

Cinética de secagem de tomate em secador convencional e bomba de calor

Drying kinetics of tomato in conventional dryer and heat pump

Cinética de secado de tomate en secador convencional y bomba de calor

Recebido: 30/08/2020 | Revisado: 06/09/2020 | Aceito: 06/09/2020 | Publicado: 08/09/2020

Rodrigo Aparecido Jordan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-4461>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: rodrigojordan@ufgd.edu.br

Wellytton Darci Quequeto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0658-2692>

Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: wellytton_quequeto@hotmail.com

Elton Aparecido Siqueira Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3195-2317>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: eltonmartins@ufgd.edu.br

Valdiney Cambuy Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-0330>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: vcambuy@yahoo.com

Renata Henrique Hoscher

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5724-7173>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: renatahoscher@hotmail.com

Rodrigo Vital da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8610-9319>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: vital.rodrigo@hotmail.com

Carlos de Oliveira Moreira de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2777-9053>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: chomm3@hotmail.com

Ricardo Lordelo Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0998-9834>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: ricardolordelo@hotmail.com

Maurício Battilani

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-1633>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: mauriciobattilani@gmail.com

Fabício Correia de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-0667>

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

E-mail: fcoliveira@utfpr.edu.br

Resumo

O tomate é considerado altamente perecível, exigindo do mercado a aplicação de técnicas pós-colheita que propiciem a sua conservação e aumento de vida na prateleira, entre elas, a secagem é fundamental, pois visa reduzir o teor de água até níveis seguros que possibilitam a estabilidade durante o armazenamento. Devido a sensibilidade deste produto, o uso de bomba de calor a baixa temperatura vem sendo estudado, afim de diminuir a degradação e garantir melhor qualidade. Objetivou-se com o trabalho ajustar modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem de fatias de tomate com uso de estufa e secador com bomba de calor. Foram realizadas três secagens com fatias de tomate, com teor de água inicial de aproximadamente 94,70% (base úmida), até que atingissem $25,00 \pm 1\%$ (b.u.). A primeira e a segunda utilizaram-se uma estufa com circulação forçada e renovação de ar, nas temperaturas de 50 e 65 °C, respectivamente, já a terceira foi conduzida em um secador com bomba de calor a temperatura de 45 °C. Aos dados experimentais da secagem das fatias de tomate foram ajustados diferentes modelos matemáticos para a descrição da cinética de secagem. O modelo de Valcam ajustou-se de maneira satisfatória as condições propostas. No início da secagem, a taxa de remoção de água foi maior para a secagem na estufa a 60 °C. As fatias de tomate secas com bomba de calor a 45 °C apresentaram melhor aspecto em termos de coloração.

Palavras-chave: Baixa temperatura; *Lycopersicon esculentum*; Taxa de remoção de água.

Abstract

Tomatoes are considered highly perishable, requiring from the market the application of post-harvest techniques that promote their conservation and increase shelf life, among them, drying is essential, as it aims to reduce the moisture content to safe levels that allow the stability during storage. Due to the sensitivity of this product, the use of a low temperature heat pump has been studied, in order to reduce degradation and ensure better quality. The objective of the work was to fit mathematical models to describe the drying kinetics of tomato slices using an oven and a heat pump dryer. Three dryings were carried out with tomato slices, with an initial moisture content of approximately 94.70% (wet basis), until they reached $25.00 \pm 1\%$ (w.b.). The first and second used a greenhouse with forced circulation and air renewal, at temperatures of 50 and 65 °C, respectively, while the third was conducted in a dryer with heat pump at a temperature of 45 °C. To the experimental data of the drying of the tomato slices different mathematical models were adjusted to describe the drying kinetics. The Valcam model fitted the proposed conditions satisfactorily. At the beginning of drying, the rate of water removal was higher for drying in the oven at 60 °C. The slices of tomato dried with heat pump at 45 °C showed better aspect in terms of color.

Keywords: Low temperature; *Lycopersicon esculentum*; Water removal rate.

Resumen

Los tomates son considerados altamente perecederos, requiriendo del mercado la aplicación de técnicas de poscosecha que promuevan su conservación y aumenten la vida útil, entre ellas, el secado es fundamental, ya que tiene como objetivo reducir el contenido de agua a niveles seguros que permitan la estabilidad durante el almacenamiento. Debido a la sensibilidad de este producto, se ha estudiado el uso de una bomba de calor de baja temperatura, con el fin de reducir la degradación y asegurar una mejor calidad. El objetivo del trabajo fue ajustar modelos matemáticos para describir la cinética de secado de rodajas de tomate utilizando un horno y un secador con bomba de calor. Se realizaron tres secados con rodajas de tomate, con un contenido inicial de agua de aproximadamente 94,70% (base húmeda), hasta alcanzar $25,00 \pm 1\%$ (b.h.). El primero y el segundo utilizaron un invernadero con circulación forzada y renovación de aire, a temperaturas de 50 y 65 °C, respectivamente, mientras que el tercero se realizó en un secador con bomba de calor a una temperatura de 45 °C. A los datos experimentales del secado de las rodajas de tomate se ajustaron diferentes modelos matemáticos para describir la cinética de secado. El modelo Valcam se ajustaba satisfactoriamente a las condiciones propuestas. Al inicio del secado, la tasa de remoción de agua fue mayor para el secado en el horno a 60 °C. Las

rodajas de tomate secadas con bomba de calor a 45 °C mostraron mejor aspecto en cuanto a color.

Palabras clave: Baja temperatura; *Lycopersicon esculentum*; Tasa de remoción de agua.

1. Introdução

O tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) é um vegetal mundialmente produzido e consumido. Possui benefícios nutricionais e seus compostos contém atividades anti-inflamatórias, antioxidantes, como β -caroteno, licopeno, vitaminas C e E, flavonóides e compostos fenólicos (Olajire & Azeez, 2011).

