

CINÉTICA DE SECAGEM E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE RESÍDUOS DE ACEROLA SUBMETIDOS À SECAGEM CONVECTIVA E POR MICRO-ONDAS

DOI: 10.22289/sg.V7N1A14

Janine Patricia Melo Oliveira ^a, Gracimário Bezerra da Silva ^a, Ana Maria de Souza Araújo ^a, Emanuele Cardoso Dias ^a, Anna Laura Mendonça da Trindade Silva ^a, Maria Clara da Silva Oliveira ^a, Alanna Silva de Souza Anastácio ^a e Ana Regina Nascimento Campos ^{a*}

^a Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Resumo

Os resíduos agroindustriais de acerola (*Malpighia emarginata* DC.), constituídos principalmente por cascas e sementes, apresentam elevado potencial de aproveitamento tecnológico, porém sua alta umidade e perecibilidade limitam aplicações diretas. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar e modelar a cinética de secagem convectiva e por irradiação de micro-ondas de resíduos de acerola, bem como determinar os parâmetros difusivos e as propriedades termodinâmicas associadas aos processos. A secagem convectiva foi conduzida em estufa com circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, enquanto a secagem por micro-ondas foi realizada nas potências de 780, 1040 e 1300 W. Os dados experimentais de razão de umidade foram ajustados a diferentes modelos matemáticos, sendo avaliados por meio do coeficiente de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e qui-quadrado (χ^2). Entre os modelos testados, o de Wang & Singh apresentou o melhor desempenho estatístico em ambas as condições de secagem, com valores de R^2 superiores a 0,99, desvio quadrático médio inferior a 0,02 e valores de χ^2 da ordem de 10^{-4} , evidenciando a adequação do modelo aos dados experimentais. A secagem por micro-ondas destacou-se pela expressiva redução do tempo de processo, alcançando o equilíbrio higroscópico em até 21 min, enquanto na secagem convectiva os tempos variaram entre 480 e 780 min. As difusividades efetivas aumentaram com a elevação da temperatura e da potência, com valores mais elevados na secagem por micro-ondas, variando de $2,96 \times 10^{-9}$ a $4,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, em comparação à secagem convectiva ($8,02 \times 10^{-11}$ a $1,45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). As propriedades termodinâmicas indicaram processo endotérmico e não espontâneo, com redução da entalpia e aumento da energia livre de Gibbs à medida que se intensificaram as condições operacionais. Conclui-se que a secagem por micro-ondas constitui uma alternativa tecnicamente viável para reduzir o tempo de processamento e viabilizar a obtenção de farináceos a partir de resíduos de acerola, com potencial aplicação em formulações alimentícias sustentáveis.

Palavras-chave: Produção de farináceos; Conservação de alimentos; Subprodutos agroindustriais.

DRYING KINETICS AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF ACEROLA RESIDUES SUBJECTED TO CONVECTIVE AND MICROWAVE DRYING

Abstract

Agro-industrial residues of acerola (*Malpighia emarginata* DC.), mainly composed of peels and seeds, present high potential for technological valorization; however, their high moisture content and perishability limit direct applications. In this context, this study aimed to evaluate and model the convective and microwave drying kinetics of acerola residues, as well as to determine the associated diffusional parameters and thermodynamic properties. Convective drying was carried out in a forced-air circulation oven at temperatures of 50, 60, and 70 °C, while microwave drying was performed at power levels of 780, 1040, and 1300 W. Experimental moisture ratio data were fitted to different mathematical models and evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square deviation (RMSD), and chi-square (χ^2). Among the tested models, the Wang & Singh model showed the best statistical performance under both drying conditions, with R^2 values higher than 0.99, RMSD lower than 0.02, and χ^2 values on the order of 10^{-4} , indicating good agreement between experimental and predicted data. Microwave drying resulted in a marked reduction in processing time, reaching hygroscopic equilibrium within up to 21 min, whereas convective drying required between 480 and 780 min. Effective moisture diffusivities increased with increasing temperature and power, with higher values observed for microwave drying, ranging from 2.96×10^{-9} to $4.55 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, compared with convective drying (8.02×10^{-11} to $1.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Thermodynamic properties indicated an endothermic and non-spontaneous process, with decreasing enthalpy and increasing Gibbs free energy as operating conditions intensified. These results indicate that microwave drying is a technically viable alternative to reduce processing time and enable the production of flours from acerola residues, with potential application in sustainable food formulations.

* Autor para correspondência: ana.regina@professor.ufcg.edu.br

Keywords: Flour production; Food preservation; Agro-industrial by-products.

