

Avaliação de um sistema de secagem solar de abacaxi utilizando bentonita, carvão vegetal e arroz, separadamente, como dessecantes para o ar de secagem

Evaluation of a pineapple solar drying system using bentonite, charcoal and rice, separately, as desiccants for air drying

Evaluación de un sistema de secado solar de piña utilizando bentonita, carbón vegetal y arroz, por separado, como dessecantes para el secado al aire

Recebido: 15/06/2022 | Revisado: 29/06/2022 | Aceito: 06/07/2022 | Publicado: 16/07/2022

João André Soares e Sousa da Conceição

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-2587>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: andresoaresd@gmail.com

Marcelo Bezerra Grilo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6415-5058>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: griloufcg@yahoo.com.br

Vitor Leão Santana

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7663-9471>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: vitorlsantana@gmail.com

Jonas Fernando de Souza Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0444-0391>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: jonasengmecanica@gmail.com

Ítalo de Andrade Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6537-4394>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: eng.iagomes@gmail.com

Nancy Lima Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5313-5070>
Universidade de Pernambuco, Brasil
E-mail: nancy.costa@upe.br

Arnaldo Bezerra Lopes de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3572-9526>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: lopes.aa1976@gmail.com

Nórtton Leornado Teodório Rafael

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5820-4300>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: nortonleonardo15@gmail.com

Wellington Souza Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7344-2270>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: wellington.lima@dee.ufcg.edu.br

Allan Willian Luduvico de Aquino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5281-3316>
Centro Universitário Maurício de Nassau, Brasil
E-mail: allan_willian_2011@hotmail.com

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar um sistema de secagem solar de exposição direta de baixo custo, fácil operação, acessível aos produtores da agricultura familiar e de elevada eficiência que utiliza dessecante para o ar de secagem na cidade de Campina Grande – PB. A metodologia utilizada consistiu na construção de dois secadores de características e dimensões idênticas, que, quando testadas experimentalmente, um deles estava (integrado) a uma unidade dessecante (câmara dessecante) enquanto o outro estava sem câmara. As temperaturas de saída obtidas nos secadores com e sem câmara dessecante foram próximas, diferente do valor da umidade relativa do ar. A média de umidade relativa do ar de secagem registrada foi de aproximadamente 16,8% no secador com dessecante, enquanto no secador sem dessecante a média foi de aproximadamente 17,6%. Os dados coletados possibilitaram a realização do balanço de energia do secador solar, resultando no cálculo do rendimento termodinâmico dos secadores solares, o qual

foi em média 38,89% para os secadores com dessecante e 36,93% para o secador sem dessecante. A média da eficiência mássica do processo de secagem ficou em torno de 99% para o secador com dessecante e 98% para o secador sem dessecante. Por fim, foi possível concluir que o uso de materiais dessecantes pode auxiliar na melhora do rendimento térmico de um equipamento, e que a bentonita foi o dessecante mais eficiente comparativamente ao carvão vegetal e arroz.

Palavras-chave: Secagem de abacaxi; Secador solar; Rendimento térmico; Energia solar.

Abstract

The present work aims to evaluate a low cost direct exposure solar drying system, easy to operate, accessible to family farmers and of high efficiency that uses desiccant for drying air in the city of Campina Grande - PB. The methodology used consisted in the construction of two dryers of identical characteristics and dimensions, which, when experimentally tested, one of them was (integrated) to a desiccant unit (desiccant chamber) while the other was without a chamber. The outlet temperatures obtained in the dryers with and without desiccant chambers were close, different from the value of the relative humidity of the air. The average relative humidity of the drying air recorded was approximately 16.8% in the dryer with desiccant, while in the dryer without desiccant the average was approximately 17.6%. The collected data allowed the realization of the energy balance of the solar dryer, resulting in the calculation of the thermodynamic efficiency of the solar dryers, which was on average 38.89% for the dryers with desiccant and 36.93% for the dryer without desiccant. The average mass efficiency of the drying process was around 99% for the dryer with desiccant and 98% for the dryer without desiccant. Finally, it was possible to conclude that the use of desiccant materials can help to improve the thermal performance of an equipment, and that bentonite was the most efficient desiccant compared to charcoal and rice.

