamento, aplicada à transferência de massa. Porém esta lei é aplicada apenas em condições isotérmicas e a resistência à transferência de umidade ocorre somente na superfície do produto (PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

O modelo de Henderson e Pabis é considerado uns modelos empíricos obtido pela simplificação das séries da Segunda Lei de Fick, modelo teórico de difusão líquida utilizado para descrição da secagem de materiais alimentícios, apresentando bons resultados, tanto para produtos vegetais, quanto animais (ALVES et al., 2012)

O estudo da cinética de secagem é uma alternativa para avaliar as alterações da qualidade durante o processo de secagem de alimentos, pois esta dependente da temperatura, do tempo e da quantidade de umidade presente neste produto, sendo uma importante informação para o design de secadores e para o processamento, minimizando os efeitos adversos da qualidade do produto final (STEFFENS, 2011).

A aplicação desta tecnologia na polpa do buriti seria uma alternativa para conservar e garantir o comércio do fruto em períodos de entressafra. O presente trabalho teve como objetivos: estudar a cinética de secagem da polpa de buriti nas temperaturas de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, aplicar modelos matemáticos para os dados experimentais, ajustar o melhor modelo de acordo com o comportamento destes dados.

2. Material e Métodos

Os frutos do buriti foram colhidos frescos e maduros, com tamanho e forma uniformes, na região do município de Palmas - TO, entre os períodos de setembro e dezembro de 2013. As amostras foram avaliadas no LAPSDEA – Laboratório de Separação de Biomoléculas e Desidratação de Alimentos da Universidade Federal do Tocantins – UFT.

2.1. Preparo das amostras

Os frutos foram selecionados, lavados e sanitizados em água clorada (5 ppm) durante 30 minutos, e em seguida, lavados com água destilada para retirar o resíduo do cloro.

Após a lavagem os frutos foram submetidos ao processo de cocção por três horas a 100°C , e em seguida, despulpados, separando o fruto em quatro partes: casca, polpa, fibra e semente (SANTOS et al., 2011). As polpas do buriti foram congeladas em freezer convencional na temperatura aproximadamente de -18°C em porções de aproximadamente 0,5kg, sendo esta descongelada sob refrigeração somente nos dias específicos do estudo da cinética de secagem.

O processamento foi realizado segundo o fluxograma mostrado na Figura 1.

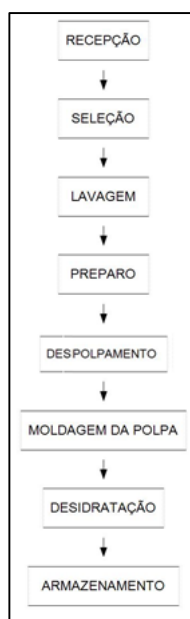


Figura 1. Fluxograma de processamento da polpa.

2.2. Cinética de secagem

Para a determinação da cinética de secagem da polpa do buriti, foram utilizados 3 (três) formatos de cilindros (discos), cubos e losangos com dimensões de 3cm de diâmetro, 2,5 cm de comprimento e 3cm de diagonal, respectivamente, sendo que a espessura destes foram de aproximadamente 3mm.

A desidratação da polpa foi realizada por secagem de contato com ar quente, em desidratador do tipo cabine com bandejas perfuradas (Modelo PD 15 - MELONE). As amostras foram retiradas do desidratador em intervalos de uma hora, até obtenção do equilíbrio dinâmico. Este estudo foi realizado em 5 amostras para cada formato distinto, utilizando as temperaturas de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $50^{\circ}\text{C} \pm 2$ e $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

A quantificação da redução do teor de água dos frutos durante a secagem foi realizada pelo método gravimétrico (perda de massa), utilizando-se uma balança analítica com precisão de 0,01 g. Para avaliar se o teor de água desejado nos frutos de buriti foi atingido, determinou-se o estudo da taxa de secagem do produto.

Na análise de dados da secagem a razão de umidade (RU) é essencial para descrever diferentes modelos de secagem.

As curvas generalizadas de secagem são outro meio de avaliar a umidade de uma amostra. Trata-se de curvas que relacionam a umidade adimensionalizada das amostras com uma variável adimensional de tempo (MENEZES, 2013).

A cinética de secagem convectiva também pode ser caracterizada a partir dos dados do adimensional de umidade em função do tempo do processo. Os modelos descritos na Tabela 1, a seguir, são alguns modelos matemáticos aplicados para estudo da cinética.

Tabela 1. Modelos matemáticos para curva de secagem

Designação do modelo	Modelo Matemático
Modelo de Newton ¹	$RU = \exp(-k \cdot t)$
Modelo de Page ²	$RU = \exp(-ktn)$
Modelo de Thompson ³	$RU = \exp\{[-a - (-a^2 + 4bt)0,5](2b) - 1\}$
Modelo de Henderson e Pabis ⁴	$RU = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$

¹ (PAGE, 1949); ² (PAGE, 1949), ³ (THOMPSON; PEARTT; FOSTER, 1968), ⁴ (KARATHANOS, 1999).

2.3. Análise estatística

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* Sigmaplot versão 12.5. A escolha do modelo mais adequado para a cinética de secagem baseou-se nos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2).

