



MODELAGEM DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA DA SECAGEM DE CAFÉ DESPOLPADO (*Coffea arabica* L.) EM SECADOR ROTO-AERADO

PAULO S. DE ANDRADE^{1*}, THIAGO K. G. ANRAKU¹, VÍTOR S. FARIA¹, FERNANDO R. C. BORGES¹, CLAUDIO R. DUARTE¹, MARCOS A. S. BARROZO¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

*e-mail: paulo.andrade_97@hotmail.com

RESUMO – A secagem de café arábica (*Coffea arabica* L.) é geralmente feita por via de secagem mecânica ou em terreiro, visando reduzir a umidade do grão a um nível seguro entre 10 e 12 %_{bu}. As técnicas usadas têm como característica um elevado tempo de secagem, sendo então oportuno a busca por técnicas alternativas que reduzam o tempo de processo e mantenham a qualidade do produto. Posto isto, este estudo analisou a transferência simultânea de calor e massa entre o café e o ar em um secador rotativo não convencional, denominado secador roto-aerado. Um modelo de duas fases, com um conjunto apropriado de equações constitutivas, foi usado para descrever o processo de secagem. O sistema de equações foi resolvido numericamente usando a técnica de colocação normal. Os resultados simulados mostraram boa concordância com os dados experimentais. A diferença média entre os resultados experimentais e simulados foi de 3,89 % para a umidade do café e de 2,17 % para a temperatura do café.

INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a cultura de café arábica (*Coffea arabica* L.) representa uma das mais importantes produções do Brasil, com 65 % da produção nacional entre as espécies de café. A região sudeste é destacada como a maior produtora, onde se produziu 1.775.518 toneladas na safra de 2021, equivalente a 92,37 % da produção nacional.

Os frutos do café geralmente são colhidos com teor de umidade entre 30 e 65 %_{bu} e o café despulpado possui uma umidade de aproximadamente 20 a 40 %_{bu} (AFONSO JÚNIOR, 2001; GONELI et al., 2013). Nestas condições, o café está sujeito à rápida deterioração. Assim, antes de ser armazenado, o café deve ser desidratado até uma umidade entre 10 a 12%_{bu}, para aumentar sua vida útil e garantir que sua comercialização e consumo sejam seguros (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; DE MELO PEREIRA et al., 2019).

A secagem é uma das etapas de maior relevância na pós-colheita do café, tanto em relação ao consumo de energia e formação dos custos de processamento quanto do ponto de vista da preservação da qualidade. A escolha da técnica de secagem depende de fatores econômicos e/ou do tipo de processamento empregado, o que influencia nas propriedades físico-químicas do café e na qualidade da bebida (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; LIVRAMENTO et al., 2017).

A secagem em terreiro é comumente usada pela indústria, pois tende a produzir cafés torrados com propriedades sensoriais superiores à secagem mecânica. Contudo, possui desvantagens, como tempo de secagem prolongado (até 7 dias), alto custo de mão de obra e a necessidade de uma grande área para secagem, além do alto risco de deterioração (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; KULAPICHITR et al., 2019; LIVRAMENTO et al., 2017).

Já, quando se opta pela secagem mecânica do café, a temperatura do ar de secagem normalmente deve estar entre 45 e

50 °C, não devendo ultrapassar 60 °C em processos de secagem prolongados. A temperatura do café pode ser elevada até 45 °C para os cafés commodity ou 40 °C para os cafés especiais (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; MUJUMDAR, 2006).

Alguns estudos compararam o impacto de diferentes técnicas de secagem (bomba de calor, leito fixo, solar, estufa e bandeja) na qualidade do café e verificaram que, mesmo a secagem mecânica sendo mais rápida, ela apresenta desvantagens devido às temperaturas aplicadas (entre 40 e 60 °C) por um tempo prolongado de secagem (de 11 h a 5 dias), ocasionando perdas significativas de componentes de qualidade do café (DONG et al., 2017; KULAPICHITR et al., 2019, 2022; LIVRAMENTO et al., 2017).

