

Estudo experimental e numérico do perfil de aquecimento de um forno solar aplicado à secagem

Experimental and numerical study of the heating profile of a solar oven applied to drying

Estudio experimental y numérico del perfil de calentamiento de un horno solar aplicado al secado

Recebido: 09/05/2020 | Revisado: 13/05/2020 | Aceito: 18/05/2020 | Publicado: 30/05/2020

Erica Victor Faria

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9890-7273>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: erica-victor@hotmail.com

Nádia Guimarães Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3142-5875>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: nadia.sousa@uftm.edu.br

Kássia Graciele dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7452-6900>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: kassia.santos@uftm.edu.br

Resumo

Dentre as técnicas de conservação de alimentos, pode-se destacar a secagem. No entanto, esta é uma operação que demanda um alto consumo energético e pode ser viabilizada pela aplicação de uma fonte energética alternativa não poluente e inesgotável, como a energia solar. Um equipamento aplicado a secagem que opera a partir da captação de raios solares é o forno solar. A partir de objetos refletores ocorre a reflexão dos raios solares para o interior desse secador, proporcionando o aumento da temperatura do ar contido no forno, para posterior aplicação como ar de secagem. A fim de melhor entender o funcionamento deste secador, diversos autores vêm estudando-o através de simulações computacionais.

Considerando o exposto, o objetivo desse trabalho é realizar um estudo experimental e numérico do aquecimento de um forno solar. O experimento consistiu na exposição do forno aos raios solares e registro contínuo dos valores de temperatura ambiente e em diferentes posições no equipamento. O modelo matemático utilizado é constituído por balanços de energia individuais para cada componente do secador, sendo que o cálculo dos coeficientes de transferência de calor na forma convectiva e por radiação foram baseados em trabalhos da literatura. O modelo foi implementado no *software* livre Scilab®, utilizando o solucionador *lsoda* do pacote ODEPACK e os experimentos foram desenvolvidos na UFTM em Uberaba – MG. Os resultados mostraram que a abordagem de modelagem empregada foi eficiente na predição do comportamento térmico do secador, que atingiu temperaturas adequadas à secagem ($T_s^* = 82^\circ C$) apenas com utilização de energia solar.

Palavras-chave: Energia solar; Modelagem; Simulação; Aquecimento.

Abstract

Among food preservation techniques, drying can be highlighted. However, this is an operation that demands high energy consumption and can be made possible by applying an alternative non-polluting and inexhaustible energy source, such as solar energy. A device applied to dry that operates from the capture of solar rays is the solar oven. Reflective objects reflect the sun's rays into the interior of this dryer, providing an increase in the temperature of the air contained in the oven, for later application as drying air. To better understand the operation of this dryer, several authors have been studying it through computer simulations. Considering the above, the objective of this work is to carry out an experimental and numerical study of the heating of a solar oven. The experiment consisted of exposing the oven to sunlight and continuously recording ambient temperature values and in different positions on the equipment. The mathematical model used consists of individual energy balances for each component of the dryer, and the calculation of the heat transfer coefficients in convective form and by radiation was based on works in the literature. The model was implemented in the free software Scilab®, using the *lsoda* solver in the ODEPACK package and the experiments were developed at UFTM in Uberaba - MG. The results showed that the modeling approach employed was efficient in predicting the thermal behavior of the dryer, which reached temperatures suitable for drying ($T_s^* = 82^\circ C$) using only solar energy.

Keywords: Solar energy; Modeling; Simulation; Heating.

Resumen

Entre las técnicas de conservación de alimentos, se puede resaltar el secado. Sin embargo, esta es una operación que exige un alto consumo de energía y puede hacerse posible mediante la aplicación de una fuente de energía alternativa no contaminante e inagotable, como la energía solar. Un dispositivo aplicado al secado que opera desde la captura de rayos solares es el horno solar. Los objetos reflectantes reflejan los rayos del sol en el interior de esta secadora, proporcionando un aumento en la temperatura del aire contenido en el horno, para su posterior aplicación como aire de secado. Para comprender mejor el funcionamiento de este secador, varios autores lo han estado estudiando a través de simulaciones por computadora. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio experimental y numérico del calentamiento de un horno solar. El experimento consistió en exponer el horno a la luz solar y registrar continuamente los valores de temperatura ambiente y en diferentes posiciones en el equipo. El modelo matemático utilizado consiste en balances de energía individuales para cada componente de la secadora, y el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en forma convectiva y por radiación se basaron en trabajos en la literatura. El modelo se implementó en el software libre Scilab®, utilizando el solucionador *lsoda* en el paquete ODEPACK y los experimentos se desarrollaron en UFTM en Uberaba - MG. Los resultados mostraron que el enfoque de modelado empleado fue eficiente para predecir el comportamiento térmico del secador, que alcanzó temperaturas adecuadas para el secado ($T_s^* = 82^\circ C$) utilizando solo energía solar.

Palabras-clave: Energía solar; Modelado; Simulación; Calefacción.

1. Introdução

O Brasil é o terceiro maior exportador de alimentos do mundo. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a safra 2017/18 produziu 232,6 milhões de toneladas (Brasil, 2018). No entanto, uma quantidade significativa da produção é perdida devido à falta de um processo de conservação, o qual seja de baixo custo e permita sua industrialização e comércio. A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) estima que o Brasil jogue no lixo, anualmente, 26,3 milhões de toneladas de comida, enquanto 15 milhões de brasileiros não tem o mínimo para se alimentar (Esteche, 2008).

O desperdício se estende pelas etapas de plantio, colheita e armazenamento dos alimentos. Na área de frutas e legumes, estas perdas chegam a 25% da produção total (Abud

& Narain, 2009). Por possuírem um alto teor de umidade (cerca de 80%), frutas e legumes são altamente perecíveis. Devido a isso, devem ser processados o mais rapidamente possível após a colheita. O principal objetivo do processamento de alimentos é convertê-los em produtos mais estáveis que possam ser estocados por longos períodos (Coelho, 2010).