Keywords: Pineapple drying; Solar dryer; Thermal performance; Solar energy.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar un sistema de secado solar de exposición directa de bajo costo, fácil de operar, accesible a los agricultores familiares y de alta eficiencia que utiliza desecante para el secado del aire en la ciudad de Campina Grande - PB. La metodología utilizada consistió en la construcción de dos secadores de idénticas características y dimensiones, los cuales al ser probados experimentalmente uno de ellos estaba (integrado) a una unidad desecante (cámara desecante) mientras que el otro no tenía cámara. Las temperaturas de salida obtenidas en los secadores con y sin cámaras desecantes fueron cercanas, diferentes al valor de la humedad relativa del aire. La humedad relativa promedio del aire de secado registrada fue de aproximadamente 16,8% en el secador con desecante, mientras que en el secador sin desecante el promedio fue de aproximadamente 17,6%. Los datos recolectados permitieron la realización del balance energético del secador solar, dando como resultado el cálculo de la eficiencia termodinámica de los secadores solares, que fue en promedio 38,89% para los secadores con desecante y 36,93% para el secador sin desecante. La eficiencia de masa promedio del proceso de secado fue de alrededor del 99 % para el secador con desecante y del 98 % para el secador sin desecante. Finalmente, se pudo concluir que el uso de materiales desecantes puede ayudar a mejorar el desempeño térmico de un equipo, y que la bentonita fue el desecante más eficiente en comparación con el carbón vegetal y el arroz.

Palabras clave: Secado de piña; Secador solar; Rendimiento térmico; Energía solar.

1. Introdução

A evolução tecnológica levou o homem a um consumo cada vez maior de energia e recursos naturais em todas as formas disponíveis, cujo crescimento exponencial teve início com a Revolução Industrial. Este crescimento não dá sinais de que possa diminuir, contribuindo para uma matriz energética amplamente baseada nos combustíveis fósseis, com uso intensivo de gás natural e derivados de petróleo.

Colocar o conhecimento científico a serviço do desenvolvimento sustentável da humanidade, respeitando os recursos naturais e privilegiando a eficiência energética deve ser a meta do pesquisador moderno, principalmente em países como o Brasil, que tem recursos energéticos renováveis disponíveis e precisa crescer para propiciar seu desenvolvimento.

A secagem é uma operação de transferência de calor e massa, por meio da qual ocorre a redução do teor de água do produto, mediante o fornecimento de energia. O controle do processo de secagem e o conhecimento do mecanismo do movimento de água no produto são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas e reduzindo o consumo de energia (Proetti, 2018).

O objetivo deste trabalho foi analisar, experimentalmente, a influência do uso dos dessecantes: bentonita, carvão vegetal e arroz, no desempenho de um sistema de secagem solar de exposição direta nas condições climáticas da cidade de

Campina Grande, PB.

Os maiores produtores estaduais de abacaxi do País são: Pará com 239,3 milhões de frutos; Paraíba com 217,0 milhões de frutos; e Minas Gerais com 166,7 milhões de frutos. (CONAB, 2020).

2. Sistema de Secagem Solar de Exposição Direta

A utilização da energia solar como alternativa para a realização de secagem tem-se mostrado viável tecnicamente e economicamente (Guerra, 2014). O processo pode ser realizado a céu aberto ou em um equipamento chamado secador solar.

O secador solar de exposição direta é composto pelo coletor solar, que é uma estrutura construída de material isolante térmico, possui uma cobertura transparente responsável pelo efeito estufa no interior e consequente aquecimento do ar circundante e uma bandeja onde o produto a ser seco é depositado (Krang, 2015). De modo geral, sua construção é simples e de baixo custo.

A opção por este tipo de equipamento se deu por ser simples e de fácil construção, rentável, exige menor manutenção, é de fácil manuseio e transporte e é útil para o processamento de vários produtos, como minérios, fatias de frutas e vegetais (Mustayen, 2014).

Além disso, em comparação com o secador solar de exposição indireta e secadores híbridos, os secadores solares de exposição direta apresentam maior rendimento térmico, ficando entre 20% e 40% (Kumar et al. 2016). O desenvolvimento de secadores solares tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores em instituições de ensino nacionais e internacionais (Silva, 2020). Na UFCG o Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) tem desenvolvido várias pesquisas nessa área e já conta com grande experiência na área de secagem solar.

3. Metodologia

Com o objetivo de avaliar os sistemas de secagem, este trabalho é uma pesquisa de natureza quantitativa, a qual tem por objetivo demonstrar, de forma quantificada, a importância dos dados coletados em uma verificação experimental.

Os secadores solares desenvolvidos nessa pesquisa, a saber, um sistema de secagem solar sem unidade dessecante e um sistema de secagem solar com unidade dessecante, são adaptações do sistema de secagem desenvolvidos e testados por Fernandes (2021) e Gomes (2021). Suas principais características construtivas são:

- ✓ Material de base: Poliestileno expandido 25 mm revestido com chapa de alumínio;
- ✓ Utilização de uma telha de fibrocimento pintada de preto fosco, usada como capacitor térmico;
- ✓ Dimensões 90 cm x 120 cm x 12 cm;
- ✓ Dimensões da entrada de ar: 50 cm x 3 cm;
- ✓ Dimensões da saída de ar: 40 cm x 3 cm;
- ✓ Convecção forçada por meio de um cooler de computador na entrada do sistema de secagem de 12V e 0,23 A;
- ✓ Volume interno de 129,6 litros;
- ✓ Cobertura de policarbonato alveolar transparente de 4 mm;
- ✓ Unidade dessecante feita com uma caixa de polietileno de 17 litros contendo 2 kg de bentonita, carvão vegetal e arroz, testados separadamente.

