

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
Departamento de Engenharia de Materiais

Marcelo de Oliveira Ferreira

**Estudo da influência do uso de Chicanas na Eficiência Térmica de  
Coletores Solares de ar para Secadores**

Belo Horizonte

2021

**Marcelo de Oliveira Ferreira**

**Estudo da influência do uso de Chicanas na Eficiência Térmica de Coletores Solares de ar para Secadores**

Monografia apresentada ao Programa de graduação em Engenharia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira.

Belo Horizonte

2021

## Resumo

O processo de secagem foi o primeiro método utilizado para conservação de alimentos, sendo uma das principais operações para remoção da umidade de alimentos. A secagem também é utilizada para reduzir a massa e o volume, reduzindo custos operacionais e de transporte. A secagem artificial, que usa energia elétrica ou proveniente da queima de combustíveis fósseis para aquecimento, apesar de permitir um maior controle das propriedades térmicas do escoamento do ar de secagem, pode apresentar custos impeditivos para algumas aplicações específicas. Os secadores solares apoiam-se em tecnologias que utilizam energia renovável como fonte, com o intuito de amenizar os impactos ambientais gerados e uso de suprimento finito de fonte de energia. Então neste sentido, a secagem em secadores solares tornou-se uma solução interessante, por apresentar custos operacionais reduzidos, e melhor qualidade quando comparada a secagem natural ao sol. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência do uso de chicanas no coletor de um secador solar, que aumenta a trajetória e o tempo de permanência do escoamento de ar dentro do coletor. O coletor foi construído a partir de uma estrutura de madeira, forrada interna e externamente de chapas de aço galvanizado, pintada na cor preto fosco, coberta por placa de vidro e com isolamento interno nas paredes com lã de vidro. Foram realizados testes sem e com a presença das chicanas instaladas, onde mediu-se a velocidade de escoamento do ar, temperatura de entrada e de saída e a radiação solar. Dessa forma foi possível comparar a eficiência térmica nos dois casos, levando em conta as diferentes condições climáticas e atmosféricas onde obteve-se como resultado um aumento na eficiência térmica em mais de 50% com o uso de chicanas. Tal fato ocorreu principalmente pelo aumento do escoamento de ar com as chicanas, maximizando então sua eficiência térmica.

Palavras-chave: secador solar, chicanas, coletor solar, secagem, eficiência térmica.

## **Abstract**

The drying process was the first method used for food preservation, being one of the main processes for removing moisture from food. Drying is also used to reduce mass and volume, decreasing operational and transportation costs. Artificial drying uses electricity or energy from fossil fuels burning to provide heat and, despite allowing greater control of drying airflow thermal properties, it can present impeditive costs for some specific applications. Solar dryers rely on renewable energy technologies as a source, with the aim of mitigating the environmental impacts generated and lowering the use of finite supply energy sources. Therefore, drying through solar dryers has become an interesting solution, as it reduces operating costs, and has better quality when compared to natural drying in the sun. This work presents a study of the influence of the use of baffles on the collector of a solar dryer, which increases the trajectory and the airflow permanence time inside the collector. The dryer was built from a wooden structure, lined internally and externally with galvanized steel sheets, painted in matte black color, covered by a glass plate, and it has internal insulation on the walls made by glass wool. Tests were carried out with and without the presence of baffles, with measurement of airflow velocity, inlet and outlet temperature, and solar radiation. Hence, it was possible to compare the thermal efficiency of the two processes, taking into consideration the different climatic and atmospheric conditions, where the utilization of baffles resulted in an increase of over 50 % in thermal efficiency. This occurred mainly because the dryer could maintain the temperature for a longer time, reaching higher final temperature values, thus maximizing its thermal efficiency.

Keywords: solar dryer, chicanes, drying, thermal efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Principais fluxos de energia na secagem .....	9
FIGURA 2 - Curvas de secagem.....	11
FIGURA 3 - Classificação dos secadores .....	13
FIGURA 4 - Principais componentes de um secador solar .....	14
FIGURA 5 - Classificação de secadores solares.....	16
FIGURA 6 - Linhas de corrente de ar no interior do secador solar.....	18
FIGURA 7 - Estrutura das chicanas .....	19
FIGURA 8 - Caminho do escoamento de ar com chicanas.....	19
FIGURA 9 - Madeira Saligna.....	21
FIGURA 10 - Estrutura de madeira .....	22
FIGURA 11 - Chapas metálicas .....	23
FIGURA 12 - Tesourão .....	23
FIGURA 13 - Dobradeira .....	24
FIGURA 14 - Lã de vidro.....	24
FIGURA 15 - Secador pintado com tinta preta fosca e cobertura de vidro acoplada	25
FIGURA 16 - Termo- higrô-anemômetro .....	26
FIGURA 17 - Termômetro digital acoplado aos termopares .....	27
FIGURA 18 - Piranômetro e multímetro digital .....	28
GRÁFICO 1 - Valores de radiação solar no secador solar sem chicanas .....	31
GRÁFICO 2 - Valores de radiação solar no secador solar com chicanas .....	32
GRÁFICO 3 - Valores de temperatura de entrada e saída do escoamento de ar no secador solar sem chicanas.....	33
GRÁFICO 4 - Valores de temperatura de entrada e saída do escoamento de ar no secador solar com chicanas.....	34
GRÁFICO 5 - Valores de vazão mássica no secador solar sem chicanas.....	35
GRÁFICO 6 - Valores de vazão mássica no secador solar com chicanas.....	35
GRÁFICO 7 - Valores de eficiência térmica do secador solar sem chicanas.....	36
GRÁFICO 8 - Valores de eficiência térmica do secador solar com chicanas.....	36

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
2.1 Objetivo geral.....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
3.1 Princípios térmicos de secagem .....	9
3.2 Tipo e classificação de secadores .....	12
3.3 Secadores Solares.....	12
3.4 Secadores com chicanas.....	18
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
4.1 Confeções do Secador solar .....	21
4.1.1 Estrutura de madeira .....	21
4.1.2 Chapas metálicas.....	22
4.1.3 A lã de vidro .....	24
4.2 Equipamentos utilizados .....	26
4.3 Metodologias de secagem .....	28
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
5.1 Irradiações solar.....	31
5.2 Temperaturas de entrada e de saída do escoamento de ar.....	33
5.3 Vazões mássicas .....	34
5.4 Eficiências térmicas .....	36
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de secagem, além de ser uma das primeiras operações unitárias conhecidas para conservação, é também um processo muito importante no auxílio da remoção da umidade de um produto. Ao diminuir o teor de umidade do produto em questão, reduz-se a massa e muitas vezes o volume também, facilitando e diminuindo custos para o transporte. Além disto, o processo de secagem de alimentos reduz a chance de deterioração por meio da ação de microrganismos que necessitam da água para proliferarem.

A secagem envolve ao mesmo tempo transferência de massa e de calor entre os envolvidos, porém isso dependendo do tipo de processo de secagem implantado. Existem vários tipos de processos de secagem que podem ser realizados, dentre eles destacam-se a secagem por incidência de radiação solar e por escoamento do vento, denominada secagem natural (ou secagem ao sol). Alternativamente a secagem realizada no interior de sistemas de secagem solares, é denominada secagem solar.

A secagem natural ao sol, não requer tantos investimentos, no entanto pode apresentar problemas durante a execução por ser muito lenta, e isto pode acarretar em dificuldades de absorção de umidade do produto em períodos úmidos e secagem incompleta.

Nesse viés, a secagem através dos secadores solares pode levar a uma melhora na qualidade e na agilidade do processo de forma significativa, além de diminuir o elevado índice de perdas, estas que geralmente acontecem ao longo do percurso.

Secadores artificiais (escoamento de ar aquecido por energia elétrica ou de queima de combustíveis fósil) se tornam uma boa opção quanto à velocidade e controle da operação, porém por envolver limitação de suprimentos, pode acarretar em custos proibitivos para as aplicações requeridas.

Como alternativa, têm-se secadores solares, que possuem o atributo da utilização de energia renovável como fonte, a fim de minimizar impactos ambientais e ilimitação de recursos necessários. Nesse cenário, aparecem como uma alternativa interessante, visto que estão dentro de uma faixa entre serem mais velozes e eficazes do que a secagem por via natural, e com custos significativamente mais baixos que a secagem artificial, já que a energia solar utilizada para aquecer não tem custos diretos na operação.

No entanto, devido à disponibilidade estacional e a aleatoriedade das condições climáticas, as condições térmicas do fluxo de ar de secagem estão sujeitas a constantes variações ao longo de sua utilização.

Com o intuito de buscar se utilizar um desenvolvimento sustentável, o uso correto dos recursos disponíveis é de grande interesse, com isso a busca pelo aumento da eficiência térmica nesse trabalho é fundamental para viabilizar a aplicabilidade desses sistemas.