Dentre as técnicas de conservação de alimentos, pode-se destacar a secagem. Essa é uma importante operação unitária que envolve transferência de calor e massa com a finalidade de reduzir a umidade de um determinado produto (Zhang et al., 2006). A diminuição do teor de água impede o crescimento e a reprodução de microrganismo como leveduras, bactérias e fungos, levando ao aumento seu tempo de prateleira (Murthy, 2009).

No entanto, a secagem de produtos agrícolas é uma operação que demanda um alto consumo energético e por isso a influência da temperatura, cinética e velocidade do ar de secagem vem sendo alvo de estudos nos últimos anos (Alves et al., 2014; Taşeri et al. 2018; Santos et al., 2020a; Santos et al., 2020b; Siqueira et al., 2020; Almeida et al., 2020; Riguetto et al., 2020). Partindo disso, a aplicação de uma fonte energética alternativa pode contribuir para redução de custo operacionais relacionados a secagem.

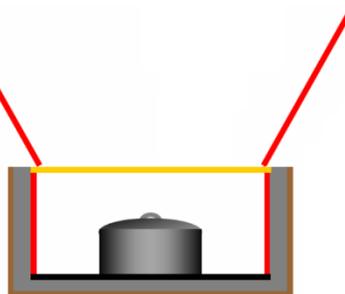
No Brasil o uso de energia solar possui grande potencial para expansão, pois, segundo dados do relatório "Um Banho de Sol para o Brasil" do Instituto Vitae Civilis (Rodrigues & Matajs, 2006), devido à localização e extensão territorial, o país recebe radiação solar da ordem de 1013 MWh anuais. Esse valor corresponde a cerca de 50 mil vezes o consumo anual de eletricidade. Devido a isto, diversos trabalhos vêm adotando a energia solar em variados processos, como sistemas de refrigeração (Paiva & Souza, 2015), aquecimento de água (Tavares & Sousa, 2018), e utilidades (Silva & Sousa, 2020), extração de óleos vegetais (Tavares et al., 2019), destilação aplicada a recuperação de etanol (Silva et al., 2019) e secagem (Kumar et al., 2016; Bontempo et al., 2020; Guimarães et al., 2020; Sttope et al., 2020;), assim como demais aplicações.

Dessa forma, a secagem solar pode ser dividida entre direta e indireta, segundo Téllez et al. (2018). Na secagem direta, o material contido no secador é exposto diretamente à radiação solar, e o equipamento é constituído por um único compartimento. Já na secagem indireta, o material a ser seco não é exposto diretamente à radiação solar e o equipamento possui duas peças, um coletor solar, forno ou fogão solar, responsável pela conversão da radiação solar em energia térmica para o aquecimento do gás de secagem e uma câmara onde ocorre a secagem.

A operação de um forno solar se baseia na captação de raios solares através de objetos refletoras, como espelhos ou papel alumínio. Tais objetos quando colocados em locais

estratégicos de uma caixa, fazem com que a reflexão dos raios ocorra para o seu interior, aumentando a temperatura. Esse aumento da temperatura é também ocasionado pela presença de materiais que causam um efeito estufa no interior da caixa, fazendo com que a energia absorvida seja maior (Guia da Energia Solar, 2013). A Figura 1 apresenta o esquema básico de um forno solar.

Figura 1: Esquema de um forno solar.



Fonte: Adaptado de Guia da Energia Solar, 2013.

Observa-se na Figura 1 que a cor vermelha representa os materiais refletores; a cor preta representa o fundo do forno que deve ser de uma coloração escura, com o objetivo de maximizar a absorção de energia e assim aumentar a temperatura; a cor amarela representa os materiais transparentes, que tem a função de criar um efeito estufa no interior do forno; o marrom corresponde aos materiais estruturais, geralmente madeira; e a cor cinza representa os materiais isolantes, geralmente isopor ou mesmo uma camada de ar.

A grande maioria dos fornos solares utiliza essa mesma estrutura, no entanto alguns mais robustos possuem acessórios extras, como partes móveis em sua base que permite o direcionamento dos refletos para o sol ou jogos de espelhos para captação ao invés de um único espelho, que permite uma maior eficiência do forno.

A fácil construção e o baixo custo dos materiais são as principais vantagens de um forno solar. No entanto, não é possível utilizá-lo sem uma boa incidência solar, como em dias chuvosos ou nublados. Além disso, o tempo de aquecimento é maior do que nos fornos a gás ou a lenha. Contudo, sugere-se otimizar cada etapa envolvida na secagem solar para melhor viabilidade técnico-econômica (Kumar et al., 2016). Dessa forma, a primeira etapa envolvida na secagem solar é o aquecimento do forno, objetivo de estudo deste trabalho.

O estudo de processos químicos industriais por meio da simulação de modelos matemáticos vem sendo amplamente adotada, visto que pode ser aplicada na investigação das características de processo de qualquer sistema, sem a necessidade de realizar alterações

físicas no equipamento estudado. Com isso, o aquecimento de um forno solar pode ser descrito por modelos matemáticos, que permitem obter estimativas da temperatura em posições de interesse em relação ao tempo, e através desse estudo, descobrir quais as variáveis que mais interferem nessa resposta.

Apesar de diversos trabalhos desenvolverem temáticas relacionadas à secagem solar, ainda faltam informações sobre os balanços de energia relacionados ao aquecimento de um forno através da radiação solar direta. Seu estudo é o primeiro passo para entender o processo de secagem nesse equipamento.

Segundo Venturin & Silva (2019) a simulação matemática da secagem de produtos agrícolas começou a despertar o interesse do meio científico entre as décadas de 1950 e 1970, mas obteve maior crescimento a partir década de 1990 com a evolução dos *softwares* e *hardwares*. Alguns avanços nessa área podem ser encontrados em Hossain et al. (2010); Ondieki et al. (2014); Antoine (2016); Vásquez et al. (2019) e Sttope et al. (2020).