CINÉTICA Y PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE SECADO DE RESIDUOS DE ACEROLA SOMETIDOS A SECADO POR CONVECCIÓN Y MICROONDAS

Resumen

Los residuos agroindustriales de acerola (*Malpighia emarginata* DC), compuestos principalmente por cáscaras y semillas, presentan un alto potencial de valoración tecnológica; sin embargo, su alto contenido de humedad y perecederidad limitan las aplicaciones directas. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo evaluar y modelar la cinética de secado convectivo y por microondas de los residuos de acerola, así como determinar los parámetros difusivos asociados y las propiedades termodinámicas. El secado convectivo se realizó en un horno de circulación de aire forzado a temperaturas de 50, 60 y 70 °C, mientras que el secado por microondas se realizó a niveles de potencia de 780, 1040 y 1300 W. Los datos experimentales de la relación de humedad se ajustaron a diferentes modelos matemáticos y evaluaron utilizando el coeficiente de determinación (R^2), la desviación cuadrática media raíz (RMSD) y el chi cuadrado (χ^2). Entre los modelos probados, el modelo de Wang & Singh mostró el mejor rendimiento estadístico en ambas condiciones de secado, con valores de R^2 superiores a 0,99, RMSD inferiores a 0,02 y valores de χ^2 del orden de 10^{-4} , lo que indica una buena concordancia entre los datos experimentales y los predichos. El secado por microondas resultó en una reducción notable del tiempo de procesamiento, alcanzando el equilibrio higroscópico en hasta 21 minutos, mientras que el secado por convección requería entre 480 y 780 minutos. Las difusividades efectivas de humedad aumentaron con el aumento de temperatura y potencia, observándose valores más altos para el secado por microondas, que oscilan entre $2,96 \times 10^{-9}$ y $4,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en comparación con el secado convectivo ($8,02 \times 10^{-11}$ a $1,45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Las propiedades termodinámicas indicaban un proceso endotérmico y no espontáneo, con una disminución de la entalpía y un aumento de la energía libre de Gibbs a medida que se intensificaban las condiciones de operación. Estos resultados indican que el secado por microondas es una alternativa técnicamente viable para reducir el tiempo de procesamiento y permitir la producción de harinas a partir de residuos de acerola, con posible aplicación en formulaciones alimentarias sostenibles.

Palabras clave: Producción de harina; Conservación de alimentos; Subproductos agroindustriales.

1. Introdução

A acerola (*Malpighia emarginata* DC.) e seus subprodutos agroindustriais, como cascas e sementes, constituem uma importante fonte de compostos bioativos, minerais e fibras. Entretanto, a elevada perecibilidade desse material, aliada ao expressivo volume de resíduos gerados durante o processamento industrial, resulta em perdas significativas e impõe desafios ambientais e econômicos (Vilvert *et al.*, 2024; Ragupathy *et al.*, 2025). Nesse contexto, torna-se necessária a adoção de métodos de conservação que possibilitem o aproveitamento desses resíduos, agregando valor e ampliando suas possibilidades de aplicação (Oliveira *et al.*, 2023; Albuquerque Junior *et al.*, 2025).

A secagem é uma das operações unitárias mais empregadas na conservação de produtos agrícolas e resíduos agroindustriais, pois reduz a atividade de água a níveis que limitam o crescimento microbiano e retardam reações de deterioração (Moura *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2024). Entre os métodos disponíveis, a secagem convectiva em estufa com circulação de ar destaca-se pelo baixo custo operacional e pela ampla difusão na indústria. No entanto, esse método apresenta como limitações o longo tempo de processamento e a possibilidade de degradação de compostos termossensíveis (Kaveh *et al.*, 2025). Em contrapartida, a secagem por irradiação de micro-ondas tem sido apontada como uma alternativa eficiente, uma vez que utiliza o mecanismo de aquecimento volumétrico, promovendo rápida remoção da umidade e redução significativa do tempo de secagem em comparação aos métodos convencionais (Brahmi *et al.*, 2023; Nogueira *et al.*, 2023).

A compreensão da cinética de secagem é fundamental para o controle, a otimização e o dimensionamento de processos industriais, permitindo prever o comportamento da perda de água sob diferentes condições operacionais de temperatura e potência. Dessa forma, a modelagem matemática constitui uma ferramenta essencial para descrever as curvas de secagem e estimar parâmetros relevantes, como a difusividade efetiva, que expressa a facilidade de migração da água do interior do

material para sua superfície (Brahmi *et al.*, 2023; Almeida *et al.*, 2025).

Além da análise cinética, a avaliação das propriedades termodinâmicas associadas ao processo de secagem fornece informações importantes sobre a demanda energética e os mecanismos envolvidos na transferência de massa e energia. Parâmetros como energia de ativação, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs permitem compreender a viabilidade energética do processo e o efeito das condições operacionais sobre o comportamento do material durante a desidratação (Moura *et al.*, 2023).

O presente estudo teve como objetivo avaliar e modelar a cinética de secagem convectiva e por irradiação de micro-ondas de resíduos de acerola, bem como determinar os parâmetros difusivos e termodinâmicos associados aos processos, visando subsidiar o aproveitamento tecnológico desses resíduos na forma de produtos farináceos com potencial aplicação em sistemas alimentícios sustentáveis.

2. Metodologia

O resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* DC.) foi obtido junto a uma indústria de processamento de polpa de frutas, localizada no município de Brejo dos Santos, Paraíba, Brasil, que adota como critério de seleção o estado de maturação das acerolas, sendo escolhidos frutos maduros caracterizados pela coloração avermelhada. Após a coleta, o material foi acondicionado em embalagens plásticas apropriadas, armazenado sob congelamento por 24 h e transportado ao Laboratório de Bioprocessos (LabBio), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foram conduzidos todos os ensaios experimentais. A Figura 1 ilustra o resíduo de acerola *in natura* utilizado neste estudo.



Figura 1. Resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* DC.).