3. Resultados e Discussão

De acordo com a metodologia aplicada ao estudo da cinética de secagem, na Tabela 2, tem-se um comparativo dos resultados obtidos nos modelos matemáticos de Henderson e Pabis e Modelo de Newton, pois foram os modelos com melhores ajustes aplicados para este experimento. Foi avaliado a razão de umidade, coeficiente de determinação, desvio padrão estimado e erro médio relativo para os diferentes formatos e temperaturas de secagem da polpa do buriti.

Tabela 2. Valores dos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P) obtidos para os modelos matemáticos na descrição da cinética de secagem de polpa de buriti.

Formato	Modelo	Temperatura	R^2	SE	P(%)
Cilindro	Modelo de Henderson e Pabis	60±3°C	0,9999	0,0022	<0,01
		50±2°C	0,9993	0,0072	<0,01
		40±2°C	0,9996	0,0049	<0,01
Cubo	Modelo de Henderson e Pabis	60±3°C	0,9996	0,0054	<0,01
		50±2°C	0,9992	0,0075	<0,01
		40±2°C	0,9999	0,0028	<0,01
Losango	Modelo de Henderson e Pabis	60±3°C	0,9995	0,0062	<0,01
		50±2°C	0,9992	0,0069	<0,01
		40±2°C	0,9994	0,0053	<0,01
Cilindro	Modelo de Newton	60±3°C	0,8287	0,0521	<0,01
		50±2°C	0,7653	0,1264	0,02
		40±2°C	0,7866	0,1182	<0,01
Cubo	Modelo de Newton	60±3°C	0,7201	0,1226	0,37
		50±2°C	0,8065	0,1124	<0,01
		40±2°C	0,7399	0,1284	0,03
Losango	Modelo de Newton	60±3°C	0,7275	0,1185	0,32
		50±2°C	0,6652	0,1149	0,19
		40±2°C	0,7085	0,1306	0,03

Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), os valores dos coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis para o fenômeno de secagem devem ser superiores a 0,9982 e erro médio relativo (P) inferior a 10%. Analisando-se o modelo de Henderson e Pabis aplicado para polpa de buriti, todos os coeficientes estavam em condições aceitáveis para diferentes temperaturas de secagem e formatos da polpa. Já para o modelo de Newton apresentou valores de coeficientes inferiores.

Em relação ao critério de erro médio relativo (P), ambos os modelos aplicados apresentaram valores aceitáveis para diferentes temperaturas de secagem e formatos da polpa. Lembrando-se que o formato da polpa em cubo para o modelo de Newton, sob temperatura de aproximadamente 60°C apresentou o maior valor para o erro médio relativo (P). Estudos relacionados à secagem de frutos de café mostraram o modelo de Henderson e Pabis modificado com melhores ajustes, valores de coeficientes de determinação ($R^2 > 99,98\%$), valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa $P < 4,16\%$ e $SE < 0,012$, respectivamente (ALVES et al., 2012). Quando comparado o desvio padrão da estimativa do presente trabalho com esta secagem dos frutos de café, o modelo de Newton apresentou valores superiores a 0,012, sendo que o de Henderson e Pabis apresentou valores aceitáveis inferiores a este.

Nas figuras 2, 3 e 4 são demonstradas as curvas de secagem relacionadas ao comportamento da razão de umidade (adimensional) do fruto de buriti em função do tempo (h), cujo modelo de Henderson e Pabis modificado apresentou maior concordância entre estes valores observados experimentalmente.

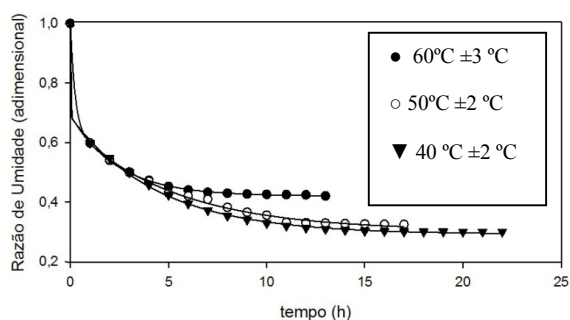


Figura 2. Curva de Secagem da polpa de buriti no formato de cilindros.

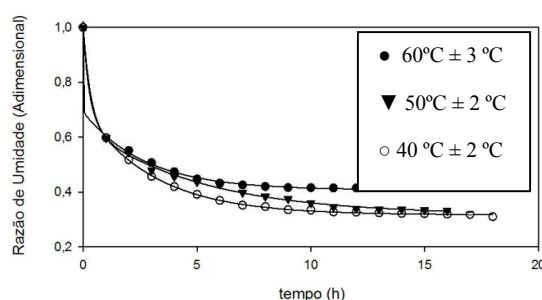


Figura 3. Curva de Secagem da polpa de buriti no formato de cubos.

