

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE RESÍDUO DE ACEROLA EM FORNO DE MICRO-ONDAS

Ana Paula Moisés de Sousa (1); Ana Regina Nascimento Campos (2)

(Universidade Federal de Campina Grande, anapaulinha_15_6@hotmail.com; arncampos@yahoo.com.br)

Resumo: A acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) é uma fruta amplamente cultivada no nordeste brasileiro, bastante apreciada por sua polpa ácida, sendo a parte mais aproveitada na forma *in natura* ou processada. Assim, há uma produção significativa de resíduos que não são explorados e, portanto, é de interesse científico e tecnológico o desenvolvimento de estratégias para agregar valor econômico a esses resíduos. A secagem por forno de micro-ondas (FMO) tem sido estudada ao longo dos últimos anos e tem se mostrado uma tecnologia promissora. A cinética de secagem em FMO e o ajuste de modelos matemáticos já foram estudados para diversos produtos agrícolas, no entanto, poucos estudos exploraram a acerola e seu resíduo. Desta forma, a obtenção de um modelo matemático que represente satisfatoriamente os dados experimentais, é de suma importância para minimizar as alterações promovidas pela secagem em FMO, obtendo-se, produtos de qualidade. Portanto, objetivou-se com o presente trabalho, descrever a cinética de secagem do resíduo de acerola em FMO, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. As equações de Newton, Page, Henderson e Pabis, Logarítimo e Midilli foram ajustadas aos dados experimentais e avaliadas segundo o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM). Os modelos propostos se ajustaram bem aos dados experimentais, porém o melhor foi o de Midilli, por apresentar maior R^2 e menor DQM, indicando que este modelo representa satisfatoriamente o fenômeno de secagem de resíduo de acerola em FMO. O processo de desidratação em FMO tanto reduziu o tempo de secagem quando comparado a outros métodos convencionais, como também reduziu o teor de água final apresentado pelo resíduo. Portanto, o estudo da cinética de secagem e o ajuste de modelos matemáticos podem ser aplicados para o resíduo de acerola, contribuindo para a otimização do processo em FMO.

Palavras-Chave: Acerola; resíduo de acerola; cinética de secagem; forno de micro-ondas; modelos matemáticos;

Introdução

O Brasil destaca-se por sua biodiversidade, podendo encontrar distintas frutas com grande potencial para consumo e propriedades importantes para a saúde e alimentação. Devido ao sabor de destaque e ao teor nutricional, a acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) é uma delas. Esta fruta tropical, originária dos países da América, é apreciada por sua polpa ácida, sendo a parte mais aproveitada em termos comerciais, usada *in natura*, na forma de suco ou como matéria-prima para elaboração de produtos derivados como compotas, geleias, licores, sorvetes, balas, barras nutritivas, néctares, entre outros (FREITAS et al., 2006; SEGTOEWICK et al., 2013).

Amplamente cultivada na região Nordeste do país, a maior parte da produção de acerola é absorvida pela indústria de processamento, pois o período de vida útil é curto após a colheita, devido às reações bioquímicas de deterioração que comprometem a qualidade do fruto. Sendo assim, o processamento visa potencializar sua durabilidade, além de facilitar o transporte e agregar

valor ao produto (ALVES et al., 2010). Em consequência, a geração de resíduos, constituídos de semente, casca e bagaço, tornou-se significativa (ARAÚJO, 2017).

Os resíduos, entre 15 e 41% do volume total de toda acerola processada, ainda são pouco explorados e, portanto, é de interesse científico e tecnológico o desenvolvimento de estratégias para agregar valor econômico (BRAGA et al., 2011). A secagem, por ser o processo mais utilizado na preservação da qualidade e estabilidade de produtos alimentícios, representa uma alternativa viável de aproveitamento dos resíduos, podendo gerar um material com potencial aplicação na indústria alimentícia (MOURA, 2016).