A demanda de tomate tem aumentado com a procura de alimentos saudáveis, no entanto o tomate é altamente perecível, acarretando desperdícios se não for consumido logo após a sua colheita, sendo assim, é de grande interesse econômico e ambiental, que essas perdas sejam minimizadas, desta forma, o mercado vem fazendo uso de tecnologias para a conservação desses produtos, uma delas é a secagem.

A secagem é uma a etapa de grande importância, tanto do ponto de vista de consumo de energia e formação dos custos de processamento bem como da preservação da qualidade do produto. Atualmente, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de desenvolver metodologias que propiciem a obtenção de um produto de boa qualidade em curto intervalo de tempo sem onerar o custo do processo (Juan et al., 2013; Dong et al., 2017; Gümüşay et al., 2015; Dong et al., 2019; Jeyaprakash, 2019; Jordan et al., 2020a; Jordan et al., 2020b).

O processo de secagem quando conduzido de maneira inadequada, pode resultar na degradação dos produtos, como a oxidação, descoloração, perda de massa, alteração do valor nutricional e componentes químicos (Gümüşay et al., 2015), isto posto, a eficácia do processo de secagem depende das condições, como temperatura, velocidade do ar, tempo, ambiente e uso de equipamentos específicos (Ozdemir et al., 2018).

De modo geral, a temperatura é o parâmetro levado em maior consideração por ser responsável por uma secagem mais rápida, porém temperaturas elevadas são prejudiciais aos produtos, assim, faz-se necessários sistemas de secagem que possam operar com baixas temperaturas (Pacco, 2008). No entanto, os secadores comumente utilizados apresentam dificuldades em obter baixas temperaturas, pois estes são baseados em aquecimento sensível do ar, estando associado com a umidade relativa (Jordan et al., 2020a).

De acordo com Aktas et al. (2014), o sistema de secagem com bomba de calor se mostra eficaz para atuar em baixas temperaturas, mantendo uma baixa umidade relativa, sem a

elevação dos parâmetros de temperatura e fluxo do ar. Além do mais, este sistema resulta em produtos com melhor qualidade e menor consumo de energia (Coşkun et al., 2016).

Independente do sistema de secagem, durante a remoção de água do produto, é fundamental a simulação e obtenção de informações teóricas a respeito de seu comportamento, pois estes dados auxiliam no desenvolvimento ou aperfeiçoamento de equipamentos utilizados na secagem (Resende et al., 2009). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que represente satisfatoriamente a perda de água do produto durante a secagem (Berbert et al., 1995).

Assim, objetivou-se com o presente trabalho ajustar modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem de fatias de tomate com uso de estufa e secador com bomba de calor.

2. Metodologia

O experimento foi conduzido no Laboratório de Termodinâmica, Refrigeração e Energia (LTRE) da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD).

Inicialmente os tomates foram lavados com água a temperatura ambiente e cortados em quatro pedaços, retirando a polpa e sementes, mantendo a máxima uniformidade entre as amostras. Posteriormente, as fatias de tomates foram distribuídas em camada única sobre bandejas, com aproximadamente 1,5 kg de produto (Figura 1), realizadas três repetições por condição de secagem.

Figura 1 - Bandeja com fatias de tomates utilizadas na secagem.



Fonte: Própria (2020).

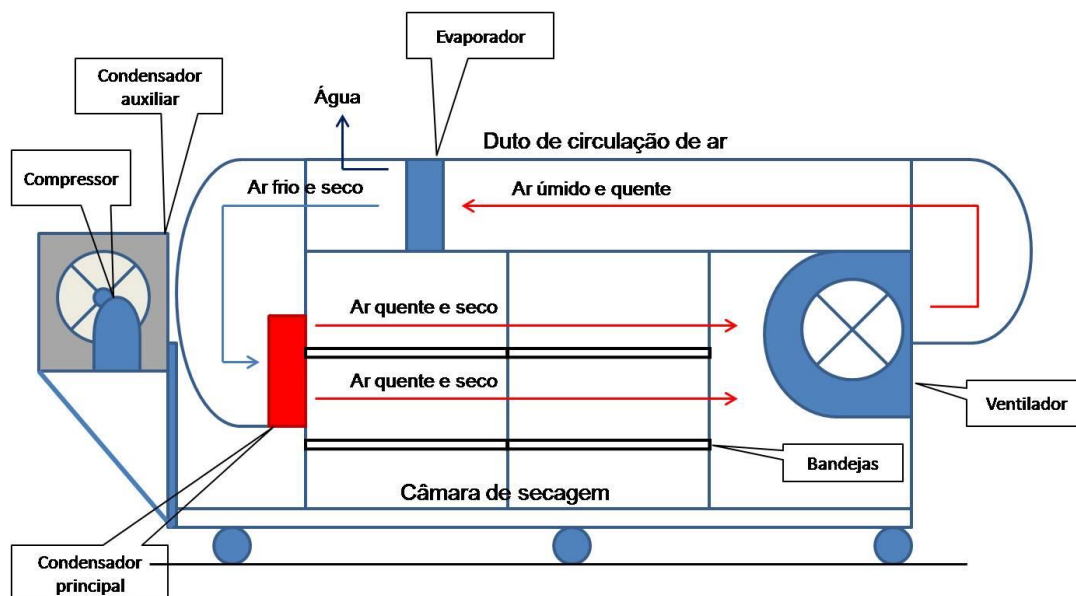
Iniciada a secagem, a massa das amostras foi pesada a cada hora, com auxílio de uma balança semi-analítica com resolução de 0,01 g. O teor de água durante a secagem foi determinado por diferença de massa, conhecendo-se o teor de água inicial, até que fosse atingido o teor de água final de pelo menos $25,00 \pm 1\%$ base úmida (b.u.), sendo este valor indicado para frutas secas, segundo ABIA (1985).

O teor de água inicial foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 12 h, em três repetições de aproximadamente 250 g (adaptado de Monteiro et al., 2008). As fatias de tomate apresentaram teor de água inicial de 94,70% (b.u.).