Neste contexto, este projeto propõe um estudo experimental, da influência do uso de chicanas na eficiência térmica em um coletor solar de ar para secadores. O que se deseja alcançar com o devido trabalho é que as chicanas irão promover a mudança da trajetória do escoamento do ar no interior do coletor, maximizando assim o aquecimento dentro do escoamento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo experimental da influência do uso de chicanas na eficiência térmica de um coletor solar de ar para secadores.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos definidos foram:

- Construir um coletor para secador solar, com chicanas adaptáveis que podem ser inseridas e removidas;
- Realizar medições das condições ambientais (irradiação solar e temperatura ambiente) e propriedades do escoamento (temperatura e velocidade), em ensaios experimentais no coletor com e sem chicana;
- Determinar e comparar eficiência térmica do coletor com e sem chicana.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Princípios térmicos de secagem

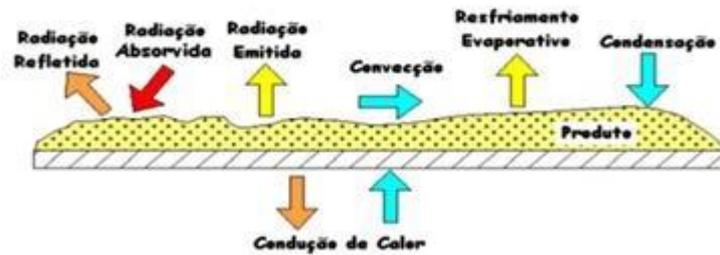
A secagem é uma operação unitária, em que o processo se baseia na remoção de umidade por meio da transferência de calor e massa entre o produto a ser seco e o meio de secagem. Geralmente é a etapa do processo que mais consome energia, tornando-se relevante então, a busca pela melhora na eficiência térmica do sistema de secagem.

A secagem, ou desidratação, envolve dois fenômenos simultâneos e fundamentais, nos quais o calor é concedido do fluido de secagem para o sólido, vaporizando o líquido contido na superfície do material. A massa é transferida em fase líquida ou vapor em seu interior, gerando à transferência do vapor da superfície para as proximidades do sólido, segundo (FERREIRA, 2004).

Essas transferências tanto de calor e de massa têm suas particularidades. A transferência de calor varia de acordo com condições externas, como umidade do ar, fluxo de ar, pressão e temperatura. Já a transferência de massa é dependente da natureza física do sólido, o conteúdo de umidade presente nele e a sua temperatura intrínseca, segundo Oliveira (2014).

Os três mecanismos de transferência de calor estarão presentes em um processo de secagem são condução, convecção e radiação. Gonçalves (2012) informa que a transferência de calor é realizada a uma temperatura menor do que a de evaporação da água, tendo como intuito final a diminuição do teor de umidade, reduzindo assim o volume e a massa do produto, mantendo suas propriedades. Na figura 1 são mostrados os fluxos de transferência de calor durante o processo de secagem.

**FIGURA 1 - Principais fluxos de energia na secagem**



Fonte: Ferreira (2004).

A junção dos modos de transferência de calor por condução e por convecção, dão origem ao que se chama de calor convectivo. Essa transferência de calor convectivo é um parâmetro de grande relevância, quando se levando em consideração a energia de secagem de um sistema. A importância de se saber sobre o calor convectivo e do coeficiente de transferência de massa é para se caracterizar as equações, tanto de transferência de massa, como de transferência de calor. De acordo com Dhiman; Singh (2015) *apud* Shrivastava; Kumar (2016) durante o aquecimento solar do ar, aumenta-se o coeficiente de calor convectivo que resulta em um aumento na transferência de calor

Na secagem, essa operação de transferência de calor e massa é complexa, pois pode sim levar a uma melhora na qualidade do produto, aumentar sua longevidade, no entanto ocorrerá várias transformações físico-químicas (MUJUMDAR; DEVAHASTIN 2000; MACIEL, 2017). Os principais fatores que influenciam no processo de secagem são: teor de umidade do produto; a temperatura de secagem; temperatura do ar na entrada e na saída do secador; umidade relativa; velocidade do escoamento e a pressão do escoamento de ar.

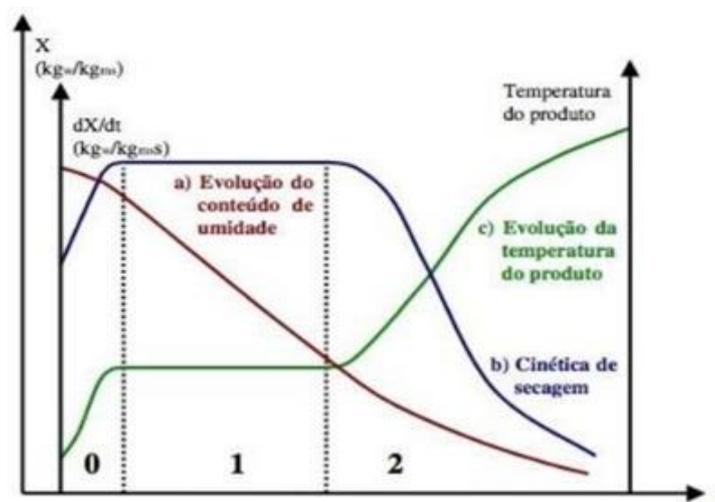
A quantidade de energia solar absorvida é uma grandeza de grande importância no estudo de viabilidade de um secador solar, pois é determinante saber se a energia disponível é suficiente para determinada aplicação. A energia solar total absorvida não depende apenas de sua área, transmissividade e absorvidade, mas também da emissividade incidente na superfície do coletor, de acordo com (DUFFIE E BECKMAN, 2006).

A energia consumida durante o processo irá depender do tipo do produto a ser secado e do processo escolhido. As taxas de transferências de calor e de massa tem relação de dependência com a velocidade e a temperatura que circula

no interior do secador.

De acordo com Park (2007), o processo de secagem pode ser dividido em três etapas. A Figura 2, mostra as curvas de evolução do teor de umidade do produto, temperatura e taxa de variação do teor de umidade do produto, chamada velocidade de secagem.

**FIGURA 2 - Curvas de secagem**



Fonte: Park (2007)

O primeiro período (0) é aquele no qual se marca o início da secagem. Neste momento acontece a elevação progressiva da temperatura do produto e da pressão de vapor de água até o ponto em que a transferência de calor seja igual à transferência de massa, a água no caso.

Já no segundo período (1), a taxa de secagem é considerada constante, ou seja, a água evaporada é a água livre. É o momento no qual as transferências de massa e de calor se equivalem e com isso têm-se a velocidade de secagem contínua. A taxa de secagem mantém-se constante mediante ao fato de ainda ter quantidade de água suficiente na superfície do produto para amparar a evaporação.

No terceiro período (2), começa a decrescer a taxa de secagem. A transferência de massa é reduzida devido a quantidade de água que se encontra na superfície do produto ser menor do que anteriormente. Park (2007) destacou que o fator limitante nesta fase, é reduzir a migração de umidade do interior para

a superfície do produto. Como a transferência de calor não pode ser compensada pela transferência de massa, a temperatura do produto sobe até atingir a temperatura do ar de secagem. Segundo Park (2007), o processo termina quando o produto atinge um equilíbrio de umidade em relação ao ar seco.

Para a secagem de determinados produtos, existem vários tipos de secadores onde estes possuem algumas características que devem ser consideradas na hora da escolha do secador. Características como: facilidade de processamento; o volume; a quantidade; fatores econômicos entre outros. No entanto, ainda que se tenham vários tipos de secadores, a natureza do processo de secagem é que determina ou ao menos limita a escolha de dois ou três secadores.

### **3.2 Tipo e classificação de secadores**

Um secador pode ser qualificado de várias formas. A maneira mais utilizada para se classificar esses secadores é de acordo com o aquecimento do ar de secagem, isto é, se o aquecimento do ar é realizado através de uma fonte natural, sem intervenção do homem, como a energia proveniente do sol, é chamado secagem natural.

Entretanto, se o aquecimento é feito por meio de outra fonte capaz de modificar as condições do processo, seja ela elétrica, a gás, combustível fóssil, entre outros, é chamado secador artificial. Segundo Silva (2010), os secadores podem ser classificados de acordo com sua fonte de calor, podendo ser solares, artificiais ou até mesmo híbridos. Se utilizar pelo menos duas fontes de energia, seja ela convencionais e renováveis são chamados de secadores híbridos.