A secagem por forno de micro-ondas (FMO) tem sido estudada ao longo dos últimos anos e tem se mostrado uma tecnologia promissora. A utilização dessa tecnologia se mostra mais eficiente na realização da secagem, pois o tempo de operação é bastante reduzido em comparação a outros métodos, promovendo menor perda da qualidade do produto, o que motiva o emprego do aparelho de micro-ondas doméstico (MATA et al., 2014). A cinética de aquecimento e secagem, bem como a interação do campo eletromagnético com o material a ser aquecido está diretamente associada às propriedades dielétricas que interagem com o material como um todo, facilitando a secagem e favorecendo um melhor transporte de água (TELÖKEN, 2016).

A secagem pode ser descrita por modelos matemáticos, que permitem a obtenção de estimativas do tempo necessário para a perda de água do produto, tornando-se ferramentas úteis para as tomadas de decisão e contribuem para a melhoria da eficiência do processo (KADAM; BALASUBRAMANIAN, 2011; MEZIANE, 2011; SOUSA et al., 2011, ARAÚJO et al, 2017). Os modelos matemáticos de Newton (O'CALLAGHAN; MENZIES; BAILEY, 1971), Page (1949), Henderson e Pabis (1962), Logarítimo (YAGCIOGLU et al., 1999) e Midilli et al. (2002) são largamente adotados em processos de secagem.

A cinética de secagem em FMO e o ajuste de modelos matemáticos já foram estudados para diversos produtos agrícolas, tais como cenoura (*Daucus carota* L.) (ANDREOLA et al., 2013), feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) (MATA et al., 2014), vagem de algaroba (*Prosopis juliflora* (S.w.) D.C.) (COSTA et al., 2016), casca de jaca (SOUSA et al., 2016), porém poucos estudos exploraram a acerola e seu resíduo.

Desta forma, a obtenção de um modelo matemático que represente satisfatoriamente os dados experimentais, é de suma importância para minimizar as alterações promovidas pela secagem, obtendo-se, produtos de qualidade (MENDONÇA et al., 2015). Portanto, objetivou-se

com o presente trabalho, descrever a cinética de secagem do resíduo de acerola em FMO, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais.

Metodologia

Foi adquirido resíduo de acerola em uma indústria de polpas de frutas no município de Nova Floresta-PB, durante o período de agosto de 2017, e conduzido até o Laboratório de Bioquímica e Biotecnologia de Alimentos, Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A secagem das amostras de resíduo foi realizada em um forno de micro-ondas (2450 MHz e 700 W), com potência de 80%, e massa de amostra de 50 g. Antes e após o início de cada secagem, foram retiradas amostras para determinação do teor de água, conforme metodologia descrita em IAL (2008). O experimento foi realizado em duplicata, sendo as pesagens dos resíduos obtidas em balança semi-analítica. As leituras contínuas em relação à perda de massa de cada amostra foram realizadas em intervalos regulares, sendo de 2 minutos, até que as amostras atingissem massa constante.

A razão de teor de água (RX) é definida como sendo a diferença entre o teor de água, em base seca, em um dado tempo de secagem, e o teor de água de equilíbrio, dividida pela diferença entre o teor de água no início da secagem e o teor de água de equilíbrio. Portanto, as curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados referentes à perda de água no parâmetro adimensional RX, realizados para cada intervalo de tempo, conforme Equação 1.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

em que:

RX - razão de teor de água, adimensional;

X - teor de água, base seca, b.s;

X_e - teor de água de equilíbrio, b.s; e

X_0 - teor de água inicial, b.s.

Para o ajuste dos modelos matemático das curvas de secagem de resíduo de acerola aos dados experimentais, utilizaram-se as equações descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos de regressão não-linear aplicados às curvas de secagem de resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), em forno de micro-ondas

Modelo	Equação
Newton	$RX = \exp(-k.t)$ (2)
Page	$RX = \exp(-k.t^n)$ (3)
Henderson e Pabis	$RX = a.\exp(-k.t)$ (4)
Logarítimo	$RX = a.\exp(-k.t)+c$ (5)
Midilli	$RX = a.\exp(-k.t^n)+b.t$ (6)

RX - Razão de teor de água, adimensional; a, b, c, k, n, - Parâmetros do modelo, adimensional; t - Tempo de secagem, min.

