



SECAGEM INFRAVERMELHA DE BANANAS ASSISTIDA POR CONVECÇÃO

JOÃO VICTOR B. DE SOUZA¹, LUISA R. MOREIRA¹, LIDJA D. M. S. BOREL¹, RENATA A. B. LIMA-CORRÊA^{1*},

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Setor de Engenharia Química.
*e-mail: renata.correa@ufla.br

RESUMO - A banana-passa é produto da secagem de bananas, comumente realizada em secadores convectivos. Ela costuma apresentar coloração muito escura, o que prejudica sua aceitação pelos consumidores. O objetivo desse trabalho foi estudar a produção de banana-passa usando secagem infravermelha combinada com convecção forçada. As bananas, com teor de umidade inicial de $72,2 \pm 1,8\%$ b.u., foram cortadas no sentido longitudinal e secas a diferentes potências de radiação ($P=118, 178$ e 238 W) e velocidades de ar não aquecido ($v=1,5, 3,0$ e $4,5$ m/s) durante 6 horas. A umidade final variou entre $15,63\%$ b.u. (em $P=238$ W e $v=1,5$ m/s) e $61,53\%$ b.u. (em $P=118$ W e $v=4,5$ m/s). Nessas condições, também foram observados o mínimo consumo específico de energia ($12,51$ kWh/kgH₂O) e o máximo ($56,64$ kWh/kgH₂O), respectivamente. Para todas as condições, a secagem ocorreu em período de taxa decrescente; logo, o processo foi controlado pela difusão. Na condição de $P=238$ W e $v=1,5$ m/s também se observou a maior diferença total de cor $\Delta E=50,99$, no entanto apenas a velocidade do ar teve influência significativa ($p < 0,1$) sobre o índice de escurecimento. O produto obtido na condição $P=238$ W e $v=4,5$ m/s alcançou uma desejabilidade de $0,768$, configurando um produto de boa qualidade.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior consumidor mundial de bananas. O país também obteve a quarta maior produção mundial da fruta em 2020, estimada em 6,6 milhões de toneladas e destinada, principalmente para o abastecimento do mercado interno (Embrapa, s.d.; IBGE, s.d.). Apenas em Minas Gerais, a produção foi estimada em 831 mil toneladas no mesmo ano, colocando o estado como o terceiro maior produtor nacional de bananas (IBGE, [s.d.]; Seapa, 2021).

A alta produção e consumo interno de bananas, no entanto, vem acompanhado de um desperdício de cerca de 40% da produção devido ao comprometimento da qualidade e/ou aparência do produto pelo transporte inadequado, principalmente (Borges *et al.*, 2006; Naknaen; Charoentahikij; Kerdsup, 2016; Abafrutas, 2021). Isso motiva o desenvolvimento de técnicas de preservação de

forma a prolongar a validade, agregar valor e promover o aproveitamento consciente do alimento, mesmo em estágios avançados de maturação e/ou com pouca aceitação.

A secagem é uma operação unitária que visa reduzir a umidade de um material até um valor seguro para armazenamento, o que prolonga sua vida útil, facilita o manuseio e estocagem, e reduz custos com embalagem e transporte, como consequência da redução do peso e volume do material.

Apesar de ser um produto promissor no mercado interno, a banana-passa – nome dado ao produto resultante da secagem de bananas – comumente produzida pela técnica de convecção forçada, origina um produto de coloração bem escura, reduzindo sua aceitação pelo público. Do ponto de vista econômico, a produção tem custo elevado, o que se deve à eficiência energética do processo tradicionalmente empregado.

A literatura expõe diversas alternativas à secagem por convecção forçada a fim de

aprimorar a eficiência energética do processo. Na secagem infravermelha (IV), por exemplo, a superfície do alimento é rapidamente aquecida pela irradiação com comprimento de onda infravermelho, sem perdas de energia com o aquecimento do ar circundante (Adak; Heybeli; Ertekin, 2017; Rabello *et al.*, 2021).

Onwude, Hashin e Chen (2016), no entanto, propõem o uso de técnicas híbridas de secagem, isto é, a combinação de métodos para aumentar a eficiência do processo, em uma magnitude mais expressiva do que se fossem conduzidos separadamente. Este é o caso da secagem IV combinada com convecção forçada, cuja eficácia foi verificada em trabalhos com maçãs (El Mesery; Mwithiga, 2015), arroz integral (Nachaisin; Jamradloedluk; Niamnuy, 2015) e fruta *longan* – um tipo de lichia branca – (Nuthong *et al.*, 2010; Nathakaranakule; Jaiboon; Soponronnarit, 2010). Contudo, há poucos estudos dedicados a avaliar essa combinação para secagem de bananas, podendo-se destacar o de Puangsuwan *et al.* (2021) com bananas do cultivar Pisang-Awak.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da potência IV e da velocidade do ar no comportamento cinético do processo de secagem IV de bananas assistido por convecção forçada e na qualidade do produto. Para isso, foram investigadas como respostas a umidade final, difusividade efetiva, diferença total de cor, índice de escurecimento do produto e o consumo energético específico do processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Seleção e preparo das amostras

As bananas da variedade prata utilizadas nesse estudo foram adquiridas no comércio local de Lavras (MG) entre os meses de outubro e novembro de 2021.

As frutas foram selecionadas de acordo com a coloração da casca, seguindo a escala de maturação de Von Loesecke como aquelas que se adequavam ao 6º estágio de maturação, caracterizado por uma casca de cor amarelada sem áreas marrons (CEAGESP, 2006).

A casca foi higienizada com pano úmido para remoção de sujidades e, em seguida, separada da polpa. A polpa foi cortada ao meio

(no sentido longitudinal) com o auxílio de uma faca e a espessura de cada metade foi medida com um paquímetro digital. Por fim, as metades foram dispostas em uma bandeja de alumínio, como mostrado na Figura 1.