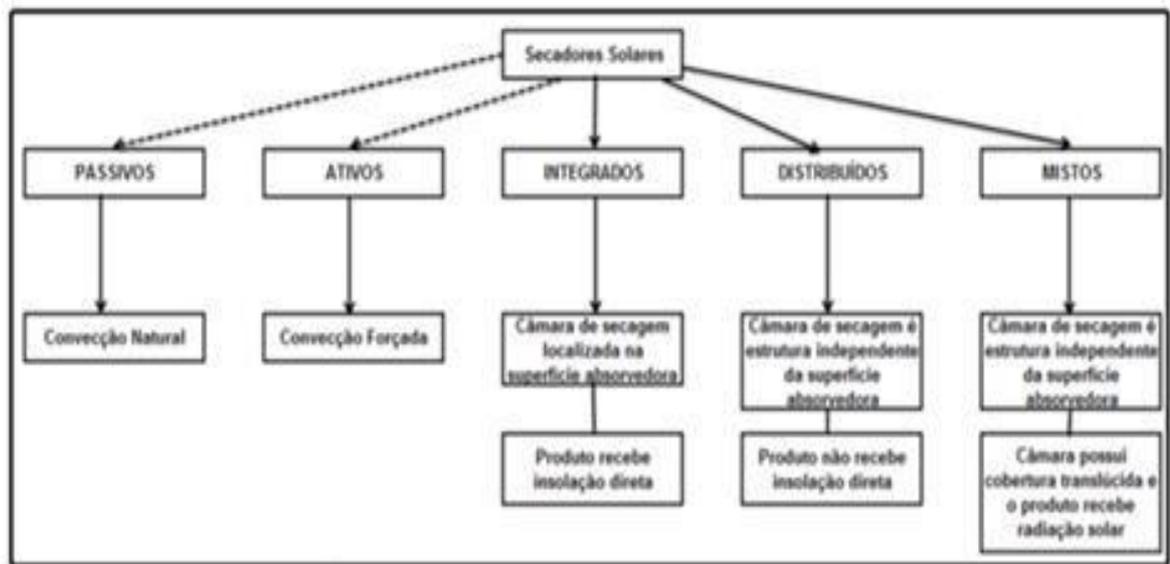
### **3.3 Secadores Solares**

Os chamados secadores solares são um viés da classificação dos secadores, onde se utiliza como fonte de energia renovável, aquela proveniente do Sol. O projeto de um bom secador solar, deve se considerar as particularidades de cada processo, para garantir um desempenho requerido

juntamente com um produto seco e de qualidade.

Desta forma, os próprios secadores solares possuem uma classificação própria, que pode distinguir os métodos existentes de secagem ao sol, com as particularidades existentes. De forma mais resumida e integrada, a classificação segundo Ekechukwu e Norton (1999), pode ser apresentada da seguinte forma, de acordo com a figura 3.

**FIGURA 3 - Classificação dos secadores**



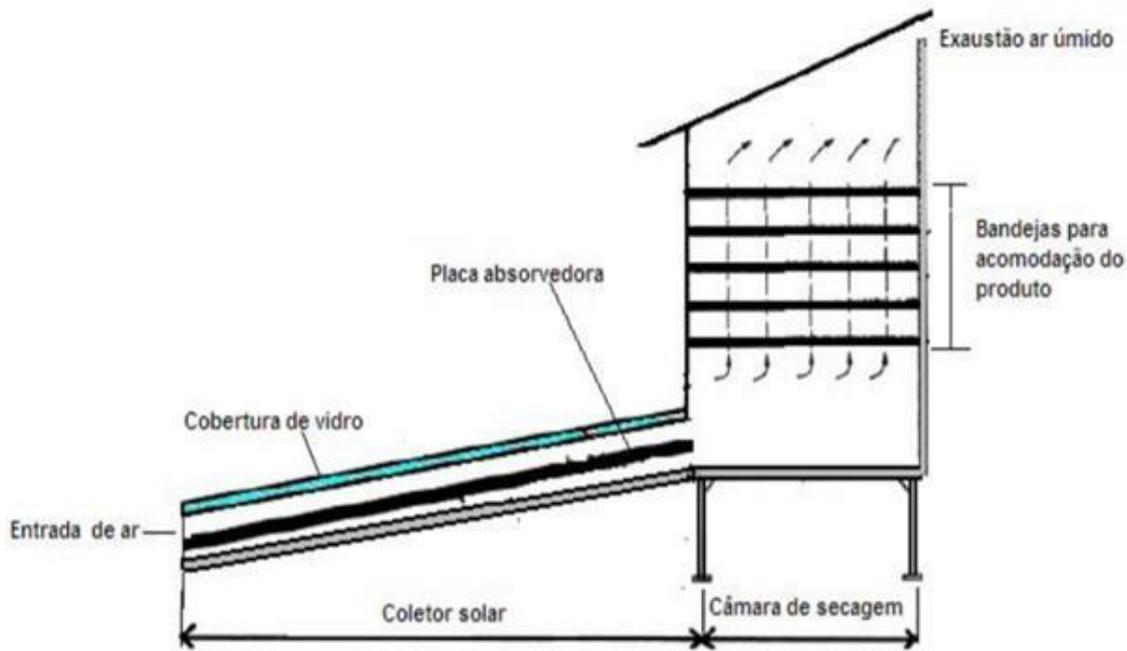
Fonte: Ekechukwu e Norton (1999)

Já foram feitos estudos com os diferentes tipos de secadores encontrados nessas classificações e cada um apresenta um resultado distinto.

Nota-se que cada tipo de secador solar existente possui particularidades positivas e negativas em sua utilização, necessitando de uma seleção mais restrita para o que se deseja obter como produto. De acordo com Oliveira (2014), ao utilizar da energia proveniente do Sol, para aquecer o ar, o secador então é considerado um secador solar. Várias ideias foram propostas a fim de maximizar a eficiência térmica dos secadores. Para que se faça o uso dos secadores solares, a parte do coletor é uma parte de grande importância na operação do secador, porque é nele que a radiação solar incide onde é absorvida e transferida por convecção. É um método onde se utiliza uma câmara de secagem e um coletor solar onde o ar é aquecido antes de entrar na câmara do secador FTERICH *et al.* (2018). Na figura 4 é possível encontrar os principais

componentes de um secador solar.

**FIGURA 4 - Principais componentes de um secador solar**



Fonte: Adaptado de Belessiotis; Delyannis (2011)

De acordo com Imre (2015), os secadores solares apresentam as seguintes características principais:

- Câmara de secagem, onde o produto a ser secado é depositado;
- Coletor solar, para transformação a energia da radiação solar em energia térmica;
- Placa absorvedora, para transferir energia térmica ao ar de secagem ou ao material;
- Exaustão do ar úmido, que é um meio de manter o ar de secagem em movimento, junto com o ar de admissão;
- Cobertura de vidro, que ajudará a transferir a energia solar para energia térmica.

Diversas literaturas relatam que uma modificação no design do secador influencia na eficiência do sistema de secagem. Em secadores com taxas de fluxo de massa de ar diferentes, notou-se que o aumento na taxa de fluxo, gera uma melhora no desempenho do secador. Já a utilização ou não de um sistema de armazenamento de calor, aumenta-se o tempo de secagem dependendo do caso

EKKA *et al.* (2020).

Fabricado e projetado por Mohanraj Chandrasekar (2009), um secador solar de convecção forçada indireta, foi construído para secagem de pimenta. A eficiência térmica do secador solar era de 21%. Enquanto o teor de umidade da pimenta foi de 72,8%, para aproximadamente 9,5%. Há também os relatos de um estudo utilizando um secador de convecção natural, realizado por Ajao e Adedeji(2008), onde os resultados revelam uma eficiência de secagem de 18%, ao mesmo tempo em que o secador solar de convecção natural indireto desenvolvido por Musembi *et al.* (2016) *apud* Abubakar *et al.* (2018), para se secar maçãs, obteve eficiência geral do secador de 17,89%.

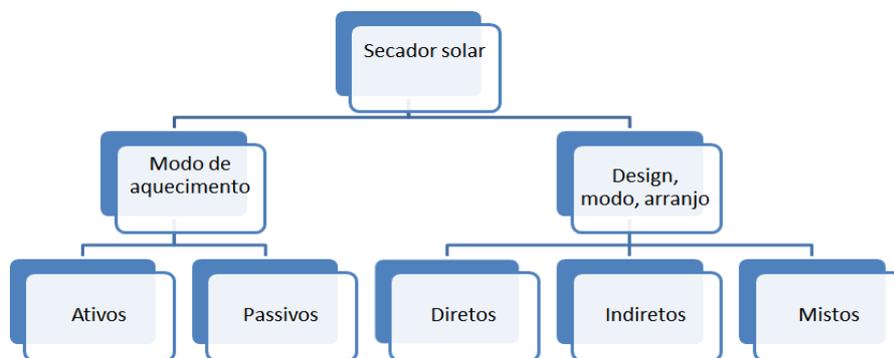
Essas e outras literaturas, mostram os diferentes tipos de secadores existentes, e seus diferentes resultados de eficiência térmica e de secagem. Como Lakshmi *et al.* (2018) *apud* Abubakar *et al.* (2018), que fez a avaliação da eficiência do coletor e do secador em geral, onde o secador solar de convecção forçada de modo misto, obteve respectivamente valores encontrados de 25,6% e 12,0% (ABUBAKAR *et al.* 2018).

Os secadores solares podem ser classificados por meio do modo de aquecimento, ou a forma em que a energia é utilizada, isto é, se são secadores solares ativos ou passivos. Ou então, estes mesmos secadores podem ser classificados quanto ao seu design, arranjo e o modo de uso, podendo ser chamados de distribuídos, ou diretos, integrados, ou indiretos, ou então mistos, que são a junção dos dois tipos.

