

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE POLPA DE CUPUAÇU EM CAMADA FINA

A. Figueiredo, S. M. Amorim, J. T. Teleken*

Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – Unifesspa, Marabá-PA, Brasil (jhony.teleken@unifesspa.edu.br)

Neste estudo foi desenvolvido um modelo matemático para descrever a secagem convectiva da polpa de cupuaçu em camada fina. O modelo acopla as equações de conservação de massa e energia, considerando propriedades dependentes da temperatura e composição. As transferências de calor e umidade foram descritas pelas Leis de Fourier e Fick, respectivamente. Simulações mostraram que o aumento da temperatura acelera a secagem, enquanto maiores espessuras e umidade relativa ampliam o tempo de processo.

Palavras-chave: Fruto amazônico; conservação; transferência de calor e massa.

INTRODUÇÃO

O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) é uma fruta nativa da região amazônica e pertence ao mesmo gênero do cacau. No Brasil, os estados do Pará, Amazonas e Bahia são os principais responsáveis pela produção dessa fruta (Barbosa-Carvalho et al., 2024; Rosa et al., 2024). A polpa do cupuaçu possui significativo potencial econômico devido ao seu aroma e sabor característicos, tornando-a adequada para diversas aplicações na indústria alimentícia, como produção de doces, bebidas e sorvetes (Rosa et al., 2024).

Porém, por apresentar elevado teor de umidade (>85%) e rica composição nutricional, a polpa é altamente suscetível à deterioração. Por esse motivo, o produto é geralmente submetido à pasteurização e comercializado, principalmente, na forma congelada no varejo. A secagem surge como uma estratégia alternativa para processamento e conservação da polpa. A redução do teor de umidade promove a diminuição da atividade de água, inibindo o desenvolvimento de microrganismos e aumentando a estabilidade do produto. Além disso, a desidratação contribui para a redução dos custos de transporte e armazenamento, quando comparada ao produto congelado (Castro Alves et al., 2025).

Entre os diversos métodos de secagem disponíveis, o mais extensamente aplicado industrialmente é o processo de secagem com ar quente. Entretanto, o dimensionamento desta operação não é uma tarefa simples. O processo envolve, simultaneamente, a transferência de calor e de massa entre o produto e o ar de secagem, sendo sua dinâmica influenciada tanto pelas características do alimento quanto pelas condições operacionais (McCabe et al., 2005). Nesse

contexto, o desenvolvimento de modelos físico-matemáticos configura-se como uma ferramenta importante para a predição do processo sob diferentes condições de operação, contribuindo para a redução de custos associados ao desenvolvimento experimental e à construção de protótipos, além de acelerar o projeto de equipamentos (Teleken et al., 2026, 2025). Assim, o presente projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático baseado nas equações de conservação de massa e de energia para descrever o processo de secagem em camada fina da polpa de cupuaçu em um secador do tipo estufa.

MATERIAL E MÉTODOS

Modelagem Matemática

Um modelo matemático que acopla os fenômenos de transferência de calor e massa foi desenvolvido para descrever o processo de desidratação de polpa de cupuaçu, distribuída na forma de filme sobre um suporte (placa de alumínio) e submetida à secagem convectiva, conforme reportado por Castro Alves et al. (2025).

Considerando que a espessura do filme (1,5 mm, 3,0 mm e 4,5 mm) é significativamente menor que a área de espalhamento (10 cm × 35 cm), o fenômeno foi assumido como unidimensional, com gradientes predominantes na direção da espessura (z). Adicionalmente, assumiu-se que a polpa não sofre deformação durante a secagem e que a transferência de calor do ar para a superfície do material ocorre por convecção, conforme a Lei de Newton do resfriamento. No interior da polpa, o calor é transmitido por condução (Lei de Fourier) e, paralelamente, a umidade é transportada até a superfície por difusão (Lei de Fick). Na superfície (interface ar/polpa), a água líquida evapora e é

transportada para o ar. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo de secagem e dos fenômenos considerados no modelo.