Dessa forma, a análise com base nas técnicas de modelagem não só economiza tempo, mas também energia e investimento de capital em sistemas de secagem solar, visto que antes de ampliar o sistema de secagem, é recomendável executar o modelo de simulação do sistema de previsão para analisar seu desempenho.

Portanto, este trabalho visa estudar experimentalmente o aquecimento de um forno solar do tipo caixa e realizar a sua simulação através de um modelo fenomenológico de simples resolução, composto por Equações Diferenciais Ordinárias (EDO's), capaz de prever a dinâmica de aquecimento do forno solar e seu perfil de temperatura.

2. Metodologia

Este trabalho possui natureza experimental e teórico-computacional. Foi utilizado o *software* livre, Scilab®, para realizar as simulações computacionais do modelo matemático do forno solar estudado. A listagem contendo a nomenclatura de grandezas e símbolos usados é apresentada a seguir.

Nomenclatura

$L[m]$	Comprimento
$C_p[Jkg^{-1}K^{-1}]$	Calor específico
$k[Wm^{-1}K^{-1}]$	Condutividade térmica
$\alpha[-]$	Absorbância
$T[K]$	Temperatura
$h_c[Wm^{-2}K^{-1}]$	Coefficiente de transferência de calor convectivo
$h_r[Wm^{-2}K^{-1}]$	Coefficiente de transferência de calor por radiação
$v_{vento}[ms^{-1}]$	Velocidade do vento
$U_p[Wm^{-2}K^{-2}]$	Calor perdido
$\beta[K^{-1}]$	Expansividade do volume
$\Delta[-]$	Varição
$\varepsilon[-]$	Emitância
$\delta[m]$	Espessura (m)
$\rho[kgm^{-3}]$	Densidade (kg/m ³)
$\sigma[Wm^{-2}K^{-4}]$	Constante de Stefan–Boltzmann
$\tau[-]$	Transmissividade do vidro
$\vartheta[m^2s^{-1}]$	Viscosidade cinemática do ar
$Nu[-]$	Número de Nusselt
$Ra[-]$	Número de Rayleigh

Subscrito

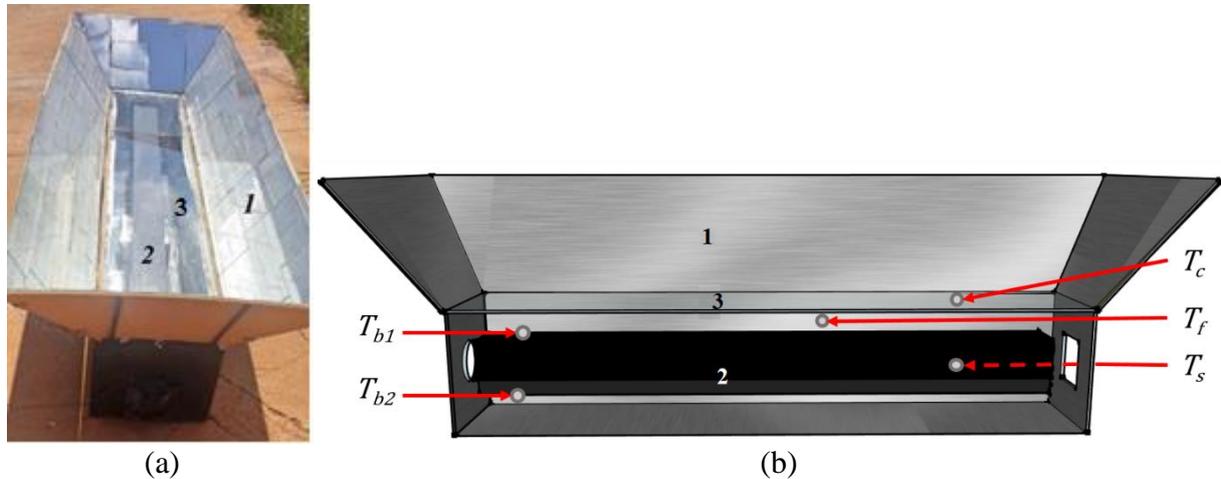
f	Forno
b	Absorvedor
b_1	Canaleta superior do absorvedor
b_2	Canaleta inferior do absorvedor
s	Secador
c	Cobertura
sky	Atmosférico

2.1. Método experimental

O forno solar utilizado foi construído por alunos do curso de Engenharia Química da UFTM na disciplina de Desenvolvimento de Processos Químicos, e foi empregado na secagem de resíduos alimentícios por Bontempo et al. (2020).

O forno solar apresentado na Figura 2 foi construído com madeira MDF, nas dimensões de 1,5 m x 30 cm x 30 cm, revestido internamente com papel alumínio e fundo recoberto por placas de metal.

Figura 2: Forno solar utilizados nos testes (a) vista superior; (b) corte lateral com indicação de posicionamento dos termopares (esquema): 1- superfície refletora; 2- calha (superfície absorvedora); 3- Superfície transparente.



Fonte: Dos autores.

O coletor solar foi construído com retalhos de espelhos e possui uma angulação de 60° . No interior do forno foi inserida uma calha, com dimensões de $1,45\text{ m} \times 10\text{ cm} \times 7,5\text{ cm}$, pintada com tinta spray preta a fim de conservar o calor no interior do equipamento (*Ibidem*, 2020).

O experimento de aquecimento do forno solar consistiu na exposição do equipamento, posicionando-o na direção norte, onde havia maior incidência de raios solares, então acompanhou-se a variação da temperatura ambiente e da temperatura em diferentes posições dentro do equipamento com o tempo, a saber: na cobertura de vidro (T_c), no forno (T_f), na parte superior do absorvedor (T_{b1}), no secador (T_s) e na parte inferior do absorvedor (T_{b2}).

