

Secagem de caulim usando energia solar: avaliação da cobertura de policarbonato e cobertura de polipropileno para as condições climáticas de Campina Grande - PB

Kaolin drying using solar energy: evaluation of polycarbonate roofing and polypropylene roofing for the climatic conditions of Campina Grande – PB

Secado de caolín con energía solar: evaluación de cubiertas de policarbonato y cubiertas de polipropileno para las condiciones climáticas de Campina Grande – PB

Recebido: 17/03/2022 | Revisado: 23/03/2022 | Aceito: 29/03/2022 | Publicado: 05/04/2022

Vitor Leão Santana

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

Rayanne de Oliveira Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3799-7452>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: rayanneoli96@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

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

Maria de Sousa Leite Filha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-3979>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: mariadslfilha@gmail.com

João André Soares e Sousa da Conceição

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-2587>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: joao.andre@estudante.ufcg.edu.br

Araldo Bezerra Lopes de Almeida

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

Resumo

Esse trabalho teve como objetivo contribuir para avaliar um sistema de secagem solar usado na secagem de caulim, desenvolvido para ser aplicado na região da Província Pegmatítica da Borborema (PPB). Foi analisado o processo de secagem para as condições climáticas da cidade de Campina Grande no estado da Paraíba, comparando-se as vantagens e desvantagens do uso de três tipos de cobertura no sistema de secagem solar: policarbonato, polipropileno e sem cobertura. Como metodologia, foram realizados três experimentos, sendo dois em secadores solares idênticos, de exposição direta, um com cobertura de policarbonato e outro com cobertura de polipropileno, o terceiro experimento foi com secagem solar ao ar livre. Os experimentos foram realizados no mesmo dia e na mesma localidade, para permitir as comparações. Foram avaliados o tempo de secagem do caulim, o rendimento térmico de cada sistema de secagem, também a quantidade de água retirada do caulim por unidade de tempo e o consumo específico de energia, para cada

experimento. O caulim utilizado possuía teor de umidade inicial, em base úmida, de 30%, e cada amostra de caulim possuía 1000 g. Os principais resultados experimentais obtidos mostraram que a secagem solar reduziu a umidade do caulim de 30% para 5%, deixando-o em condições adequadas às etapas seguintes de beneficiamento. Como conclusão, observou-se que o secador solar com cobertura de policarbonato se mostrou mais eficiente termicamente (38,24%) em comparação ao secador com cobertura de polipropileno (35,59%), além do caulim seco atingir o teor de água em base úmida desejado em menor tempo. O secador com cobertura de policarbonato também obteve índices de consumo específico de energia menores, demandando assim menos energia para realizar o processo de secagem.

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

Abstract

This work aimed to contribute to the evaluation of a solar drying system used in the drying of kaolin, developed to be applied in the region of the Pegmatitic Province of Borborema (PPB). The drying process was analyzed for the climatic conditions of the city of Campina Grande in the state of Paraíba, comparing the advantages and disadvantages of using three types of coverage in the solar drying system: polycarbonate, polypropylene and without coverage. As a methodology, three experiments were carried out, two in identical solar dryers, with direct exposure, one with a polycarbonate cover and another with a polypropylene cover, the third experiment was with solar drying in the open air. The experiments were performed on the same day and at the same location to allow comparisons. The drying time of the kaolin, the thermal efficiency of each drying system, the amount of water removed from the kaolin per unit of time and the specific energy consumption for each experiment were evaluated. The kaolin used had an initial moisture content, on a wet basis, of 30%, and each kaolin sample had 1000 g. The main experimental results obtained showed that the solar drying reduced the kaolin moisture from 30% to 5%, leaving it in suitable conditions for the following stages of processing. In conclusion, it was observed that the solar dryer with polycarbonate cover was more thermally efficient (38.24%) compared to the dryer with polypropylene cover (35.59%), in addition to the dry kaolin reaching the water content in desired wet base in less time. The dryer with a polycarbonate cover also obtained lower specific energy consumption rates, thus requiring less energy to carry out the drying process.

Keywords: Kaolin drying; Solar dryer; Thermal yield; Solar energy.