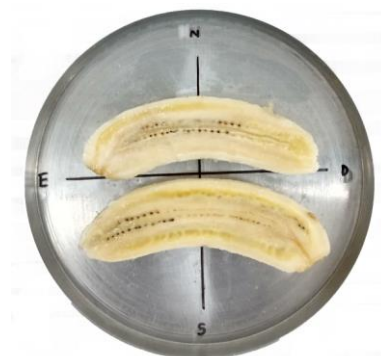


Figura 1 – Amostras *in natura*.

Equipamento de secagem

O secador híbrido, que combina radiação IV com convecção forçada, foi confeccionado em MDF (28,0 x 28,0 x 25,0 cm) e isolado, internamente, com placas de isopor revestidas com papel alumínio, como mostrado na Figura 2.

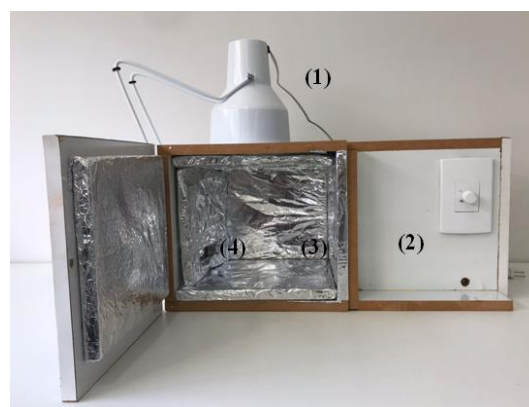


Figura 2 – Secador IV assistido por convecção forçada.

A lâmpada IV (1) com 250 W de potência foi posicionada 23,0 cm acima do centro da amostra, que correspondia também ao centro da base da câmara. Um ventilador (2) forçava a passagem do ar em temperatura ambiente desde a entrada (3), passando pelo interior da câmara paralelamente à superfície da amostra, até a saída (4).

A velocidade do ar de secagem era medida com um termo-anemômetro TAD-500 (*Instrutherm*) e regulada por um potenciômetro manual. A temperatura superficial da amostra foi monitorada utilizando um termopar tipo K

conectado a um alicate amperímetro (Kript, modelo KRAD01).

Ensaio de secagem

As amostras foram secas no secador híbrido de acordo com um planejamento fatorial 3^2 com duas réplicas no ponto central, tendo diferentes velocidades do ar não aquecido (1,5, 3,0 e 4,5 m/s) em associação com diferentes potências de radiação IV (118, 178 e 238 W) (Tabela 1). A potência da lâmpada IV (P) era ajustada medindo a corrente elétrica e a tensão da rede com um alicate amperímetro com termopar (Kript, modelo KRAD01).

A massa da amostra foi monitorada em intervalos pré-determinados ao longo de 6 horas pela pesagem em balança eletrônica AD4200 (Marte), com precisão de 0,01 g.

A umidade de equilíbrio (X_{eq}) em cada condição foi estimada pela Equação 1, que representa um ajuste do modelo de Oswin Modificado às isotermas de desorção de umidade para bananas, válida para temperaturas entre $13 \leq T_{ar} \leq 40^\circ\text{C}$, e umidades relativas entre $0,5 \leq RH \leq 0,8$ (Phoungchandang; Woods, 2000).

$$X_{eq} = \frac{16,68 - (0,1212 * T_{ar})}{\left(\frac{1}{RH} - 1\right)^{\frac{1}{0,9020}}} \quad (1)$$

em que T_{ar} é a temperatura do ar, em $^\circ\text{C}$, e RH é a umidade relativa, ambos do ar de secagem.

O adimensional de umidade (*moisture ratio* - MR) foi calculado pela Equação 2, em que X_0 e X representam a umidade da amostra, em base seca, *in natura* e no momento da pesagem, respectivamente.

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2)$$

O coeficiente de difusividade efetiva para cada condição avaliada foi calculado com o auxílio do *software* Excel (Microsoft) utilizando-se o primeiro termo da solução do modelo difusivo de Fick (Brandão *et al.*, 2016; Szadzińska; Mierzwa, 2021), conforme a Equação 3 para os dados experimentais observados no período de taxa decrescente,

assumindo-se a amostra como uma placa plana semi-infinita, migração de umidade unidirecional e apenas por difusão, distribuição homogênea de umidade na superfície, bem como resistência e encolhimento desprezíveis.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} * \exp\left(-\frac{\pi^2 * D_{ef} * \tau}{L^2}\right) \quad (3)$$

em que D_{ef} é o coeficiente de difusão efetiva, em mm^2/min , τ é o instante do tempo de secagem no período decrescente, em minutos, e L é a espessura da amostra, em milímetros.

A qualidade dos ajustes foi avaliada através do coeficiente de determinação (R^2) e da soma do quadrado dos resíduos (SQR).

Em seguida, os coeficientes de difusão efetiva foram ajustados em função da potência IV (P) e velocidade do ar de secagem (v), utilizando o *software* Statistica 7.0, sendo esse ajuste incorporado à Equação 3 e resultando na Equação 4.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} * \exp\left(-\frac{\pi^2 * D_{ef}(P, v) * \tau}{L^2}\right) \quad (4)$$

A taxa de secagem (*drying rate* - DR) foi calculada pela Equação 5 com base na diferença de umidade (X) em um determinado período de tempo (Δt).

$$DR = -\frac{X_{t+1} - X_t}{\Delta t} \quad (5)$$

Caracterização do produto seco

Umidade final: a umidade da amostra em base úmida (X_{bu}) e em base seca (X_{bs}) foram determinadas pelas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$X_{bu} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (6)$$

$$X_{bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f} * 100 \quad (7)$$

em que m_i representa a massa da amostra após 6 horas de secagem e m_f é a massa da amostra após 24 horas de secagem em estufa, conforme

método gravimétrico (AOAC, 1990), ambas em gramas.