Para os ajustes dos dados experimentais, realizaram-se as análises de regressão não-linear pelo método Quasi-Newton, empregando-se o *software* Statistica 8.0. Os critérios de avaliação utilizados para a escolha dos modelos foram o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM), calculado pela Equação 7 (SANTOS et al., 2016).

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum(RX_{exp} - RX_{pre})^2}{N}} \quad (7)$$

em que:

DQM - desvio quadrático médio;

RX_{exp} - razão de teor de água experimental;

RX_{pre} - razão de teor de água predito;

N - número de dados experimentais.

Resultados e discussão

Os valores dos parâmetros dos modelos de Newton, Page, Henderson e Pabis, Logarítimo e Midilli ajustados aos dados experimentais das curvas de cinéticas de secagem de resíduo de acerola em FMO, com os correspondentes R^2 e DQM estão representados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste dos modelos das curvas de cinética de secagem de resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), em forno de micro-ondas

Modelos	Parâmetros					R ²	DQM
	a	k	b	c	n		
Newton	-	0,176	-	-	-	0,982	0,067
Page	-	0,077	-	-	1,437	0,997	0,028
Henderson e Pabis	1,056	0,185	-	-	-	0,985	0,062
Logarítimo	1,381	0,101	-	0,367	-	0,998	0,010
Midilli	0,997	0,091	0,007	-	1,244	0,999	0,006

O melhor modelo para a secagem apresenta valor de R² ajustado e valor de DQM o mais próximo de um e zero, respectivamente. Todos os modelos apresentaram valores de R² próximos a unidade e baixos valores de DQM (Tabela 2).

Os modelos matemáticos de Page, Logarítimo e Midilli foram os que melhor representaram os dados experimentais para prever a cinética de secagem do resíduo de acerola em FMO, em virtude de apresentarem os maiores R² e menores DQM (Tabela 2), sendo o modelo de Midilli escolhido para representar o fenômeno de secagem dos resíduos, indicando uma representação satisfatória desse modelo para o processo de secagem.

Rosa (2010) analisou a secagem de cenoura em micro-ondas e a qualidade do produto final, em que dentre os modelos de Lewis e Page utilizados no estudo do processo, o modelo de Page foi o que melhor descreveu a cinética de secagem. Ribeiro (2013) avaliou a cinética de secagem de tomate em micro-ondas seguido de secagem convectiva, na qual se aplicou o modelo de Page para descrever o comportamento das curvas de secagem. Mata et al. (2014) analisaram a modelagem matemática do processo de secagem de feijão verde *in natura* e com desidratação osmótica, utilizando a tecnologia de micro-ondas, onde o modelo mais representativo para as secagens foi o de Page.

O fato de o modelo de Midilli ter sido o mais adequado diante dos demais modelos para representar a cinética de secagem em FMO de resíduo de acerola também pode ser verificado na Figura 2, na qual, está representada a curva de secagem, sendo a que mais se aproximou dos dados experimentais para os intervalos de tempo analisados.