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT), na Universidade Federal de Campina Grande, na cidade de Campina Grande, PB. Os dados de radiação solar foram fornecidos pelo Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), também localizado na Universidade Federal de Campina Grande.

Grilo (2007) recomenda que o secador solar, quando fixo, esteja posicionado voltado para o norte geográfico, com uma inclinação igual à latitude local mais uma inclinação de 10° a 15°. Seguindo esta recomendação, neste estudo foi utilizada uma inclinação de 20°.

Para a obtenção dos dados referentes a temperatura do ar e umidade relativa do ar durante o processo de secagem, necessários para o cálculo do rendimento térmico, foi desenvolvido um sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) utilizando uma plataforma de prototipagem eletrônica do tipo Arduino, com sensores de medição de temperatura e umidade relativa do ar do tipo DHT22. O posicionamento dos sensores durante a realização dos experimentos está ilustrado na Figura 1. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem foram obtidos a cada minuto e gravados em periférico para posterior tratamento.

Figura 1: Posicionamento dos sensores nos sistemas de secagem solar.



Fonte: Autoria própria.

No processo de secagem foram utilizadas fatias de abacaxi do tipo pérola adquiridas no mercado local, observando-se a uniformidade e grau de maturação dos produtos. Os frutos selecionados foram higienizados, descascados e cortados manualmente em rodela de aproximadamente $1,0 \pm 0,2$ cm. O miolo do produto foi retirado para se evitar o gosto amargo ao final da secagem, conforme descreve (Costa, 2022). e na sequência as amostras foram pesadas e colocadas nos sistemas de secagem

As amostras foram dispostas no centro do secador e foram pesadas em uma balança digital com resolução de 0,01 g, a cada 60 min. A cada pesagem os dados de massa foram registrados para que posteriormente fosse possível plotar o gráfico de decaimento da massa de água do abacaxi em função do tempo de experimento.

Os experimentos tiveram início sempre as 09:00 h, horário de Brasília, e foram finalizados as 16:00 h, sendo realizado dois dias de secagem para cada material dessecante. Com isso todos os experimentos tiveram o mesmo tempo de duração de 14 horas.

3.1 Secagem

A secagem é uma operação unitária caracterizada pela transferência simultânea de calor e massa entre o ar circundante e o produto a ser seco. Na secagem de minérios e alimentos, em particular de frutas, a redução da quantidade de água ocorre até um nível no qual seu metabolismo e/ou dos microrganismos a ele associados sejam minimizados. (Lima, 1999; Costa, 2018).

A composição mássica de um produto a ser seco é formada por fração de massa de matéria seca e outra de massa de água (Leite Filha, 2021), como representado na Equação (1).

$$m_t = m_{ms} + m_{H_2O} \quad (1)$$

onde,

m_t – Massa total do produto, (g);

m_{H_2O} – Massa de água contida no produto, (g);

m_{ms} – Massa de matéria seca do produto, (g);

A remoção de água durante o processo de secagem é calculada em função do teor de água inicial e final do produto a ser seco e da massa total do produto no início do processo.

O teor de água pode ser expresso em relação a massa de matéria seca ou em relação a massa total do produto a ser seco, como é expresso pelas Equações (2) e (3).

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} \quad (2)$$

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (3)$$

onde,

X_{bu} – teor de água, em base úmida, do produto (%);

X_{bs} – teor de água, em base seca, do produto (%).

Em geral utiliza-se o teor de água em base úmida em situações comerciais, como por exemplo no critério de classificação de frutas, secas ou desidratadas, da Anvisa e de minérios; e o teor de água em base seca é utilizado em trabalhos científicos, com por exemplo na modelagem matemática da cinética de secagem (Gomes, 2015).

Para determinação do teor de água do abacaxi, as amostras, após a secagem solar, foram levadas a uma estufa de Secagem e Esterilização SL-100 a uma temperatura de 100°C por um período de 24 h para a obtenção da massa de equilíbrio. Em seguida, as amostras eram mantidas sob as mesmas condições por mais um período de 24 h para a obtenção da massa seca do produto, conforme metodologia empregada por *Farias (2011), sendo possível a determinação da massa de água do produto.

3.2 Rendimento térmico do sistema de secagem

O rendimento térmico do sistema de secagem foi obtido por meio da aplicação do balanço de energia levando em consideração dados referentes à temperatura e umidade relativa do fluido de trabalho. Como o SMAD desenvolvido mede e registra os dados de temperatura e umidade relativa do ar, essas informações serão utilizadas para calcular o rendimento térmico do sistema durante a realização dos experimentos.