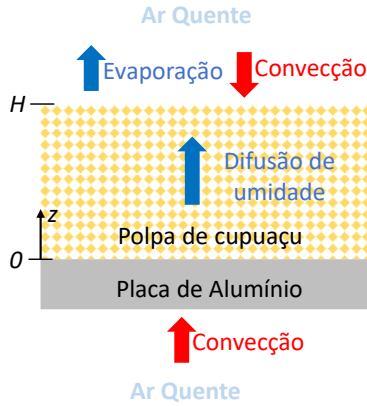


Figura 1. Representação esquemática dos fenômenos de transferência de calor e massa considerados no modelo matemático.

As Equações (1) e (2) foram utilizadas para descrever a variação da concentração de umidade (C_w , kg/m³) e da temperatura (T , °C) no interior da espuma ao longo do processo de secagem (Parisotto et al., 2020).

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C_w}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Nas quais D é o coeficiente efetivo de difusão de umidade na polpa (m²/s), ρ é a densidade (kg/m³), c_p é o calor específico (J/kg°C) e k é a condutividade térmica (W/m°C).

As propriedades termofísicas da polpa (ρ , c_p e k) foram determinadas a partir dos modelos propostos por Choi e Okos baseados na composição centesimal da amostra (Equações 3–5) (Rao et al., 2005).

$$\frac{1}{\rho} = \sum \frac{x_i}{\rho_i} \quad (3)$$

$$c_p = \sum x_i c_{p,i} \quad (4)$$

$$k = \sum x_i k_i \quad (5)$$

Onde x_i representa a fração mássica do constituinte i da polpa (kg/kg). A composição centesimal da polpa de cupuaçu foi baseada na TACO - Brazilian Food Composition Tables (NEPA - UNICAMP, 2011): 86,6% água ($i = w$), carboidratos 9,8% ($i = c$), 1,6% fibras ($i = f$), 0,8% proteína ($i = p$), 0,6% lipídeos ($i = l$), e 0,6% cinzas ($i = a$). Porém, durante o processo de secagem, a diminuição do teor de umidade da polpa provoca a variação da fração mássica de cada um dos constituintes. Essa variação foi descrita pela

Equação (6), para a água, e Equação (7), para os demais componentes (Parisotto et al., 2020). Os valores dos parâmetros de ρ_i , $c_{p,i}$ e k_i foram tratados como funções da temperatura conforme estabelecido por Choi e Okos e reportados por Rao et al. (2005).

$$x_w = \frac{C_w}{C_w + C_s} \quad (6)$$

$$x_i = (1 - x_w) F_i \quad (7)$$

Onde C_w corresponde à concentração de água na polpa (obtida pela Equação 1) e C_s à concentração de sólidos (kg/m³), considerada constante, uma vez que a espuma foi modelada como um meio indeformável. O termo F_i representa a fração mássica do componente i em relação à massa de sólidos (kg/kg).

Para a resolução da equação de conservação de massa (Equação 1), adotou-se como condição inicial que o conteúdo de umidade é homogeneamente distribuído na polpa, conforme expresso por:

$$C_w(0, z) = C_{w0} \quad (8)$$

Como condições de contorno, considerou-se: (i) fluxo difusivo de umidade nulo na interface placa de espalhamento/espuma ($z = 0$), assumindo impermeabilidade da base (Equação 9); e (ii) evaporação de água na interface espuma/ar ($z = H$), descrita por uma condição convectiva (Equação 10), conforme ilustrado na Figura 1.

$$z = 0 \quad -D \frac{\partial C_w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$z = H \quad -D \frac{\partial C_w}{\partial z} = \quad (10)$$

$$-h_m M_w \left(\frac{a_w P^{sat}(T)}{RT} - \left(\frac{RH}{100} \right) \frac{P^{sat}(T_{ar})}{RT_{ar}} \right)$$