O teste foi realizado durante o inverno, em um dia ensolarado e de céu limpo, sendo iniciado as 11h 40 min, a fim de abranger o horário com maior incidência solar do dia. Para as medições de temperatura, foram empregados termopares do tipo J e do tipo K, devidamente calibrados e posicionados conforme indicado na Figura 2.

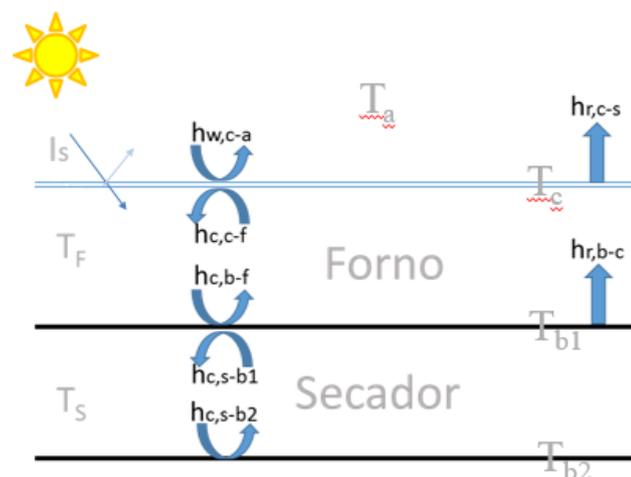
As temperaturas foram monitoradas em intervalos de aproximadamente 2 minutos até atingir o equilíbrio. Após 70 minutos de operação observou-se a estabilização das temperaturas no interior do equipamento. Além disso, foram registradas as medidas de velocidade do vento durante todo o experimento, empregando um anemômetro de fio quente. Foi verificado o efeito da convecção natural sobre o aquecimento do forno.

2.2. Modelo matemático

Para realizar esse estudo adaptou-se o modelo matemático proposto por Smitabhindu et al. (2008) ao forno solar. Esse modelo é composto por balanços de energia individuais para cada componente do forno solar, para conhecer o comportamento da temperatura da cobertura de vidro (T_c), do forno (T_f), da parte superior do absorvedor (T_{b1}), do secador (T_s) e da parte inferior do absorvedor (T_{b2}).

Com base nos princípios da conservação de energia para cada componente do forno solar, como mostrado na Figura 3, o modelo considera as trocas de calor por radiação e convecção entre as partes componentes do forno solar e também com o ambiente.

Figura 3: Mecanismos de transferência de energia em forno solar.



Fonte: Dos autores.

O cálculo dos coeficientes de transferência de calor na forma convectiva e por radiação foram baseados nos trabalhos de Smitabhindu et al. (2008) e Ondieki et al. (2014).

O modelo utilizado para a simulação do forno solar é composto por balanços de energia (BE) individuais para cada componente (Equações 1 a 5) e equações constitutivas (Equações 6 a 16). A nomenclatura dos parâmetros utilizados está disposta na Tabela 3.

A Equação 1 representa o balanço de energia para a cobertura de vidro.

$$\rho_c \delta_c C_{p_c} \frac{dT_c}{dt} = h_{r,b-c}(T_b - T_c) + h_{c,f-c}(T_f - T_c) + h_{w,c-a}(T_a - T_c) + h_{r,c-sky}(T_{sky} - T_c) + \alpha_c I_t \quad (1)$$

A temperatura do ar do forno é representada pela Equação 2.

$$D_c G C p_f \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-c}(T_c - T_f) + h_{c,b-f}(T_b - T_f) \quad (2)$$

A temperatura para a parte superior do absorvedor é representada pela Equação 3.

$$\rho_b \delta_{b1} C p_b \frac{dT_{b1}}{dt} = h_{c,b-f}(T_f - T_b) + h_{r,b-c}(T_c - T_b) + h_{c,b-s}(T_s - T_{b1}) + \tau_c \alpha_b I_t \quad (3)$$

A Equação 4 representa o balanço de energia para ar no secador.

$$D_s G C p_s \frac{dT_s}{dt} = h_{c,s-b1}(T_{b1} - T_s) + h_{c,s-b2}(T_{b2} - T_s) \quad (4)$$

A temperatura para a parte inferior do absorvedor é representada pela Equação 5.

$$\rho_b \delta_{b2} C p_b \frac{dT_{b2}}{dt} = h_{c,s-b2}(T_s - T_{b2}) \quad (5)$$

A Equação 6 apresenta o coeficiente de transferência de calor por radiação entre cobertura e a parte superior do absorvedor ($h_{r,b-c}$).

$$h_{r,b-c} = \frac{\sigma (T_{b1}^2 + T_{b2}^2) (T_{b1} + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_b} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (6)$$

A Equação 7 apresenta o coeficiente de transferência de calor por convecção natural entre a cobertura e o forno ($h_{w,c-a}$) e o coeficiente de transferência de calor por radiação entre cobertura e o ambiente ($h_{r,c-sky}$) é descrito pela Equação 8.

$$h_{w,c-a} = 5,7 + 3,8 v_{\text{vento}} \quad (7)$$

$$h_{r,c-sky} = \epsilon_c \sigma (T_c^2 + T_{\text{sky}}^2) (T_c + T_{\text{sky}}) \quad (8)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção natural entre a cobertura e o forno ($h_{c,f-c}$) é dado pela Equação 9 e a Equação 10 apresenta o coeficiente de transferência de calor por convecção natural do forno para parte superior do absorvedor ($h_{c,b-f}$).

$$h_{c,f-c} = \frac{Nu_{f-c} k}{D_{hf}} \quad (9)$$

$$h_{c,b-f} = \frac{Nu_{b1-f} k}{D_{hf}} \quad (10)$$

A Equação 11 apresenta o coeficiente de transferência de calor por convecção natural da parte superior do absorvedor para o secador ($h_{c,s-b1}$) e a Equação 12 apresenta o coeficiente de transferência de calor por convecção natural do secador para parte inferior do absorvedor ($h_{c,s-b2}$).

$$h_{c,s-b1} = \frac{Nu_{s-b1} k}{D_{hs}} \quad (11)$$

$$h_{c,s-b2} = \frac{Nu_{s-b2} k}{D_{hs}} \quad (12)$$

As Equações 13 a 15 apresentam, respectivamente, o número de Nusselt (Nu), número de Rayleigh (Ra) e o diâmetro hidráulico (D_h) empregados no cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural. A notação $[]^+$, na Equação 13 é usada para denotar que se a que a quantidade entre colchetes for negativa, deve ser adotada como sendo igual a zero. Esta correlação é válida para $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ (Ondieki et al., 2014).