Diferença total de cor (ΔE): foi avaliada com a escala CIE $L^*a^*b^*$ que contempla três coordenadas de cor: luminosidade (L), transição (a) vermelho (+) /verde (-) e transição (b) amarelo (+) /azul (-) (Wanyo; Siriamornpun; Meeso, 2011). Esses parâmetros foram quantificados por meio do *software* Photoshop (Adobe), a partir de fotografias das amostras obtidas com uma *smartphone* Motorola® G8 Play, segundo a metodologia proposta por Yam e Papadakis (2004).

As coordenadas obtidas pelo *software* foram convertidas ao formato padrão pelas Equações 8, 9 e 10, e a diferença total de cor (ΔE) calculada pela Equação 11 (Yam; Papadakis, 2004; Nachaisin; Jamradloedluk; Niamnuy, 2015).

$$L^* = \frac{L}{255} * 100 \quad (8)$$

$$a^* = \frac{240 * a}{255} - 120 \quad (9)$$

$$b^* = \frac{240 * b}{255} - 120 \quad (10)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (11)$$

em que o subscrito '0' refere-se aos valores de cor obtidos para a banana *in natura*, usada como controle.

Índice de escurecimento (BI): foi calculado usando a Equação 12 (Vishwanathan; Hebbar; Raghavarao, 2010).

$$BI = \frac{100 * (x - 0,31)}{0,17} \quad (12)$$

em que:

$$x = \frac{a^* + (1,75 * L^*)}{(5,645 * L^*) + a^* - (3,012 * b^*)} \quad (13)$$

Consumo específico de energia (SEC): foi calculado pela Equação 14 (Brandão *et al.*, 2016).

$$SEC = \frac{P_{total} * t}{m_{\text{água evaporada}}} \quad (14)$$

em que t é o tempo de secagem para atingir a umidade final de 60,64% b.u. (base úmida), em horas, e $m_{\text{água evaporada}}$ representa a quantidade de água removida da amostra, em quilogramas. Vale ressaltar que o valor 60,64% corresponde à maior umidade final obtida entre as condições de secagem avaliadas. Já P_{total} denota a potência consumida no processo de secagem, calculada pela Equação 15, a partir da tensão da rede (V_{rede}), em volts, e das correntes elétricas na lâmpada IV (I_{IR}) e no ventilador ($I_{convecção}$), ambas em ampéres.

$$P_{total} = V_{rede} * (I_{IR} + I_{convecção}) \quad (15)$$

Análise estatística

A partir dos resultados obtidos, avaliou-se a influência da potência IV e da velocidade do ar nas características da banana-passa com um nível de 90% de confiança estatística utilizando o *software* Statistica 7.0.

Os principais efeitos das variáveis independentes (em forma codificada) e as interações entre essas variáveis, bem como as contribuições quadráticas para as variáveis respostas foram quantificados derivando equações empíricas pela técnica de regressão. (Equação 16).

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_{12} XY + \beta_{11} X^2 + \beta_{22} Y^2 \quad (16)$$

em que: Z é a variável resposta, β_0 é um parâmetro associado à média, β_1 e β_2 , β_{11} e β_{22} , e β_{12} são os coeficientes de regressão dos efeitos linear, quadrático e de interação, respectivamente e X e Y são as variáveis independentes codificadas.

A condição operacional ótima foi determinada com base na desejabilidade global. Usando a Equação 17 calculou-se a desejabilidade individual para minimizar as variáveis respostas umidade final, SEC, ΔE e BI e usando a Equação 18 calculou-se a desejabilidade global com a condição de mesma importância para tais variáveis respostas (Maciel, 2017).

$$f(x) = \begin{cases} 1, & y_i < T_i \\ \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - U_i}\right)^{r_i}, & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 0, & y_i > U_i \end{cases} \quad (17)$$

$$D = \left(\prod_{i=1}^N d_i \right)^{\frac{1}{N}} \quad (18)$$

em que, y_i é a variável de resposta, d_i é a desejabilidade individual, U_i é o valor máximo tolerado e T_i é o valor ótimo. Já D é a desejabilidade global, N é o número de desejabilidades individuais e $r_i=1 \forall i$, considerando uma desejabilidade linear.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efeitos da potência IV e velocidade do ar

A banana *in natura* apresentou umidade inicial média de $72,2 \pm 1,8$ % b.u. e espessura média de $14,76 \pm 0,96$ mm. O material foi seco usando a combinação de uma lâmpada IV em diferentes potências sob convecção forçada com ar não aquecido a $22,9 \pm 2,2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $72,0 \pm 8,0$ % em diferentes velocidades.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas do adimensional de umidade e temperatura superficial das bananas em função do tempo, parametrizadas na potência IV (P) e velocidade do ar (v). Como pode ser visto na Figura 3a, para um valor de potência IV constante e igual a 178 W, o aumento da velocidade do ar à temperatura ambiente provoca o resfriamento do material aquecido, o que atenua a remoção de umidade. Aumentando-se a velocidade do ar de 1,5 para 3,0 m/s e de 1,5 para 4,5 m/s, o tempo de secagem para atingir 50% de remoção de umidade aumentou em 33,3% e 44,4%, respectivamente. Um comportamento semelhante também foi observado por El-Mesery *et al.* (2019) e por Brandão *et al.* (2016). Por sua vez, o aumento da potência IV (Figura 3b) para uma velocidade de ar constante de 3,0 m/s promoveu um aumento na temperatura atingida pelo material devido à maior disponibilidade de energia fornecida pela fonte IV. Aumentar a potência de 118 W para 178 W e de 118 W para 238 W reduziu o tempo

de secagem em 32,5% e 90,1%, respectivamente.

Nota-se ainda pela Figura 3 que o tempo de secagem estudado (6 horas) não foi suficiente para que o material atingisse a umidade de equilíbrio em algumas condições. Nesse sentido, o uso de maiores tempos de operação poderá reduzir a elevada umidade final obtida para a banana, especialmente para a desidratação utilizando maiores velocidades de ar e menores potências IV.