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo contribuir a la evaluación de un sistema de secado solar utilizado en el secado de caolín, desarrollado para ser aplicado en la región de la Provincia Pegmatítica de Borborema (PPB). Se analizó el proceso de secado para las condiciones climáticas de la ciudad de Campina Grande en el estado de Paraíba, comparando las ventajas y desventajas de utilizar tres tipos de cobertura en el sistema de secado solar: policarbonato, polipropileno y sin cobertura. Como metodología se realizaron tres experimentos, dos en secadores solares idénticos, con exposición directa, uno con cubierta de policarbonato y otro con cubierta de polipropileno, el tercer experimento fue con secado solar al aire libre. Los experimentos se realizaron el mismo día y en el mismo lugar para permitir las comparaciones. Se evaluó el tiempo de secado del caolín, la eficiencia térmica de cada sistema de secado, la cantidad de agua removida del caolín por unidad de tiempo y el consumo energético específico para cada experimento. El caolín utilizado tenía un contenido de humedad inicial, en base húmeda, del 30%, y cada muestra de caolín tenía 1000 g. Los principales resultados experimentales obtenidos mostraron que el secado solar redujo la humedad del caolín de un 30% a un 5%, dejándolo en condiciones adecuadas para las siguientes etapas de procesamiento. En conclusión, se observó que el secador solar con cubierta de policarbonato fue más eficiente térmicamente (38,24 %) en comparación con el secador con cubierta de polipropileno (35,59 %), además de que el caolín seco alcanzó el contenido de agua en base húmeda deseada en menor tiempo. El secador con cubierta de policarbonato también obtuvo menores índices de consumo energético específico, por lo que requirió menos energía para llevar a cabo el proceso de secado.

Palabras clave: Secado de caolín; 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.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de diferentes coberturas (policarbonato e polipropileno) em secadores usados para a secagem solar de minério do caulim da região da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), nas condições climáticas da cidade de Campina Grande, PB.

2. Caulim

O termo caulim é utilizado tanto para denominar a rocha que contém a caulinita, o seu principal constituinte, quanto para o produto resultante do seu beneficiamento. Caulim é uma rocha de granulometria fina, constituída de material argiloso, normalmente com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca (Grim, 1958).

Em função de suas propriedades físicas e químicas, o caulim pode ser utilizado em uma grande variedade de produtos, com destaque para o seu uso na fabricação de papéis comuns e revestidos, cerâmicas e refratários (Industrial Minerals, 2001).

Segundo Murray (1986), o caulim é uma importante matéria prima para as seguintes indústrias:

- ✓ Papel;
- ✓ cerâmica branca;
- ✓ fibra de vidro;
- ✓ plástico;
- ✓ tintas;
- ✓ borracha;
- ✓ catalisadores para craqueamento de petróleo;
- ✓ concreto de alto desempenho;
- ✓ refratários.

Outras aplicações são: cimento branco, pesticidas, vidros, adesivos, cosméticos etc.

3. 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. 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 conseqüente aquecimento do ar circundante e uma bandeja onde o produto a ser seco é depositado. 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 (Kumar; Singh, 2020).

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. 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.

4. Metodologia

Com o objetivo de avaliar os sistemas de secagem propostos neste trabalho, esta é uma pesquisa de natureza quantitativa, a qual tem por objetivo demonstrar, de forma quantificada, a importância dos dados coletados em uma verificação experimental (Proetti, 2018).

Os secadores solares desenvolvidos nessa pesquisa, a saber, um com cobertura de policarbonato e outro com cobertura de polipropileno, são adaptações do sistema de secagem desenvolvidos e testados por Fernandes (2021) e Gomes (2021). Suas principais características construtivas são:

- ✓ Painel de fibras de média densidade conhecido comercialmente como *Medium Density Fiberboard* (MDF);
- ✓ Utilização de uma telha de fibrocimento pintada de preto fosco, usada como capacitor térmico;
- ✓ Tela de nylon;
- ✓ Volume interno de 55 litros;
- ✓ Cobertura de policarbonato alveolar transparente 4 mm;
- ✓ Cobertura de polipropileno fosco.

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: Autores.

No processo de secagem foram utilizados fragmentos de caulim oriundos da Província Pegmatítica Borborema, da cidade de Assunção, PB. 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.

4.1 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, 2008).

A composição mássica de um produto a ser seco é formada por fração de massa de matéria seca e outra de massa de água, 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.

Para determinação do teor de água do caulim, 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.