Onde h_m é o coeficiente convectivo de transferência de umidade no ar (m/s) e a_w é a atividade de água avaliada na superfície da amostra (-). A atividade de água do material varia entre 0 e 1 e foi descrita como função do conteúdo local de umidade em base seca, $X_{bs} = C_w/C_s$ (kg/kg), utilizando uma isoterma de equilíbrio (Equação 11, (Bahamón-Monje et al., 2025). A pressão de saturação da água, P^{sat} (Pa), foi considerada dependente da temperatura e estimada por meio da equação de Antoine (Smith et al., 2007). Os parâmetros RH (%) e T_{ar} (°C) representam a umidade relativa e a temperatura do ar, R é a constante universal dos gases (8,314 J/(mol.K)) e M_w é a massa molar da água (18 g/mol).

$$a_w = \exp[-\exp(5,482 X_{bs}^{-0,1894} - 7,759)] \quad (11)$$

$$P^{sat} = 1000 \exp \left(16,3872 - \frac{3885,7}{T + 230,17} \right) \quad (12)$$

Para a resolução da equação da conservação da energia térmica (Equação 2) foi assumido que a temperatura inicial da polpa era constante e homogeneamente distribuída no meio, Equação 13.

$$T(0, z) = T_0 \quad (13)$$

Na interface placa de espalhamento/polpa ($z = 0$) foi aplicada uma condição de contorno de terceiro tipo (Robin), utilizando um coeficiente global de transferência de calor U ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), o qual considera as resistências térmicas em série associadas à convecção no ar e à condução na placa de alumínio (observe a Figura 1) (Equação 14). Na interface polpa/ar ($z = L$), o fluxo de calor resulta da transferência de calor por convecção entre o ar de secagem e a superfície da polpa, combinado com os efeitos de resfriamento evaporativo decorrentes da evaporação de água na superfície da amostra. Dessa forma, o balanço de energia na superfície considera tanto o calor sensível transferido por convecção quanto o calor latente requerido para a evaporação da água (Equação 15) (Teleken et al., 2025).

$$z = 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = U(T - T_{ar}) \quad (14)$$

$$z = H \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = h_t(T - T_{ar}) - \left(\frac{a_w P^{sat}(T)}{RT} - \left(\frac{RH}{100} \right) \frac{P^{sat}(T_{ar})}{RT_{ar}} \right) \Delta H_{vap} \quad (15)$$

em que h_t o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) e ΔH_{vap} é o calor latente de vaporização da água ($2,4 \times 10^6$ J/kg). O coeficiente global de transferência de calor, U , foi calculado de acordo com a Equação (16) (Bergman et al., 2011):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_t} + \frac{L_{al}}{k_{al}}} \quad (16)$$

Na qual L_{al} representa a espessura da placa (1,5 mm, medido) e k_{al} é a condutividade térmica do alumínio (220 $\text{W}/(\text{mK})$) (Bergman et al., 2011), respectivamente.

Resolução Numérica

Para a resolução do modelo matemático, foi empregado o Método das Diferenças Finitas totalmente implícito, conforme descrito por Patankar (1980). Nesse método, o domínio computacional contínuo é discretizado, de modo que as variáveis dependentes (T e C_w) passam a ser avaliadas apenas nos pontos discretos da malha. Uma malha com pontos igualmente espaçados ($\Delta z = 0,06$ mm) foi utilizada neste estudo. As derivadas espaciais e temporais foram aproximadas por diferenças centrais e as propriedades termofísicas foram tratadas explicitamente avaliando seus valores com base nos campos de temperatura e concentração de umidade no

passo de tempo anterior, resultando assim em um sistema de equações algébricas linear, o qual foi resolvido utilizando o método de inversão de matrizes em cada passo no tempo ($\Delta t = 2$ s). O algoritmo de solução do modelo foi implementado no software Scilab® (<https://www.scilab.org/>).