No laboratório, as amostras foram inicialmente submetidas ao descongelamento sob refrigeração controlada a 4 °C. Em seguida, o material foi mantido em bancada até atingir o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente, visando à padronização das condições iniciais antes da realização dos experimentos de secagem. Para a realização do estudo da cinética de secagem convectiva, utilizou-se uma estufa com circulação e renovação de ar (SOLAB, modelo SL 102). O material foi distribuído em bandejas redondas de alumínio com diâmetro de 16 cm, mantendo-se espessura de camada uniforme de 0,5 cm. Os experimentos foram conduzidos em triplicata, utilizando-se as temperaturas de 50, 60 e 70 °C. O acompanhamento da perda de água foi realizado por meio da pesagem do material em intervalos de tempo de 5, 15, 30, 60 e 120 min, até que fosse atingido o teor de água de equilíbrio, definido como variação máxima de 0,01 g em três pesagens consecutivas.

Para a secagem por irradiação, utilizou-se um forno de micro-ondas (modelo MTO30, 60 Hz, 1300 W, 20 L). Os

experimentos também foram realizados em triplicata, empregando-se potências de 780, 1040 e 1300 W. As amostras foram acondicionadas em recipientes circulares de polipropileno com diâmetro de 16 cm, mantendo-se a mesma espessura de camada utilizada na secagem convectiva. As massas das amostras foram registradas a cada 1 min até a obtenção do teor de água de equilíbrio.

Os teores de água inicial e final das amostras foram determinados pelo método gravimétrico, por secagem em estufa a 105 °C por 24 h, conforme metodologia da AOAC (2023). A partir desses dados, foi calculada a razão do teor de água, conforme a Equação (1), sendo esses valores utilizados no ajuste dos modelos matemáticos das cinéticas de secagem.

$$RU = \frac{U_{bs} - U_e}{U_{bs}(\text{inicial}) - U_e} \quad (1)$$

Onde: RU = razão de teor de água (adimensional); U_e = teor de água de equilíbrio em base seca; U_{bs} = teor de água em base seca; $U_{bs}(\text{inicial})$ = teor de água inicial em base seca.

Os dados experimentais das cinéticas de secagem foram ajustados a diferentes modelos matemáticos amplamente utilizados na literatura: Henderson & Pabis, Logarítmico, Dois Termos, Wang & Singh e Henderson & Pabis modificado, conforme apresentado na Tabela 1. Os ajustes foram realizados por regressão não linear, utilizando o software STATISTICA®, versão 14.0, pelo método Quase-Newton (Statistica, 2020).

Tabela 1. Modelos matemáticos escolhidos para os ajustes das secagens do resíduo de acerola.

Designação do modelo	Modelos	Equação
Henderson & Pabis	$RU = a \cdot e^{-kt}$	(2)
Logarítmico	$RU = a \cdot e^{-k_0 t} + c$	(3)
Dois termos	$RU = a \cdot e^{-k_0 t} + b \cdot e^{-k_1 t}$	(4)
Wang & Singh	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(5)
Henderson & Pabis modificado	$RU = a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-k_0 t} + c \cdot e^{-k_1 t}$	(6)

RU = razão de umidade (adimensional); t = tempo de secagem (min); k = constante de secagem; a, b, c, k_0 , k_1 e n = parâmetros dos modelos.

A qualidade do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), do desvio quadrático médio (DQM) e do qui-quadrado (χ^2), calculados conforme as Equações (7), (8) e (9), respectivamente.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2} \right) \quad (7)$$

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{n-N} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \quad (9)$$

Onde: R^2 = coeficiente de determinação; DQM = desvio quadrático médio; X^2 = qui-quadrado; $RU_{pred,i}$ = razão do teor de água predito pelo modelo; $RU_{exp,i}$ = razão do teor de água experimental; n = número de observações; N = número de constantes do modelo.

A difusividade efetiva foi determinada com base na teoria da difusão líquida, utilizando a segunda lei de Fick e a solução analítica com aproximação de cinco termos, conforme a Equação (10).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \pi^2 Def \frac{t}{4L^2} \right] \quad (10)$$

Onde: Def = difusividade efetiva ($m^2 \cdot s^{-1}$); n = número de termos da equação; L = dimensão característica (m); t = tempo (s).

A relação difusividade e temperaturas de secagem foi determinada pela equação de Arrhenius Equação (11).

$$Def = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R(T+273,15)} \right) \quad (11)$$

Onde: D_0 = fator pré-exponencial ($m^2 \cdot s^{-1}$); E_a = energia de ativação ($kJ \cdot mol^{-1}$); R = constante universal dos gases ($0,008314 kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$); T = temperatura absoluta (K).

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem, incluindo variação da entalpia (ΔH), variação da entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG), foram determinadas a partir das Equações (12), (13) e (14).

$$\Delta H = E_a - R(T + 273,15) \quad (12)$$

$$\Delta S = R \left[\ln(D_0) - \ln \frac{k_b}{h_p} - \ln (T + 273,15) \right] \quad (13)$$

$$\Delta G = \Delta H - (T + 273,15)\Delta S \quad (14)$$

Onde: ΔH = variação da entalpia ($J \cdot mol^{-1}$); ΔS = variação da entropia ($J \cdot mol^{-1}$); ΔG = energia livre de Gibbs de ativação ($J \cdot mol^{-1}$); E_a = energia de ativação ($kJ \cdot mol^{-1}$); R = Constante universal dos gases ($0,008314 kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$); T = Temperatura absoluta (K); D_0 = fator pré-exponencial ($m^2 \cdot s^{-1}$); k_b - constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$); h_p = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$).