4.2 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, 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). Este enunciado pode ser representado simbolicamente como:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (4)$$

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 ($\frac{m}{s}$);

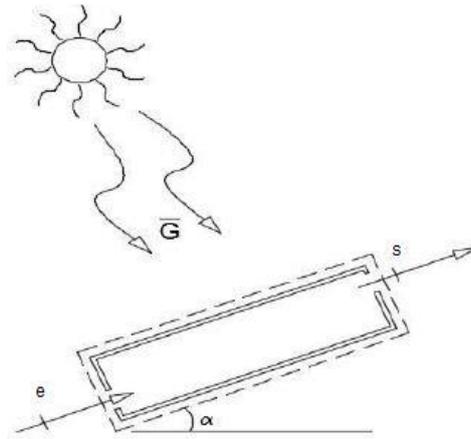
g – Aceleração da gravidade ($\frac{m}{s^2}$);

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.

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 caulim, 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 caulim (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.

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

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.

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{m} (h_s - h_e) + \dot{E}_b}{\dot{Q}_{solar}} \quad (11)$$

onde,

$$\dot{Q}_{solar} = A \cdot \bar{G} \quad (12)$$

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 ($\frac{W}{m^2}$).

4.3 Cálculo da quantidade de massa de água retirada por experimento

Considerando que durante o experimento, o caulim em todas as situações (cobertura de policarbonato, cobertura de polipropileno e ao ar livre) teve a mesma exposição à irradiação solar e durante o mesmo período, é possível comparar a quantidade de massa de água retirada do produto. Para isso, foi desenvolvida uma forma de medir a perda de água do produto em função do tempo total do experimento. Esse indicador mostra a quantidade de água retirada por hora, durante todo o processo. A Equação 14 apresenta os parâmetros necessários para essa determinação:

$$\Delta m / \Delta t = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{t_{\text{total}}} \quad (14)$$

Onde:

$\Delta m / \Delta t$ = Quantidade de água retirada no intervalo Δt (g/h);

m_{inicial} = Massa inicial do produto (g);

m_{final} = Massa final do produto (g);

t_{total} = tempo total do experimento (h).

4.4 Cálculo do consumo específico de energia (CEE) dos processos de secagem

O cálculo do consumo específico de energia, que é a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água presente no produto durante o processo de secagem, foi realizado em todos os testes experimentais. A Equação 14 foi utilizada neste trabalho para determinar o consumo específico dos processos de secagem. O Resultado do cálculo do consumo específico de energia foi um dos principais indicadores de eficiência dos sistemas de secagem estudado neste trabalho e pode ser calculado pela Equação 15.

$$CEE = \frac{EC \cdot (100 - U_f)}{M_i \cdot (U_i - U_f)} \quad (15)$$

Onde:

CEE = consumo específico total de energia em kJ/kg de água evaporada;

EC = energia consumida na secagem (térmica), kJ;

U_i = teor de água inicial do produto, % b.u.;

U_f = teor de água final do produto, % b.u.;

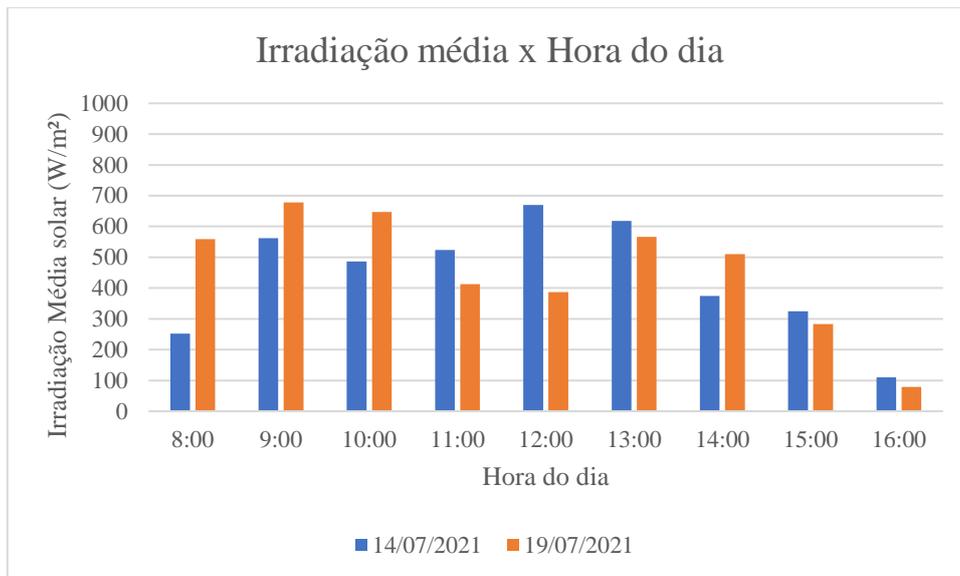
M_i = massa inicial do produto.