Validação Experimental

A validação do modelo foi realizada utilizando dados experimentais da secagem da polpa de cupuaçu em estufa convectiva com circulação forçada de ar (SolidSteel, SSDcr-85L, Brasil). A polpa foi distribuída uniformemente em uma camada de 3 mm de espessura sobre uma placa de alumínio revestida com filme adesivo de Teflon® e, posteriormente, inserida na estufa previamente aquecida a 60 °C. As cinéticas de secagem (conteúdo de umidade em função do tempo) foram obtidas por meio da retirada periódica de amostras de polpa em intervalos de tempo preestabelecidos, utilizando uma espátula de aço inoxidável. O conteúdo de umidade foi determinado pelo método gravimétrico de secagem em estufa. Os experimentos de secagem para obtenção das curvas de perda de umidade foram realizados em triplicata. Uma descrição detalhada do procedimento experimental é apresentada em Castro Alves et al. (2025).

Para a obtenção das curvas de evolução da temperatura, foram utilizados quatro termopares do tipo K inseridos na camada de polpa e conectados a um sistema de aquisição de dados (TASi, TA612C, China), com intervalo de aquisição de 30 s. Esses experimentos foram realizados em duplicata. Os ensaios destinados à obtenção das cinéticas de perda de umidade e de evolução da temperatura foram conduzidos separadamente, a fim de evitar interferências decorrentes da inserção dos termopares e da retirada de amostras durante o processo de secagem.

Análise Paramétrica

Após a validação do modelo matemático, avaliou-se, por meio de simulação numérica, a influência das condições de processo — temperatura do ar, umidade relativa e espessura da polpa — sobre a dinâmica de secagem da polpa de cupuaçu. Adicionalmente, investigou-se o efeito da difusividade mássica, parâmetro intrínseco do alimento, bem como dos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa. O Quadro 1 apresenta um resumo dos parâmetros empregados nas simulações. Os valores de referência adotados foram obtidos a partir de dados reportados na literatura para as condições operacionais (T_{ar} , UR e H) (Castro Alves et al., 2025). Já os parâmetros de transporte (D , h_t e h_m) foram definidos com base na ordem de grandeza dos valores reportados por Parisotto et al. (2020) para secagem de polpa de tomate camada fina.

Quadro 1. Parâmetros do modelo utilizados na simulação do processo.

Parâmetros de referência	$D = 3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ $h_t = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ $h_m = 0,01 \text{ m/s}$ $RH = 20 \%$ $T_{ar} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ $H = 3 \text{ mm}$
Efeito da temperatura do ar (T_{ar})	$T_{ar} = 50, 60 \text{ e } 70 \text{ }^\circ\text{C}$
Efeito da umidade relativa (RH)	$RH = 5, 10, 20 \text{ e } 30 \%$
Efeito da espessura da amostra (H)	$H = 1,5; 3,0 \text{ e } 4,5 \text{ mm}$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validação do Modelo

A Figura 2 apresenta os dados experimentais de temperatura da polpa (T) e do ar de secagem (T_{ar}), conteúdo de umidade em base seca da polpa (X_{bs}) e umidade relativa do ar (UR) ao longo do processo de secagem. Observa-se que as previsões do modelo (linhas pretas) apresentaram boa concordância com os dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98. Esses resultados demonstram que as hipóteses e simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo matemático foram adequadas para descrever os principais fenômenos físicos envolvidos no processo de secagem convectiva da polpa de cupuaçu.

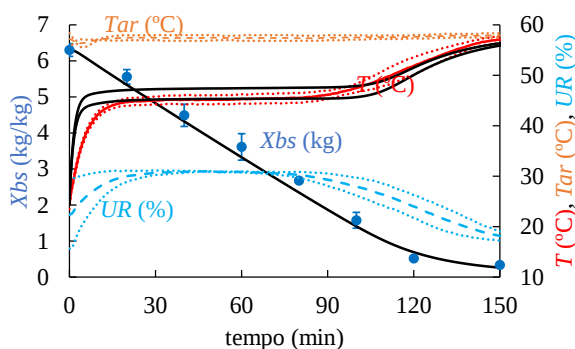


Figura 2. Temperatura e conteúdo de umidade da polpa de cupuaçu durante o processo de secagem convectiva a 60 °C. As linhas pretas representam as previsões do modelo e os símbolos coloridos as medidas experimentais.