Foram realizadas três secagens distintas de fatias de tomates, alterando-se o tipo de secador e a temperatura de secagem. A primeira e a segunda secagem foram realizadas utilizando uma estufa com circulação forçada e renovação de ar (SOLAB SL-102/150), nas temperaturas de 50 e $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

A terceira secagem foi conduzida em um protótipo de secador com bomba de calor, em temperatura de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. O protótipo foi montado com peças retiradas de aparelhos antigos de condicionamento e resfriamento de ar e materiais de sucata, sendo composto, basicamente, por uma unidade de refrigeração, condensador auxiliar, duto de circulação de ar, quadro de comando e câmara de secagem (Figura 2).

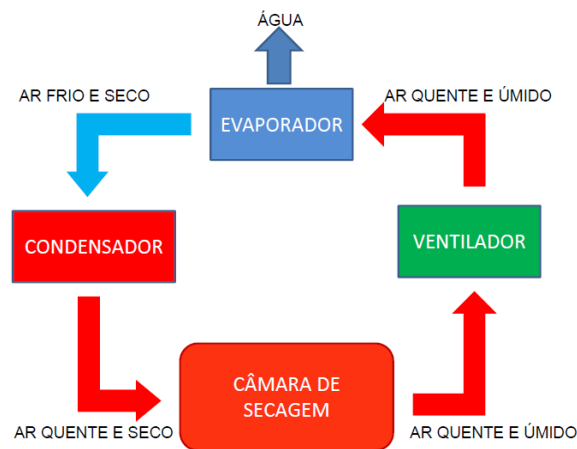
Figura 2 - Esquema básico de funcionamento do secador.



Fonte: Própria (2020).

O condicionamento do ar de secagem é realizado em um duto acoplado a câmara de secagem, onde estão instalados o evaporador e condensador principal, colocados em série. Um ventilador instalado na saída da câmara de secagem força o ar vindo da câmara de secagem para o duto, passando pelo evaporador reduzindo a sua temperatura abaixo do ponto de orvalho, promovendo a condensação da água removida do produto. Na sequência, o ar passa pelo condensador, onde é aquecido e promove a redução da umidade relativa, proporcionando condições adequadas para uma secagem a baixa temperatura (Figura 3).

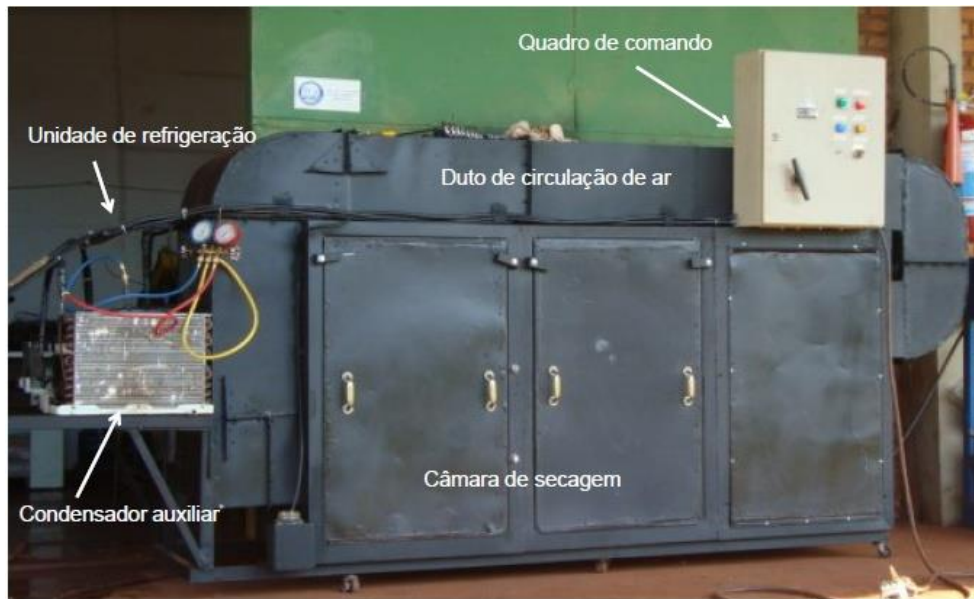
Figura 3 - Fluxograma do processo de secagem no secador com bomba de calor.



Fonte: Própria (2020).

O controle de temperatura foi realizado por um controlador instalado no painel de controle operando com lógica ON-OFF. O secador possui um condensador auxiliar, localizado na parte externa do secador (Figura 4), para controlar a temperatura na câmara de secagem, rejeitando o excesso de calor para o ambiente.

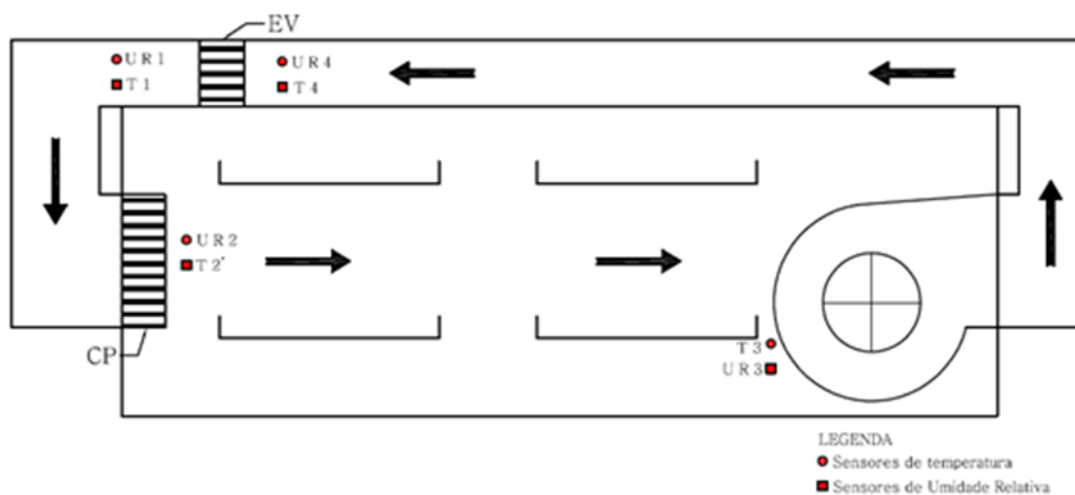
Figura 4 - Vista panorâmica do protótipo do secador.