5. Resultados e Discussões

Durante a realização dos experimentos, a velocidade do ar foi mantida em 1,4 m/s e a vazão mássica foi 0,0018383 (kg/s). No primeiro dia do experimento (14/07/2021), a secagem do minério de caulim 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 15/07/2021, iniciando-se às 8:00 h e encerrando às 16:00 h.

Os valores médios de irradiação solar incidente em (W/m^2), 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.



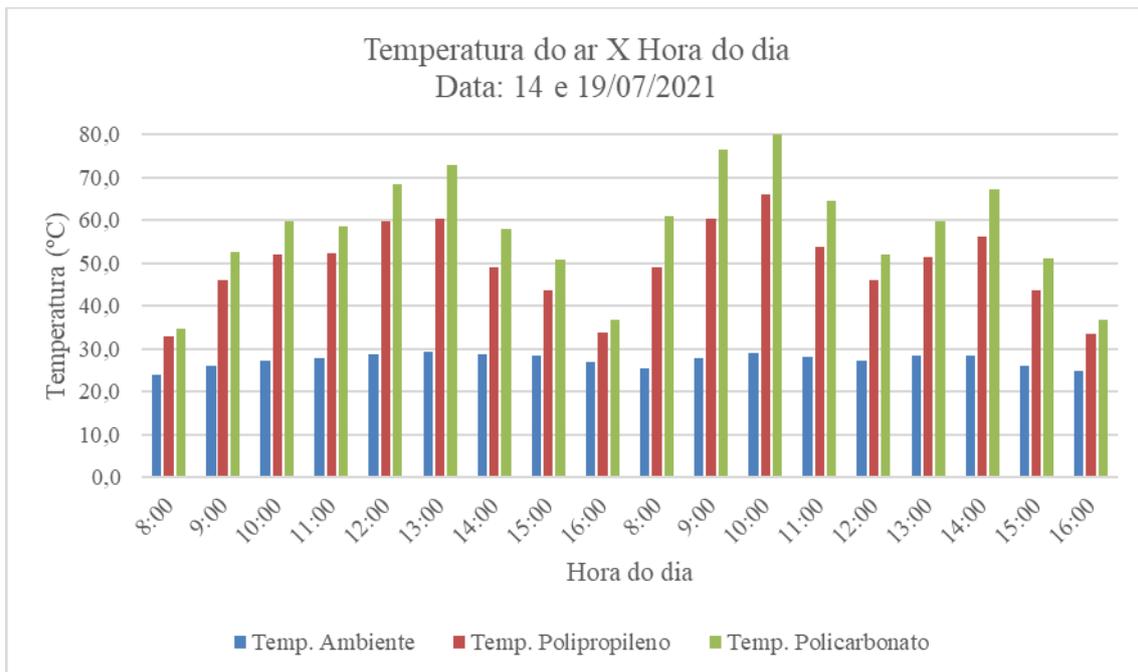
Fonte: INMET.

A média de irradiação solar ao longo dos dois dias foi muito próxima, sendo no primeiro dia da ordem de 435,85 W/m², e no segundo dia, da ordem de 457,88 W/m². Ou seja, uma irradiação solar média de aproximadamente 446,87 W/m².

A variação de temperatura do ar de secagem, medida durante a realização do experimento, é apresentada na Figura 4, onde a primeira coluna representa a temperatura do ar de secagem na entrada dos secadores, que é a temperatura do ar ambiente. A segunda coluna representa a temperatura do ar de secagem na saída do secador solar com cobertura de polipropileno e a terceira coluna representa a temperatura do ar de secagem na saída do secador solar com cobertura de policarbonato. As temperaturas máximas na entrada foram 29,23°C e de saída no valor de 83,02°C, respectivamente.