Dinâmica do processo de secagem

A Figura 3 ilustra a evolução espacial e temporal do conteúdo de umidade (expresso em termos de fração mássica de umidade, x_w , Figura 3a) e temperatura (T , °C, Figura 3b) durante a secagem a 60 °C. Estes

resultados foram obtidos utilizando para a simulação os parâmetros de referência ilustrados no quadro 1.

Na Figura 3b observa-se que a temperatura da polpa aumenta rapidamente no início do processo, passando de 25 °C para valores em torno de 45 °C. Em seguida, a temperatura permanece aproximadamente constante até cerca de 120 min de secagem, quando volta a aumentar se aproximando da temperatura do ar (60°C). Além disso, verifica-se que a variação de temperatura na direção axial (z) ao longo da espessura do filme é muito pequena a cada passo de tempo. Em outras palavras, para a espessura de polpa avaliada (3 mm), um modelo a parâmetros concentrados para a conservação de energia térmica poderia ser utilizado sem provocar diferenças significativas nas respostas preditas. Por outro lado, a Figura 3a mostra que a resistência à transferência de massa no interior da amostra é mais importante do que a resistência à transferência de calor. Observa-se a formação de gradientes internos de umidade durante a secagem.

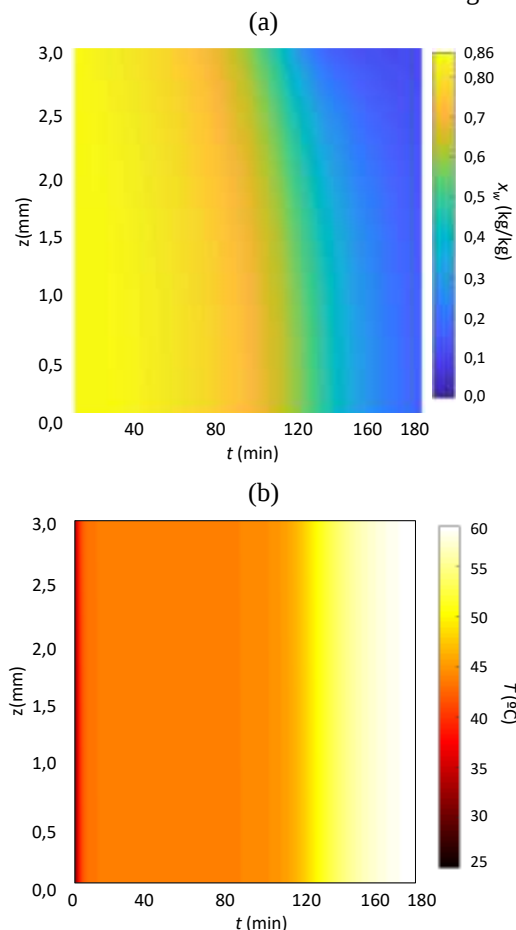


Figura 3. Perfis de conteúdo de umidade (a) e temperatura (b) na polpa de cupuaçu calculados pelo modelo durante o processo de secagem.

O processo de secagem da polpa de cupuaçu apresentou três fases distintas, conforme pode ser observado na Figura 4, a qual representa a evolução da

temperatura média da polpa e da taxa de secagem em função do conteúdo de umidade do produto em base seca (X_{bs}). A primeira fase é caracterizada por um aumento pronunciado da temperatura da polpa, de 25 °C para aproximadamente 45 °C, acompanhado pela elevação da taxa de secagem até valores próximos de 0,048 kg/(kg·min). Na sequência, a temperatura da polpa e a taxa de secagem permanecem aproximadamente constantes. O período de taxa de secagem constante é caracterizado pelo equilíbrio entre o calor fornecido por convecção pelo ar de secagem e o calor consumido na evaporação da água presente na superfície do material. Nessa etapa, a superfície da polpa permanece saturada de umidade, fazendo com que o processo seja controlado predominantemente pelas resistências externas à transferência de calor e massa. Na terceira fase, a superfície do material torna-se progressivamente mais seca, reduzindo a disponibilidade de água para evaporação. Como consequência, a transferência de massa passa a ser governada predominantemente pela difusão de umidade no interior da polpa. Além disso, o fluxo convectivo de calor fornecido pelo ar de secagem torna-se superior ao calor consumido na evaporação da água, resultando no aumento gradual da temperatura da polpa. A dinâmica da secagem convectiva da polpa de cupuaçu, caracterizada por três fases distintas, é semelhante à observada por Parisotto et al. (2020) na secagem de polpa de tomate pelo processo *cast-tape drying*.