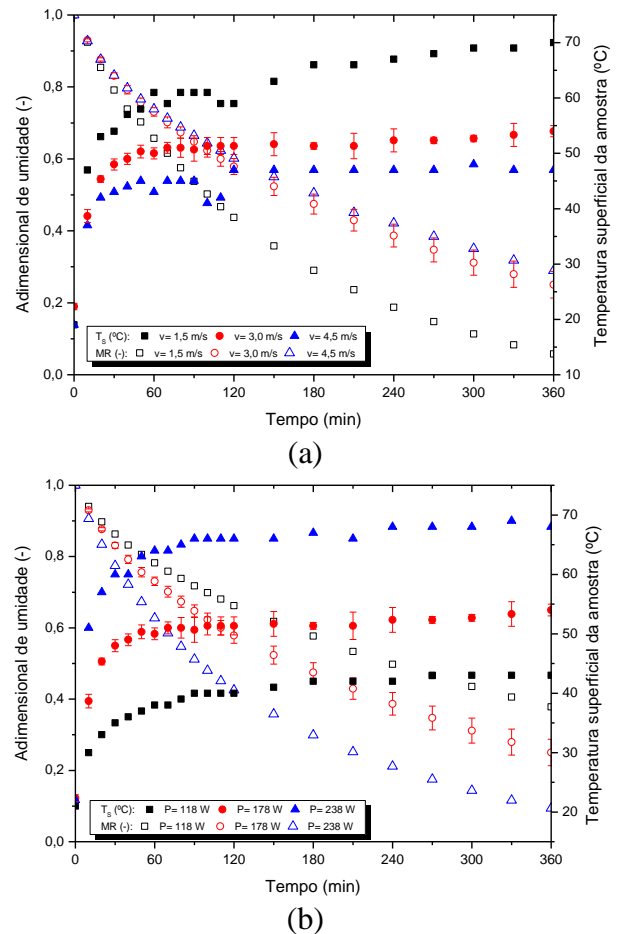


Figura 3 - Adimensional de umidade e temperatura da banana em função do tempo de secagem com (a) $P = 178$ W em diferentes velocidades do ar e (b) $v = 3,0$ m/s em diferentes potências IV.

Além disso, como pode ser observado nas curvas de taxa de secagem apresentadas na Figura 4, a secagem caracterizou-se por uma taxa decrescente ao longo do tempo, indicando que o mecanismo de difusão controla o processo. Vale ressaltar que os comportamentos anteriormente descritos foram também observados para as demais condições avaliadas.

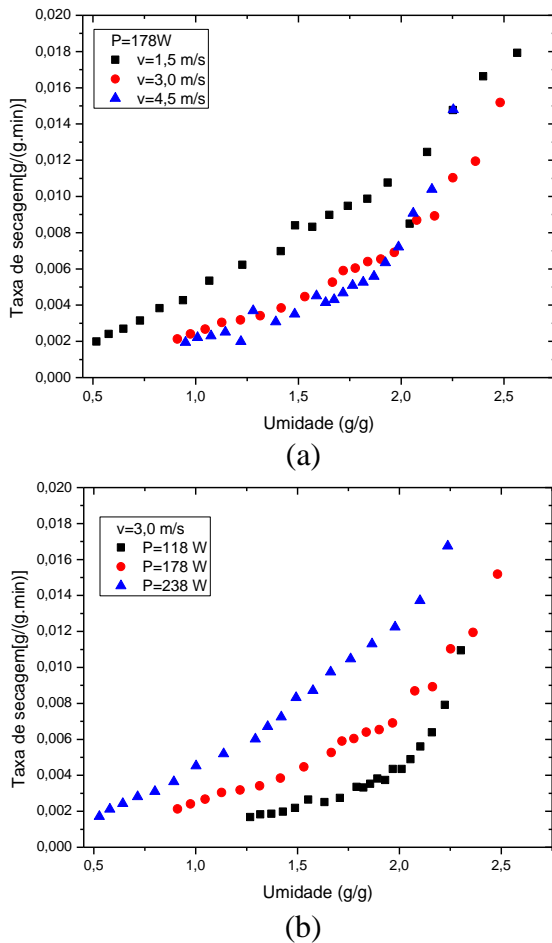


Figura 4 – Taxa de secagem em função da umidade da banana com (a) $P = 178 \text{ W}$ em diferentes velocidades do ar e (b) $v=3,0 \text{ m/s}$ em diferentes potências IV.

Na Tabela 1 são apresentados a difusividade efetiva, o teor de umidade final, a diferença total de cor, o índice de escurecimento e o consumo específico de energia em cada condição experimental investigada. O aumento da potência IV contribuiu com difusividades de maior magnitude devido à intensificação da agitação das moléculas do material que promovem temperaturas mais elevadas, contribuindo com a difusão de umidade não só do interior para a superfície do material, mas também da superfície para o ar de secagem devido à evaporação. *Puente-Díaz et al. (2013)* relataram que maiores temperaturas apresentaram coeficientes de difusividade efetivos mais elevados na secagem híbrida de murta. O modelo de difusão de Fick descreveu um ajuste razoável aos dados experimentais de MR em função do tempo para a secagem híbrida da banana, sendo obtidos valores de $R^2 \geq 0,80$ e $SQR \leq 0,188$.

Já em relação à velocidade, pode se notar na Tabela 1, o comportamento contrário, isto é, em geral, maiores velocidades levaram a coeficientes menores. Isto se deve ao resfriamento da amostra com o aumento dessa variável, como explicado anteriormente, visto que o ar de secagem não era aquecido.

Na Figura 5 é mostrada a superfície de resposta ajustada para a difusividade efetiva como função das condições de potência e velocidade do ar.