Na classificação dos secadores solares em ativos ou passivos, tem-se que nos ativos, a convecção geralmente é forçada, isto é, ocorrem devido a utilização de ventiladores ou bombas dependendo do projeto do secador (se inclui parte elétrica). Já nos passivos, a convecção se dá por forma natural, com isso não consomem energia para conseguir movimentar o ar de secagem, no entanto podem gerar algumas estagnações ou interrupções no fluxo de ar. Situação esta em que não ocorre nos secadores ativos, onde se tem um fluxo mais uniforme e a possibilidade de secar volumes maiores de carga.

A figura 5 exemplifica bem o processo de classificação destes secadores.

**FIGURA 5 - Classificação de secadores solares**



Fonte: Próprio autor.

Já na classificação dos secadores solares quanto ao seu modo, design e arranjo, podem ser colocá-los em grupos onde se separam entre aqueles que recebem a radiação diretamente, aqueles em que não recebem a radiação diretamente, e aqueles em que se unem as duas coisas. Dito isso têm-se secadores solares distribuídos (diretos), integrados (indiretos), ou mistos, respectivamente.

Os secadores solares, de acordo com Belessiotis e Delyannis (2011), geralmente têm uma pequena capacidade, e apresentam desvantagens como suscetibilidade às mudanças climáticas e tempo de secagem longo, porque são contados como tempo de secagem os horários sem radiação solar são. Outra questão importante é a dificuldade de se padronizar o processo como um todo, onde muitas vezes o interessado tem de construir o próprio secador, o que acaba

gerando uma série de incertezas no processo geral e perdendo um pouco a credibilidade na área tecnológica e com isso dificultando sua expansão e aceitação.

As principais razões em que se opta pela escolha dos secadores solares são baseadas principalmente quando se considera a economia de energia e devido ao fato de termos uma grande indisponibilidade de recursos proveniente de fontes convencionais. Considerando esses fatores, e tendo em vista um bom desempenho energético a utilização desses secadores se tornou uma alternativa interessante, principalmente no meio de projetos de pesquisas.

De acordo com pesquisas anteriores, o tipo de secador que for escolhido vai apresentar valores diferentes de eficiência térmica. Forson *et al.* (2007) *apud* LOPEZ-VIDAÑA *et al.* (2020)., avaliou um secador solar de convecção natural de modo misto onde foi estimada a eficiência de 12,5%. Enquanto Essalh *et al.* (2018), para secagem de pêra, avaliou o desempenho do secador solar do tipo indireto e passivo, obtendo uma eficiência de 11,11%. Embora literaturas como de Lingayat *et al.* onde ele avalia o desempenho de um secador solar do tipo indireto, na secagem de banana, teve eficiência térmica de 31,5% (LOPEZ-VIDAÑA *et al.*, 2020).

Várias literaturas relatam sobre como uma mudança no design do secador pode afetar o desempenho do sistema de secagem no geral. A partir disso, várias ideias começaram a surgir sobre formas de alteração para que se tenha um aumento da eficiência térmica do secador. Chauhan e Kumar(2018) modificaram o secador, espalhando folha preta no chão do secador. Posteriormente, ele comparou a eficiência térmica do secador com e sem as folhas no chão. Os resultados observados foram que a eficiência térmica do secador aumenta quando se utiliza uma superfície com um material de cor absorvente (EKKA *et al.*, 2020).

Sabe-se que a eficiência térmica é um parâmetro de grande importância, e que varia de acordo com condições climáticas, e do tanto que é possível aproveitar essa energia absorvida. Diante da necessidade de se ter uma elevada eficiência térmica e energética nos secadores solares, para que sua viabilidade econômica fosse garantida, é preciso que o ar circule por mais tempo dentro do secador, de modo a conseguir uma absorção maior de energia. Dito isso, as

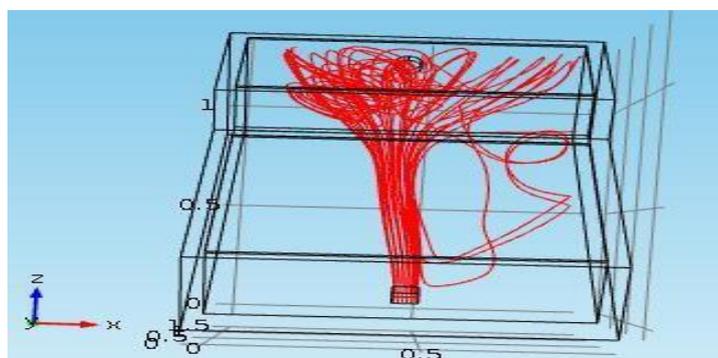
chicanas vieram com o propósito de se tornar barreiras, impedindo que o escoamento do ar ocorra de forma convencional, ou seja, o ar precisará desviar das chicanas e com isso percorrerá um caminho mais longo, onde se espera que absorva mais energia e com isso se torne viável economicamente.

### 3.4 Secadores com chicanas

Os secadores com chicanas surgiram como um viés onde se tem que, em um secador normal, isto é, sem chicanas, o escoamento do ar tende a percorrer um caminho mais fácil. Quando não há barreiras dentro da estrutura do coletor, o ar ao escoar percorre uma parte pequena da superfície total do coletor, não favorecendo o aquecimento pleno de toda a estrutura, como pode ser relatado na figura 6.

As linhas de corrente de ar, mostram o caminho preferencial que o ar tende a percorrer. O caminho mais curto entre o canal por onde o ar entra, até a parte final onde se encontra a camada de saída, é a preferência do fluxo de ar, por questões de ser o percurso que gera o menor gasto de energia por ele. Ocorrem poucas variações ao longo do percurso e as chicanas funcionam como uma forma de dificultar a passagem do ar, e como consequência disso, fazer com que esse fluxo de ar percorra por uma área maior dentro do secador, ocasionando em um maior aquecimento do ar no interior, e elevando-se a temperatura de saída da corrente de ar. A consequência final disso, é gerar um aumento, considerável, na eficiência térmica e energética do sistema, conforme figura 6.

**FIGURA 6 - Linhas de corrente de ar no interior do secador solar**

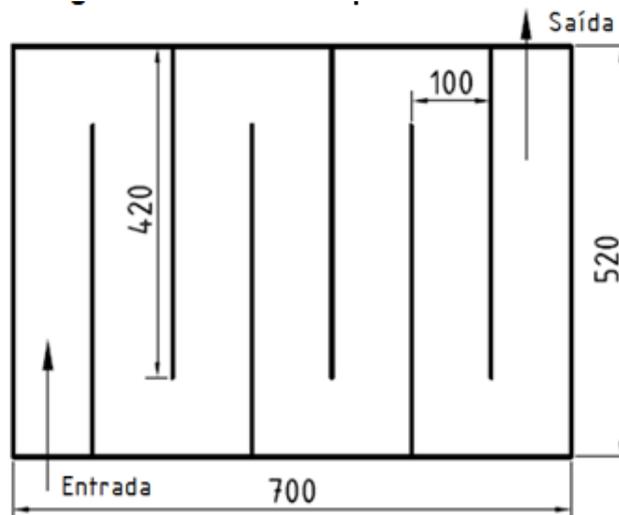


Fonte: Santos (2018).

Desse modo, com o intuito de maximizar a área em que o ar irá percorrer, e consequentemente maximizar a eficiência térmica do secador solar, as

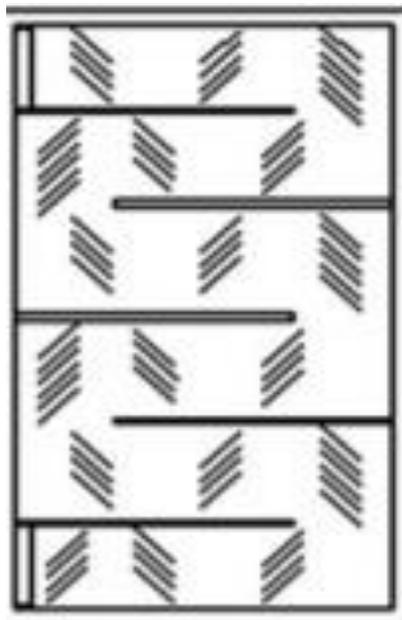
chicanas tem se tornado objetos de estudo interessantes. A figura 7 mostra a estrutura das chicanas utilizadas no presente secador solar, e ao seu lado mostra como deveria ser o novo caminho que o escoamento de ar irá percorrer ao se utilizar as chicanas, relatado na figura 8 (AKPINAR; KOÇYIGIT, 2010).

**FIGURA 7 - Estrutura das chicanas**



Fonte: Próprio autor.

**FIGURA 8 - Caminho do escoamento de ar com chicanas**



Fonte: Akpinar (2010).

As chicanas tendem a atuar como barreiras, fazendo com que o escoamento do ar percorra uma área muito maior da superfície absorvedora. Esse trajeto mais

longo possibilita o escoamento do ar a se aquecer mais e por mais tempo, gerando uma temperatura de saída do ar mais elevada do que se não tivesse essas barreiras.