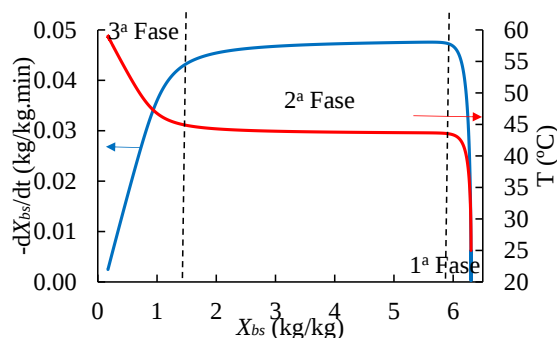


Figura 4. Taxa de secagem dX_{db}/dt (kg/kg.min) e temperatura média da polpa em função do conteúdo de umidade do material (X_{db} , kg/kg) durante o processo de secagem.

A Figura 5 ilustra a evolução dos valores médios das propriedades termofísicas da polpa ao longo da secagem. Observa-se que a condutividade térmica (k) e o calor específico (c_p) diminuem de aproximadamente 0,55 para 0,32 W/mK e de 3900 para 1200 J/kgK, respectivamente. Em contrapartida, a densidade da polpa aumenta de cerca de 1020 para 1450 kg/m³. Esse comportamento está diretamente relacionado à redução do teor de umidade da amostra durante o processo de secagem, que decresce de 86,6% para valores inferiores a 10% ao final de 180

min. Como a água apresenta elevada capacidade térmica e contribui significativamente para a transferência de calor no material, sua remoção resulta na diminuição da condutividade térmica e do calor específico, enquanto a concentração dos sólidos promove o aumento da densidade aparente da polpa (Rao et al., 2005).

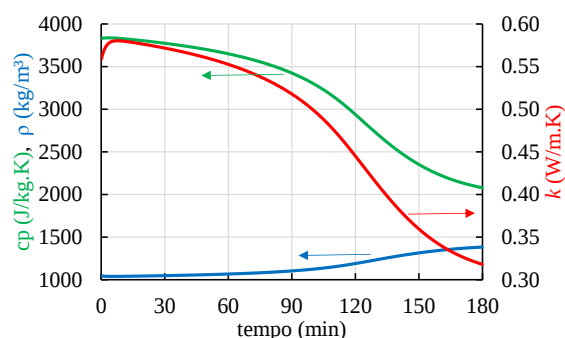


Figura 5. Valores da condutividade térmica (k), calor específico (c_p) e densidade da polpa (ρ) durante o processo de secagem.

Efeito das condições de processo

Na Figura 6 estão ilustrados os resultados da análise paramétrica sobre o efeito das condições operacionais (temperatura do ar de secagem, Figura 6a, umidade relativa do ar, Figura 6b, e espessura da amostra, Figura 6c) nas cinéticas de secagem (linhas pontilhadas) e de aumento da temperatura média da polpa (linhas sólidas).

O aumento da temperatura do ar promoveu elevação tanto da taxa de secagem quanto da temperatura da amostra durante o período de taxa constante. Esse comportamento era esperado, uma vez que temperaturas mais elevadas aumentam o fluxo de energia térmica transferido para a polpa, favorecendo o aquecimento do material e elevando a pressão de vapor na superfície da amostra. Como consequência, intensifica-se a transferência de massa do produto para o ar de secagem, resultando em maiores taxas de evaporação (Teleken et al., 2025). Com o aumento da temperatura de 50 para 70 °C o tempo de secagem passou de >180 min para 130,6 min. Esses resultados estão de acordo com os valores experimentais obtidos por Castro Alves et al. (2025), os quais obtiveram tempos de secagem de cerca de 200 min para 50 °C e 140 min para 70 °C para a polpa com 3 mm de espessura.