Tabela 1 – Planejamento experimental e parâmetros de qualidade obtidos para cada experimento.

Ensaio	P (W)	v (m/s)	D_{ef} (mm^2/min)	$X_{b,u}$ (%)	ΔE	BI	SEC ($\text{kWh}/\text{kgH}_2\text{O}$)
1	118 (-1)	1,5 (-1)	0,0548	53,89	9,85	130,28	25,35
2	178 (0)	1,5 (-1)	0,1138	34,06	18,59	76,75	14,61
3	238 (+1)	1,5 (-1)	0,1479	15,63	50,99	236,44	12,51
4	118 (-1)	3,0 (0)	0,0443	55,89	7,17	129,36	33,22
5	178 (0)	3,0 (0)	0,0716	47,65	14,32	107,32	25,49
6	238 (+1)	3,0 (0)	0,1105	34,51	12,49	146,30	19,72
7	118 (-1)	4,5 (+1)	0,0547	61,53	14,30	70,37	56,64
8	178 (0)	4,5 (+1)	0,0565	48,73	6,20	82,74	27,01
9	238 (+1)	4,5 (+1)	0,0807	34,14	10,13	89,05	25,61
10	178 (0)	3,0 (0)	0,0650	47,08	8,01	128,61	30,61
11	178 (0)	3,0 (0)	0,0650	47,81	8,39	152,90	24,18

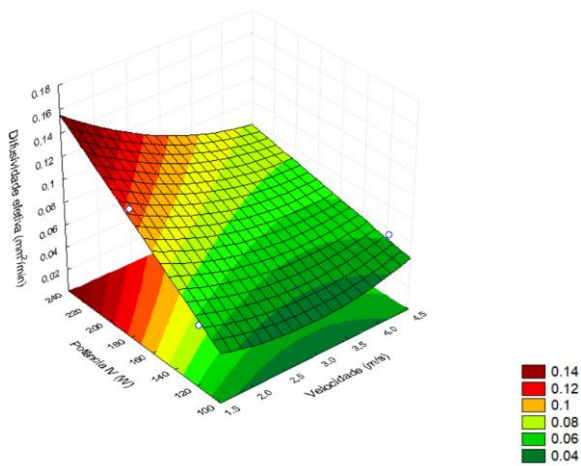


Figura 5 – Superfície de resposta para a difusividade efetiva.

A equação ajustada para a difusividade efetiva como função da potência IV e da velocidade do ar é a Equação 19 ($R^2 = 0,9654$). Identificou-se ainda que o aumento simultâneo da potência IV e da velocidade do ar tem um efeito negativo sobre a difusividade efetiva. Isso provavelmente está relacionado ao fato de o resfriamento da amostra prevalecer sobre o efeito positivo do aumento da potência IV.

$$D_{ef}(P, v) = 0,0802 - 0,0208 * v' - 0,0067 * v'^2 + 0,0309 * P' - 0,0168 * P' * v' \quad (19)$$

em que P' e v' representam a potência IV e a velocidade do ar em sua forma codificada.

Ainda a partir da Tabela 1, observa-se que as bananas-passas apresentaram uma umidade final entre 15,63 % b.u. (com $P=238$ W e $v=1,5$ m/s) e 61,53% b.u. (com $P=118$ W e $v=4,5$ m/s). O aumento da potência IV e diminuição da velocidade contribuíram para atingir um menor teor de umidade final do material. Corrêa *et al.* (2010) estudaram a secagem convectiva de bananas e observaram que maiores temperaturas e velocidades do ar de secagem diminuem o tempo de processo necessário para alcançar menores valores de umidade. No presente trabalho, maiores temperaturas são alcançadas com o aumento da potência IV. Já em relação à velocidade, devido ao fato de empregar-se ar não aquecido ocorre o resfriamento do material (aquecido pela lâmpada) o que desfavorece a redução da umidade.

Na Figura 6 é mostrada a superfície de resposta ajustada para a umidade final como

função das condições de potência e velocidade do ar.

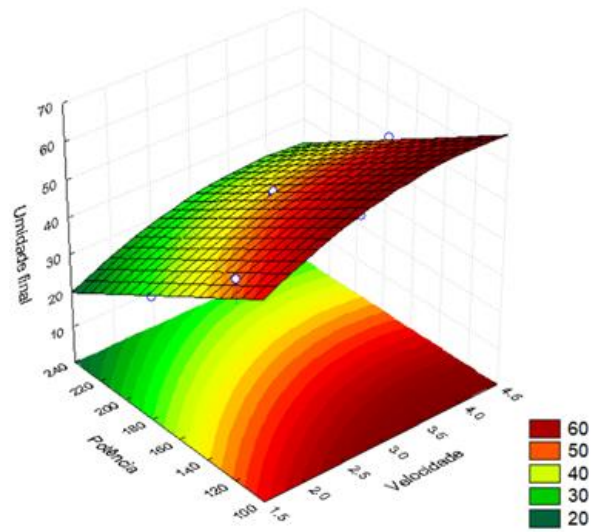


Figura 6 – Superfície de resposta para umidade final da banana-passa.

A equação que descreve a relação entre a umidade final e as variáveis independentes potência IV e velocidade do ar é a Equação 20 ($R^2 = 0,9524$).

$$X_{bu} = 43,0815 + 6,8024 * v' + 2,6295 * v'^2 - 14,5039 * P' \quad (20)$$

O valor máximo de ΔE (Tabela 1) foi de 50,99 (com $P=238$ W e $v=1,5$ m/s), enquanto o valor mínimo, igual a 6,2 (com $P=118$ W e $v=4,5$ m/s). As fotografias das amostras secas nestas condições são apresentadas na Figura 7.