Observou-se que na saída do secador com cobertura de Policarbonato foram obtidos valores de temperatura superior, com média de 58,02°C, enquanto para o secador com cobertura de polipropileno a média, na saída, foi de 49,43°C. Isso será refletido em um maior rendimento térmico do secador solar com cobertura de policarbonato

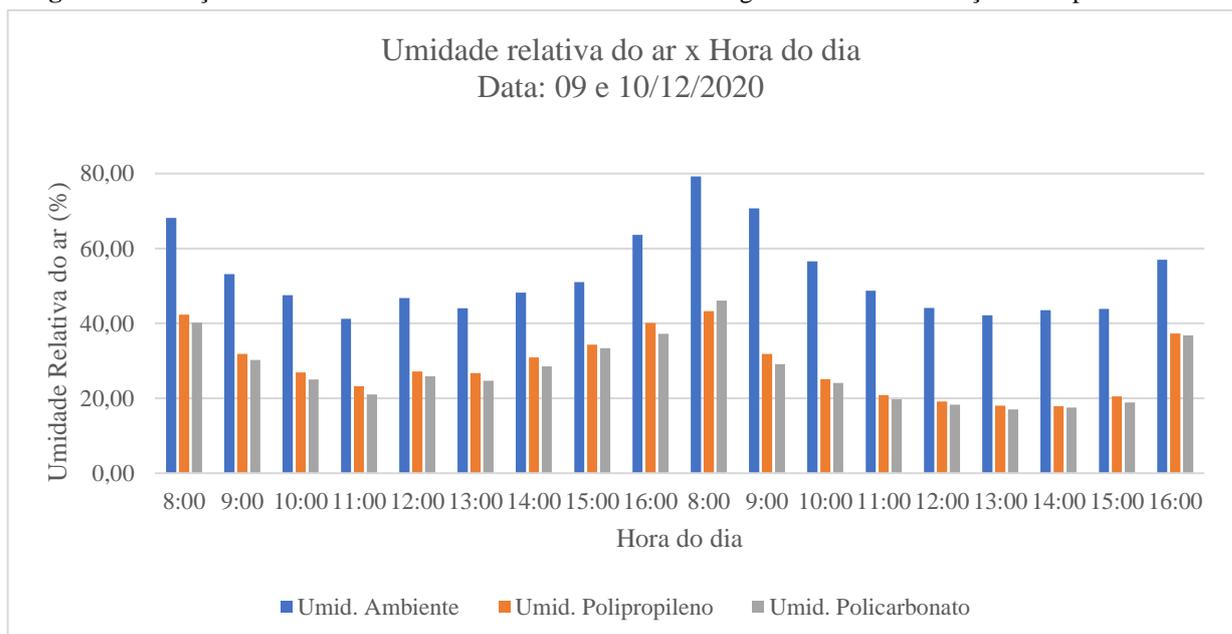
Figura 4: Variação da temperatura do ar nos sistemas de secagem durante a realização do experimento.



Fonte: Autores.

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 consequente 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.

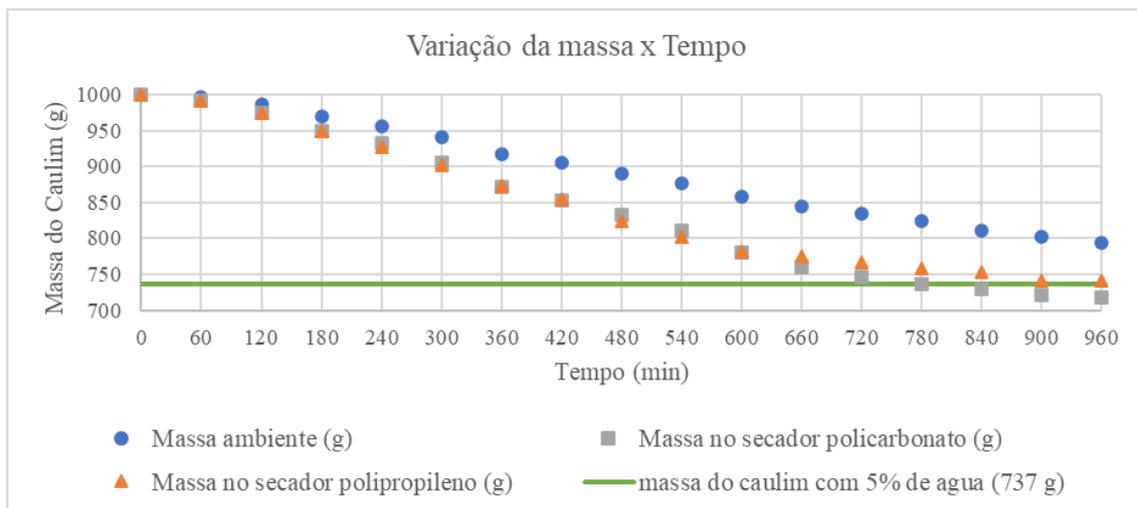


Fonte: Autores.