Em algumas literaturas, mostrou-se que as chicanas utilizadas em secadores, revelaram resultados promissores. De acordo com o trabalho de Akpinar e Koçyigti (2010), o uso de chicanas no secador, gerou um aumento de 20% para 82% de eficiência térmica, resultados que levaram a uma busca por melhorias utilizando o sistema dessa maneira NEPONUCENO (2019).

Deste modo, as chicanas possuem o intuito de melhorar a eficiência na troca térmica entre o escoamento de ar e as superfícies do coletor, isto é, melhorar a transferência de calor entre todo o sistema, de modo a incrementar a eficiência de secagem e energética.

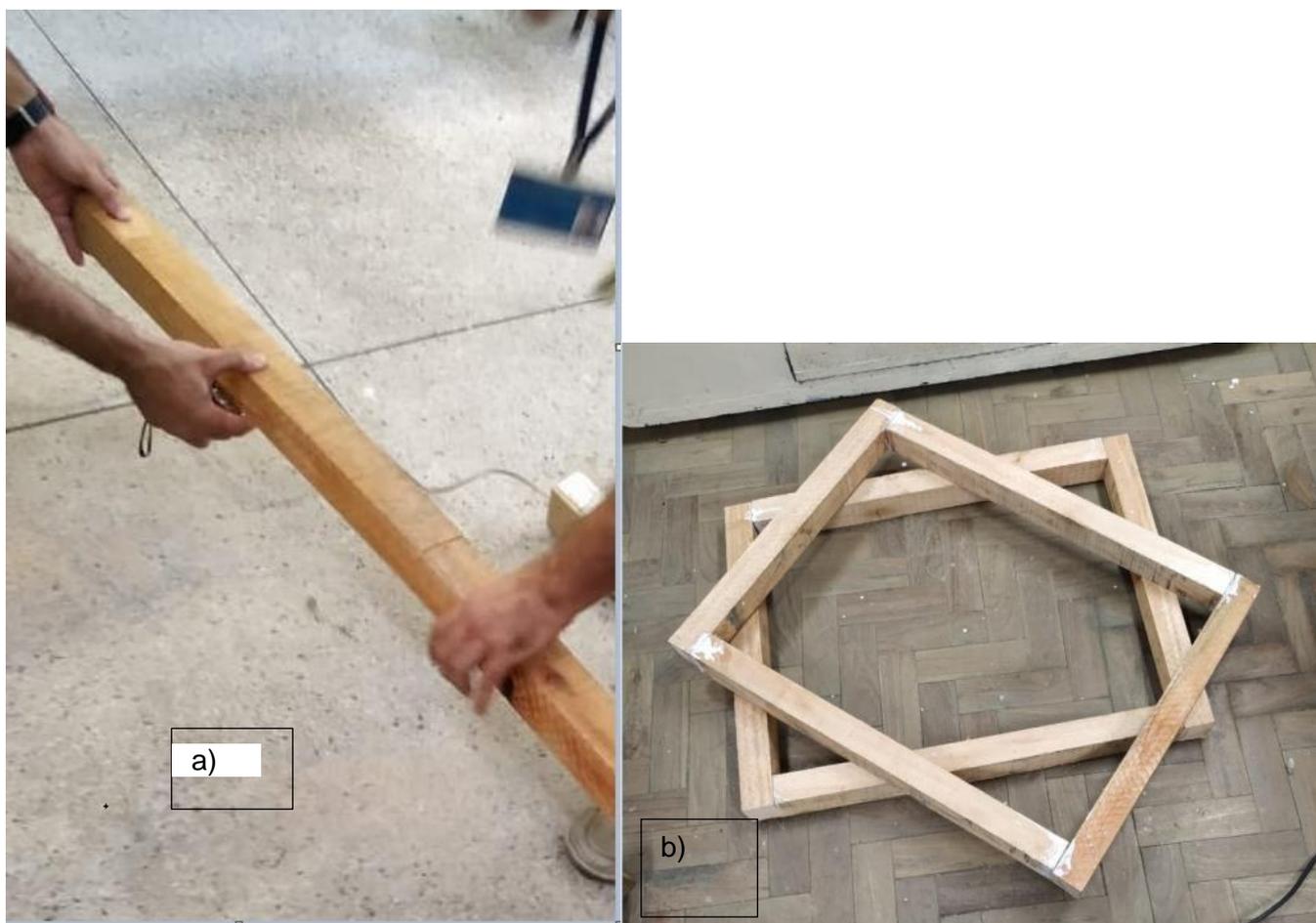
## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Confeccões do Coletor solar

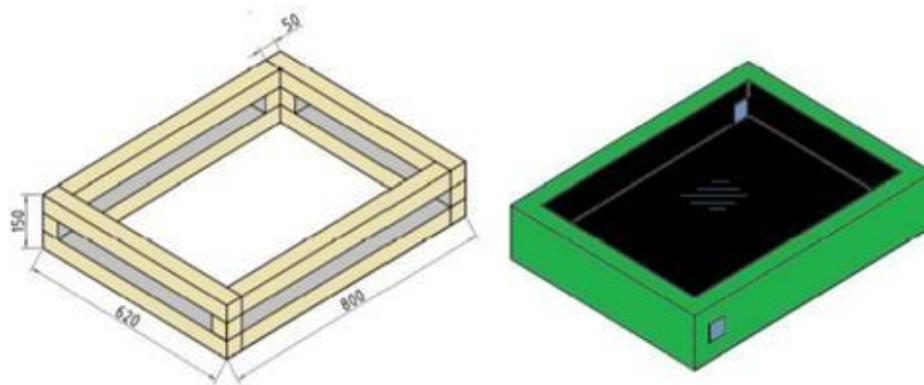
#### 4.1.1 Estrutura de madeira

Para a confecção do presente coletor solar, foi utilizado madeiras de baixa densidade, caibros comerciais, para a construção da estrutura do coletor solar. Nestecaso em específico, foi-se utilizada madeira Saligna, que por ser isolante térmico minimizam-se perdas térmicas, além de apresentar um custo relativamente barato. A figura 9, mostra na figura (a) a madeira utilizada, e ao seu lado (b) o esboço da estrutura do coletor solar já com as devidas dimensões da estrutura, como mostrado na figura 10.

**FIGURA 9 - Madeira Saligna**



Fonte: Próprio autor.

**FIGURA 10 - Estrutura de madeira**

Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.2 Chapas metálicas

O revestimento interno e externo foi realizado por chapas de aço galvanizados, com espessura bem próxima de  $3 \times 10^{-2} \text{m}$ . O intuito das chapas é garantir a proteção da estrutura de madeira contra a atividade das intempéries e até mesmo da água proveniente do processo de secagem.

O coletor foi contruído no laboratório de caldeiraria (L.150) do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, *campus I*. Como mostrado na figura 11 (a) e (b), as chapas de aço precisaram passar por dobramentos e cortes até assumir a forma atual. Para isso foi preciso dos maquinários existentes no laboratório de caldeiraria, chamadas de tesourão e dobradeira respectivamente, relatados nas figuras 12 e 13. Feito isso, foi possível preencher a estrutura de madeira toda com as chapas metálicas e com isso adquirir um secador solar firme, e com uma estrutura capaz de suportar os mais devidos esforços as quais estão sujeitos.

**FIGURA 11 - Chapas metálicas**

Fonte: Próprio autor.

**FIGURA 12 - Tesourão**

Fonte: Próprio autor.

**FIGURA 13 - Dobradeira**

Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.3 A lã de vidro

Esse coletor solar ainda apresentava espaços vazios entre as chapas metálicas internas e externas do secador. Para isso foi-se utilizado lã de vidro, como pode ser mostrado na Figura 14, com o intuito de se tornar um isolante térmico desse secador solar, minimizando assim as perdas e garantindo uma maior eficiência térmica.