Em uma secagem em duas etapas, o café despulpado é pré-secado em terreiro, podendo atingir 18 %_{bu} de umidade (AFONSO JÚNIOR et al., 2007). Após atingir esta condição de meia seca (18 a 30 %_{bu}), o café é colocado no secador com um teor de umidade uniforme. A secagem deve ser conduzida até que o café atinja 12,5 a 13 %_{bu} de umidade. O café é então descarregado enquanto ainda está quente para descansar, até atingir 11 %_{bu} de umidade final antes da transferência para o armazenamento (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014).

O secador roto-aerado é um equipamento que foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU) e pode ser uma alternativa para a secagem de café. Ele possui uma configuração que é constituída por um cilindro rotatório, semelhante ao secador rotativo convencional (Figura 1), com o acréscimo de um sistema de fluidização interno e a retirada dos suspensores (Figura 2).

Sua concepção não convencional, além de superar algumas limitações operacionais, tem como motivação o melhor contato fluido-partícula, esperando-se, desta forma, aumentar os coeficientes de transferência de calor e massa e, como consequência, possibilitar a redução do consumo energético e a eficiência do processo (LISBOA, 2005).

O modelo de duas fases tem sido utilizado com sucesso para modelar a transferência de calor e massa entre sólidos e ar (SOUZA et al.,

2021). Este modelo compreende as equações de balanço de massa e energia aplicadas tanto às fases fluida como sólida e requer equações constitutivas para o coeficiente de transferência de calor entre estas duas fases, cinética de secagem e isoterma de sorção.

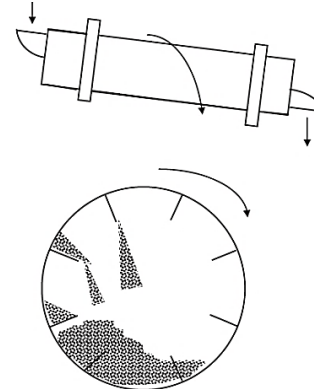


Figura 1: Esquema generalizado do secador rotativo convencional. Fonte: Berk (2018).

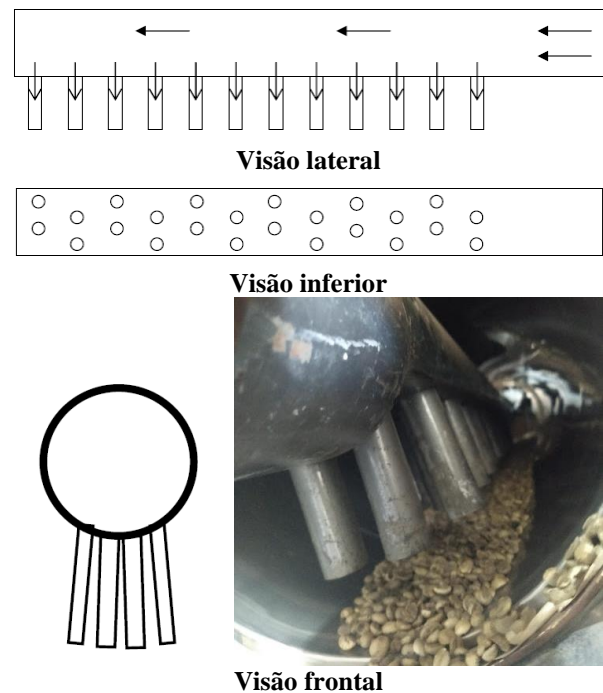


Figura 2: Esquema do sistema de fluidização do secador roto-aerado.

A modelagem adequada e a simulação dos perfis de temperatura e umidade do material no secador, uma vez validados por dados experimentais, permitem, por exemplo, examinar e interpretar o efeito das condições de funcionamento no processo de secagem sem a necessidade de incorrer em um extenso conjunto de testes experimentais (SOUZA et al., 2021) e, assim, escolher as condições

apropriadas para preservar a qualidade do café, por exemplo.