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708 (\sin 1,8 \theta)^{1,6}}{Ra \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (13)$$

$$Ra = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \left(\frac{k_{ar}}{\rho_{ar} C_{par}} \right)} \quad (14)$$

$$D_h = \frac{2DL}{(D+L)} \quad (15)$$

A Equação 16 apresenta o cálculo da temperatura atmosférica, empregada no cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação entre cobertura e o ambiente (Swinbank, 1963 apud Ondieki et al., 2014).

$$T_{\text{sky}} = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (16)$$

Os valores dos parâmetros empregados na resolução do sistema de Equações 1 a 16 encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da simulação.

$C_{p_{ar}} = 4178 J/kgK$	$D_s = 0,08m$	$U_b = 4 W/m^2K$	$\tau_c = 0,98$
$C_{p_c} = 0,8 J/kgK$	$e_b = 0,001m$	$\alpha_b = 0,9$	$v_{ar} = 1,75 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s^2}$
$C_{p_f} = 1007 J/kgK$	$e_c = 0,004m$	$\alpha_c = 0,6$	$\rho_{ar} = 1,275 kg/m^3$
$C_{p_b} = 486 J/kgK$	$k_{ar} = 0,027 W/mK$	$\beta_{ar} = 0,00315K^{-1}$	$\rho_b = 7860 kg/m^3$
$C_{p_s} = 1007 J/kgK$	$K_b = 52 W/mK$	$\varepsilon_b = 0,87$	$\rho_c = 2500 kg/m^3$
$D_c = 0,105m$	$L = 1,5m$	$\varepsilon_c = 0,5$	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$

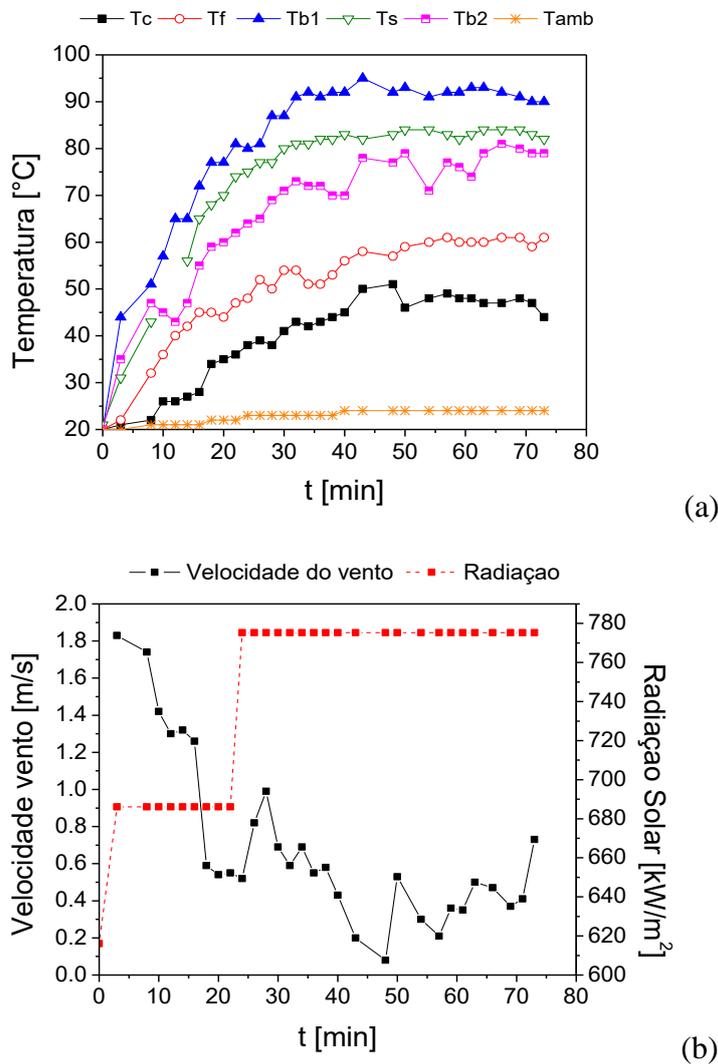
Fonte: Dos autores

As simulações foram realizadas por meio do *software* livre Scilab®, utilizando o solucionador *lsoda* do pacote ODEPACK. Os dados de radiação solar incidente foram obtidos pelo site *INMET* (Instituto Nacional de Meteorologia), para a cidade de Uberaba, Minas Gerais. A temperatura ambiente e velocidade do vento foram medidas durante os experimentos com auxílio de um termopar do tipo K e anemômetro de fio quente, respectivamente.

3. Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta os resultados experimentais das temperaturas obtidas durante o teste de aquecimento do secador solar, operando apenas com convecção natural. Observa-se que em cerca de 50 minutos de operação as temperaturas em todas as superfícies já haviam estabilizado, atingindo um valor constante, uma vez que não houve variações significativas de radiação solar nesse momento.

Figura 4: Dados experimentais obtidos ao longo do teste de aquecimento do forno solar: (a) temperaturas no forno solar; (b) velocidade do vento e radiação solar.