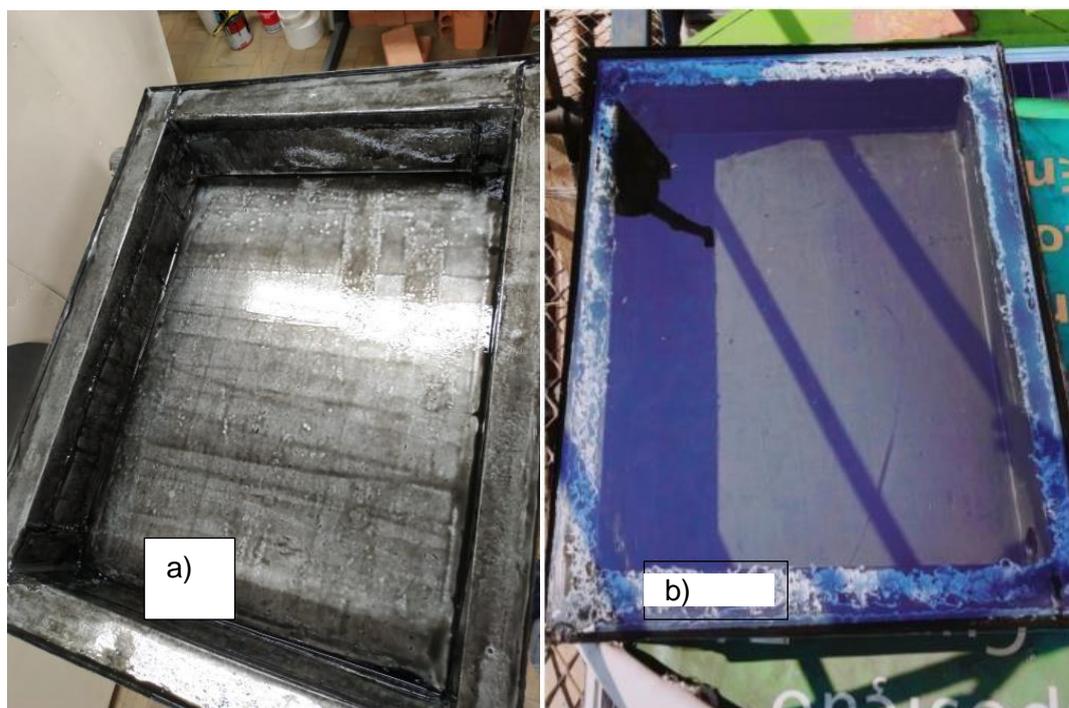
**FIGURA 14 - Lã de vidro**

Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.4 Pintura e acoplamento da cobertura de vidro

Com o intuito novamente de se maximizar sua eficiência térmica, o coletor foi pintado de preto fosco em suas superfícies metálicas. É possível se observar na figura 15 (a) como ficou a pintura da estrutura do secador. A cor preta irá assegurar um aumento na temperatura do ar de secagem, isto é, fazer com que a radiação obtida da energia solar seja mais absorvida, sendo assim garantindo uma eficiência térmica mais elevada. Mediante a isso, foi acoplada a estrutura, uma cobertura. Cobertura esta feita de vidro com uma área de coleta de 700 mm x 520 mm, e 1 mm de profundidade, aproximadamente. O vidro tem uma espessura de cerca de 3 mm, e tem como função aquecer o escoamento de ar que entra no coletor, e para conseguir colocar ele junto da estrutura do coletor solar, foi utilizado silicone para conseguir aderir uma superfície juntamente da outra. Essa estrutura do secador com a cobertura de vidro pode ser vista na Figura 15 (b).

**FIGURA 15 - Coletor pintado com tinta preta fosca e cobertura de vidro acoplada**



Fonte: Próprio autor.

Neste secador solar, o vidro atua como um meio em que irá transmitir parte

da radiação solar incidente para a superfície absorvedora. Este absorvedor aquecido irá aquecer o escoamento de ar no interior do secador que apresentará uma redução na densidade. Forças de empuxo atuarão sobre o escoamento de ar fazendo com que este escoe pela saída do secador. Juntamente da utilização da cor preta, o secador tende a absorver uma quantidade maior de radiação solar e, portanto, consegue aquecer mais o escoamento do ar e assim buscando maximizar a eficiência térmica.

O coletor solar como um todo foi construído baseado em experiências anteriores, e buscando através de cada componente de sua estrutura um jeito de maximizar o seu poder de absorção da radiação solar, que é um dos fatores de maior importância, e também minimizar as perdas térmicas que eventualmente acontecem. Nesse sentido, as chicanas foram construídas, também de aço galvanizado com espessura bem próxima de  $3 \times 10^{-2} \text{m}$ .

## 4.2 Equipamentos utilizados

Neste projeto foram utilizados os seguintes equipamentos para realização dos ensaios experimentais:

- Termo-higro-anemômetro para medição de velocidade, e temperatura do escoamento do ar. Modelo AN-4870, com faixa de medição da velocidade do ar de 0,1 m/s a 35 m/s e incerteza de medição de 3% do valor lido. Já a faixa de medição da temperatura varia entre a temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  com incerteza de medição de  $0,6^{\circ}\text{C}$ , como mostrado na figura 16.

**FIGURA 16 - Termo- higro-anemômetro**



Fonte: Próprio autor.

- Um termopar do tipo K, foi ligado a um sistema para adquirir dados de temperatura de entrada e temperatura de saída, onde é possível visualizar através da figura 17.

**FIGURA 17 - Termômetro digital acoplado aos termopares**



Fonte: Próprio autor.

- Piranômetro Kipp&Zonem, modelo CMP21, com incerteza de medição  $<1\%$  para temperaturas entre  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ . Possui sensor do tipo fototérmico, com circuito interno de compensação de temperatura, tempo de resposta 5 segundos, serve para medir a radiação solar incidente sobre o coletor solar, sendo necessário ficar no mesmo plano do coletor, como mostrado na figura 18.

**FIGURA 18 - Piranômetro e multímetro digital**

Fonte: Santos (2019).

#### **4.3 Metodologias de secagem**

Para a comparação entre os resultados de eficiência térmica dos coletores solares com e sem chicanas foram realizadas duas medições. A primeira ocorreu nos meses de outubro e novembro no intervalo de tempo de 04 horas (10h00 às 14h00), sendo este intervalo de tempo o período pelo qual se têm maior incidência e disponibilidade de radiação solar. O primeiro teste ocorreu utilizando o coletor solar sem as chicanas, com o intuito de comparar os resultados futuros obtidos posteriormente.

Já o segundo teste, foi realizado entre o período de janeiro e fevereiro, no mesmo intervalo de tempo. Nesse ensaio, as chicanas já foram devidamente instaladas e vedadas. De maneira que os resultados pudessem ser comparados, foi feita uma metodologia que permitisse que o processo de secagem fosse realizado dentro de padrões operacionais estabelecidos, ainda que as situações climáticas e dos produtos fossem diferentes.

No primeiro momento, mediu-se a velocidade do escoamento do ar, no qual se foi utilizado uma chaminé, que por diferença de pressão permitia que se tivesse uma velocidade não muito alta, que possibilitaria o ar aquecer por mais tempo durante sua passagem pela superfície absorvedora. Para medir essa velocidade foi utilizado o termo- higo-anemômetro, no entanto utilizando somente a parte de velocidade do instrumento.

Posteriormente foi a vez de se medir as temperaturas, tanto na entrada do

coletor solar, quanto na saída. Para isso foi preciso realizar furos nos dutos de entrada e saída de modo que a leitura das temperaturas fosse feita onde o Sol não incidia diretamente, a fim de evitar oscilações bruscas nos valores encontrados. Foi utilizado o termômetro juntamente dos termopares para se realizar essas medições.

Em sequência foi utilizado o piranômetro e o miliamperímetro para medir a radiação solar. O piranômetro sozinho não consegue fazer a leitura, além de que ele não pega todo o espectro visível, então para isso ele precisa estar no mesmo plano do coletor, sem nenhum sombreamento que possa atrapalhar. Com o amperímetro ligado em série, o mesmo é ligado a 20mA, antes mesmo de todo o conjunto ser ligado na tomada. As medições foram feitas em um intervalo de 15 em 15 minutos, a partir das 10:00 horas, até as 14:00, sem interrupções. Foram realizadas no total de 17 medições, nas quais se puderam obter informações relevantes para o presente trabalho.

#### 4.4 Metodologias de análise de eficiência dos secadores

O principal objetivo do trabalho é comparar a eficiência térmica do coletor solar com e sem a presença das chicanas. Neste contexto, foram adquiridas medidas de temperatura de entrada e saída, a velocidade do escoamento do ar e da irradiação solar. Dessa forma foi possível obter valores de eficiência térmica, por meio da energia útil e da energia solar absorvida.

Analisando matematicamente, a eficiência térmica associada aos valores de energia pode ser obtida através da equação 1.

$$\eta(\%) = \frac{E_{\text{útil}}(J)}{E_{\text{solar}}(J)} \quad (1)$$

Onde  $\eta$  é a eficiência térmica,  $E_{\text{útil}}(J)$  é a energia útil total, dada em Joules, e

$E_{\text{solar}}(J)$ , é a energia solar total absorvida, também dada em Joules.

Por sua vez, a energia útil, pode ser calculada através da fórmula da equação 2.

$$E_{\text{útil}} = \dot{m} \times c_p \times (T_o - T_i) \quad (2)$$

Onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica em  $kg/s$ , dada pela equação 4,  $c_p$  é calor específico a pressão constante do ar e  $T_o$  é a temperatura de saída, e  $T_i$  é a temperatura de entrada do escoamento de ar. Com isso têm-se a energia útil dada em Watt, que para transformar em Joule é necessário multiplicar pelo tempo de cada medição que no caso foi de 15 minutos, convertendo para segundos, têm-se 900 segundos.

Já a energia solar total absorvida, é inferida através da equação 3, que é basicamente o valor da radiação solar encontrado naquela hora em questão, multiplicado pela área de coleta do coletor solar.

$$E_{solar} = G \times A_c \quad (3)$$

Onde se tem que  $G$  é a radiação solar em  $W/m^2$ , e  $A_c$  é a área de coleta do coletor solar em  $m^2$ .