Fonte: Própria (2020).

Os sensores para o monitoramento das variáveis operacionais (temperatura e umidade relativa na câmara de secagem e pressão da bomba de calor) foram conectados a um sistema de aquisição de dados que permaneceu ligado a um computador para o registro dos dados (Figura 5).

Figura 5 - Posicionamento dos sensores de temperatura (T1, T2, T3 e T4) e umidade relativa (UR1, UR2, UR3 e UR4) no secador.



Fonte: Própria (2020).

A razão de umidade das fatias do tomate durante a secagem foi determinada pela equação 1. O teor de água de equilíbrio do produto foi de 18,42% (b.u.) para o secador com bomba de calor a 45 °C; 17,56% para estufa a 50 °C; e 13,73% para estufa a 65 °C.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

em que,

RU = razão de umidade do produto, adimensional;

U_t = teor de água do produto em um determinado tempo, decimal (b.s.);

U_e = teor de água de equilíbrio do produto, decimal (b.s.); e

U_i = teor de água inicial do produto, decimal (b.s.).

Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para descrever a cinética de secagem em camada delgada de produtos agrícolas foram ajustados aos dados experimentais de secagem, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para descrever as curvas de secagem de produtos agrícolas

Descrição do modelo	Modelos
Exponencial de dois termos	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$ (2)
Henderson & Pabis modificado	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$ (3)
Logarítmica	$RU = a \exp(-k t) + b$ (4)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$ (5)
Newton	$RU = \exp(-k t)$ (6)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$ (7)
Valcam	$RU = a + b t + c t^{1,5} + d t^2$ (8)
Wang & Singh	$RU = 1 + a t + b t^2$ (9)

em que,

t = tempo de secagem, h;

k, k_0 e k_1 = coeficientes dos modelos, h^{-1} ; e

a, b, c e n = coeficientes dos modelos, adimensionais.

Fonte: Própria (2020).

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton. O grau de ajuste do modelo foi avaliado pelas magnitudes do erro

médio relativo (P, %), do desvio padrão da estimativa (SE, decimal), de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices, melhor o ajuste do modelo aos dados observados. Considerou-se ainda o coeficiente de determinação (R^2 , decimal), que normalmente apresenta maiores valores para os modelos com ajuste satisfatório. Afim de selecionar o modelo, ponderou-se que este deve atender os critérios de seleção em todas as condições de secagem propostas.

Os valores de P e SE para cada modelo foram calculados pelas Equações 10 e 11, respectivamente:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon^2}{GLR}} \quad (11)$$

em que,

Y = valor observado experimentalmente;

\hat{Y} = valor estimado pelo modelo;

n = número de dados observados; e

GLR = graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

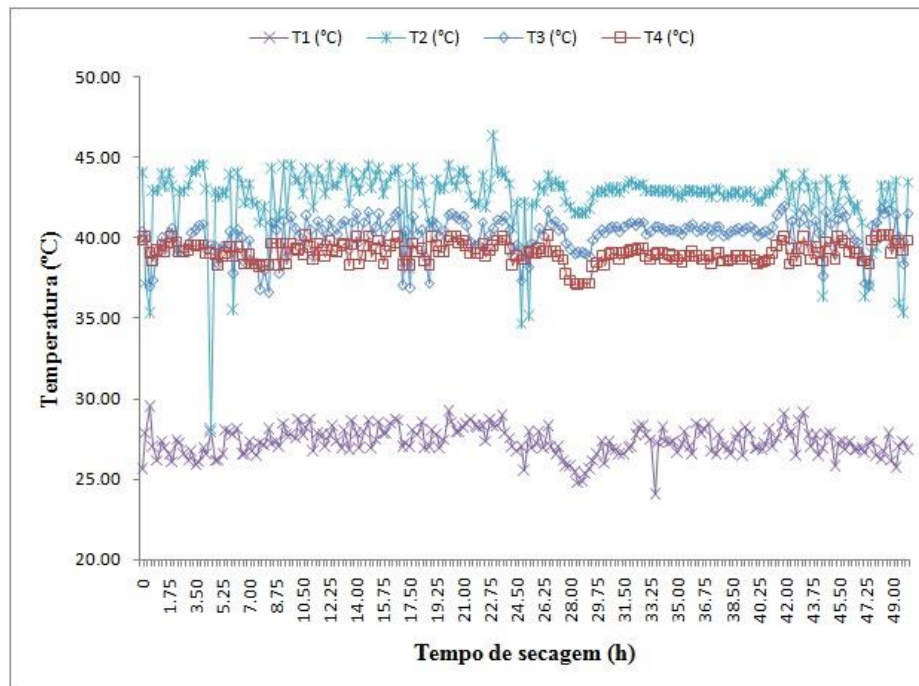
3. Resultados e Discussão

As Figuras 6 e 7 mostram o comportamento da temperatura e umidade relativa durante o tempo de operação do secador com bomba de calor, registrados pelo sistema de aquisição de dados, conforme mostrado na Figura 5.

Observa-se pelos dados de operação, que o secador operou de forma estável durante a maior parte do tempo, com pouca oscilação dos parâmetros, demonstrando que o controle empregado na bomba de calor (on-off) foi suficiente para manter as condições operacionais dentro da faixa desejada.