Para isso, faz-se necessário a aplicação do Princípio da Conservação da Energia e de Massa para um volume de controle e da Primeira Lei da Termodinâmica (Moran, 2018) descritas a seguir:

Princípio de Conservação de Massa: A taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle no instante (t) é igual a taxa temporal de fluxo de massa através da entrada (e) no instante (t) menos a taxa temporal de fluxo de massa através da saída

(s) no instante (t).
$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (4)$$

Este enunciado pode ser representado simbolicamente como:

onde,

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ - taxa temporal da variação de massa contida no interior do volume de controle ($\frac{kg}{s}$);

\dot{m}_e e \dot{m}_s - taxas de fluxo de massa instantâneas na entrada e saída, respectivamente ($\frac{kg}{s}$).

Neste trabalho, será considerado um escoamento unidimensional para o fluido; assim, a taxa de fluxo de massa pode ser calculada pela Equação 5.

$$\dot{m} = \rho AV \quad (5)$$

onde,

ρ - massa específica do fluido de trabalho ($\frac{kg}{m^3}$);

A - área através da qual o fluido escoar (m^2);

V - Velocidade de escoamento do fluido de trabalho ($\frac{m}{s}$).

Primeira Lei da Termodinâmica (Lei da Conservação de Energia): A taxa temporal de variação da energia armazenada no interior de um volume de controle no instante t é igual à diferença entre as taxas totais de transferência de energia de entrada e saída. Em linguagem simbólica, a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser representada pela Equação 6.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (6)$$

onde,

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ - taxa temporal da variação de energia contida no interior do volume de controle (W);

\dot{Q}_{vc} - taxa de transferência de calor ao longo da fronteira do volume de controle (W);

\dot{W}_{vc} - taxa de transferência de trabalho ao longo da fronteira do volume de controle (W);

\dot{m}_e e \dot{m}_s - taxas de fluxo de massa instantâneas na entrada e saída, respectivamente ($\frac{kg}{s}$);

v_e e v_s - velocidade do fluido na entrada e saída, respectivamente, do volume de controle ($\frac{m}{s}$);

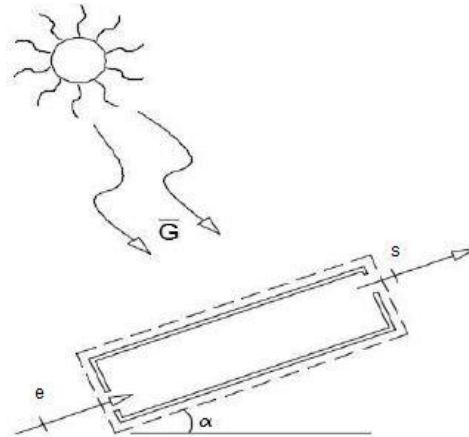
g - Aceleração da gravidade ($\frac{m}{s^2}$);

z_e e z_s - valor absoluto da posição vertical da entrada e saída, respectivamente, do volume de controle (m);

h_e e h_s - entalpia específica do fluido na entrada e saída, respectivamente, no volume de controle ($\frac{kJ}{kg}$).

Para calcular o rendimento térmico do sistema de secagem proposto neste trabalho, foi considerada a representação esquemática do volume de controle ilustrado na Figura 2. (Montgomery, 2017)

Figura 2: Representação esquemática do volume de controle.



Fonte: Adaptado de Nunes (2016).

Ao analisar o volume de controle para o secador solar proposto, deve-se levar em consideração que a massa de ar que sai é igual a massa de ar que entra, mais a massa de água, retirada do abacaxi, cuja equação matemática é dada por:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_e + \dot{m}_{\text{água retirada do produto}} \quad (7)$$

onde,

\dot{m}_s - Vazão mássica de ar na saída do volume de controle (kg/s);

\dot{m}_e - Vazão mássica de ar na entrada do volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_{\text{água retirada do produto}}$ - Vazão mássica da água retirada do abacaxi (kg/s).

Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída do secador solar são iguais, o que é aceitável, dadas as características construtivas e operacionais do equipamento e considerando que o trabalho realizado pelo secador solar é nulo, porque o secador solar não é uma máquina térmica e sim um aparelho térmico, a Equação 6 fica reduzida à Equação 8.

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_e h_e = \dot{m}_s h_s + h_v \dot{m}_{\text{água retirada do produto}} \quad (8)$$

onde,

h_v = entalpia de vaporização da água na temperatura de saída ($\frac{J}{kg}$).

Como \dot{Q}_{vc} é o \dot{Q}_{real} , isto é, \dot{Q}_{vc} é a energia transferida para o fluido de trabalho e denotando

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{\text{água retirada do produto}} \quad (9)$$

A Equação 8 pode ser reescrita como:

$$\dot{Q}_{real} + \dot{m}_e h_e = \dot{m}_s h_s + \dot{E}_b \quad (10)$$

Ao aplicar o conceito de eficiência térmica, pela Segunda Lei da Termodinâmica, para um volume de controle e considerando a vazão mássica de entrada e saída diferentes, dadas as características construtivas do equipamento, obtém-se a Equação 11, a qual representa o rendimento térmico do secador solar proposto.