Neste experimento, foi utilizada uma amostra em cada secador solar. Cada amostra pesava exatamente 1000 g de minério de caulim, e estavam com 30% de teor de umidade inicial. Este valor foi encontrado a partir da secagem até a obtenção da massa seca em estufa, após a realização do experimento.

Para que o minério caulim esteja em condições de seguir para a próxima etapa de beneficiamento, é necessário que o material esteja com teor de umidade inferior a 5%. Os valores obtidos para a variação de massa de caulim durante a secagem nos dois secadores são ilustrados na Figura 6.

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

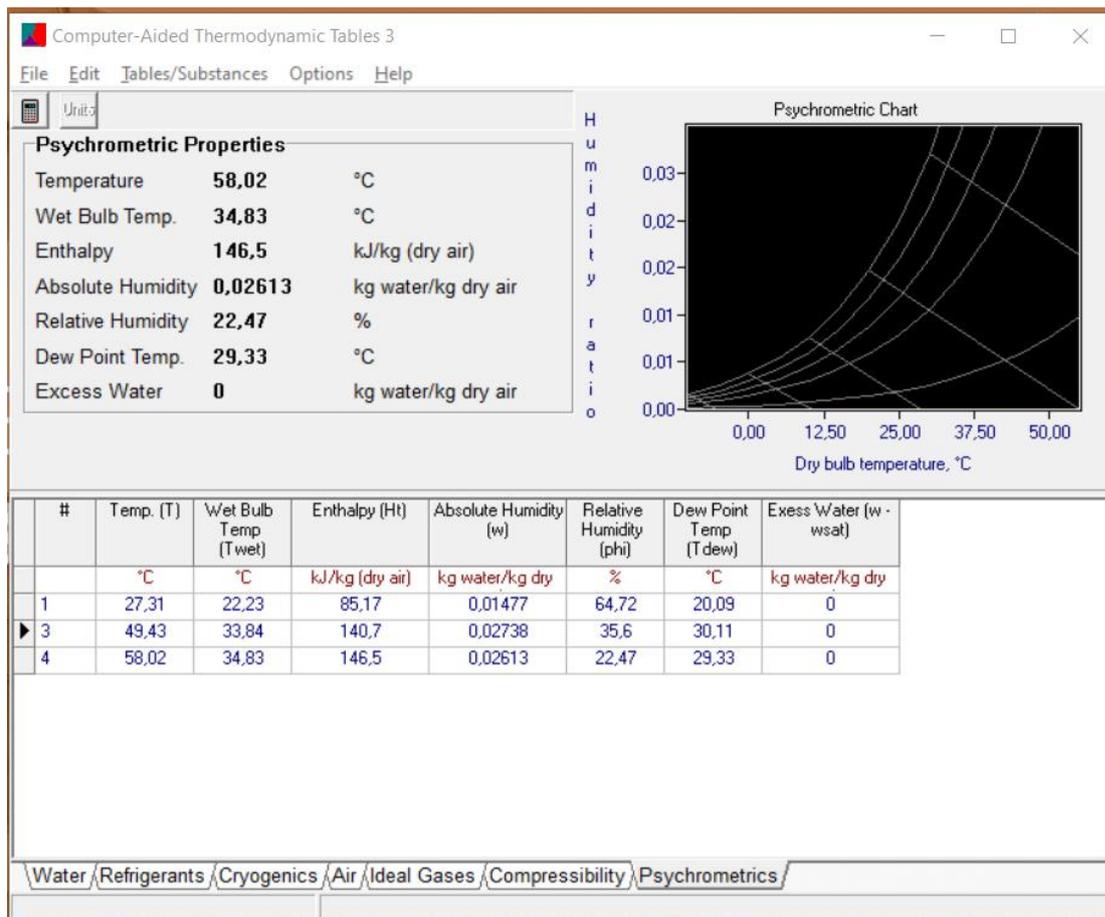


Fonte: Autores.