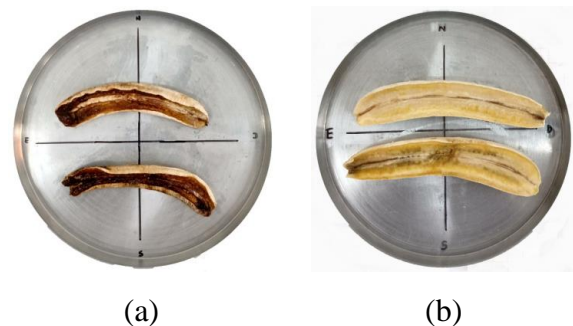


Figura 7 - Bananas secas com (a) $P=238$ W e $v=1,5$ m/s e com (b) $P=118$ W e $v=4,5$ m/s.

Em complemento, apresenta-se na Tabela 2 a cor das bananas utilizadas nos experimentos, na sua forma *in natura* (InN) e

seca para todas as condições de secagem avaliadas.

Tabela 2 – Cor média das amostras de banana.

V (m/s)	1,5		3,0		4,5	
P (W)	InN	Passa	InN	Passa	InN	Passa
118						
178						
238						

Os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 mostram que, em geral, ocorre um aumento da diferença total de cor, com consequente prejuízo (escurecimento) na cor média das amostras, com o aumento da potência IV, assim como a redução desse parâmetro com o aumento da velocidade do ar de secagem. Segundo Nuthong *et al.* (2011), maiores temperaturas (o que ocorre em função de maiores potências IV) podem provocar alterações físicas e/ou químicas que contribuem com a degradação da cor, enquanto o aumento da velocidade implica na redução da temperatura da amostra e minimização desse processo.

Na Figura 8 é mostrada a superfície de resposta ajustada para a diferença total de cor como função das condições de potência IV e velocidade do ar.

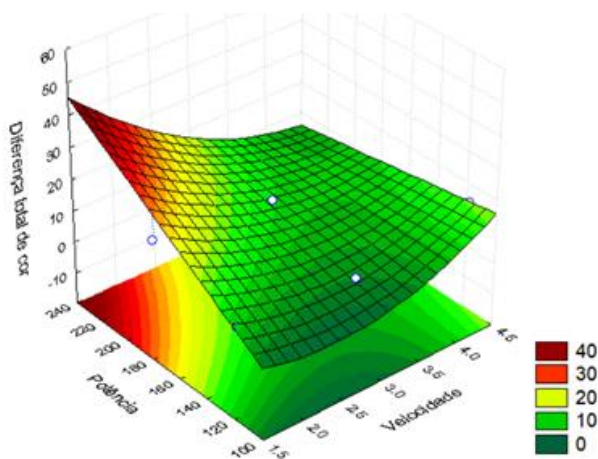


Figura 8 – Superfície de resposta de diferença total de cor de banana-passa.

A equação ajustada para a diferença total de cor como função da potência IV e da velocidade do ar de secagem é a Equação 21 ($R^2 = 0,8743$). É possível constatar que o aumento

da potência IV e a diminuição da velocidade do ar levaram a maiores valores de ΔE e, conseqüentemente, resultaram em prejuízos na cor da banana em relação ao controle (banana *in natura*). Ainda, observou-se um sinal negativo para a interação entre a potência IV e a velocidade do ar, sugerindo que a cor é favorecida (menor ΔE) com o aumento simultâneo destas variáveis. Isso possivelmente ocorre, pois o impacto negativo do aumento da potência em ΔE é minimizado com o aumento concomitante da velocidade do ar, cujo efeito é maior em módulo que o observado para a potência.

$$\Delta E = 15,5864 - 8,1337 * v' - 4,1324 * v'^2 + 7,0465 * P' - 11,3254 * P' * v' \quad (21)$$

Os índices de escurecimento observados (Tabela 1) estiveram entre 70,37 (P=118 W e v=4,5 m/s) e 236,44 (P=238 W e v=1,5 m/s). Este índice utiliza as coordenadas de cor L^* , a^* e b^* para indicar a formação da cor marrom e, conseqüentemente, o escurecimento da amostra durante a secagem.

Observou-se que, com 90% de confiança estatística, apenas o efeito linear da velocidade foi significativo sobre os valores de BI, sendo identificado um efeito negativo. Kumar *et al.* (2005) relatam o aumento do escurecimento da amostra com a temperatura – fator dependente do infravermelho – na secagem de cebolas. No presente trabalho, a redução do escurecimento da amostra pode estar relacionada à redução da temperatura devido ao aumento da velocidade do ar.

O valor máximo de SEC (Tabela 1) foi obtido na condição de velocidade máxima (v=4,5 m/s) e potência mínima (P=118 W) no valor de 56,64 kWh/kg água evaporada, enquanto o valor mínimo de 12,51 kWh/kg água evaporada foi alcançado na condição de potência máxima (P=238 W) e velocidade mínima (v=1,5 m/s). A diminuição do SEC com o aumento da potência IV e diminuição da velocidade do ar eram esperados e condizem com o reportado por El-Mesery *et al.* (2019) na secagem de tomates. Ao aumentar a intensidade de infravermelho, eleva-se a temperatura do material, assim como as taxas de secagem, enquanto ao aumentar a velocidade, aumentam-se as taxas de

transferência de calor entre a amostra e o ar, o que resulta no resfriamento do material.

Na Figura 9 é mostrada a superfície de resposta para o consumo específico de energia como função das condições de potência IV e velocidade do ar.