A partir dos resultados obtidos nas cinéticas de secagem, foram identificados os tempos, temperatura da estufa e potência do forno micro-ondas a serem utilizados para a produção de farináceo. Esse processo envolveu as etapas de secagem, trituração do material seco em moinho de facas, e acondicionamento a vácuo em sacos plásticos e armazenamento em temperatura ambiente.

3. Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os critérios estatísticos de ajuste obtidos a partir da modelagem dos dados experimentais da secagem dos resíduos de acerola, abrangendo a secagem convectiva em estufa com circulação de ar, realizada nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, e a secagem em forno de micro-ondas, conduzida nas potências de 780, 1040 e 1300 W. Os dados experimentais da secagem dos resíduos de acerola foram ajustados os modelos matemáticos amplamente utilizados por diferentes pesquisadores na representação da secagem de produtos agrícolas, os quais apresentaram bom desempenho em ambas as condições de secagem, evidenciado pelos elevados valores do coeficiente de determinação (R^2) e pelos baixos valores de desvio quadrático médio (DQM) e qui-quadrado (χ^2), indicando adequada concordância entre os dados experimentais e os valores preditos.

O modelo de Wang & Singh destacou-se por reunir, de forma consistente, os maiores valores de R^2 e os menores erros estatísticos, sendo, portanto, o mais adequado para descrever a cinética de secagem tanto na secagem convectiva quanto na secagem por micro-ondas. Para este último método, esses resultados estão em concordância com os achados de Khatun, Karmakar e Chakraborty (2024), que reportaram desempenho superior do modelo de Wang & Singh na descrição da secagem a vácuo por micro-ondas da pitaya (*Hylocereus undatus*) em diferentes níveis de potência.

Tabela 2. Critérios estatísticos de ajuste, aplicados à secagem convectiva e por irradiação de micro-ondas dos resíduos de acerola em diferentes temperaturas e potências.

Modelos	Secagem convectiva				Secagem Micro-ondas			
	Temp. (°C)	R^2	DQM	χ^2	Pot. (W)	R^2	DQM	χ^2
Henderson & Pabis	50	0,9915	0,0482	0,0023	780	0,9841	0,0570	0,0032
	60	0,9935	0,0395	0,0016	1040	0,9898	0,0457	0,0019
	70	0,9931	0,0389	0,0015	1300	0,9888	0,0479	0,0023
Logarítmico	50	0,9985	0,0201	0,0004	780	0,9988	0,0155	0,0002
	60	0,9986	0,0179	0,0003	1040	0,9964	0,0273	0,0007
	70	0,9984	0,0166	0,0003	1300	0,9977	0,0218	0,0005
Dois Termos	50	0,9915	0,0482	0,0023	780	0,9841	0,0570	0,0032
	60	0,9935	0,0397	0,0016	1040	0,9898	0,0457	0,0021
	70	0,9931	0,0389	0,0015	1300	0,9888	0,0479	0,0023
Wang & Sing	50	0,9994	0,0122	0,0001	780	0,9983	0,0188	0,0003
	60	0,9989	0,0160	0,0002	1040	0,9966	0,0264	0,0007
	70	0,9994	0,0113	0,0001	1300	0,9988	0,0155	0,0002
Henderson & Pabis modificado	50	0,9914	0,0458	0,0021	780	0,9841	0,0570	0,0032
	60	0,9935	0,0395	0,0016	1040	0,9898	0,0457	0,0020
	70	0,9930	0,0404	0,0016	1300	0,9888	0,0479	0,0022

Os valores dos parâmetros estimados para o modelo de Wang & Singh estão apresentados na Tabela 3, tanto para a secagem convectiva quanto para a secagem por micro-ondas.

Tabela 3. Parâmetros do modelo de Wang & Singh aplicados à secagem convectiva e à secagem por irradiação de micro-ondas dos resíduos de acerola, em diferentes temperaturas e potências.

Modelo	Secagem convectiva			Secagem Micro-ondas		
	Temp. (°C)	a	b	Pot. (W)	a	b
Wang e Sing	50	-0,0019	0,0000	780	-0,0614	0,0008
	60	-0,0028	0,0000	1040	-0,0840	0,0018
	70	-0,0037	0,0000	1300	-0,0955	0,0023

A avaliação dos parâmetros do modelo de Wang & Singh mostrou comportamento consistente do coeficiente “a” para ambos os métodos de secagem. Em particular, observou-se que o parâmetro “a” assumiu valores progressivamente mais negativos com o aumento da intensidade térmica, seja pelo incremento da temperatura do ar na secagem convectiva, seja pelo aumento da potência aplicada no forno micro-ondas. Esse comportamento está associado à maior inclinação inicial das curvas de secagem sob condições mais intensas, refletindo a aceleração da remoção de umidade nas etapas iniciais do processo.