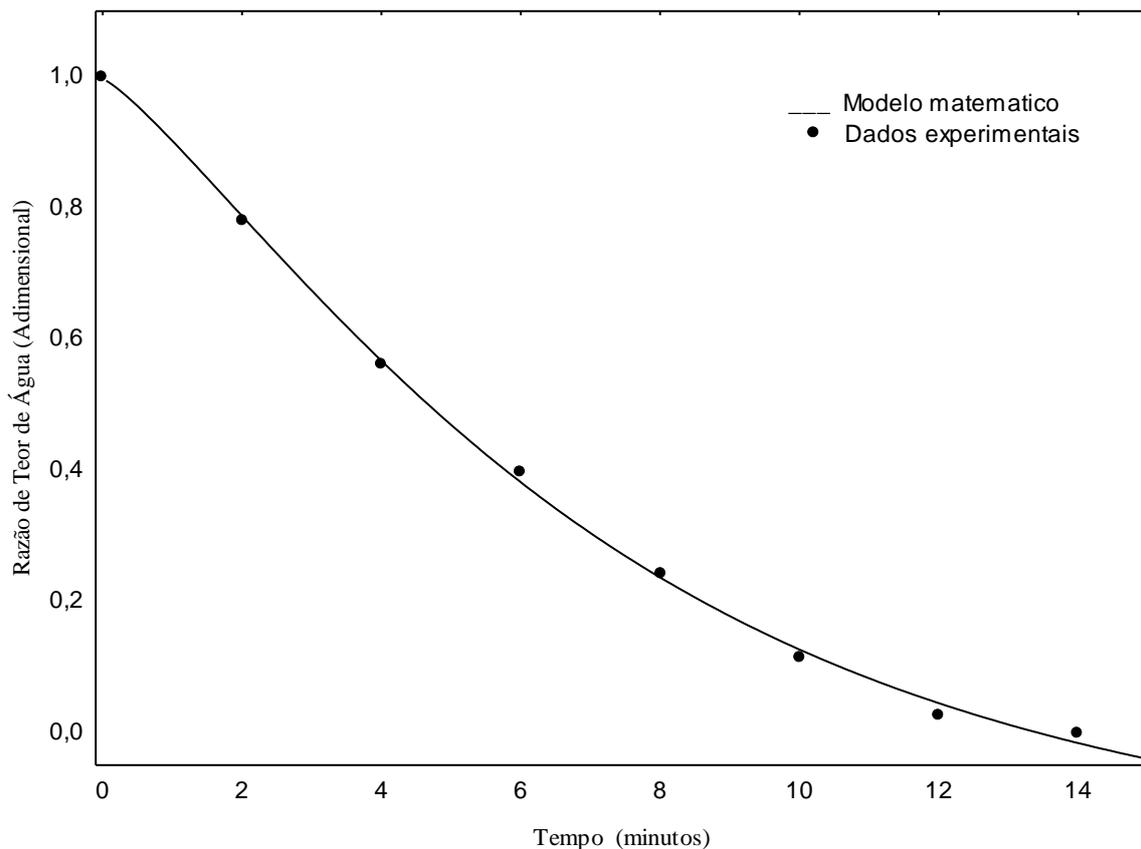


Figura 1. Cinética de secagem do resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) em forno de micro-ondas, com ajuste pelo modelo de Midilli

De acordo com a Figura 1, a secagem do resíduo de acerola em FMO necessitou de 14 min para atingir o teor de água final de 24%, estando dentro do padrão de umidade estabelecido pela legislação brasileira, que preconiza que produtos de frutas secos ou desidratados apresentem valor de umidade inferior a 25% (ANVISA, 2005).

O tempo de secagem das amostras em FMO mostrou-se menor, indicando uma economia energética e maior eficiência do processo, quando comparado com o estudo realizado por Araújo et al. (2017), que estudaram a etapa de secagem da polpa de acerola em leito de espuma, nas temperaturas de 50, 55, 60, 65 e 70 °C, além de avaliar o efeito da temperatura sobre a cinética de secagem da polpa e ajustou modelos matemáticos para descrever o processo.

Conclusões

O processo de desidratação de resíduo de acerola em FMO reduziu o tempo de secagem e o teor de água final apresentado pelo resíduo. O modelo de Midilli foi o que melhor se adequou aos dados experimentais, apresentando os maiores valores de R^2 (0,999), e os menores valores para o DQM (0,006). O estudo da cinética de secagem e o ajuste de modelos matemáticos podem ser aplicados para outros produtos e contribuir para a otimização dos processos de secagem em FMO.

Fomento

A CAPES pelo apoio financeiro a este trabalho, nas formas de auxílio à bolsa de Doutorado.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 set. 2005.

ALVES, J. A.; VALÉRIO, E.; VILAS, D. B.; MONTEIRO, B.; BOAS, V.; SOUZA, É. C. Qualidade de produto minimamente processado à base de abóbora, cenoura, chuchu e mandioquinha-salsa. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 3, p. 625-634, 2010.