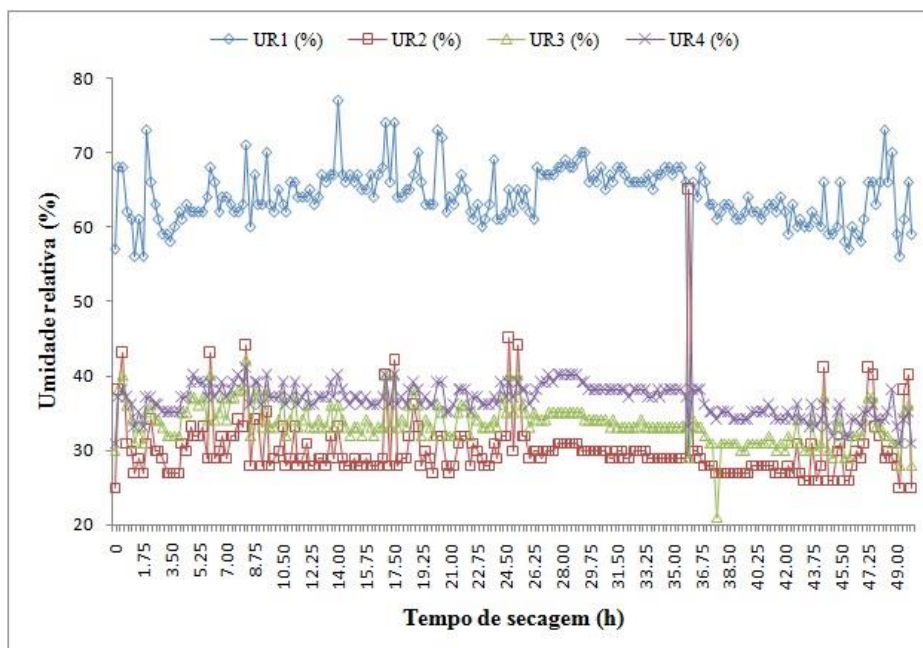
Liu et al. (2017), destacam como uma vantagem dos sistemas de bomba de calor, a possibilidade de automação completa dos parâmetros, melhorando o controle das condições de operação.

Figura 6 - Comportamento das temperaturas em pontos do secador com bomba de calor durante o teste de secagem.



Fonte: Própria (2020).

Figura 7 - Comportamento da umidade relativa em pontos do secador com bomba de calor durante o teste de secagem.



Fonte: Própria (2020).

A temperatura média na câmara de secagem (Tabela 2) foi de 42,5 °C na entrada (T2) e 40,3 °C na saída (T3). A umidade relativa média na entrada da câmara de secagem (UR2) foi de 30,2%, o que possibilitou a secagem, em temperaturas com valores inferiores as utilizadas na secagem em estufa.

De acordo com Jordan et al. (2020b) as bombas de calor conseguem trabalhar em faixas de temperatura abaixo dos secadores convencionais, pelo fato da sua tecnologia não ser baseada em aquecimento sensível e, sim, em redução da pressão de vapor.

É interessante observar que a umidade relativa na saída da câmara de secagem (UR3) foi de 33,6%, uma diferença de pouco mais de 3 pontos percentuais em relação a entrada (UR2). Isso pode ser devido à pouca quantidade de produto relativa ao volume da câmara de secagem, como também, pelo fato do fluxo de ar ser paralelo ao produto, que foi uma das limitações do secador, devido a sua origem construtiva.

Tabela 2 - Média dos sensores de temperatura e umidade relativa

Sensores	T1 (°C)	UR1 (%)	T2 (°C)	UR2 (%)	T3 (°C)	UR3 (%)	T4 (°C)	UR4 (%)
Média	27,3	64,1	42,5	30,2	40,2	33,6	39,07	36,6

Fonte: Própria (2020).

Dentre os modelos avaliados para descrever a cinética de secagem das fatias do tomate, o modelo de Valcam foi o único que se ajustou aos dados experimentais, com base nos critérios de seleção determinados (Tabela 3). Observa-se que em todas as condições, este modelo apresentou valores do erro médio relativo (P) menores que 10%, expondo um bom ajuste aos dados observados experimentalmente. Ademais, o modelo resultou nos menores valores do desvio padrão de estimativa (SE) e elevados valores do coeficiente de determinação (R^2).

O modelo de Valcam foi considerado satisfatório para descrever a cinética de secagem de outros produtos agrícolas, como frutos de pinhão-manso, para a secagem em temperatura de 45 °C (Siqueira et al., 2013) e folhas de *Bauhinia forficata* em temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C (Silva et al., 2017). Já Coşkun et al. (2016), na secagem de fatias de tomate em temperaturas de 35, 45 e 50 °C, com sistema de bomba de calor, obtiveram melhor ajuste com o modelo de Midili.

Tabela 3 - Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE) e coeficiente de determinação (R^2) dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem de fatias de tomate para as condições de secagem propostas.

Condições de secagem	Modelos	P(%)	R^2 (decimal)	SE (decimal)
Secador Bomba de Calor 45 °C	Exponencial de dois termos	52,7362	0,0233	0,9943
	Henderson & Pabis Modificado	73,3256	0,0309	0,9899
	Logarítmica	10,5451	0,0085	0,9993
	Newton	77,2970	0,0312	0,9892
	Page	51,2744	0,0241	0,9939
	Valcam	9,0357	0,0064	0,9996
	Wang & Singh	33,9279	0,0253	0,9932
	Midilli	16,5141	0,0080	0,9994
Estufa 50 °C	Exponencial de dois termos	40,5696	0,0164	0,9971
	Henderson & Pabis Modificado	71,9389	0,0330	0,9884
	Logarítmica	24,1072	0,0105	0,9989
	Newton	84,0450	0,0384	0,9838
	Page	32,8770	0,0150	0,9976
	Valcam	5,2765	0,0037	0,9999
	Wang & Singh	23,3531	0,0106	0,9988
	Midilli	12,0950	0,0059	0,9997
Estufa 65 °C	Exponencial de dois termos	46,6102	0,0263	99,3680
	Henderson & Pabis Modificado	81,7585	0,0498	97,7351
	Logarítmica	28,6409	0,0165	99,7636
	Newton	94,2795	0,0557	97,0017
	Page	32,1780	0,0212	99,5870
	Valcam	1,5270	0,0031	99,9921
	Wang & Singh	8,5473	0,0062	99,9644
	Midilli	14,9319	0,0104	99,9115

Fonte: Própria (2020).