Deste modo, este trabalho teve como objetivo melhorar o desempenho da secagem de café despulpado (*Coffea arabica* L.), utilizando pela primeira vez o secador roto-aerado. Foi avaliado o efeito da temperatura do ar de secagem na umidade e temperatura do café, sendo que o processo de transferência de calor e massa foi modelado utilizando um modelo em duas fases e as previsões a partir da simulação numérica do modelo foram comparadas com dados experimentais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material e aparato experimental

O café arábica despulpado de variedade Mundo Novo, utilizado nos experimentos, foi obtido na Região do Cerrado Mineiro em parceria com a fazenda Santa Bárbara – Grupo DKB (Monte Carmelo/MG). A densidade aparente do café, de $1,11 \text{ g cm}^{-3}$, foi obtida pela técnica de picnometria. Por meio do analisador de tamanho e forma de partículas Camsizer® P4, foram analisados o diâmetro médio de Sauter da partícula (d_p), esfericidade (ϕ), simetria e a razão de aspecto do café (RA). Estas propriedades estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do café despulpado alcançadas pelo Camsizer.

d_p (m)	ϕ	Simetria	RA
$6,0 \times 10^{-3}$	0,888	0,940	0,685

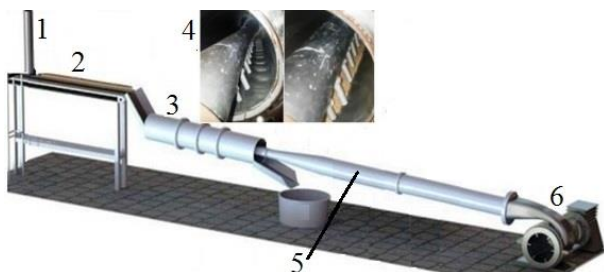


Figura 3: Esquema da unidade experimental do processo de secagem: (1) recipiente de armazenamento do material, (2) esteira de transporte, (3) secador roto-aerado, (4) visão interna (minitubos), (5) sistema de aquecimento elétrico e (6) soprador. Fonte: Souza et al. (2021).

A unidade experimental utilizada é mostrada na Figura 3. A unidade era constituída por um soprador de 7,5 hp do tipo ventilador radial (6) acoplado a um duto de 2 m e 0,2 m de diâmetro (5) com um sistema de aquecimento do ar composto por resistências elétricas controladas por dois variadores de tensão; o secador rotativo (3) possuía a superfície interna coberta por chapas de aço inoxidável de 0,5 mm de espessura, sendo que a estrutura permitia variações de inclinação e rotação; e uma correia transportadora (2) montada debaixo de um recipiente para a alimentação dos sólidos (1). O secador roto-aerado tem comprimento de 1,4 m e 0,28 m de diâmetro (relação L/D = 5), com 56 mini tubos (4) com diâmetros de 0,02 m e 0,095 m de comprimento, os quais direcionam o ar para o material, colocados a 0,02 m do café.

Procedimento experimental

Os experimentos foram conduzidos em diferentes níveis de temperatura do ar de secagem (58,2; 75 e 83,4 °C). O ângulo de inclinação do tambor era de 0,2°, a velocidade de rotação era de 1,5 rpm, a vazão de alimentação de sólidos era de $0,05 \text{ kg min}^{-1}$ e a velocidade do ar de 4 m s^{-1} . Os experimentos de secagem, em secador roto-aerado, foram realizados em uma faixa de 30% a 40% de umidade relativa do ar.

As temperaturas do ar e dos sólidos foram medidas usando termopares de cobre-constantan, previamente calibrados usando um banho termostático e termômetro de mercúrio (com uma precisão de 0,05 °C). A velocidade do ar foi medida no duto de alimentação de ar (0,2 m de diâmetro) utilizando um anemômetro de fio quente.

Após certificar que o sistema estava em regime permanente, as amostras foram recolhidas para as análises. Para obter a temperatura do café no secador, o material foi recolhido em um recipiente isolado termicamente contendo um termopar. O teor de umidade do café (%_{bs}) foi determinado pelo método de estufa a 105 °C até peso constante (aprox. 24h) (SILVA, 2018). A amostragem da temperatura e umidade foi feita ao longo do secador em posições: 0 (inicial), 0,3; 0,7; 1,1 e 1,4 m (final).