A similaridade do comportamento do parâmetro “a” entre os dois métodos de secagem indica que esse coeficiente é sensível às condições energéticas impostas ao sistema, podendo ser utilizado como um indicador empírico da intensificação da cinética de secagem. Assim, o modelo de Wang & Singh mostrou-se não apenas estatisticamente adequado, mas também consistente do ponto de vista físico-matemático para descrever a dinâmica da perda de água dos resíduos de acerola.

Já o parâmetro “b”, relacionado ao efeito do tempo, não apresentou influência significativa da temperatura/potência, indicando que suas variações decorrem principalmente dos ajustes matemáticos e não do processo de secagem (Moura *et al.*, 2023).

A Figura 2 (A e B) apresenta as curvas experimentais e as curvas preditas da razão de umidade em função do tempo, correspondentes à secagem convectiva (A) e à secagem em forno micro-ondas (B). Em ambos os casos, percebe-se boa concordância visual entre os dados experimentais e os valores estimados pelo modelo de Wang & Singh em todas as condições avaliadas.

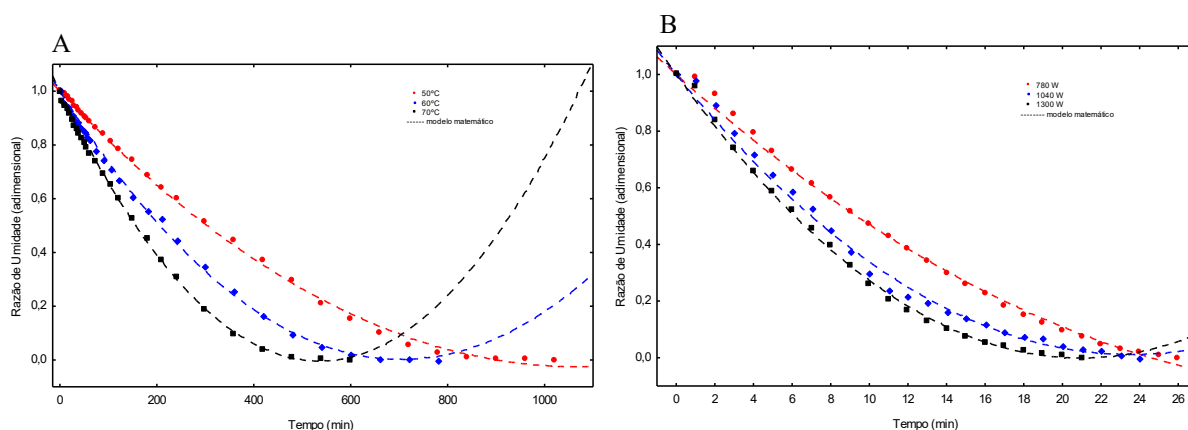


Figura 2. Curvas da cinética de secagem dos resíduos de acerola em diferentes condições operacionais, com ajustes pelo modelo de Wang & Singh: (A) secagem convectiva em estufa, em diferentes temperaturas do ar; (B) secagem em forno micro-ondas, em diferentes níveis de potência.

As curvas de cinética de secagem do resíduo de acerola apresentaram diferenças marcantes entre os métodos avaliados. Na secagem em estufa com circulação de ar, o equilíbrio higroscópico foi atingido em aproximadamente 780, 620

e 480 min, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Em contraste, na secagem em forno micro-ondas, os tempos foram substancialmente menores, correspondendo a 26, 24 e 21 min, para as potências de 780, 1040 e 1300 W.

A discrepância acentuada entre os tempos de secagem em estufa e em micro-ondas evidencia a maior eficiência do aquecimento volumétrico na remoção de água da matriz do resíduo de acerola (Brahmi *et al.*, 2023; Nogueira *et al.*, 2023). Na secagem convectiva, o processo é predominantemente limitado pela difusão molecular interna, caracterizada por taxas mais lentas de migração de umidade. Em contrapartida, no aquecimento por micro-ondas, a energia é absorvida diretamente pelas moléculas polares de água, promovendo rápido aumento da pressão de vapor no interior do material e acelerando o transporte de umidade em direção à superfície. Esse comportamento está em consonância com estudos que apontam a secagem por micro-ondas como uma tecnologia capaz de reduzir significativamente o tempo de processamento e aumentar a eficiência térmica, ao atuar sobre a permeabilidade celular e minimizar a dependência da transferência de calor por condução superficial (Brahmi *et al.*, 2023).

A Tabela 4 apresenta os valores das difusividades efetivas ($Deff$) e das energias de ativação (Ea) obtidos durante a secagem dos resíduos de acerola, juntamente com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2). A difusividade efetiva é um parâmetro fundamental na avaliação e otimização de processos de secagem, pois descreve a eficiência da transferência de umidade no interior do material, permitindo a comparação entre diferentes métodos de secagem (Albuquerque Junior *et al.*, 2025). O aumento da temperatura e da potência promove a elevação dos valores de $Deff$, uma vez que a ampliação do espaço poroso favorece a remoção de umidade, intensifica a difusão interna e reduz o tempo total de secagem (Watharkar *et al.*, 2021; Cavalcante *et al.*, 2020).

Tabela 4. Valores de Difusividades efetivas ($Deff$) e Energias de ativação (Ea) dos resíduos de acerola em diferentes temperaturas e condições de secagens.