A equação ajustada para o consumo específico de energia como função da potência IV e da velocidade do ar é a Equação 22 ($R^2 = 0,7978$).

$$SEC = 26,8134 + 9,4644 * v' - 9,5625 * P' \quad (22)$$

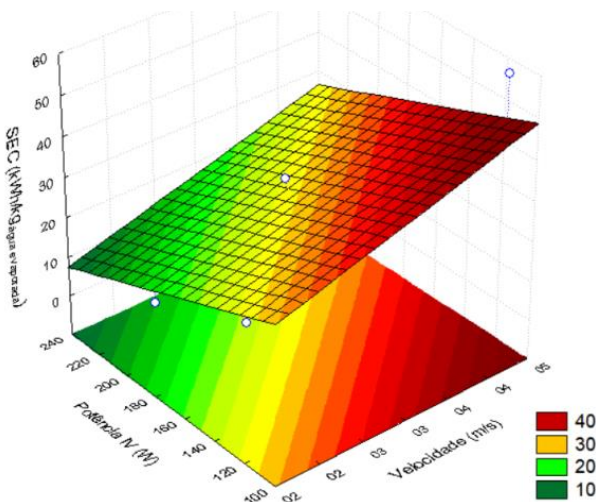


Figura 9 – Superfície de resposta para consumo específico de energia.

Análise de desejabilidade e otimização

Usou-se a função desejabilidade para minimizar simultaneamente as variáveis respostas umidade final, SEC, ΔE e BI. Assim, identificou-se que o produto obtido na condição $P=238$ W e $v=4,5$ m/s com 35,96% (b.u.) de umidade, $SEC=23,88$ kWh/kg água evaporada, $\Delta E=7,43$ e $BI=92,86$ apresenta $D=0,768$, conforme mostra a Figura 10. Pela escala de Lazic (2016), esta é uma boa desejabilidade.

A legislação brasileira, por meio da RDC nº 272 de 22/09/2005, estabelece um teor máximo de umidade de 25% (b.s.) ou 20% (b.u.) para produtos de frutas secas ou desidratadas. Assim, a umidade final da banana-passa produzida na condição ótima ainda não atende à exigência e, portanto, não pode ser comercializada. Por isso, recomenda-se explorar maiores tempos de secagem nas mesmas condições operacionais.

Apesar disso, a semelhança da cor da banana-passa obtida (“Ótimo”) com a *in natura*

(“*InN*”) representa um avanço na produção conforme a comparação com bananas-passa disponíveis no comércio local de Lavras (MG), que pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3 – Cor da banana-passa comercializada em Lavras (MG) e na condição ótima.

Produto		
<i>InN</i>	Ótimo	Lavras (MG)

CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu elucidar aspectos relacionados à secagem IV assistida por convecção de bananas.

As curvas de taxa de secagem mostram que a difusão de umidade controlou o processo, visto que o período de taxa decrescente foi o único observado. Nesse sentido, uma análise dos coeficientes de difusividade efetiva indicou que maiores potências e menores velocidades elevaram a magnitude da difusão. O modelo difusivo de Fick para placa plana semi-infinita foi razoável na representação da cinética de secagem de bananas ($R^2 \geq 0,80$ e $SQR \leq 0,188$). Maiores potências de radiação infravermelha e menores velocidades aceleraram o processo de secagem, permitindo a obtenção de menores umidades em menores tempos.

Todas as variáveis resposta foram influenciadas pelas condições de secagem, respeitando-se o nível de confiança de 90%, com exceção do índice de escurecimento (BI) influenciado significativamente ($p < 0,1$) apenas pela velocidade do ar. O consumo específico de energia (SEC), bem como a umidade final, foram reduzidos com maiores potências e menores velocidades, indicando um processo mais eficiente e maior remoção de umidade. Maiores velocidades e menores potências de infravermelho resultaram em bananas-passas com menor diferença total de cor (ΔE). Maiores velocidades resultaram em menores valores de índice de escurecimento.

As condições operacionais ótimas foram 4,5 m/s e 238 W, o que resulta num produto com 35,96% (b.u.) de umidade final, com um consumo de energia específico de

23,88 kWh/kg_{água evaporada}, diferença total de cor de 7,43 e índice de escurecimento de 92,86. Apesar da otimização do processo, a umidade final do produto ainda não atende a legislação vigente e, por isso, faz-se necessário avaliar o processo em tempos de secagem superiores a 6

horas. Contudo, a cor do produto “otimizado” foi mais próxima da cor da banana *in natura*, do que de bananas-passa disponíveis no mercado de Lavras (MG).