O cálculo da taxa de secagem, (pp min^{-1}) foi feito considerando a diferença entre a

umidade inicial e final em relação ao tempo de residência de cada ensaio. O tempo de residência (τ) foi determinado pela razão entre a carga de sólidos no secador e a alimentação de sólidos. Para medir a carga de sólidos (kg), o secador foi parado e o material foi recolhido para pesagem em uma balança analítica.

Modelagem matemática

O processo foi modelado através da aplicação de equações de balanço de massa e energia para as fases sólida e fluida. A abordagem considera as características dinâmicas do fluido no secador, bem como as propriedades intrínsecas do material, a umidade de equilíbrio e a cinética de secagem.

Na formulação deste modelo, foram feitas as seguintes considerações:

- a forma e as propriedades físicas do grão não se alteram durante a secagem;
- as condições iniciais de fluxo de alimentação, umidade e temperatura do sólido e do ar são conhecidas;
- a velocidade da partícula através do tambor é constante;
- a temperatura e a umidade do ar são constantes na condição de entrada.

As Equações 1 e 2 dos balanços de massa e energia entre o ar de secagem e o material particulado são apresentadas a seguir.

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_s} \quad (1)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{U_{va} V (T_f - T_s) + R_w H^* C_{p_l} T_s - R_w H^* [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)]}{G_s (C_{p_s} + C_{p_l} M)} \quad (2)$$

No caso do secador roto-aerado, o sistema de equações diferenciais obtido nesse trabalho deve ser resolvido simultaneamente para as duas variáveis envolvidas, levando-se em consideração que são conhecidas na entrada a temperatura ($T_s(0) = T_{s_0}$) e a umidade ($M(0) = M_0$) do sólido, como condições de contorno.

Equações constitutivas

Equação de GAB (Equações 3 a 6), para a umidade de equilíbrio (M_{eq}) do café (GONELI et al., 2013).

$$M_{eq} = \frac{M_m CKUR}{(1-KUR)(1-KUR+CKUR)} \quad (3)$$

Onde:

$$C = 3,213 \exp\left[\frac{163,334}{RT_s}\right] \quad (4)$$

$$K = 1,414 \exp\left[\frac{-86,080}{RT_s}\right] \quad (5)$$

$$M_m = 0,006 \exp\left[\frac{352,528}{RT_s}\right] \quad (6)$$

Sendo M_{eq} (bs), UR decimal, T_s em Kelvin e $R = 0,462 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Equação de Page (Equação 7), com relação do tipo Arrhenius (Equação 8), para a cinética de secagem, em que MR é o adimensional de umidade.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M - M_{eq}} = \exp(-kt^{0,5631}) \quad (7)$$

$$k = \exp\left(-5,6177 - \frac{-29,0362}{T_f + 273,15}\right) \quad (8)$$

Sendo k (s^{-1}), T_f em Kelvin e t em s.

A melhor correlação (Equação 9) para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) foi determinado para o secador roto-aerado por Arruda (2008).

$$U_{va} = 29,765 G_f^{-0,129} G_s^{0,968} \quad (9)$$

Onde G_s e G_f são as vazões mássicas do sólido e do ar seco, respectivamente.

Resolução numérica

O método de colocação normal com dez pontos de colocação e uma aproximação polinomial de quarta ordem foram utilizados para a resolução numérica do modelo. Este número de pontos foi escolhido através de testes que mostraram que valores acima deste não trouxeram melhorias na precisão dos resultados obtidos com este modelo (ARRUDA et al., 2009). A tolerância relativa definida foi da ordem de 10^{-10} e foi utilizada a sub-rotina 'BVP4C' do software Matlab®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade inicial do café despulpado foi de $19,7 \pm 1,1\%$ _{bs}. A Tabela 2 mostra o tempo de residência (τ), a taxa de secagem (pp min^{-1}) e a

variação de temperatura do café ($^{\circ}\text{C}$), obtido em cada condição de operação. Pode-se notar que as respostas de taxa de secagem e o acréscimo de temperatura do café foram influenciadas pela temperatura do ar.

O tempo médio de residência do material dentro do secador variou de 24,73 a 26,29 min. Este tempo de residência é pequeno comparado com outros tipos de secadores utilizados para café (COSTA et al., 2021; DONG et al., 2017; KULAPICHITR et al., 2019), que podem requerer tempos acima de 2 horas para a secagem.