Fonte: Dos autores.

A temperatura do ar na cobertura de vidro estabilizou em cerca de 50°C , enquanto a temperatura do ar no forno foi de 70°C ao final de 50 minutos de exposição solar. Já as superfícies absorvedoras: superior e inferior do secador, de metal, atingiram cerca de 90°C e 80°C , respectivamente. Devido às propriedades do material e pela cor preta, a superfície que atingiu a maior temperatura foi a superior, pois estava diretamente exposta aos raios solares.

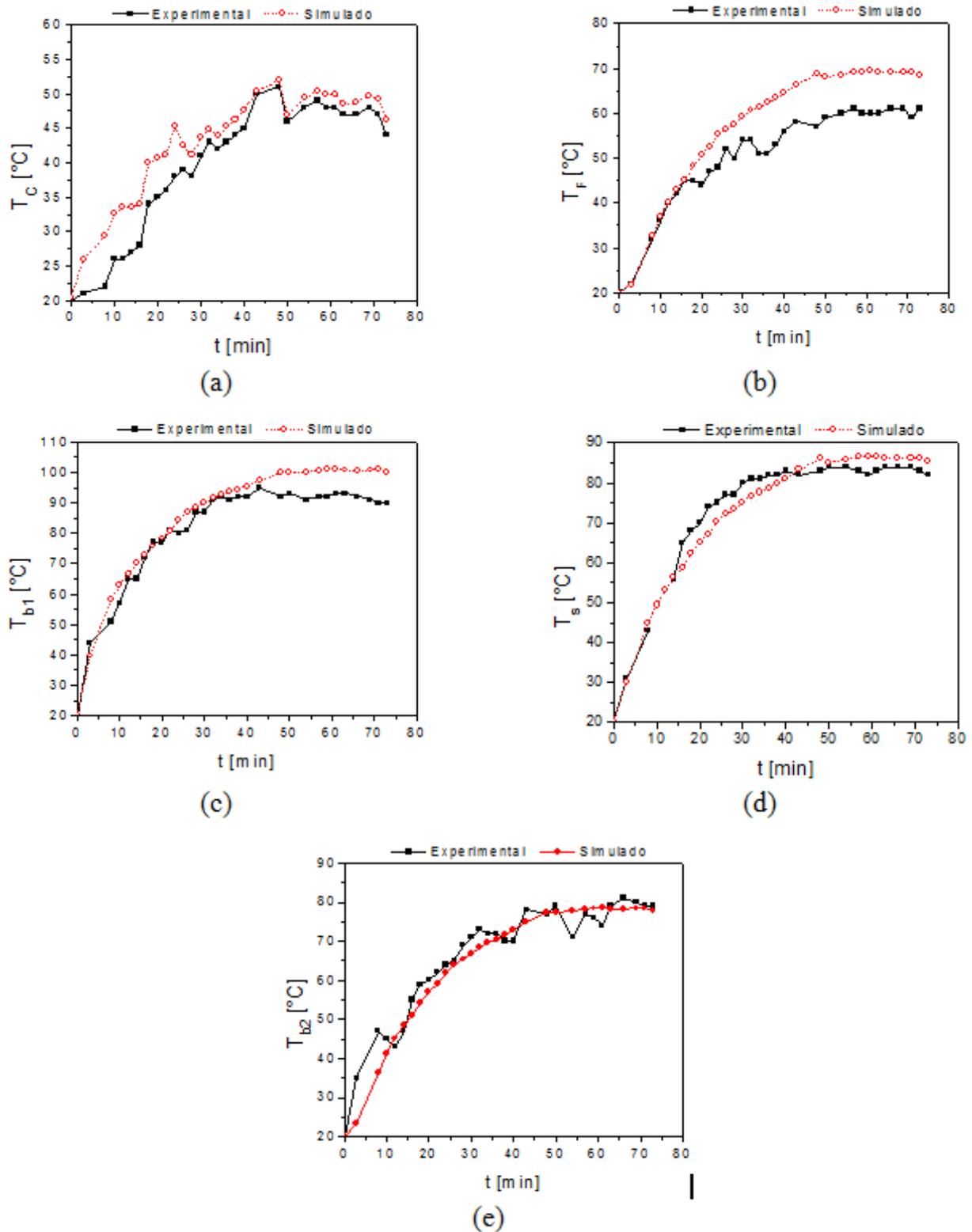
Uma vez que as temperaturas nas superfícies absorvedoras e do ar dentro do secador ($T_s^* = 82^\circ\text{C}$) são maiores que a temperatura do ar no forno ($T_f^* = 60^\circ\text{C}$), pode-se afirmar que a transferência de calor por radiação foi a principal responsável pelo aquecimento das superfícies absorvedoras. Houve também a transferência de calor por convecção natural das

paredes absorvedoras para o ar dentro do secador e do forno. Acredita-se que a temperatura do ar dentro do secador é maior que a do forno devido à menor massa de ar presente no secador, assim uma menor quantidade de moléculas recebe o calor, o que eleva a temperatura.

Além disso, a temperatura do ar de secagem alcançada no forno solar estudado é compatível com a aquela recomendada para a secagem de diversos produtos alimentícios, dentre eles podemos citar: banana d'água (Borges et al., 2010), cascas de pitomba (Santos et al., 2019) e batata doce (Almeida et al., 2020).

A Figura 5 compara os dados experimentais de temperatura nas diversas superfícies e os dados calculados pela simulação do modelo matemático, qual se observa uma boa concordância para todas as medidas.

Figura 5: Comparação entre os dados experimentais e simulados das temperaturas em função do tempo: (a) na cobertura; (b) do ar no forno; (c) na superfície superior do absorvedor; (d) do ar no secador; (e) da superfície inferior do absorvedor.



Fonte: Dos autores.