ANDREOLA, K.; COSTA, R. G.; MARSAIOLI JÚNIOR, A.; TARANTO, O. P. Secagem de cubos de cenoura assistida por micro-ondas e análise da influência das condições operacionais no encolhimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 36., 2013, Maceió. **Anais...** Maceió, 2013.

ARAÚJO, I. M. C. **Caracterização bioativa de resíduos de frutas tropicais**. 2017. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C. SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. N. TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, e2016152, 2017.

BRAGA, A. C. D.; LIMA, M. S.; AZEVEDO, L. C.; RAMOS, M. E. C. Caracterização e obtenção de farinha do resíduo gerado no processo industrial de clarificação do suco de acerola. **Revista Semiárido de Visu**, v. 1, n. 2, p.126-133, 2011.

COSTA, J. D.; MACEDO, A. D. B.; SOUSA, A. P. M.; CAMPOS, A. R. N. Cinética de secagem em forno de micro-ondas da vagem de algaroba (*prosopis juliflora*). In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 1., 2016, Campina Grande. **Anais...** I Campina Grande, 2016.

FREITAS, C. A. S.; MAIA, G. A.; COSTA, J. M. C.; FIGUEIREDO, R. W.; SOUSA, P. H. M. Acerola: produção, composição, aspectos nutricionais e produtos. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 12, n. 4, p. 395-400, 2006.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Research Engineering**, v. 12, p. 732-736, 1962.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**. 4ª Ed., 1ª Ed. digital, São Paulo, 2008.

KADAM, D. M.; BALASUBRAMANIAN, S. Foam mat drying of tomato juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, n. 4, p. 488-495, 2011.

MATA, A. L. M. L.; COSTA, S. E. D.; CAPISTRANO, D. P. MORAES FILHO, F. C. Cinética da secagem do feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) em micro-ondas com e sem pré-tratamento osmótico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2014.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.4, p.382–387, 2015.

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 3, p. 1644-1649, 2011.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, p. 1503-1513, 2002.

MOURA, B. D. **Estudo da dinâmica de secagem em um secador rotatório com alimentação intermitente**. 2016. 100f. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

O'CALLAGHAN, J. R.; MENZIES, D. J.; BAILEY, P. H. Digital simulation of agricultural dryer performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 16, n. 3, p. 223-244. 1971.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. Dissertação de Mestrado, Purdue University, West Lafayette, 1949.

ROSA, J. G. Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em micro-ondas. 2010. 78f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

RIBEIRO, R. C. Tomates semi desidratados obtidos por secagem micro-ondas convectiva precedida por desidratação osmótica. 2013. 87f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2013.

SANTOS, A. E.; MARTINS, G. M. V.; CANUTO, M. F. C. S.; SEGUNDO, J. V.; ALMEIDA, R. D. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia*

ficus indica). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 01-06, 2016.

SEGTOWICK, E. C. S.; BRUNELLI, L. T.; VENTURINI FILHO, W. G. Avaliação físico-química e sensorial de fermentado de acerola. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 16, n. 2, p. 147-154, 2013.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. The drying kinetics of forage turnips (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SOUSA, A. P. M.; MACEDO, A. D. B.; SILVA, A. P. F.; COSTA, J. D.; DANTAS, D. L.; SANTANA, R. A. C.; CAMPOS, A. R. N. Processamento de farináceo a partir da casca de jaca submetida à secagem em forno de micro-ondas. In: JORNADA DE ENSINO PESQUISA E EXTENSÃO DA UFRPE, 16., 2016, Recife. **Anais...** Recife, 2016.

TELÖKEN, F. T. **Análise da viabilidade tecnológica da desidratação de maçã em aparelho de micro-ondas doméstico**. 2016. 78f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different condition. In: BAS CETINCELİK A, (ed.) **Proceedings of the seventh international congress on agricultural mechanization and energy**, Adana, 1999.