Tabela 2: Resultados da secagem de café no secador roto-aerado.

T_f ($^{\circ}\text{C}$)	τ (min)	Taxa de secagem (pp min^{-1})	ΔT_s ($^{\circ}\text{C}$)
58,2	26,02	0,147	10,7
75	24,73	0,164	11,5
83,4	26,29	0,167	13,2

O tempo reduzido para a secagem em secador roto-aerado se deve ao bom contato fluido-partícula (ARRUDA et al., 2009) e isso pode levar a condições adequadas para a manutenção da qualidade da do café. É importante frisar também que tempos de secagem prolongados podem resultar na degradação da qualidade do café. Portanto, esta é uma grande vantagem deste secador não convencional. Em se tratando de café especial, esta vantagem pode ser decisiva.

A taxa de secagem variou de 0,147 a 0,167 pp min^{-1} e aumentou juntamente com a temperatura do ar de secagem. As taxas de secagem obtidas no secador roto-aerado foram muito superiores às obtidas para café em outras técnicas de secagem (ALVES et al., 2013, 2017), evidenciando assim um grande potencial do secador desenvolvido para secagem de café.

As Figuras 4 a 6 mostram os dados experimentais e os resultados das soluções numéricas do modelo (em diferentes condições de operação) para o teor de umidade de café em diferentes posições axiais ao longo do secador. Verifica-se que as diferenças ou desvios entre os valores experimentais e simulados, para os dados de umidade do café ($\%_{\text{bs}}$), mostraram

uma boa capacidade do modelo em prever a umidade do café.

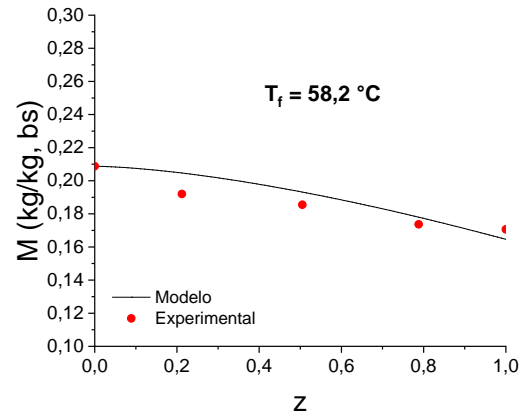


Figura 4: Perfis experimental e simulado para a umidade do café submetido à secagem em secador roto-aerado a 58,2 $^{\circ}\text{C}$.

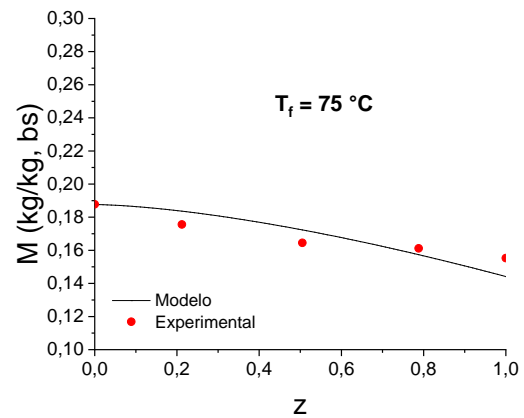


Figura 5: Perfis experimental e simulado para a umidade do café submetido à secagem em secador roto-aerado a 75 $^{\circ}\text{C}$.

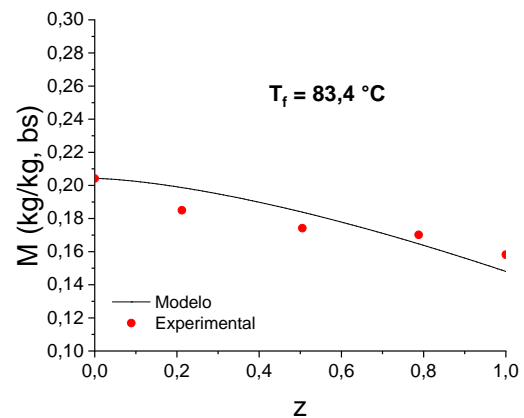


Figura 6: Perfis experimental e simulado para a umidade do café submetido à secagem em secador roto-aerado a 83,4 $^{\circ}\text{C}$.