Pode-se notar que o modelo matemático representou o comportamento das temperaturas do forno solar de forma eficiente, podendo ser utilizado para prever o comportamento das temperaturas em diferentes cenários. As temperaturas finais simuladas que apresentaram maior desvio em relação ao valor experimental foram as do ar dentro do forno ($T_f = 70^\circ C$ e $T_f^* = 60^\circ C$) e na superfície absorvedora superior ($T_{b1} = 100^\circ C$ e $T_{b1}^* = 90^\circ C$) predizendo temperaturas maiores que as reais.

Quanto às variações entre dados experimentais e simulados das temperaturas avaliadas podem ser explicadas pelas divergências entre o valor tabelado do parâmetro do material metálico e o valor real, uma vez que não há garantias que a composição do metal é a mesma do esperado. O valor do coeficiente de determinação (R^2) para cada temperatura está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficiente de determinação.

Cobertura de vidro (Figura 5a)	$R^2 = 0,8176$
Ar dentro do forno (Figura 5b)	$R^2 = 0,5466$
Superfície absorvedora superior (Figura 5c)	$R^2 = 0,8811$
Ar dentro do secador (Figura 5d)	$R^2 = 0,9838$
Superfície absorvedora inferior (Figura 5e)	$R^2 = 0,9274$

Fonte: Dos autores.

Avaliando os valores da Tabela 2, pode-se dizer que, de modo geral, o modelo matemático foi adequado para representar os fenômenos complexos de transferência de calor envolvidos na operação, uma vez que não houve ajuste de nenhum parâmetro, empregando apenas valores tabelados de propriedades dos materiais utilizados. Portanto, por ser um modelo fenomenológico, os valores de R^2 são considerados aceitáveis.

Para o caso da temperatura do ar no forno (Figura 5b) houve uma maior discrepância entre os valores experimentais e os simulados, o que pode ser explicado pela grande influência da vedação do equipamento no efeito estufa.

Como a caixa do forno é feita de madeira, as frestas entre a caixa e o vidro da cobertura podem não estar completamente vedadas, bem como a região do leito em que o cooler está acoplado. Assim, a vedação no experimento pode não ter sido perfeita, ocorrendo perdas de calor não previstas no modelo.

Além disso, pode também ter ocorrido maior perda de calor para o ambiente pelas paredes da madeira do forno, diminuindo a temperatura experimental obtida do ar no forno.

Mesmo assim, o comportamento de T_s segue a mesma tendência dos dados experimentais, confirmando que o aparato experimental e o modelo precisam apenas de pequenos ajustes.

4. Conclusões

Neste trabalho foram realizados experimentos e simulações do aquecimento de um forno solar do tipo caixa, sem convecção forçada. Para tal utilizou-se um aparato experimental, sendo o modelo composto de um sistema de EDO's, proveniente dos balanços de energia em diferentes pontos do forno solar, adaptado de Smitabhindu et al. (2008).

Os dados experimentais obtidos, após as análises térmicas do forno solar, mostraram que o ar de secagem atingiu uma temperatura de cerca de 80°C utilizando apenas energia solar, sendo esta, uma temperatura adequada à secagem.

Analisando os resultados provenientes da simulação do modelo matemático pode-se afirmar que o modelo foi capaz de prever o comportamento das temperaturas do forno solar, uma vez que seguiu a mesma tendência dos resultados experimentais para todas as temperaturas avaliadas.

Vale ressaltar que, por ser um modelo fenomenológico as divergências encontradas entre valores experimentais e os calculados são esperadas. Além disso, nota-se que tanto o modelo matemático quanto o aparato experimental precisam de ajustes, principalmente no refino dos valores dos parâmetros do modelo e do sistema de vedação do forno solar.

Devido aos bons resultados novas análises poderão ser feitas como a adaptação de um sistema de convecção forçada para avaliar o seu efeito nas temperaturas e na secagem de um determinado material.

A utilização do forno solar em diferentes períodos do dia com o intuito de verificar qual seria o comportamento das temperaturas estudadas em diferentes condições ambientais. Além disso, avaliar a influência da superfície refletora, bem como a utilização de diferentes materiais de isolamento para reduzir as de perdas de calor e assim validar o modelo matemático.

Agradecimentos

Os autores agradecem o custeio da CAPES (AUXPE-0856/2015), ao PPGMQMG e à Fapemig.

Referências

Abud AKS & Narain N. (2009). Incorporação da farinha de resíduo do processamento de polpa de fruta em biscoitos: uma alternativa de combate ao desperdício. *Brazilian Journal of Food Tech.*, 12 (4), 257-65. doi: 0.4260/BJFT2009800900020

Almeida R, Santos N, Silva V, Ribeiro V, Luíz M, Barros E, Nunes J, Nascimento A, Cavalcante J & Nogueira H. (2020). Obtaining powdered sweet potato in spouted bed and influence of drying temperature on physicochemical properties. *Research, Society and Development*, 9(4), e124942942. doi: 10.33448/rsd-v9i4.2942

Alves APDC, Correa AD, Oliveira FC, Isquierdo EP, Abreu CMP & Borem FM. (2014). Influence of drying temperature on the chemical constituents of jaboticaba (*Plinia jaboticaba* (Vell.) berg) skin. *Acta Scientiarum. Technology*, 36(4), 721-26. doi: 10.4025/actascitechnol.v36i4.19305

Antoine, R. (2016) Modelagem E Análise De Eficiência De Um Fogão Solar. *Dissertação de mestrado. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas*. Universidade Federal do ABC.

Bontempo L, Castejon L & Santos K. (2020). Drying of Tangerine peel: kinetics and performance of a convective solar dryer. *Research, Society and Development*, 9(6), e44963458. doi:10.33448/rsd-v9i6.3458

Borges SV, Mancini MC, Corrêa JLG & Leite J. (2010). Drying of banana prata and banana d'água by forced convection. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 1, 605-12. doi: 10.1590/S0101-20612010000300006.