Secagem		Difusividade (m ² .s ⁻¹)	efetiva R ²	Energia ativação (kJ.mol ⁻¹)	de R ²
Temperatura (°C)					
Convectiva	50	8,02. X 10 ⁻¹¹	0,96	27,4769	0,99
	60	1,14. X 10 ⁻¹⁰	0,97		
	70	1,45. X 10 ⁻⁹	0,96		
Potência (W)					
Irradiação micro-ondas	780	2,96. X 10 ⁻⁹	0,93	11,1291	0,98
	1040	3,94. X 10 ⁻⁹	0,95		
	1300	4,55. X 10 ⁻⁹	0,95		

O valor da energia de ativação observado para a secagem em estufa convectiva neste estudo foi inferior ao registrado por Albuquerque Junior *et al.* (2025), que, ao aplicarem a secagem convectiva ao resíduo de acerola verde nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, encontraram o valor $47,74 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Essa diferença pode estar ligada à microestrutura do resíduo, às propriedades físico-químicas e aos distintos mecanismos de transferência de massa envolvidos em cada processo (Ferreira Júnior *et al.*, 2021).

Independentemente do método de secagem empregado, existe um consenso na literatura de que a difusividade efetiva

(Deff) aumenta com a elevação da temperatura, refletindo a intensificação do transporte interno de umidade. No presente estudo, a secagem por micro-ondas apresentou valores de Deff significativamente superiores aos obtidos na secagem convectiva em estufa. Na secagem por micro-ondas, a Deff variou de $2,96 \times 10^{-9}$ a $4,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto na estufa os valores oscilaram entre $8,02 \times 10^{-11}$ e $1,45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Esse comportamento é atribuído ao aquecimento volumétrico promovido pelas micro-ondas, que aumenta a permeabilidade das membranas celulares e facilita o fluxo de água no interior do material.

A difusividade efetiva apresenta relação inversa com a energia de ativação (E_a), de modo que menores valores de E_a indicam maior facilidade para o início e a progressão do processo difusivo, uma vez que menos energia é requerida para a movimentação da água na matriz do material. A energia de ativação é um parâmetro que expressa a sensibilidade da difusividade às variações da temperatura absoluta.

A redução dos valores de E_a observados na secagem por micro-ondas indicam maior mobilidade da umidade, favorecida pela interação direta desse tipo de aquecimento com moléculas polares, como a água, o que resulta em aceleração do processo de secagem. Em contraste, na secagem convectiva, a obtenção de maiores valores de difusividade demanda maior aporte energético. Assim, o baixo valor de E_a obtido para o resíduo de acerola seco por micro-ondas confirma a maior facilidade de difusão da umidade nesse método (Mabasso *et al.*, 2024), sendo esse comportamento característico do aquecimento profundo e seletivo promovido pelas micro-ondas, amplamente descrito para diversos produtos agrícolas (Song *et al.*, 2020).

A Tabela 5 mostra os valores das propriedades termodinâmicas (variação da entalpia, variação da entropia e energia livre de Gibbs) para as secagens dos resíduos agroindustriais da acerola nas diferentes temperaturas e potências.

Tabela 5. Propriedades termodinâmicas dos resíduos de acerola secos em diferentes condições de secagens.

Secagem		$\Delta H \text{ (kJ.mol}^{-1}\text{)}$	$\Delta S \text{ (J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$	$\Delta G \text{ (kJ.mol}^{-1}\text{)}$
Temperatura (°C)				
Convectiva	50	24,7902	-0,35371	139,0906
	60	24,7071	-0,35396	142,6289
	70	24,6240	-0,35421	146,1698
Potência (W)				
Irradiação micro-ondas	780	8,3593	-0,37554	133,4688
	1040	8,1930	-0,37602	140,9844
	1300	8,0267	-0,37648	148,5094

As propriedades termodinâmicas fornecem uma base fundamental para a análise da cinética térmica durante o processo de secagem. Conforme os dados apresentados, observa-se que o aumento da temperatura e da potência resultou na diminuição dos valores de entalpia (ΔH), evidenciando uma relação inversamente proporcional. Esse comportamento pode ser atribuído à redução das interações intermoleculares, especialmente das ligações entre as moléculas de água e os constituintes do produto. Os valores de ΔH permaneceram positivos, variando de $24,7902 \text{ kJ.mol}^{-1}$ a $24,6240 \text{ kJ.mol}^{-1}$ na secagem convectiva e $8,3593 \text{ kJ.mol}^{-1}$ a $8,0267 \text{ kJ.mol}^{-1}$ na secagem por irradiação, o que caracteriza um processo endotérmico, com absorção de calor.

Os valores negativos de entropia (ΔS) observados indicam desordem de moléculas durante o processo de secagem, caracterizando um estado de transição mais ordenado e com menor liberdade estrutural em comparação aos reagentes, com isso conforme a secagem avança, a estrutura do resíduo se torna mais organizada e compacta, o que é essencial para a otimização e controle dos processos de secagem (Esmero *et al.*, 2024). Esses resultados corroboram com a literatura,

reforçando que sistemas com ΔS negativo tendem a apresentar menor agitação molecular, o que está associado à remoção progressiva da água, favorecendo à compactação na eficiência e nas características do resíduo seco durante a secagem.