O valor médio dos desvios relativos para a condição experimental de temperatura do ar mais branda de 58,2 °C (Figura 4) foi de apenas 3,35 %. Para a condição experimental intermediária de 75 °C (Figura 5), o desvio relativo médio foi de 3,79 %. Já, para a condição experimental de alta temperatura (Figura 6), o valor médio das diferenças relativas da umidade do café entre os valores simulados e experimentais ficou em 4,52 %.

Nota-se um aumento da diferença entre os valores experimentais e simulados pelo modelo com o aumento da temperatura de secagem, que pode estar associado à elevação da imprecisão da medida ou das equações constitutivas em prever estas condições mais drásticas. Entretanto, tendo em vista a preservação da qualidade do café especial, condições mais brandas devem ser usadas.

A modelagem utilizada neste estudo foi capaz de prever bem o comportamento da secagem do café no secador roto-aerado. A Figura 7 mostra uma comparação entre os resultados simulados e experimentais para o teor de umidade do café ao longo do secador em todas as condições de operação utilizadas neste estudo. O desvio relativo médio dos dados experimentais foi de 3,89 %.

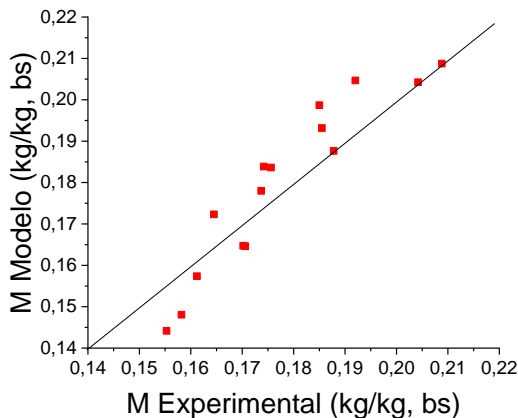


Figura 7: Resultados experimentais e simulados para o teor de umidade do café no secador roto-aerado.

Foi realizada também uma comparação entre os valores experimentais e os resultados das soluções numéricas do modelo (em diferentes condições de operação) para a temperatura do café em diferentes posições axiais ao longo do secador, que pode ser vista nas Figura 8 a 10.

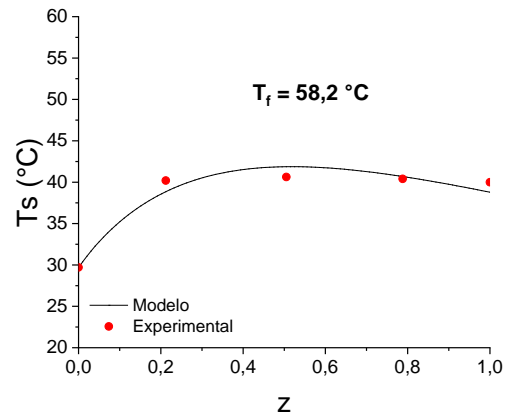


Figura 8: Perfis experimental e simulado para a temperatura do café submetido à secagem em secador roto-aerado a 58,2 °C.

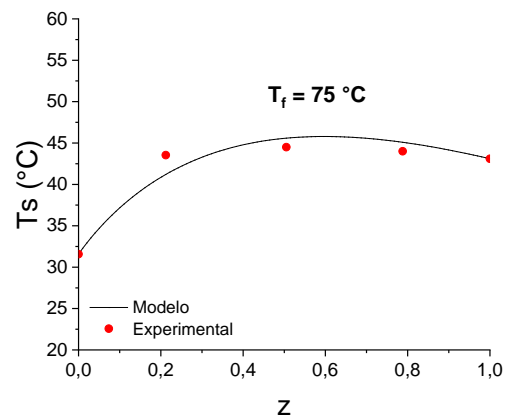


Figura 9: Perfis experimental e simulado para a temperatura do café submetido à secagem em secador roto-aerado a 75 °C.