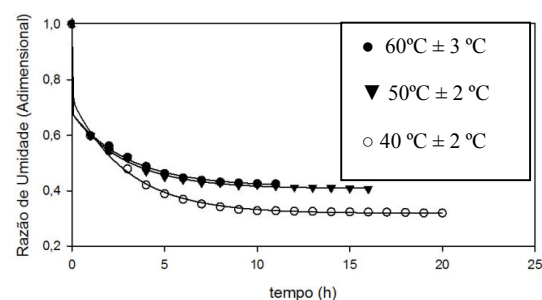


Figura 4. Curva de secagem da polpa de buriti no formato de losangos.

Observou-se nas figuras 2, 3 e 4 que o tempo de secagem variou de acordo com a temperatura e modelagem da polpa. A perda do conteúdo de umidade é mais rápida no início do processo de secagem. Com relação à temperatura, notou-se que quanto mais elevada, maior é a taxa de secagem e menor o tempo para atingir a umidade de equilíbrio.

Segundo Menezes (2013), o estudo sobre curva de secagem do bagaço do maracujá-amarelo apresentou uma redução do tempo de secagem de acordo com o aumento da temperatura, para a temperatura de 35°C a amostra levou 225 min para atingir a umidade de equilíbrio, enquanto que na temperatura de 65°C, o tempo de secagem foi de 120 min.

É necessário avaliar o formato da moldagem adotada na obtenção da polpa para desidratação, pois assim compreende-se a dificuldade de remoção para as diferentes formas,

analisando-se o processo de secagem e de apresentação do produto final mais eficiência neste processo (CARNEIRO e CARNEIRO, 2011).

Nota-se na figura 2 que para a temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a polpa de buriti no formato de cilindros apresentou umidade de equilíbrio com o tempo de 22h, para as temperaturas de 50°C e 60°C atingiu-se o equilíbrio com o tempo de 17h e 13h, respectivamente.

A figura 3, para a polpa de buriti no formato de cubos, apresentou para as temperaturas de aproximadamente 60°C , 50°C e 40°C tempo de equilíbrio de 12h, 16h e 18h respectivamente. A figura 4, para a modelagem de losangos apresentou equilíbrio de umidade de 11h, 16h e 20h para as respectivas temperaturas de aproximadamente 60°C , 50°C e 40°C , sendo que esta atingiu a umidade de equilíbrio com tempo inferior quando comparado com as demais modelagens.

Quando comparado os diferentes formatos da polpa do buriti, observou-se que o tempo de equilíbrio de umidade para os formatos de losango e cubo coincidiram para a temperatura de 50°C e 60°C . Já o formato de cilindro apresentou maiores tempos de equilíbrio para todas as temperaturas.

4. Conclusão

De acordo com os resultados obtidos no estudo da cinética de secagem para polpa de buriti (*Mauritia flexuosa* L), conclui-se que o Modelo de Henderson e Pabis apresentou melhores ajustes para os diversos formatos de moldagem e temperatura de secagem. Concluiu-se que a modelagem de losangos atingiu equilíbrio de umidade com tempo de 11h para 60°C , sendo este a melhor modelagem devido ao menor intervalo quando comparado com as demais modelagens.

5. Referências

Artigo em revista:

ALVES, G. E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, Lavras, 2012.

CARNEIRO, J.G.M., CARNEIRO, J. G.M. Frutos e polpa desidratada buriti (*Mauritia flexuosa* L.): aspectos físicos, químicos e tecnológicos. *Revista Verde*, Mossoró, 2011.

DARNET, S. H. et al. Nutritional composition, fatty acid and tocopherol contents of buriti (*Mauritia flexuosa*) and patawa (*Oenocarpus bataua*) fruit pulp from the Amazon region. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 2011.

GUIMARÃES, M. M. et al. Valor nutricional e características químicas e físicas de frutos de murici-passa (*Byrsonima verbascifolia*). *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 2008.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 1999.

MADAMBAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. h.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 1996.

MENEZES, M. L. et al. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. *ENGEVISTA*, 2013.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 2002.

PAGE, C. Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers. 1949. Purdue University, Lafayette, 1949.

SANTOS, C. A.; RIBEIRO, R. C.; E. V. C. S.; SILVA, N. S.; SILVA, B. A.; SILVA, G. F.; BARROS, B. C. V. Elaboração de biscoito de farinha de buriti (*mauritia flexuosa l. F*) com e sem adição de aveia (*avena sativa l.*). *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, Paraná, 2011.

STEFFENS, R. S. Proposta de aplicação do desing higiênico de equipamentos e instalações de um sistema de controle de temperatura em um secador de bandeja de bancada. Porto Alegre, 2011.

THOMPSON, T. L.; PEARTT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. *Transactions of the ASAE*, 1968.

Artigo em congresso:

ZUNIGA, A. D. G.; ARÉVALO-PINEDO, A.; RODRIGUES, R.M.; LIMA, C. S. S.; FEITOSA, A.C. *Drying curves and water activity evaluation for sliced jackfruit (Artocarpus Integrifolia)*. Proceedings of the 14th International Drying Symposium. São Paulo, 2004.

Livro:

BRASIL, EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Porto Velho, 2005.

FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos*. 2 ed. Porto Alegre: Arned, 2006.

VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R. P. *Handbook of food engineering practice*. New York: Boca Raton, 1997.