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{solar}}} = \eta_{\text{secador}} = \frac{m(h_s - h_e) + E_p}{Q_{\text{solar}}} \quad (11)$$

onde,

$$Q_{\text{solar}} = A \cdot \bar{G} \quad (12)$$

sendo,

A - área da cobertura transparente do secador solar (m²);

\bar{G} - Média de irradiação solar incidente sobre o secador solar durante o processo de secagem ($\frac{W}{m^2}$).

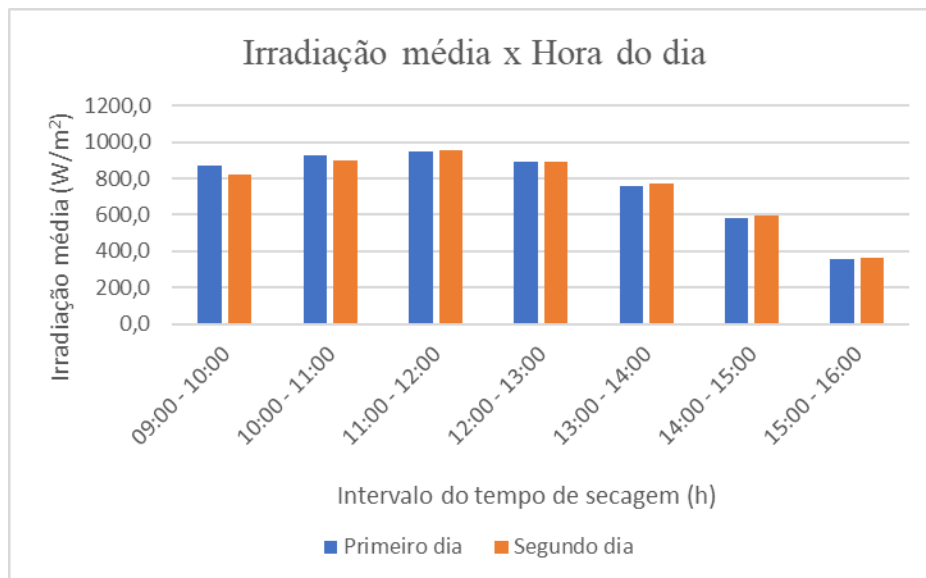
4. Resultados e Discussões

Nesta seção serão apresentadas informações sobre os dados meteorológicos durante a realização dos experimentos, a variação do teor de umidade e rendimento térmico dos secadores de apenas um experimento, realizado nos dias 10 e 11 de setembro de 2021 utilizando 2kg de bentonita como material dessecante.

Durante a realização dos experimentos, a velocidade do ar foi mantida em 1,5 m/s e a vazão mássica foi 0,00540 (kg/s). No primeiro dia do experimento (10/09/2021), a secagem do abacaxi ocorreu de 8:00 h às 16:00 h (oito intervalos de hora). Como, ao fim do primeiro dia, as amostras não haviam atingido a massa final desejada, o experimento foi retomado no dia 11/09/2021, iniciando-se às 8:00 h e encerrando às 16:00 h.

Os valores médios de irradiação solar incidente em (W/m²), ao longo da realização dos experimentos estão ilustrados na Figura 3. As condições meteorológicas da região se mostraram favoráveis em ambos os dias, com altos índices de irradiação solar, pouca nebulosidade e muitas horas de sol.

Figura 3: Valores médios da irradiação solar durante a realização do experimento.

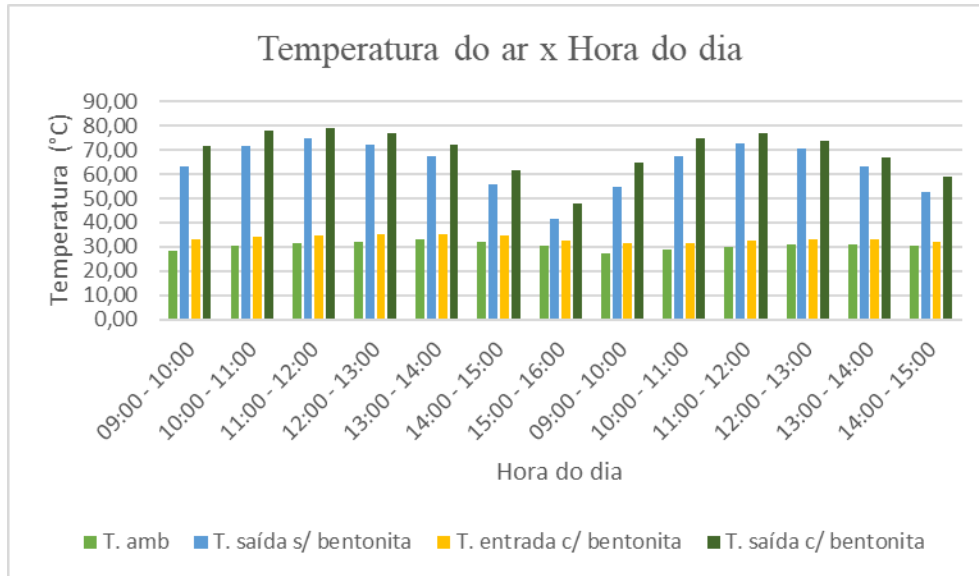


Fonte: LEIAM.