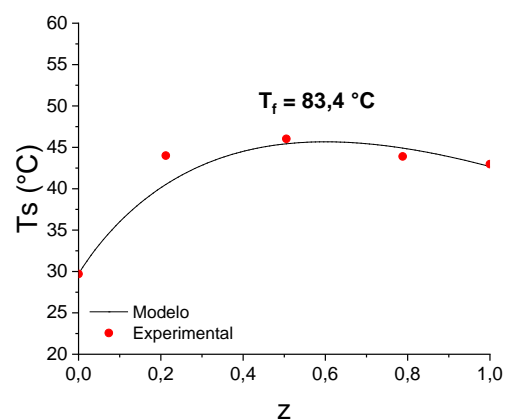


Figura 10: Perfis experimental e simulado para a temperatura do café submetido à secagem em secador roto-aerado a 83,4 °C.

Verifica-se que as diferenças entre os valores experimentais e simulados, para os dados de temperatura do café (°C), foram

inferiores àqueles para a umidade e mostraram uma boa capacidade do modelo em prever a temperatura do café.

O valor médio dos desvios relativos para temperatura do café com $T_f = 58,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 8) foi de apenas 2,03 %. Para a condição experimental intermediária (Figura 9), o desvio relativo médio da temperatura do sólido foi de 2,05 %.

Já, para a condição experimental de $83,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 10), o valor médio das diferenças relativas da temperatura do café entre os valores simulados e experimentais ficou em 2,44 %. Nota-se, assim como para a umidade do café, um aumento da diferença entre os valores experimentais e simulados pelo modelo com o aumento da temperatura de secagem.

A Figura 11 mostra uma comparação entre os resultados simulados e experimentais para a temperatura do café ao longo do secador em todas as condições de operação utilizadas neste estudo. O desvio relativo médio dos dados experimentais foi de 2,17 %. Portanto, o modelo também foi capaz de prever bem a temperatura dos cafés.

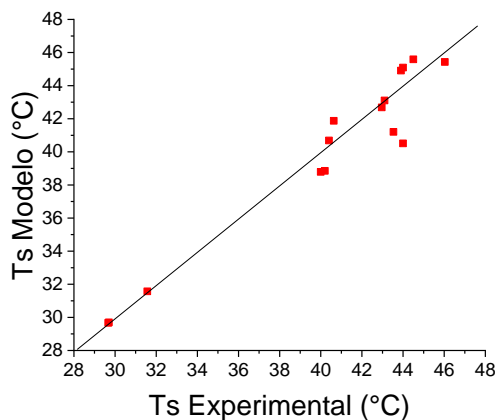


Figura 11: Resultados experimentais e simulados para a temperatura do café no secador roto-aerado.

Uma boa previsão da temperatura do café pode ajudar a encontrar as condições de operação que favorecem a preservação de sua qualidade. Diferenças na temperatura do café podem resultar em um produto com diferentes níveis de qualidade também. Ao secar a café, é importante utilizar temperaturas nas quais a sua viabilidade não seja prejudicada.

A temperatura média de entrada do café no secador foi de $30,3 \pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e houve um

aumento de $10,7$ a $13,2 \text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura do café ao final da secagem.

Como a temperatura do café pode ser elevada até $45 \text{ }^\circ\text{C}$ para os cafés commodity e $40 \text{ }^\circ\text{C}$ para os cafés especiais (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014), após a avaliação dos resultados da variação de temperatura do café, pode-se indicar a menor temperatura de secagem ($58,2 \text{ }^\circ\text{C}$) para a produção de cafés especiais e as temperaturas intermediária e superior (75 e $83,4 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente) para a produção de cafés commodity.

Em geral, a diminuição da umidade do café está associada a condições que levam a uma alta taxa de secagem e correspondente superaquecimento do café. Portanto, uma atenção especial a esta condição deve ser tomada caso haja interesse na produção de cafés especiais.

CONCLUSÃO

O novo secador desenvolvido (secador roto-aerado) e aplicado pela primeira vez para secagem de café, como uma proposta de um novo processo de produção de cafés especiais, é uma boa alternativa para secagem deste produto. Os resultados da secagem de café no secador roto-aerado foram promissores, uma vez que o tempo médio de residência obtido se mostrou bastante reduzido e a taxa de secagem bem superior em relação a outros secadores.