Albuquerque Junior *et al.* (2025) ao analisarem as propriedades termodinâmicas do resíduo de acerola verde nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, apresentaram variações de entropia que diminuíram com o aumento da temperatura. De acordo com Cavalcanti *et al.* (2020) o aumento da temperatura resulta em vibração, rotação e movimento da molécula de água, favorecendo o aumento da difusividade e redução na variação de entropia do processo.

Já com relação à energia livre de Gibbs (ΔG), observou-se que sua variação aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, indicando que o processo de dessorção da água ocorreu de forma não espontânea nessas condições. Segundo Mabasso *et al.* (2024), esse comportamento está relacionado ao aumento da pressão de vapor provocado pelo aquecimento do ar, o que gera um gradiente de pressão entre o produto e o ambiente, favorecendo a migração da umidade. Esse gradiente promove uma troca gasosa que exige aporte de energia externa para impulsionar a transferência de massa.

A Figura 3 apresenta o produto farináceo obtido a partir do resíduo de acerola submetido à secagem convectiva a 70 °C por 480 min e à secagem por irradiação de micro-ondas a 1300 W por 21 min. Em ambas as condições, observa-se a obtenção de um material seco visualmente homogêneo, sem indícios aparentes de degradação térmica acentuada, o que sugere a adequação das condições operacionais adotadas. A secagem por micro-ondas resultou em um produto com aparência semelhante ao obtido por secagem convectiva, porém associada a um tempo de processamento substancialmente menor, o que está em consonância com os menores valores de entalpia e energia de ativação determinados para esse método. Esses resultados indicam que a combinação entre cinética acelerada, menores demandas energéticas e manutenção da integridade visual do material seco torna a secagem por micro-ondas uma alternativa tecnologicamente viável para o aproveitamento de resíduos de acerola na forma de farinhas, sob a perspectiva do processo de secagem.

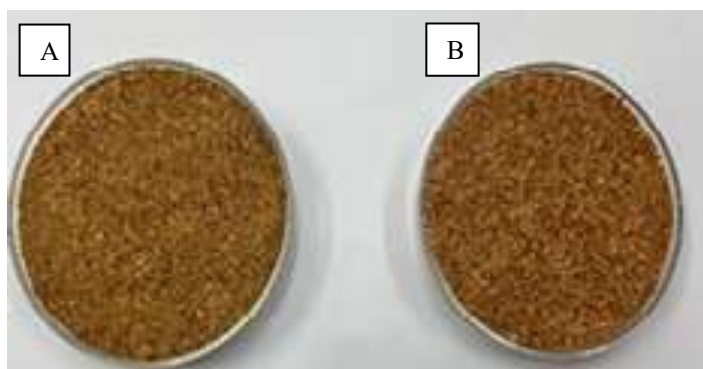


Figura 3. Produto farináceo obtido a partir do resíduo de acerola seco por secagem convectiva (A) e por secagem em forno micro-ondas (B).

4. Conclusão

A análise da cinética de secagem dos resíduos de acerola demonstrou que o modelo de Wang & Singh foi o mais adequado para descrever os dados experimentais, apresentando elevados coeficientes de determinação e baixos valores de erro estatístico em ambas as condições avaliadas.

A secagem por micro-ondas destacou-se pela expressiva redução do tempo de processamento e pelas menores energias de ativação, evidenciando maior eficiência no transporte de umidade em comparação à secagem convectiva. O aumento da

temperatura ou da potência promoveu elevação das difusividades efetivas e da energia livre de Gibbs, concomitantemente à redução da entalpia, caracterizando um processo endotérmico e termodinamicamente não espontâneo.

A qualidade visual do produto farináceo obtido, associada aos parâmetros cinéticos e termodinâmicos determinados, confirma a viabilidade tecnológica do aproveitamento dos resíduos agroindustriais de acerola para a produção de farinhas, com potencial aplicação em formulações alimentícias sustentáveis e de maior valor agregado.