É possível notar que a média de irradiação no período da manhã e no início da tarde foram boas, porém com forte redução a partir das 14 h. Para os dois dias de secagem a média de radiação foi 681,7 W/m².

A variação de temperatura do ar de secagem, medida durante a realização do experimento, é apresentada na Figura 4. É possível observar que o equipamento com bentonita apresenta maior temperatura do ar na entrada do secador solar.

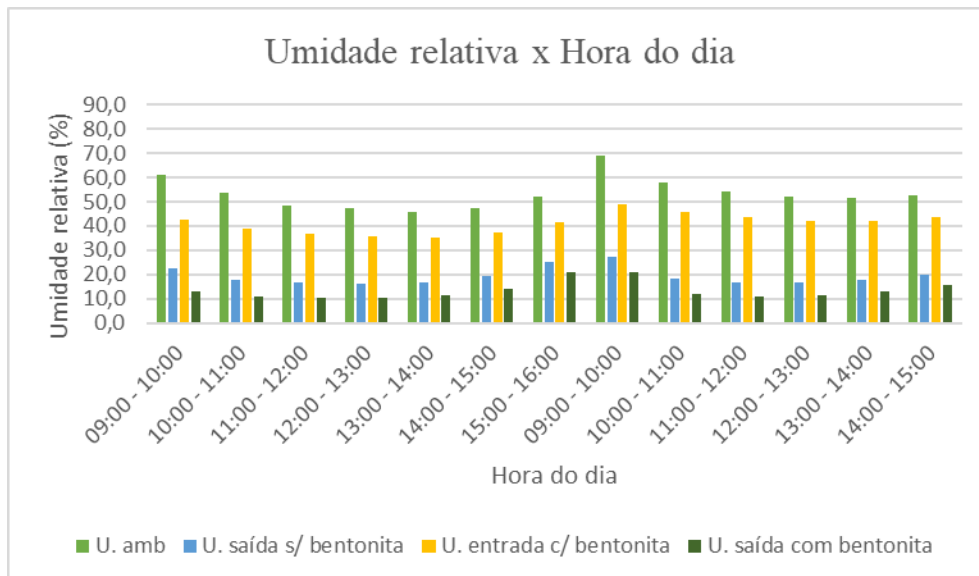
Figura 4: Variação da temperatura do ar nos sistemas de secagem durante a realização do experimento.



Fonte: Autoria própria.

A variação da umidade relativa do ar de secagem durante a realização do experimento é apresentada na Figura 5. Observou-se no ar de entrada uma umidade superior à de saída. Tal fenômeno está relacionado ao aumento de temperatura do ar dentro do secador, e conseqüente expansão do mesmo, o que resulta na diminuição da umidade relativa do ar no interior do secador.

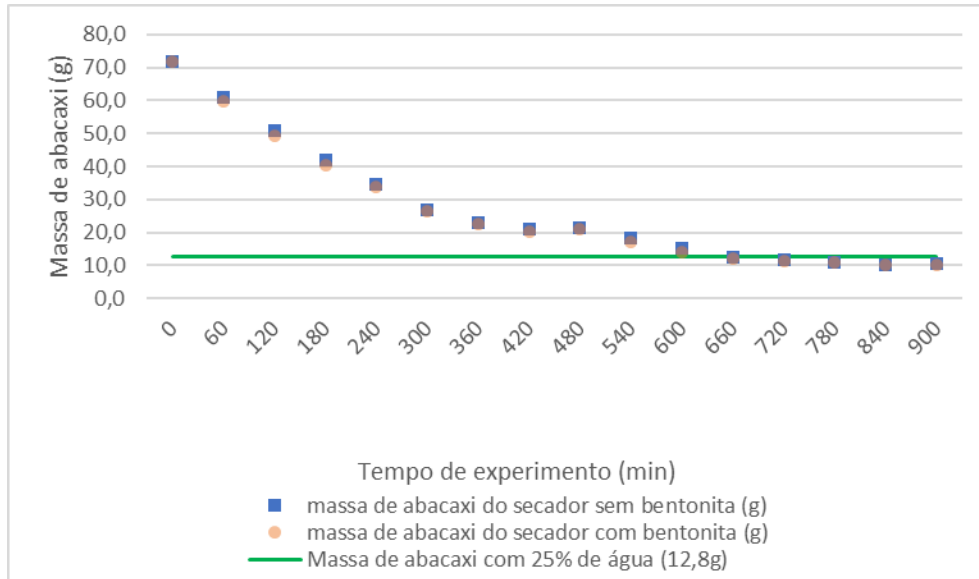
Figura 5: Variação da umidade relativa do ar nos sistemas de secagem durante a realização do experimento.