Na Tabela 4 estão apresentados os coeficientes do ajuste da curva pelo modelo de Valcam, para secador com bomba de calor a 45 °C, estufa 50 °C e 65 °C. Observa-se que os coeficientes do modelo de Valcam não apresentaram tendência de comportamento em função do incremento da temperatura de secagem.

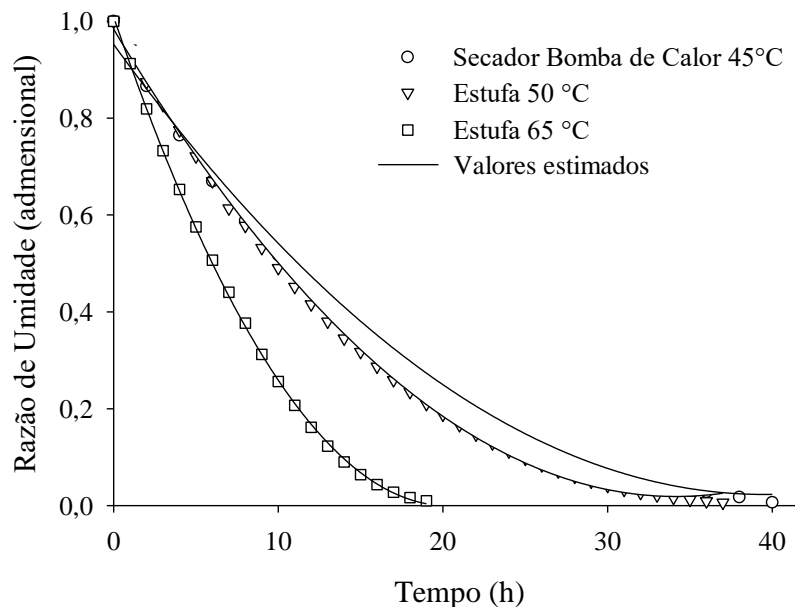
Tabela 4 - Coeficientes ajustados do modelo de Valcam para secagem de fatias de tomate para as condições de secagem propostas.

Condições de secagem	a	b	c	d
Secador Bomba de Calor a 45 °C	0,9941	0,0771	0,0106	-0,0004
Estufa a 50 °C	1,0086	0,0744	0,0065	0,0002
Estufa a 65 °C	0,9983	0,0833	0,0084	0,0036

Fonte: Própria (2020).

Analisando a Figura 8, constata-se que os parâmetros estatísticos empregados foram eficazes para selecionar o modelo, pois há uma correspondência satisfatória entre os dados observados experimentalmente e os dados estimados pelo modelo de Valcam.

Figura 8 - Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Valcam com seus coeficientes descritos em função das condições de secagem para as fatias de tomate.



Fonte: Própria (2020).

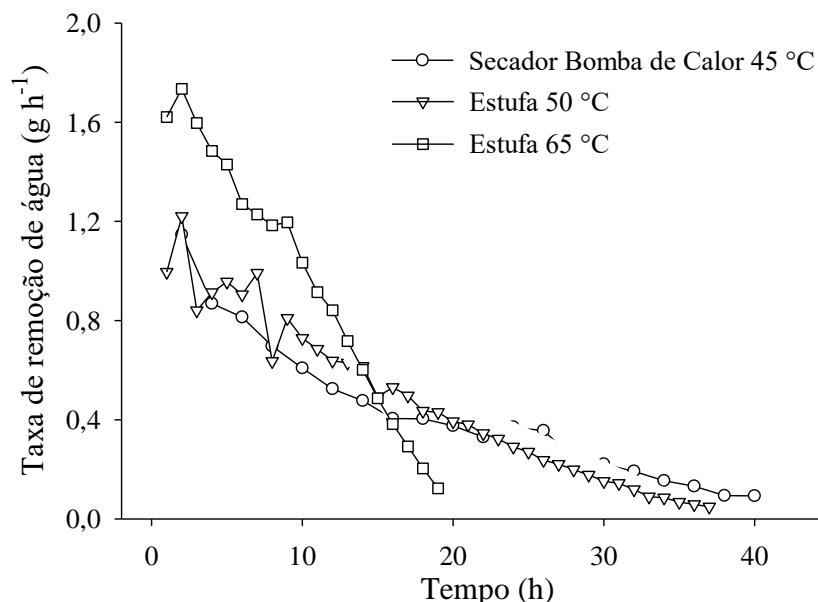
Para a secagem no secador com bomba de calor a 45 °C e estufa a 50 °C e 65 °C, foram necessárias 40, 37 e 19 h, respectivamente, para que as fatias de tomate atingissem um teor de água de aproximadamente $25 \pm 1\%$ (b.u.). Verifica-se que ocorreu redução no tempo de secagem com o incremento de temperatura.

Para todas as condições de secagem, houve maior remoção de água nas fatias de tomate no início do processo de secagem (Figura 9), de acordo com Kashaninejad et al. (2007) isso ocorre pois nesse período a água evaporada é decorrente da superfície do produto e partes

próximas a superfície. Prosseguindo a secagem e subsequente redução de água do produto, a água se desloca gradativamente do interior para a superfície, fazendo com que a taxa de remoção de água (TRA) reduza.

Nota-se que a TRA foi maior para a condição de secagem em estufa a 60 °C. Já as condições no secador com bomba de calor a 45 °C e estufa a 50 °C, não apresentaram diferenças expressivas entre si. Fica evidente que o aumento da temperatura, promove uma maior transferência de calor para o produto, aumentando a diferença de pressão de vapor entre o produto e o ar de secagem, favorecendo a retirada de água.