No secador com cobertura de policarbonato, o teor de umidade desejado para o caulim (5%) foi atingido após 780 min do início da secagem. Já na secagem com o secador de cobertura de polipropileno, tal teor de umidade só foi atingido com 900m de experimento. Na secagem ao ar livre foram necessários 960 min. Portanto, sob as mesmas condições meteorológicas, houve uma redução de 120 min no tempo de secagem do minério de caulim, com a utilização de qualquer um dos secadores solares.

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 10 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 2 obtidos pelo CATT.



Fonte: Autores.

Substituindo os valores para o secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,0018383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(146,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 85,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 146,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{1 \text{ m}^2 \cdot 0,446 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 38,24\%$$

Substituindo os valores para o secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,0018383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(140,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 85,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 140,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{1 \text{ m}^2 \cdot 0,446 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 35,59\%$$

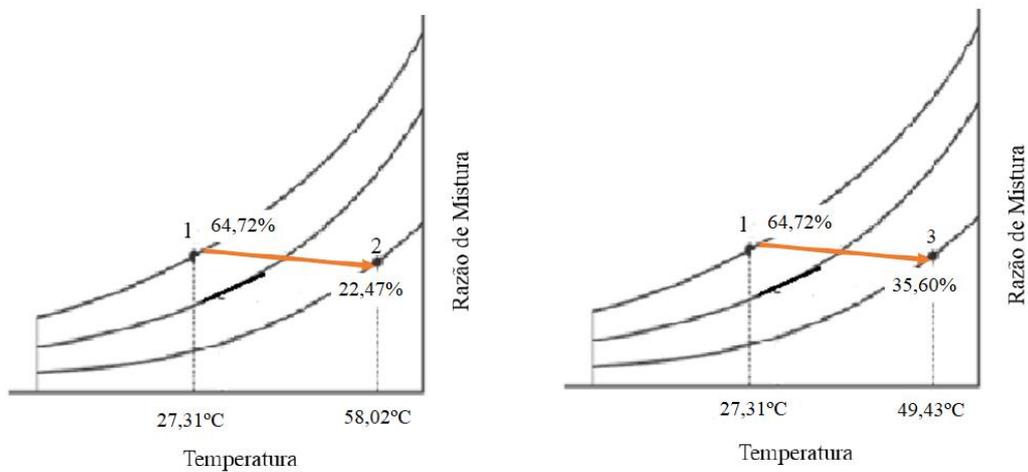
A Figura 8 apresenta, na carta psicrométrica, a média da temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento.

✓ ponto 1 representa o estado termodinâmico 1, na entrada dos sistemas de secagem com secadores – que é a temperatura ambiente;

✓ ponto 2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do secador com cobertura de policarbonato;

✓ ponto 3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do secador com cobertura de polipropileno.

Figura 8. Condições psicrométricas do ar no Experimento.



Fonte: Autores.

Foi realizado o cálculo do Consumo específico de secagem, sendo este mais um índice de comparação entre as três situações.

A energia térmica recebida durante a realização do experimento foi de 3.422,73 Wh/m² no primeiro dia de experimento e 3.714,98 Wh/m² no segundo dia, totalizando 7.136,71 Wh/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de 1 m². Com essas informações, foi possível determinar a energia térmica incidida, multiplicando a irradiação média horária pela área de incidência do coletor. Com base nessas informações, foi possível determinar o consumo específico de energia do experimento, que forneceu informações relevantes para a avaliação da etapa de secagem.

Convertendo em kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada para secagem solar foi de 7.136,71 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento, com o auxílio da equação 11, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE).

Assim, com os dados dos teores de umidade inicial e final do produto, considerando o valor total da amostra do produto utilizado no experimento e a energia térmica recebida pela irradiação solar durante o experimento, foi determinado o consumo específico de energia (CEE). Na Tabela 1 podem ser observados os valores de energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto, bem como o cálculo do consumo específico de energia para cada situação do experimento (Cobertura de policarbonato, Cobertura de Polipropileno e Secagem ao ar livre).

Tabela 1: Valores de Energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Exp para cada situação.