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2 \times V \times \rho}{4} \quad (4)$$

Onde  $d$  é o diâmetro do medidor com 7,2 cm aproximadamente,  $V$  é a velocidade do escoamento do ar, e  $\rho$  é massa específica, em  $kg/m^3$ .

Com esses valores medidos foi possível obter resultados, que se permite comparar os dois testes e analisar com base em dados factíveis, a eficiência de cada avaliação.

## 5 RESULTADOS

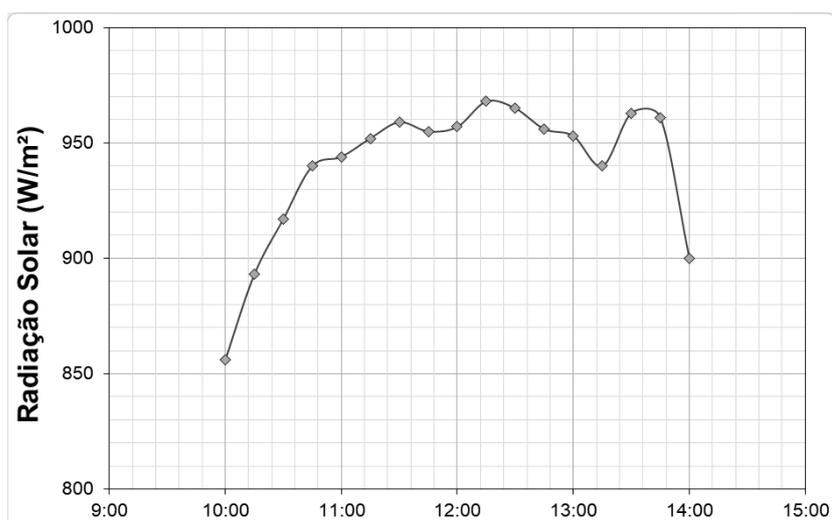
Os principais resultados encontrados são o coletor solar do secador que foi construído com êxito e que poderá contribuir para pesquisas futuras, além da análise experimental realizada, que permitirá avaliar se o aumento dos custos construtivos da fabricação das chicanas será compensado com o aumento da eficiência térmica significativa do sistema.

Os resultados e análise apresentados neste trabalho são provenientes dos dados de secagem coletados ao decorrer dos experimentos que foram feitos no secador solar. Foram observadas as grandezas medidas e a relação entre eles.

### 5.1 Irradiações solar

Em um primeiro momento foram obtidos os resultados dos valores de irradiação solar, temperatura de entrada e saída do escoamento do ar, e da velocidade de escoamento do ar, utilizando o coletor solar construído sem as chicanas acopladas. No gráfico 1, pode se visualizar os valores de radiação solar ao decorrer do tempo de ensaio.

**GRÁFICO 1 - Valores de radiação solar no coletor solar sem chicanas**



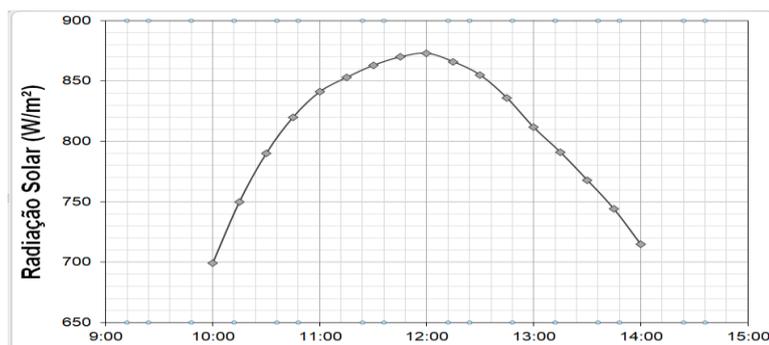
Fonte: Próprio autor.

Os primeiros ensaios, aqueles realizados sem chicanas, foram realizados em um período entre setembro e outubro, onde de acordo com Reis (2016) são os meses em que a insolação é mais forte em Minas Gerais e juntamente de dados obtidos ao

decorrer da história apresentam pouca chuva na região.

Consegue-se observar que mesmo em um primeiro momento, onde de acordo com Duffie e Beckman (2006) que é um período de menor insolação, (sendo os períodos próximos ao horário de meio dia os com maiores valores de insolação) a radiação solar não foi tão alta relativamente. No entanto, quando ao compararmos com os valores de radiação solar obtido ao se realizar o segundo ensaio, no período de fevereiro, é possível notar um número relativamente superior de radiação solar, no mesmo primeiro momento de análise. No gráfico 2 são mostrados os valores de radiação solar neste segundo ensaio, desta vez com chicanas. No primeiro ensaio o valor máximo de radiação foi de 970W/m e no segundo ensaio com chicanas esse valor máximo foi de 873W/m. Portanto, havia expectativa inicial de menores temperaturas de escoamento no segundo ensaio, se não fosse a presença das chicanas.

**GRÁFICO 2 - Valores de radiação solar no coletor solar com chicanas**



Fonte: Próprio autor.

A radiação solar depende também das condições climáticas e atmosféricas, apenas uma parcela da radiação solar atinge a superfície terrestre, isto é graças à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Seus valores variam ao longo dos meses devido às variações da inclinação terrestre ao decorrer do ano.

O mês de fevereiro é, considerando, um mês onde o período de verão está começando a declinar a sua potência, isto é, já não está mais no ápice do verão, como seria se fosse um período de dezembro até início de janeiro.

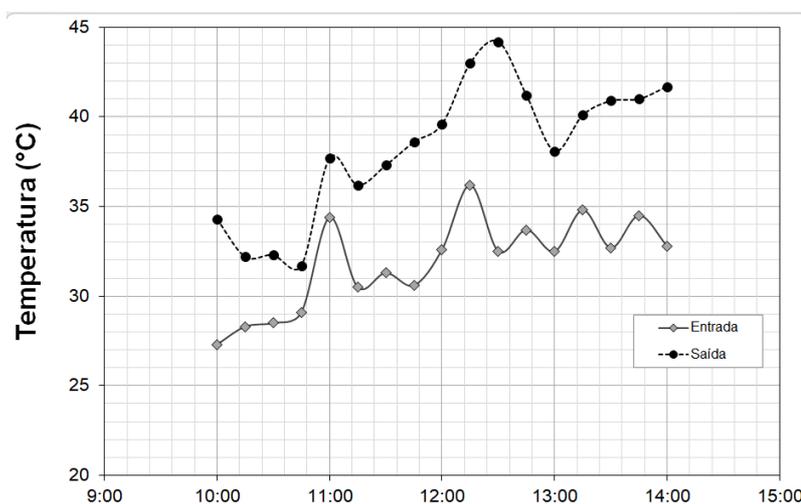
Todavia, mesmo apresentando fatores de irradiação solar, que é um dos principais parâmetros a serem considerados, quando levamos em conta a eficiência térmica, os resultados já nos mostram outra linha de raciocínio. Para analisar a eficiência térmica resultante destes secadores, devem ser verificadas as temperaturas

de saída dos escoamentos dos coletores solares.

## 5.2 Temperaturas de entrada e de saída do escoamento de ar

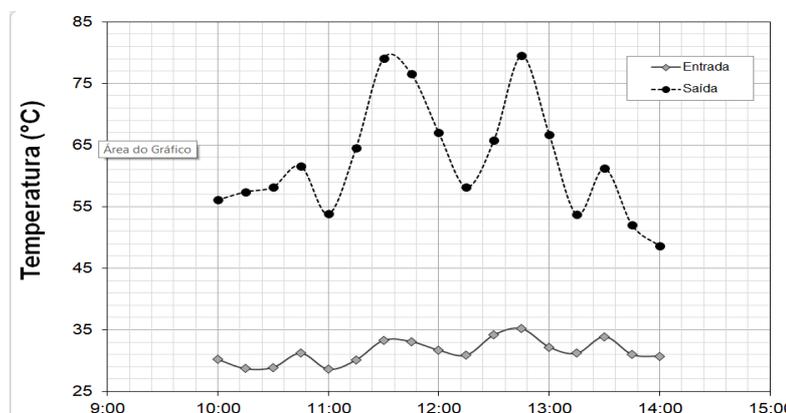
Nos gráficos 4 e 5, é possível comparar as temperaturas de entrada e de saída do escoamento de ar dos coletores solares, sem e com chicanas respectivamente. Nota-se que as temperaturas de entrada têm valores relativamente próximos, com pouca variação comparando um ensaio com o outro. No ensaio dos secadores solares sem as chicanas, as temperaturas de entrada variam entre 30°C à 35°C, nos horários entre 11h00min e 13h00min onde ocorre o período de maior insolação, tendo um pico máximo de 36,2°C. Enquanto os coletores solares com a presença das chicanas apresentam temperaturas parecidas ao ensaio anterior, tendo uma variação entre 28°C até 35°C no mesmo período de hora analisado anteriormente. Essa diferença se deve ao fato dos índices de radiação solar ser um pouco diferentes, que acaba influenciando nos valores finais. No gráfico de temperatura de entrada do coletor solar com chicanas, apresenta um pico máximo de temperatura a 35,2°C.