Fonte: Autoria própria.

A variação do teor de umidade em base úmida nos dois sistemas de secagem é ilustrada na Figura 6, com base nos valores de temperatura e umidade relativa do ar pode-se inferir que como o ar entrou no sistema com dessecante temperatura maior e umidade relativa do ar reduzida, o decaimento do teor de umidade ocorreu mais rápido nesse sistema de secagem do que no sem dessecante.

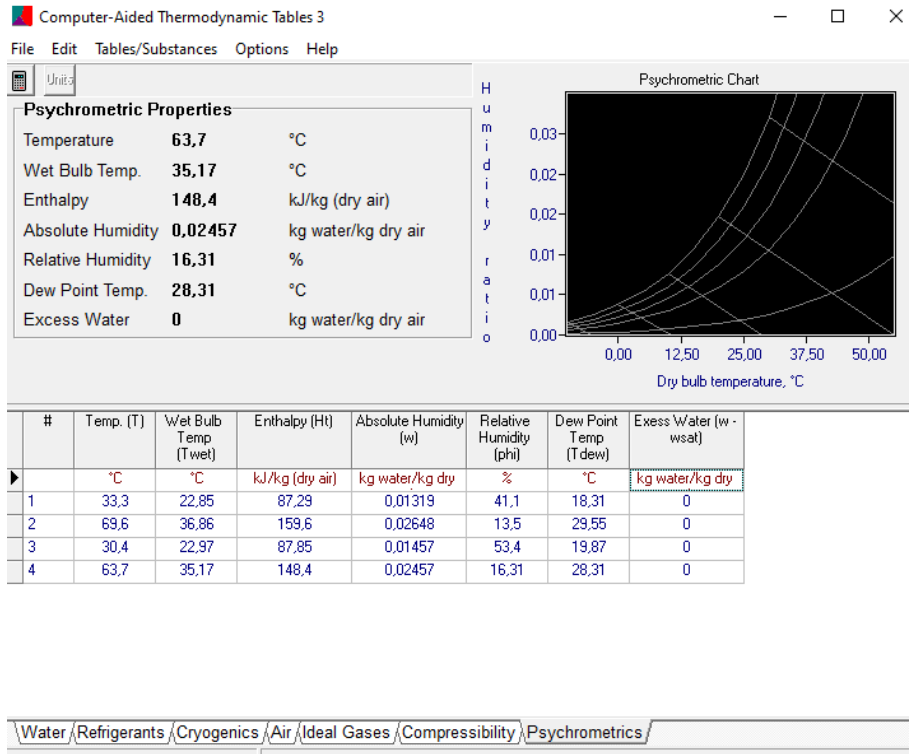
Figura 6: Teor de umidade em base úmida x tempo de secagem.



Fonte: Autoria própria.

Os dados de entalpia do ar de secagem e entalpia de vaporização da água foram obtidos pelo *software Computer-Aided Thermodynamic Tables 3 (CATT3)*, a partir da temperatura, umidade do ar na entrada e saída do sistema de secagem e da pressão atmosférica. A Figura 7 mostra a inserção desses dados no *software* e as características psicométricas do ar, obtidas a partir das curvas psicométricas. Aplicando na Equação 11 é possível calcular o rendimento térmico do equipamento – no caso, de ambos os secadores – e assim avaliar a eficiência do equipamento. A utilização de *softwares* e ferramentas para estimar as condições do fluido de secagem é uma técnica importante no auxílio da compreensão das características termodinâmicas do processo e permite determinar a entalpia - energia térmica envolvida em uma reação ou processo químico. Comparando as entalpias de entrada e de saída e relacionando com a quantidade de energia recebida pelo processo pelo sol – energia solar – pode-se assim determinar quanto da energia fornecida ao sistema foi transformada em trabalho e resultou na retirada de água do produto.

Figura 7: Dados termodinâmicos do experimento obtidos pelo CATT.



Fonte: Autoria própria.

Substituindo os valores para o secador com bentonita, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{solar}}} = \frac{0,00540 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(159,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 87,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 289,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,143 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1,176 \text{ m}^2 \cdot 0,682 \frac{\text{kJ}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}} = 48,60\%$$

Substituindo os valores para o secador sem bentonita, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{solar}}} = \frac{0,00540 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(148,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 87,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 266,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,143 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1,176 \text{ m}^2 \cdot 0,682 \frac{\text{kJ}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}} = 40,80\%$$

Nota-se que o sistema que apresenta bentonita apresentou maior rendimento térmico comparado com o sistema de secagem sem dessecante, esse aumento da eficiência térmica significa menor tempo de secagem.