Figura 9 - Taxa de remoção de água das fatias de tomate durante a secagem nas condições propostas.



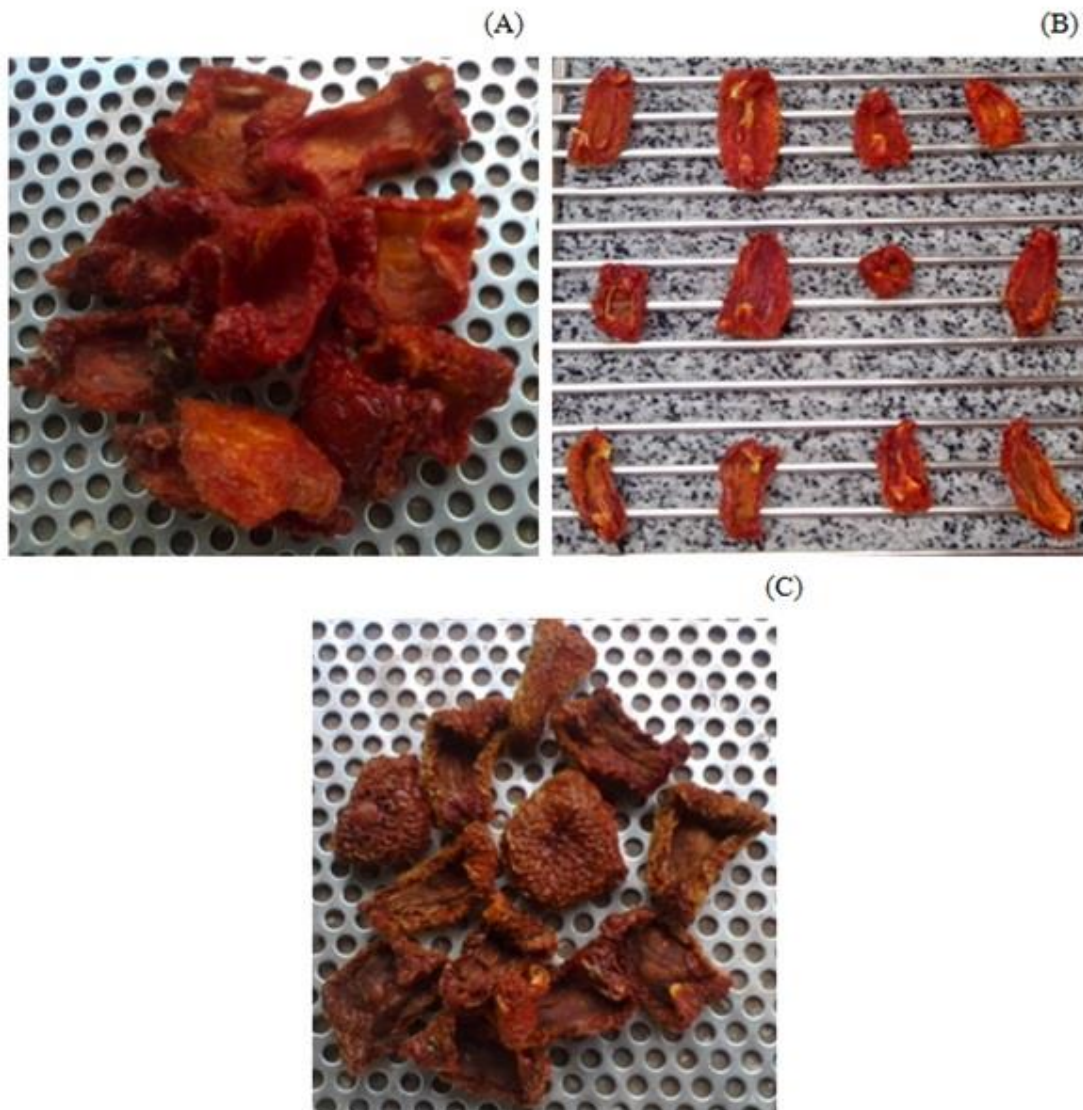
Fonte: Própria (2020).

A Figura 10 apresenta as fatias de tomate secas até o teor de água de equilíbrio no secador com bomba de calor a 45 °C (A), estufa a 50 °C (B) e 65 °C (C).

Observa-se que as fatias de tomates secas no secador com bomba de calor a 45 °C apresentaram coloração mais avermelhada, com menor escurecimento, quando comparada as amostras secas em estufa a 50 e 60 °C. A condição de 60 °C na estufa, foi a que resultou em maior escurecimento. Temperaturas de secagem mais elevadas provocam danos a cor, devido a degradação de carotenóides, como o licopeno, responsável pela cor vermelha do tomate (Cruz et al., 2012).

Purkayastha et al. (2011) observaram ótima retenção da tonalidade vermelha em fatias de tomates secas a 50 °C. Enquanto a secagem em temperaturas mais elevadas (entre 65 e 70 °C) resultou em uma diminuição considerável da qualidade da cor das fatias.

Figura 10 - Fatias de tomates secas até o teor de água de equilíbrio no secador com bomba de calor a 45 °C (A), estufa a 50 °C (B) e 65 °C (C).



Fonte: Própria (2020).

Jeyaprakash et al. (2019) ao estudarem o efeito de tecnologias de secagem na qualidade de tomates, verificaram que a secagem por bomba de calor resulta em maior sabor e preservação da sua composição química. Teeboonma et al. (2003) afirmam que a cor, qualidade e sabor dos produtos agrícolas secos com bomba de calor são melhores do que comparados com os secos em secadores convencionais.

4. Considerações Finais

Dentre os modelos matemáticos avaliados para descrever o processo de secagem de fatias de tomate, apenas o modelo de Valcam ajustou-se de maneira satisfatória para as condições de secagem propostas, tanto para estufa, quanto para a bomba de calor.

No início da secagem, a taxa de remoção de água foi maior para a secagem na estufa a 60 °C.