A redução da umidade relativa do ar para 10% resultou em uma diminuição no tempo de secagem (131,6 min, Tabela 1), semelhante à observada com o aumento da temperatura para 70 °C. Conforme mostrado na Figura 5b, essa redução no tempo de processo ocorreu sob temperaturas mais baixas, o que é vantajoso do ponto de vista da preservação de compostos termossensíveis

e da minimização de alterações sensoriais indesejáveis no produto.

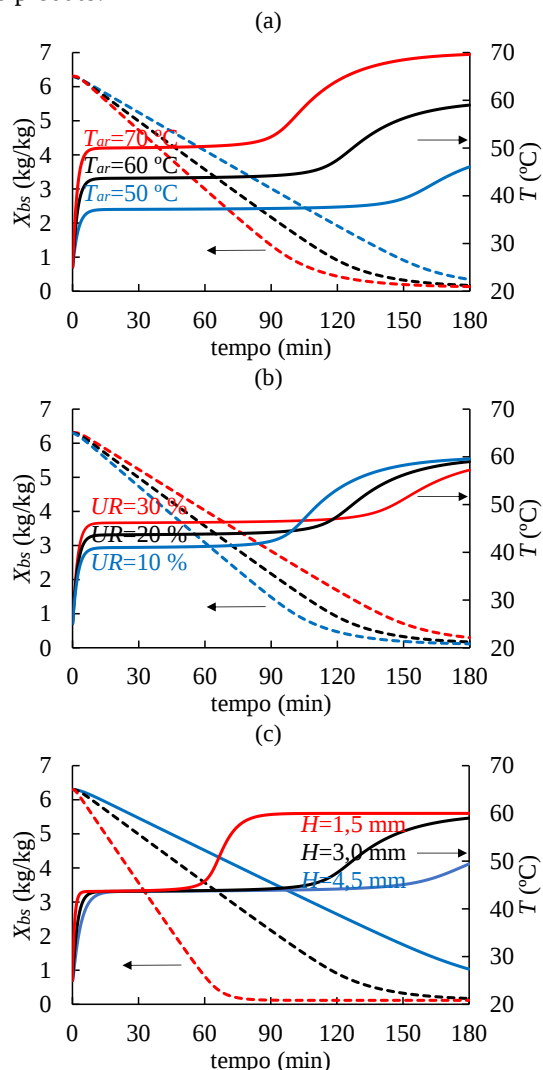


Figura 6. Efeito da temperatura do ar (a), umidade relativa (b) e espessura da polpa (c) sobre as cinéticas de secagem (linhas pontilhadas) e de aumento da temperatura (linhas contínuas) do produto.

Tabela 1. Tempo necessário para reduzir o conteúdo de umidade a 5% do valor inicial, sob diferentes condições de temperatura do ar, umidade relativa e espessura do filme.

Temperatura do ar (T_{ar})	$t_{secagem}$ (min)
50 °C	>180,0
60 °C	151,3
70 °C	130,6
Umidade relativa (UR)	
10 %	131,6
20 %	151,3
30 %	177,7
Espessura da polpa (H)	
1,5 mm	69,0
3,0 mm	151,3
4,5 mm	>180,0

A redução da espessura da polpa de cupuaçu de 3,0 mm para 1,5 mm causou uma redução de pouco mais de 50% no tempo de secagem. Para 4,5 mm de espessura o tempo ultrapassou os 180 min de processo. Castro Alves et al. (2025) encontraram valores semelhantes para a secagem a 60 °C de polpa de cupuaçu tempos de processo de cerca de 260 min para espessura de 4,5 mm, 160 min para 3,0 mm e 100 min para 1,5 mm.