Brasil. (2018). Projeções do Agronegócio: BRASIL 2017/2018 a 2027/2028. *Secretaria de Política Agrícola*. Brasília. Acesso em 15 abril, em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/PROJECOES2018_FINALIZADA_web_05092018.pdf/view>.

Esteche C. (2008). *A invisibilidade que brota no lixo*. Website Rede Sul de Notícias. Acesso em 16 abril, em <http://www.redesuldenoticias.com.br/noticias>

Guia da Energia Solar. (2013). Construção e avaliação de desempenho de fornos solares. Acesso em 17 abril, em <http://www.cienciaviva.pt/rede/himalaya/home/guia7.pdf>

Guimarães B, Silva J, Santos K & Vieira Neto J. (2020). Sequencing of unit operations for integral and sustainable peanut processing. *Research, Society and Development*, 9(6), e67963449. doi:10.33448/rsd-v9i6.3449

Hossain MA, Gottschalk K & Amer BMA. (2010). Mathematical modelling for drying of tomato in hybrid dryer. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35, 239-62.

Kumar, M; Sansaniwal, S K & Khatak, P. (2016) Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, 346–360. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.028

Murthy MVR. (2009). A Review of New Technologies, Models and Experimental Investigations of Solar Driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 835–44. doi: 10.1016/j.rser.2008.02.010

Ondieki HO, Koech RK, Tonui JK & Rotich SK. (2014). Mathematical modeling of solar air collector with a trapezoidal corrugated absorber plate. *International journal of scientific & technology research*, (3), 51-6.

Paiva LS & Sousa NG. (2015). Simulação e análise de um sistema de refrigeração por absorção e aquecimento solar. *Rev. Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 1, 25-42.

Rigueto C, Nazari M, Evaristo L, Rossetto M, Dettmer A, Geraldi C & Piccin J. (2020). Influence of foam-mat drying temperature of red jambo (*Syzygium malaccense*). *Research, Society and Development*, 9(3), e40932382. doi: 10.33448/rsd-v9i3.2382

Rodrigues D & Matajs R. (2006). Um banho de sol para o Brasil: o que os aquecedores solares podem fazer pelo meio ambiente e a sociedade. *Ed. Vitae Civilis*. Acesso em 15 abril, em: <https://ufsj.edu.br/portal-repositorio/File/mestradoenergia/UmBanhoDeSol.pdf>

Santos N, Almeida R, Pereira T, Queiroga A, Silva V, Amaral D, Almeida R, Ribeiro V, Barros E & Silva L. (2020a). Mathematical modeling applied to the drying kinetics of pitomba bark (*Talisia esculenta*). *Research, Society and Development*, 9(2), e46921986. doi: 10.33448/rsd-v9i2.1986

Santos N, Almeida R, Silva L, Muniz C, Pereira T, Silva V, Ribeiro V, Moreira F, Pinheiro W & Eduardo R. (2020b). Determination of kinetic parameters during the pineapple peel drying process. *Research, Society and Development*, 9(4), e06942794. doi: 10.33448/rsd-v9i4.2794

Silva LRC, Ribeiro MBM, Oliveira AD, Silva CS, Faria EV & Santos KG. (2019). Destilação solar do solvente etanol proveniente da extração de óleo de coco. *Brazilian Journal of Development*, 5, 28964-28982. doi: 10.34117/bjdv5n12-066

Silva S & Sousa N. (2020). Auxiliary solar heating system: simulation and control. *Research, Society and Development*, 9(3), e188932730. doi: 10.33448/rsd-v9i3.2730

Siqueira V, Mabasso G, Quequeto W, Silva C, Martins E & Isquierdo E. (2020). Drying kinetics and effective diffusion of watermelon seeds. *Research, Society and Development*, 9(4), e16942887. doi: 10.33448/rsd-v9i4.2887

Smitabhindu R, Janjai S & Chankong V. (2007). Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. *Renewable Energy*, (33), 1523-31. doi: 10.1016/j.renene.2007.09.021

Stoppe ACR, Vieira Neto JL & Santos KG. (2020). Development of a fixed bed solar dryer: experimental study and CFD simulation. *Research, Society and Development*, 9(3), e123932667. doi: 10.33448/rsd-v9i3.2667

Taşeri L, Aktaş M, Şevik S, Gülcü M, Uysal Seçkin G & Aktekeli B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food Chemistry*, 260(November 2017), 152–9. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.03.122

Tavares FP, Silvério BC, Vieira Neto JL & Santos KG. (2019). Extração sustentável de óleo de pinhão manso com solvente aquecido por radiação solar. *Brazilian Journal of Development*, 5, 28909-25. doi: 10.34117/bjdv5n12-062

Tavares SR & Sousa NG. (2019). Sistema de aquecimento solar de água: simulação e análise. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 4(1), 15-31. doi: 10.18554/rbcti.v4i1.3360

Téllez MC, Figueroa IP, Téllez BC, Vidaña ECL & Ortiz AL. (2018). Solar drying of Stevia (Rebaudiana Bertoni) leaves using direct and indirect technologies. *Solar Energy*, 159 (November 2017), 898–907. doi: 10.1016/j.solener.2017.11.031

Vásquez J, Reyes A & Pailahueque N. (2019). Modeling, simulation and experimental validation of a solar dryer for agro-products with thermal energy storage system. *Renewable Energy*, 139, 1375–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.085>

Venturin A & Silva L. (2019). Modeling and simulation of paddy drying: a bibliometric analysis. *Research, Society and Development*, 8(1), e4881658. doi: 10.33448/rsd-v8i1.658

Zhang M, Tang J, Mujumdar AS & Wang S. (2006). Trends in Microwave Related Drying of Fruits and Vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 524-34. doi: 10.1016/j.tifs.2006.04.01

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Erica Victor Faria – 50%

Nadia Guimarães Sousa – 25%

Kássia Graciele dos Santos – 25%