5. Conclusões

Com base nos resultados, pode-se inferir que:

- ✓ A utilização da unidade dessecante acarretou no aumento da temperatura e redução da umidade relativa do ar, características favoráveis para a realização do processo de secagem;
- ✓ O tempo de secagem necessário para que o abacaxi atingisse teor de umidade, em base úmida, de 25% no sistema de secagem sem unidade dessecante e no sistema de secagem com unidade dessecante foi de 660 min e 780 min, respectivamente, ou seja, houve uma redução de 180 min no tempo de secagem do abacaxi com a utilização da unidade dessecante.
- ✓ O rendimento térmico do secador com dessecante apresentou valores maiores do que o sistema sem unidade dessecante.

- ✓ A operação dos sistemas de secagem foi executada sem necessidade de ações de elevada complexidade, o que comprova sua facilidade de operação, tornando-o uma tecnologia apropriada para inserção na agricultura familiar.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar testes experimentais com a carga máxima de amostras no equipamento; realizar testes em diversas épocas do ano e com diferentes frutas e vegetais para analisar a influência dessas variáveis no tempo de secagem e no rendimento térmico do equipamento.

Referências

- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. **A participação do abacaxi no desenvolvimento econômico nas regiões produtoras**. Fevereiro/2020a. https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-daconab/item/download/30706_fec8df8c31ba1fa1fd923e1c0b86baee
- Costa, A. R. S. (2018). *Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática*. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Costa, N. L., Leite Filha, M. De S., Conceição, J. A. S. E S. Da ., Gomes, Ítalo de A., Santana, V. L., Fernandes, J. F. De s., Lima Junior, C. De, Grilo, M. B. (2021) Avaliação de um sistema de secagem solar de exposição direta para abacaxi sob as condições meteorológicas do semiárido nordestino. *Research, Society and Development*, 10(8), e3191081739910.33448/rsd-v10i8.17399. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/17399>.
- Costa, N. L. Desenvolvimento experimental de um sistema de secagem solar em regiões com dados meteorológicos distintos. 2022. 241p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande 2022.
- Farias, R. P. (2011). *Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos*. (2011). Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Fernandes, J. F. S. (2021). *Desenvolvimento experimental de um secador solar especial com sílica gel como dessecante do ar de secagem*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Guerra, M. I. S. & Varella, F. K. O. M. (2014). Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró/RN. *Revista Holos*, 4(2014), 241-268. <https://doi.org/10.15628/holos.2014.1266>. <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1266>.
- Gomes, I. de A. & Grilo, M. B. (2015). Utilização de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético na Desidratação de Abacaxi.: *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, Fortaleza.
- Gomes, Í. A. (2021). Dimensionamento e Otimização de um Secador Solar de Frutas Utilizando o Método do Planejamento Experimental Fatorial. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Grilo, M. B. (2007). *Fundamentos da Energia Solar: conceitos básicos e aplicações*. Editora da Universidade Federal de Campina Grande, EDUFPG.
- Krang, E. G., Onwe, D. N. & Onda, D. O. (2015). Development of a direct passive solar dryer for crayfish (*Procambarus clarkii*). *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, 4 (2): 153-164.
- Kumar, m., Sansaniwal, s. K. & Hatark, p. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501237X>
- Leite Filha, M. De S., Silva, M. B., Gomes, Ítalo De A., Grilo, M. B., Costa, N. L., Conceição, J. A. S. E S. Da, Santana, V. L., Fernandes, J. F. de S. (2021) Desenvolvimento de um coletor solar plano para um sistema de secagem utilizando o planejamento experimental fatorial. *Research, Society and Development*, 10(7), e39010716755 10.33448/rsd-v10i7.16755. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/16755>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- Lima, A. G. B. (1999). *Fenômeno de Difusão em Sólidos Esferoidais Prolatos. Estudo de caso: secagem de banana*. 1999. 265p., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Unicamp. 1999.
- Montgomery, D. C (2017). *Design and Analysis of Experiments*. (9a ed.), John Wiley & Sons.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. (8a ed.), John Wiley & Sons.
- Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S., Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463-470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.020>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001816#bibliog0005>
- Nunes, A. G. (2016). *Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para a secagem de frutas*. 198p.Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande-UFPG. Campina Grande.
- Proetti, S. (2018). As pesquisas qualitativa e quantitativa como métodos de investigação científica: Um estudo comparativo e objetivo. *Revista Lumen*, 4(2). <http://dx.doi.org/10.32459/revistalumen.v2i4.60>. Disponível em: <http://www.periodicos.unifai.edu.br/index.php/lumen/article/view/60>.
- Silva, S. T & Sousa, N. G. (2020). Uso da energia solar como fonte alternativa para o aquecimento de utilidades: simulação e controle. *Research, Society and Development*. 9(3). <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2730>. https://www.researchgate.net/publication/340241851_Uso_da_energia_solar_como_fonte_alternativa_para_o_aquecimento_de_utilidades_simulacao_e_contr con.