Referências

- ALBUQUERQUE JUNIOR, N. M., SILVA, W. P., LIMA, D. A., SANTOS, R. S., MOURA, H. V., SILVA, A. P. D. F., ... & AMADEU, L. T. S. **Thermodynamic, bioactive, and antioxidant potential of green acerola residue as influenced by convective drying.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, p. 1-14, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14057-3>.
- ALMEIDA, R. D., DUARTE, M. E. M., MATA, M. E. R. C., COSTA, M. E. M. D., MELO, M. O. P., ALMEIDA, R. D., ... & MARTINS, J. J. A. **Drying behavior and thermodynamic properties of cashew nut almonds in thin layers: A mathematical modeling approach.** Heliyon, v. 11, n. 1, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41417>.
- AOAC International. **Official Methods of Analysis**, 22nd ed.; AOAC International: Rockville, MD, USA, 2023.
- BRAHMI, F., MATEOS-APARICIO, I., MOUHOUBI, K., GUÉMOUNI, S., SAHKI, T., DAHMOUNE, F., ... & BOULEKBACHE-MAKHLOUF, L. **Kinetic Modeling of Convective and Microwave Drying of Potato Peels and Their Effects on Antioxidant Content and Capacity.** Antioxidants, v. 12, n. 3, p. 638, 2023. <https://doi.org/10.3390/antiox12030638>.
- CAVALCANTE, A. M. M., ALMEIDA, R. D., MELO, A. M., MORAIS, B. A., da SILVA, I. R., RIBEIRO, N. L., ... & SILVA, O. S. **Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 3, p. 11192-11209, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-113>.
- CAVALCANTI, M.E.R.M., DUARTE, M.E.M., LIRA, V.V., OLIVEIRA, R.F., COSTA, N.L. & OLIVEIRA, H.M.L. **A new approach to the traditional drying models for the thin-layer drying kinetics of chickpeas.** Journal of Food Process Engineering, v. 43, n. 12, p. e13569, 2020. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13569>.
- ESMERO, J.A.D., FIGUEIRÊDO, R. M. F., QUEIROZ, A. J. M., PAIVA, Y. F., MOURA, H. V., SANTOS, F. S., SILVA, L.P.F.R., MATOS, J.D.P., MORAES, M.S., GONDIM, C. De M. & GOMES, J. P. **Drying kinetics and thermodynamic properties of taramiá pulp.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 29, n. 2, p. e279382, 2024. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n2e279382>.
- FERREIRA JUNIOR, W. N., RESENDE, O., PINHEIRO, G. K., SILVA, L. C. D. M., SOUZA, D. G., & SOUSA, K. A. D. **Modeling and thermodynamic properties of the drying of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seeds.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 25, p. 37-43, 2021. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p37-43>.
- KAVEH, M.; ZOMORODI, S.; GHAYSARI, B.; EL-MESERY, H. S.; SHARIFIAN, F.; ELMESIRY, A. H.; SALEM, A. **Impact of various drying technologies for evaluation of drying kinetics, energy consumption, physical and bioactive properties of Rose flower.** Scientific Reports, v. 15, n. 1, p. 9245, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94300-x>.
- KHATUN, P.; KARMAKAR, A.; CHAKRABORTY, I. **Microwave-vacuum drying: Modeling validation of drying and rehydration kinetics, moisture diffusivity and physicochemical properties of dried dragon fruit slices.** Food and Humanity, v. 2, p. 100292, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100292>.
- MABASSO, G. A., CABRAL, J. C. O., BARBOSA, K. F., RESENDE, O., OLIVEIRA, D. E. C., & ALMEIDA, A. B. **Drying kinetics, thermodynamic properties and physicochemical characteristics of Rue leaves.** Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 14526, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64418-5>.
- MOURA, R. L., FIGUEIRÊDO, R. M. F. D., QUEIROZ, A. J. D. M., SANTOS, F. S. D., LIMA, A. G. B. D., REGO JUNIOR, P. F. D., ... & GREGÓRIO, M. G. **Smelling peppers and pout submitted to convective drying: Mathematical modeling, thermodynamic properties and proximal composition.** Foods, v. 12, n. 11, p. 2106, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12112106>.
- NOGUEIRA, G. D. R.; SILVA, P. B.; SOUZA, G. F. M. V.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. **Vacuum microwave drying of acerola residue: Effects of pretreatment and operating variables on main bioactive compounds.** Waste and Biomass Valorization, v. 14, n. 4, p. 1281–1292, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01925-4>.
- OLIVEIRA S. D., SOUZA E. L., ARAÚJO C. M., MARTINS A. C. S., BORGES G. D. S. C., LIMA M. D. S., VIERA V. B., GARCIA E. F., CONCEIÇÃO M. L., SOUZA A. L., OLIVEIRA M. E. G. **Spontaneous fermentation improves the physicochemical characteristics, bioactive compounds, and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) and guava (*Psidium guajava* L.) fruit processing by-products.** 3 Biotech, v. 13, n. 9, p. 315, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03738-1>.

RAGUPATHY, S., THIRUGNANASAMBANDAM, A., VINAYAGAM, V., SNEHA, R., & NEWMASER, S. G. **Development of molecular diagnostic methods to distinguish acerola species for quality assurance of food, dietary supplements and natural health products.** Scientific Reports, v. 15, n. 1, p. 28361, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12408-6>.

SANTOS, A. A. L., CORRÊA, J. L. G., MACHADO, G. G. L., SILVEIRA, P. G., CRUZ, M. S., & NASCIMENTO, B. S. **Acerola processing waste: Convective drying with ethanol as pretreatment.** Food Research International, v. 190, p. 114586, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114586>.

SONG, B., TAN, H., & YANG, J. **Effect of three drying methods on the drying kinetics and quality of acerola cherry.** Journal of Food Processing and Preservation, v. 44, n. 9, p. e14674, 2020. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14674>.

TIBCO Software Inc. **TIBCO Statistica, version 14.0.0**; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2020.

VILVERT, J. C., FREITAS, S. T., SANTOS, L. F., S. RIBEIRO, T. D., & VELOSO, C. M. **Phenolic compounds in acerola fruit and by-products: An overview on identification, quantification, influencing factors, and biological properties.** Journal of Food Measurement and Characterization, v. 18, n. 1, p. 216-239, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02175-1>.

WATHARKAR, R. B., CHAKRABORTY, S., SRIVASTAV, P. P., & SRIVASTAVA, B. **Foaming and foam mat drying characteristics of ripe banana [*Musa balbisiana* (BB)] pulp.** Journal of Food Process Engineering, v. 44, n. 8, p. e13726, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13726>.