Tipo de sistema de secagem	EC (kWh)	Ui (%bu)	Uf (%bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
Cobertura de Policarbonato	7,14	30	03	1	23,80
Cobertura de Polipropileno	7,14	30	06	1	25,65
Secagem ao ar livre	7,14	30	13	1	26,36

Fonte: Autores.

A Tabela 2 apresenta sintetiza os valores obtidos para cada sistema de secagem solar:

- ✓ Rendimento térmico;
- ✓ Quantidade de água retirada do caulim;
- ✓ CEE.

Tabela 2: Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada no intervalo de tempo e CEE para o experimento.

	Rendimento térmico (%)	Quantidade de água ret. no intervalo de tempo (g/h)	CEE (kJ/kg)
Secador policarbonato	38,24	17,63	23,80
Secador polipropileno	35,59	16,19	25,65
Secagem natural	-	12,88	26,36

Fonte: Autores.

É possível concluir que o secador solar com cobertura de policarbonato apresentou um rendimento térmico superior ao secador com cobertura de polipropileno. Observou-se que, apesar de ambos secarem o produto numa velocidade muito próxima, os rendimentos foram bem diferentes. O consumo específico de energia também mostra qual processo foi mais eficiente e necessitou de menor consumo de energia para a realização da secagem.

6. Conclusões

Com base nos resultados, pode-se inferir que:

- ✓ A utilização de secadores solares acarretou no aumento da temperatura do ar e redução da umidade relativa do ar de secagem, características favoráveis para a realização do processo de secagem;
- ✓ O rendimento térmico do secador com cobertura de policarbonato apresentou valores maiores do que o secador com cobertura de polipropileno
- ✓ Os valores observados dos rendimentos térmicos dos dois sistemas dos secadores estão de acordo com os relatados na literatura;
- ✓ O sistema de secagem com cobertura de policarbonato se mostrou mais eficiente do que o sistema de cobertura de polipropileno nas condições climáticas da cidade de Campina Grande – PB.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar testes experimentais com a carga máxima de amostras no equipamento; realizar testes em diversas épocas do ano e analisar a influência dessas variáveis no tempo de secagem e no rendimento térmico do equipamento. Além disso, testes em grande escala, com quantidades de amostra proporcionais as escalas de produção mineral da região são importantes para o desenvolvimento de projetos de grande porte e que atendam às necessidades e demandas da indústria local.

Referências

- 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. . Avaliação de um sistema de secagem solar de exposição direta para abacaxi sob as condições meteorológicas do semiárido nordestino. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 10, n. 8, p. e31910817399, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i8.17399. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/17399>.
- 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, 241-268.
- Gomes, I. de A. & GRILLO, 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.
- Grilo, M. B. (2007). *Fundamentos da Energia Solar: conceitos básicos e aplicações*. 1 ed. Campina Grande: Editora da Universidade Federal de Campina Grande, EDUFPG.
- Grim, R. (1958). *Clay Mineralogy*. New York: McGraw-Hill, (Geological Science Series), p. 29.
- Islam, M. K., Islam S., Begum, N.N. & Uddin K.Z. (2018). Fabrication and performance study of a direct type solar dryer. *International Journal of Scientific & Engineering Research* ,9 (2): 565-569
- 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.
- 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*, [S. l.], v. 10, n. 7, p. e39010716755, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16755. Disponível em: <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. Campinas, SP. 1999.
- Montgomery, D. C (2017). *Design and Analysis of Experiments*. 9 ed., New York: John Wiley & Sons.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 8 ed. Nova Jersey: 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.
- 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-UFCG. Campina Grande.
- Proetti, S. (2018). As pesquisas qualitativa e quantitativa como métodos de investigação científica: Um estudo comparativo e objetivo. *Revista Lumen*, 2.
- Santana, V. L.; Grilo, M. B. .; Fernandes, J. F. De S.; Costa, N. L. .; Leite Filha, M. De S.; Conceição, J. A. S. E S. Da .; Gomes, Ítalo De A. .; Lima, W. S. .; Almeida, A. B. L. de .(2021) Avaliação de um sistema de secagem solar para o beneficiamento de caulim: cobertura de policarbonato x cobertura de polipropileno. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 10, n. 9, p. e37710918187, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.18187. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18187>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- 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). DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2730>