CONCLUSÃO

O modelo matemático desenvolvido neste estudo foi capaz de prever a evolução dos perfis de temperatura e umidade durante a secagem convectiva da polpa sob diferentes condições operacionais. As simulações mostraram que o aumento da temperatura do ar acelera a secagem, enquanto maiores espessuras da camada de polpa e maior umidade relativa aumentam o tempo de processo. Entretanto, temperaturas elevadas podem comprometer a qualidade do produto devido à degradação de compostos termossensíveis. Assim, a definição das condições de secagem deve considerar não apenas a redução do tempo de processo, mas também a preservação da qualidade final do alimento. Nesse contexto, a redução da umidade relativa do ar pode ser uma alternativa para obter menores tempos de secagem mesmo em temperaturas mais baixas.

AGRADECIMENTOS

Ao programa Programa Nacional de Assistência Estudantil – PNAES/Unifesspa pela concessão de bolsa de iniciação científica para Ângela Figueiredo.

REFERÊNCIAS

- Bahamón-Monje, A.F., García-Rincón, P.A., Collazos Escobar, G.A., Amorcho-Cruz, C.M., Gutiérrez-Guzmán, N., 2025. **Dataset and multivariate statistical tools for mathematical modeling of water desorption isotherms and infrared spectral properties of cupuassu (*Theobroma grandiflorum* L.) pulp.** Data Br. 61, 111720. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111720>
- Barbosa-Carvalho, A.P.P., da Silva Pena, R., Chisté, R.C., 2024. **Oven-Dried Cupuaçu and Bacuri Fruit Pulp as Amazonian Food Resources.** Resources 13, 153. <https://doi.org/10.3390/resources13110153>
- Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 2011. **Fundamentals of heat and mass transfer**, 7th ed. John Wiley & Sons, NY.
- Castro Alves, T., Amorim, S.M. de, Wolf, M., Teleken, J.T., 2025. **Effect of temperature and sample thickness on the hot-air drying kinetics of cupuassu pulp.** J. Eng. Exact Sci. 11, 21706. <https://doi.org/10.18540/jcecvl11iss1pp21706>
- McCabe, W., Smith, J., Harriot, P., 2005. **Unit operations of chemical engineering**, 7th ed. McGraw-Hill Inc., Boston.
- NEPA - UNICAMP, 2011. **TABELA BRASILEIRA DE**

COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS – TACO, fourth edi.
ed. Campinas.

Parisotto, E.I.B., Teleken, J.T., Laurindo, J.B., Carciofi, B.A.M., 2020. **Mathematical modeling and experimental assessment of the cast-tape drying**. *Dry. Technol.* 38, 1024–1035.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1610768>

Patankar, S., 1980. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Taylor & Francis, Boca Raton.

Rao, M., Rizvi, S.H., Datta, A.K., 2005. **Engineering Properties of Foods**, 3th ed. ed. CRC Press, Boca Raton FL.

Rosa, J.S. da, Oliveira Moreira, P.I., Carvalho, A.V., Freitas-Silva, O., 2024. **Cupuassu Fruit, a Non-Timber Forest Product in Sustainable Bioeconomy of the Amazon—A Mini Review**. *Processes* 12, 1353.
<https://doi.org/10.3390/pr12071353>

Smith, J.M., van Ness, H.C., Abbott, M.M., 2007. **Introduction to chemical engineering thermodynamics**, 7th ed. McGraw Hill Higher Education Inc.

Teleken, J.T., Amorim, S.M., Rodrigues, S.S.S., de Souza, T.W.P., Ferreira, J.P., Carciofi, B.A.M., 2025. **Heat and Mass Transfer in Shrimp Hot-Air Drying: Experimental Evaluation and Numerical Simulation**. *Foods* 14, 428.
<https://doi.org/10.3390/foods14030428>

Teleken, J.T., Wolf, M., Ferreira, J.P., Laurindo, J.B., Carciofi, B.A.M., 2026. **Mathematical Modeling and Experimental Evaluation of Heat and Mass Transfer During Pork Loin Roasting**. *J. Food Process Eng.* 49.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.70370>