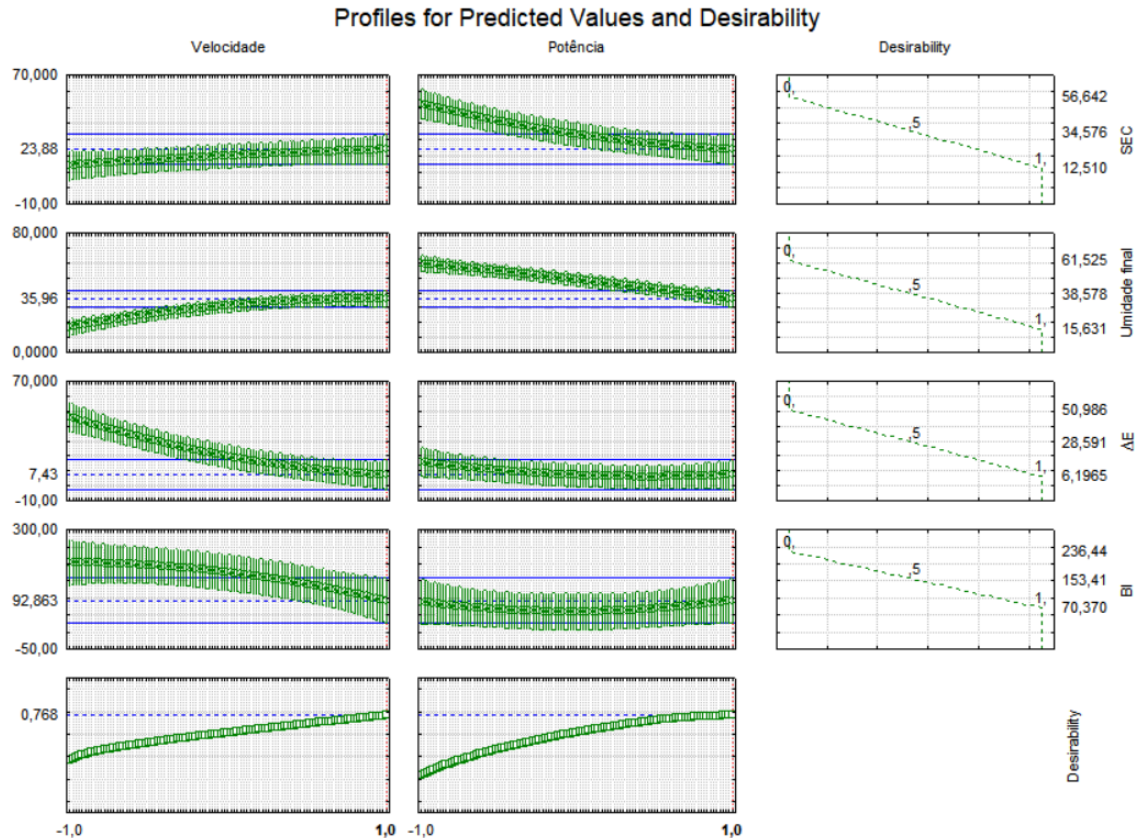


Figura 10 – Otimização por desejabilidade da produção de banana-passa por secagem infravermelha assistida por convecção de ar não aquecido para a minimização simultânea da umidade final, SEC, ΔE e BI.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo financiamento do projeto de pesquisa (proc. APQ-00320-21).

REFERÊNCIAS

- ABAFRUTAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS. Novo episódio da série “de lá pra cá” mostra o quanto as frutas são importantes no dia a dia do brasileiro. Disponível em: <<https://abrafrutas.org/2021/11/novo-episodio-da-serie-de-la-pra-ca-mostra-o-quanto-as-frutas-sao-importantes-no-dia-a-dia-do-brasileiro/>>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- ADAK, N.; HEYBELI, N.; ERTEKIN, C. Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, v. 219, p. 109-116, 2017.
- ANVISA. RDC N°272, DE 22 DE SETEMBRO DE 2005, 2005.
- AOAC – ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analytical of the Association of Official Analytical Chemists. 15. ed. Washington, v. 2. 1990.
- BORGES, A. L. et al. A cultura da banana. 3. ed. rev. e aum. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- BRANDÃO, R. J. et al. Heat and mass transfer, energy and product quality aspects in drying processes using infrared radiation.

- In: DELGADO, J.; BARBOSA DE LIMA, A. (eds). *Drying and Energy Technologies*. v. 63, p. 111-130, 2016.
- CORRÊA, J. L. G et al. Secagem de bananas prata e d'água por convecção forçada. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 30, p. 605-612, 2010.
- EL-MESERY, H. S. et al. Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy-efficient drying of biomass. *Energies*, v. 12, p. 2818-2833, 2019.
- EL-MESERY, H. S.; MWITHIGA, G. Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer. *J Food Sci Technol*, v. 52, p. 2721-2730, 2015.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Banana. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/banana>>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção de banana. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/banana/br>>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- KUMAR, D. G. P. et al. Infrared and hot air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 29, p. 132-150, 2005.
- LAZIC, Z. R. *Design of experiments in chemical engineering: a practical guide*. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.
- MACIEL, K. S. Otimização das condições do processo de secagem do extrato de café em leite de espuma e aplicação em mistura para cappuccino. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- NACHAISIN, M.; JAMRADLOEDLUK, J.; NIAMNUY, C. Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice. *Journal of Food Process Engineering*, v. 39, p. 306-318, 2016.
- NAKNAEN, P.; CHAROENTHAIKIJ, P.; KERDSUP, P. Physicochemical properties and nutritional compositions of foamed banana powders (Pisang Awak, *Musa sapientum* L.) dehydrated by various drying methods. *Walaiak Journal of Science and Technology*, v. 13, n. 3, p. 177–191, 2016.
- NATHAKARANAKULE, A.; JAIBOON, P.; SOPONRONNARIT, S. Far-infrared radiation assisted drying longan fruit. *Journal of Food Engineering*, v. 100, n. 4, p. 662-668, 2010.
- NUTHONG, P. et al. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, v. 102, p. 233-239, 2011.
- ONWUDE, D.I.; HASHIM, N.; CHEN, G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, v. 57, p. 132–145, 2016.
- PBMH & PIF – PROGRAMA BRASILEIRO PARA MODERNIZAÇÃO DA HORTICULTURA & PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS. Normas de Classificação de Banana. São Paulo: CEAGESP, 2006. (Documentos, 29).
- PHOUNGCHANDANG, S; WOODS, J. L. Moisture Diffusion and Desorption Isotherms for Banana. *Journal of Food Science*, v. 65, n. 4, p. 651-657, 2000.
- PUANGSUWAN, K. et al. Hybrid infrared with hot air drying of Pisang-Awak banana: Kinetics and shrinkage quality. *Journal of Food Process Engineering*, e13827, 2021.
- PUENTE-DÍAZ, L. et al. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: kinetic modeling and quality assessment. *Drying Technology*, v. 31, n. 3, p. 329-338, 2013.
- RABELLO, A. A. et al. Utilização de radiação infravermelha na secagem de amostras de banana. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 39317-39330, 2021.
- SEAPA – SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Balanço do Agronegócio de Minas Gerais. Disponível em: <<https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/divulgado-balanco-do>>

agronegocio-de-minas-gerais-2020>.

Acesso em: 14 mar. 2022. 2021.

- SZADZIŃSKA, J; MIERZWA, D. The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, v. 167, p. 108532, 2021.
- VISHWANATHAN, K. H.; HEBBAR, H. U.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality. *Food Sci. Technol. Res.*, v. 16, n. 5, p. 381-388, 2010.
- YAM, K. L.; PAPADAKIS, S. E. A simple digital imaging method for measuring and analysing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, v. 61, p. 137-142, 2004.