As fatias de tomates secas no secador com bomba de calor a 45 °C apresentaram menor degradação da cor vermelha.

Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar o consumo de energia e atributos químicos e físicos do tomate seco.

Agradecimentos

A Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelo apoio financeiro a pesquisa que originou o trabalho.

Referências

Aktas, M., Ceylan, I. & Gürel, A. E. (2014). Testing of a Condensation-type Heat Pump System for Low-temperature Drying Applications. *International Journal of Food Engineering*, 10(3), 521-531. doi: 10.1515/ijfe-2014-0124

Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação (ABIA). (1985). Comissão Nacional da Legislação de Alimentos: Consolidação das Normas e Padrões de Alimentos. Resolução 12/78 (12/7 Frutas Secas ou Dessecadas). São Paulo. v.1/A, p.78.

Berbert, P. A., Queiroz, D. D., Silva, J. S., & Pinheiro Filho, J. B. (1995). Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 60(3), 167-173.

Coşkun, S., Doymaz, İ., Tunçkal, C. & Erdoğan, S. (2016). Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 1863–1871. doi:10.1007/s00231-016-1946-7

Cruz, P. M. F. da., Braga, G. C., & de Grandi, A. M. (2012). Composição química, cor e qualidade sensorial do tomate seco a diferentes temperaturas. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(4), 1475-1486. doi: 10.5433/1679-0359.2012v33n4p1475

Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, 234(1), 121-130. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.156

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, 272, 723-731. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.08.068

Gümüşay, O. A., Borazan, A. A., Ercal, N. & Demirkol, O. (2015) Drying effects on the antioxidante properties of tomatoes and ginger. *Food Chemistry*, 173(1), 156-162. doi:10.1016/j.foodchem.2014.09.162.

Jeyaprakash, S., Heffernan, J. E., Driscoll, R. H., & Frank, D. C. (2020). Impact of drying technologies on tomato flavor composition and sensory quality. *LWT*, 120(1), 108888. doi:10.1016/j.lwt.2019.108888

Jordan, R. A., Siqueira, V. C., Cavalcanti-Mata, M. E. R., Hoscher, R. H., Mabasso, G. A., Motomia, A. V., Oliveira, F. C., Martins, E. A. S., Santos, R. C. & Quequeto, W. D. (2020a). Cinética de secagem de café natural e descascado a baixa temperatura e umidade relativa com emprego de uma bomba de calor. *Research, Society and Development*, 9(8). doi:10.33448/rsd-v9i8.5528.

Jordan, R. A., Siqueira, V. C., Quequeto, W. D., Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., Hoscher, R. H., Mabasso, G. A., Battilani, M., Oliveira, F. C. de, Martins, E. A. S. & Freitas, R. L. (2020b). Consumo específico de energia na secagem de café com sistema de aquecimento resistivo e bomba de calor. *Research, Society and Development*, 9(9), e303997297-e303997297. doi: 10.33448/rsd-v9i9.7297

Juan, W., Chong, Z., Zhentao, Z. & Luwei, Y. (2013). Performance Analysis of Heat-pump Dryer to Dry Mushroom. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5(2), 164-168. doi:10.19026/ajfst.5.3238

Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. & Tabil, L. G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 98-108. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.09.007

Liu, Y., Zhaoa, K., Jiu, M. & Zhang, Y. (2017). Design and Drying Technology Research of Heat Pump Lentinula Edodes Drying Room. *Procedia Engineering*, 205(1), 938-988. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.154

Monteiro, C. S., Balbi, M. E., Miguel, O. G., Penteadó, P. T. P. S. & Haracemiv, S. M. C. (2008). Qualidade nutricional e antioxidante do tomate “tipo italiano”. *Alimentos e Nutrição*, 19(1) 25-31.

Olajire, A. A. & Azeez, L. (2011). Total antioxidant activity, phenolic, flavonoid and ascorbic acid contents of Nigerian vegetables. *African Journal of Food Science and Technology*, 2(2), 22-29.

Ozdemir, Y., Yavas, H., Ozyurt, U., Kosti, R. I. & Keskinel, O. (2018) Olive semidrying process: oleuropein degradation in relation to sensory bitterness. *Journal of Food Science and Nutrition*, 1(2), 1-8. doi:10.35841/food-science.1.2.1-8

Pacco, H. C. (2008). Desenvolvimento de um sistema de bomba de calor água/água para resfriamento e secagem de tomates. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

Purkayastha, M. D., Nath, A., Deka, B. C., & Mahanta, C. L. (2013). Thin layer drying of tomato slices. *Journal of food science and technology*, 50(4), 642-653. doi: 10.1007/ s13197-011-0397-x 2011

Resende, O., Arcanjo, R. V., Siqueira, V. C., & Rodrigues, S. (2009). Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 31(2), 189-196.

Silva, F. P., Siqueira, V. C., Martins, E. A. S., Miranda, F. M. N. & Melo, R. M. (2017). Thermodynamic properties and drying kinetics of *Bauhinia forficata* Link leaves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(1), 61-67. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v21n1p61-67

Siqueira, V. C., Resende, O. & Chaves, T. H. (2013). Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. *Revista Ciência Agronômica*, 44(2), 278-285. doi:10.1590/S1806-66902013000200009

Teeboonma, U., Tiansuwan, J. & Soponronnarit, S. (2003). Optimization of heat pump fruit dryers. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 369-377. doi:10.1016/S0260-8774(02)00496-X

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rodrigo Aparecido Jordan – 15,0%
Wellytton Darci Quequeto – 8,75%
Elton Aparecido Siqueira Martins – 8,75%
Valdiney Cambuy Siqueira – 8,75%
Renata Henrique Hoscher – 8,75%
Rodrigo Vital da Silva – 15,0%
Carlos de Oliveira Moreira de Melo – 8,75%
Ricardo Lordelo Freitas – 8,75%
Maurício Battilani – 8,75%
Fabrício Correia de Oliveira – 8,75%