A modelagem matemática proposta mostrou que o modelo de duas fases, com um conjunto adequado de equações constitutivas, previu com sucesso o processo de secagem de café em um secador roto-aerado. Os resultados simulados tiveram uma boa concordância com os dados experimentais, tanto para a umidade quanto para a temperatura do café.

NOMENCLATURA

bu - Base úmida [-]

bs - Base seca [-]

C - Parâmetro do modelo de isoterma de equilíbrio [-]

Cp_l - Calor específico do líquido [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]

Cp_s - Calor específico do sólido [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]

Cp_v - Calor específico do vapor [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]

d_p - Diâmetro da partícula [m]

G_f - Vazão mássica do ar [kg s^{-1}]
 G_s - Vazão mássica do sólido [kg s^{-1}]
 H^* - Carga total de sólidos no secador [kg]
 K - Parâmetro do modelo de isoterma de equilíbrio [-]
 k - Constante de secagem [s^{-1}]
 L - Comprimento do secador [m]
 M - Umidade do material, massa de água por massa de sólido seco [kg kg^{-1}]
 M_m - Parâmetro do modelo de isoterma de equilíbrio [kg kg^{-1}]
 M_{eq} - Umidade de equilíbrio do material, massa de água por massa de sólido seco [kg kg^{-1}]
 pp min^{-1} - Pontos percentuais por minuto [-]
 MR - Adimensional de umidade, Tabela [-]
 rpm - Rotações por minuto [-]
 R_w - Taxa de secagem do material [s^{-1}]
 T_f - Temperatura do fluído [$^{\circ}\text{C}$]
 T_s - Temperatura do sólido [$^{\circ}\text{C}$]
 t - Tempo [s]
 UR - Umidade relativa do ar decimal [-]
 U_{va} - Coeficiente global volumétrico de transferência de calor [$\text{kW m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]
 V - Volume do secador [m^3]
 x - Posição ao longo do secador [m]
 z - Adimensional de comprimento (x/L) [-]

Símbolos gregos

λ - Calor latente de vaporização da água pura [kJ kg^{-1}]
 τ - Tempo de residência médio das partículas no secador [s]
 φ - Esfericidade do sólido [-]

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento.** [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- AFONSO JÚNIOR, P. C. et al. Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 39–46, set. 2007.
- ALVES, G. E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. 2013.
- ALVES, G. E. et al. Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 2, p. 225, 11 abr. 2017.
- ARRUDA, E. B. **Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes.** [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- ARRUDA, E. B. et al. Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 9, p. 1414–1418, set. 2009.
- BERK, Z. **Food Process Engineering and Technology.** 3. ed. San Diego, CA: Elsevier, 2018.
- BORÉM, F. M.; ISQUIERDO, E. P.; TAVEIRA, J. H. DA S. Coffee processing. **Handbook of coffee post-harvest technology**, p. 51–67, 2014.
- COSTA, F. O. et al. Hybrid drying of pulped arabica coffee cherry beans (*Coffea arabica* L. cv. Catuai) using a hexagonal microwave dryer designed by numerical simulations. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 5, p. e13666, 23 maio 2021.
- DE MELO PEREIRA, G. V et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. **Food Chemistry**, v. 272, p. 441–452, 2019.
- DONG, W. et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, v. 234, p. 121–130, 2017.
- GONELI, A. L. D. et al. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 386–391, mar. 2013.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Tabela 1618.** Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- KULAPICHITR, F. et al. Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee.

- Food Chemistry**, v. 291, p. 49–58, 2019.
- KULAPICHITR, F. et al. Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans. **Food Chemistry**, v. 366, p. 130504, jan. 2022.
- LISBOA, M. H. **Estudo de secadores rotatórios na secagem de fertilizantes**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- LIVRAMENTO, K. G. DO et al. Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process. **Food Chemistry**, v. 221, p. 1874–1882, abr. 2017.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. [s.l.] CRC Press, 2006.
- SILVA, P. B. **Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- SOUZA, G. F. M. V. et al. Modeling of heat and mass transfer in a non-conventional rotary dryer. **Applied Thermal Engineering**, v. 182, p. 116118, jan. 2021.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).