**GRÁFICO 3 - Valores de temperatura de entrada e saída do escoamento de ar no coletor solar sem chicanas**



Fonte: Próprio autor.

**GRÁFICO 4 - Valores de temperatura de entrada e saída do escoamento de ar no coletor solar com chicanas**



Fonte: Próprio autor.

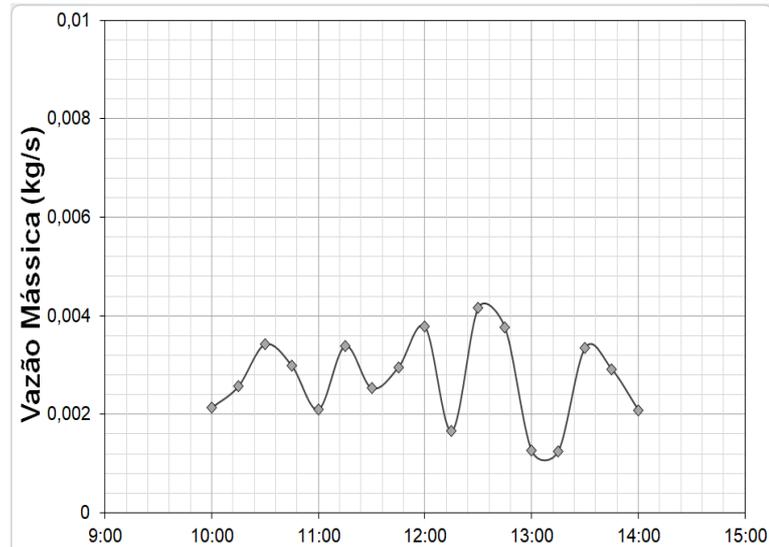
Para efeitos comparativos, enquanto nos ensaios do coletor sem as chicanas, as temperaturas de saída variam em torno de 35°C à 45°C, considerando os períodos com maiores índices de insolação, os resultados do coletor solar com as chicanas já apresentam temperaturas entre 55°C e 80°C.

Essa variação se deve ao fato de que no coletor solar com chicanas, o ar percorre um caminho mais longo até o canal de saída, e com isso ele aquece por mais tempo e conseqüentemente chega a uma temperatura mais elevada.

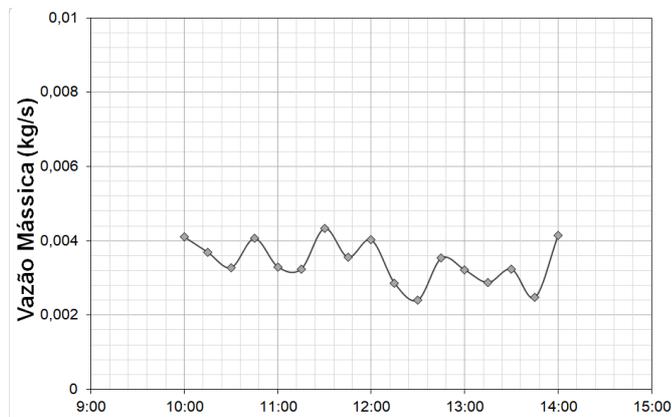
### 5.3 Vazões mássicas

Para que se tenha uma comparação efetiva entre os dois casos, é preciso também levar em consideração a velocidade do escoamento do ar, ou seja, comparar a vazão mássica nos dois casos, pois este também é um fator de grande influência nos estudos.

Nos gráficos 6 e 7, mostra a variação da vazão mássica ao decorrer do período de ensaio. É possível perceber que em ambos os casos a vazão mássica não houve muita variação, além de apresentarem valores relativamente próximos, o que para efeitos de equiparação é interessante, pois para uma mesma vazão têm-se valores de eficiência diferentes.

**GRÁFICO 5 - Valores de vazão mássica no coletor solar sem chicanas**

Fonte: Próprio autor.

**GRÁFICO 6 - Valores de vazão mássica no coletor solar com chicanas**

Fonte: Próprio autor.

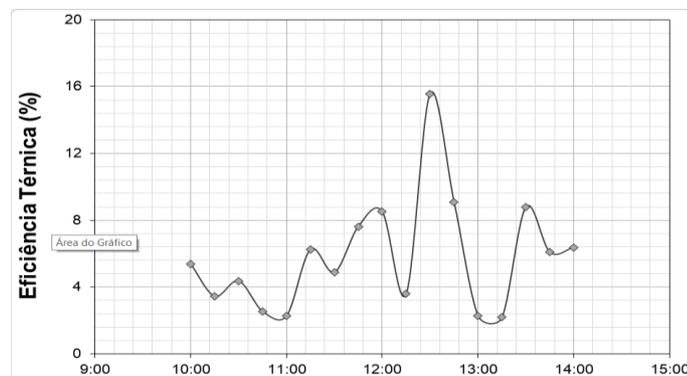
Em ambos os gráficos os valores da vazão mássica, em  $kg/s$ , durante o período de análise, apresentaram valores bem próximos dos intervalos entre  $0,002 kg/s$ , e  $0,004 kg/s$ . Como os valores ficaram bem semelhantes, a velocidade do escoamento do ar foi um fator importante a ser analisado, visto que se fosse uma velocidade muito elevada, não daria tempo de o secador conseguir aquecer todo o escoamento de ar. Do mesmo modo que se fosse uma velocidade muito baixa, não iria conseguir escoar todo o escoamento do ar da entrada até a saída, impedindo

assim de analisar as temperaturas na entrada e na saída do secador.

#### 5.4 Eficiências térmicas

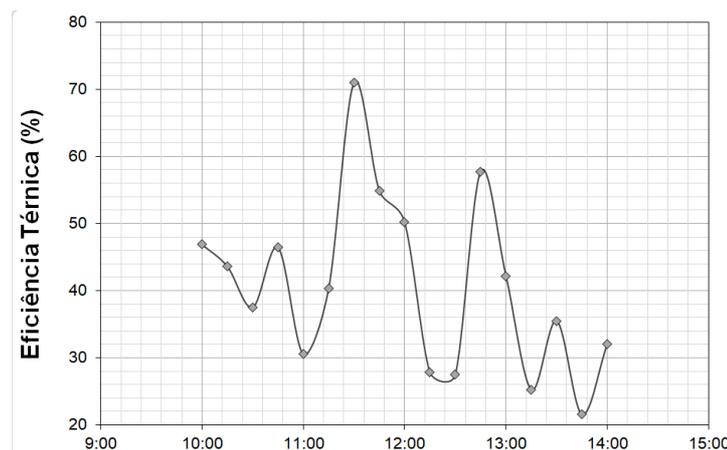
Por fim, obteve-se os gráficos 8 e 9, referentes a eficiência térmica dos coletores solares sem e com a utilização das chicanas respectivamente. A eficiência térmica é o parâmetro de grande importância no trabalho, pois será a partir dela que será possível mensurar e avaliar se a quantidade a mais de eficiência obtida supera ou não os custos construtivos relativos as chicanas.

**GRÁFICO 7 - Valores de eficiência térmica do coletor solar sem chicanas**



Fonte: Próprio autor.

**GRÁFICO 8 - Valores de eficiência térmica do coletor solar com chicanas**



Fonte: Próprio autor.

Verificou-se que, no ensaio com chicanas, os percentuais de eficiência térmica foram superiores aos do ensaio sem chicanas. Considerando o pico máximo da eficiência de cada ensaio, enquanto no ensaio sem chicanas apresenta ponto máximo de 16%, o ensaio com chicanas apresenta ponto máximo de aproximadamente 70%.

Ao analisar os experimentos realizados é perceptível que mesmo pelo fato do coletor solar com chicanas ter apresentados valores menores de radiação solar, a sua eficiência térmica cresceu significativamente quando utilizados as chicanas acoplados em seu interior. Isso se deve ao fato principalmente, do coletor absorver calor e manter a temperatura por mais tempo, isto é, permite que o escoamento de ar aqueça por um período mais longo, e com isso atinja valores maiores de temperatura final, e conseqüentemente de eficiência térmica.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo da influência do uso de chicanas em coletores de secadores solares na eficiência térmica.

No ensaio sem as chicanas, os números de insolação e radiação solar se mostraram superiores aos do ensaio com as chicanas, considerando que foram períodos diferentes e como consequência, condições climáticas diferentes que acabam interferindo nesses valores. Porém, quando se leva em conta a eficiência térmica, que é o parâmetro principal de avaliação, nota-se que os ensaios com a presença das chicanas mostraram-se suficientemente mais eficaz quando comparadas aos ensaios sem as chicanas. O coletor solar sem as chicanas faz com que o escoamento de ar percorra um caminho mais simples, sem perturbações, e com isso a via entre a entrada e saída do ar, é uma estrada, que sem barreiras, consegue aquecer pouco o escoamento do ar durante esse período de passagem.

Já o coletor solar com as chicanas acopladas em seu interior funciona como barreiras ao escoamento e dificultam a passagem natural do ar, fazendo com que o escoamento do ar necessite passar por um caminho mais longo no interior do secador. Deste modo, possibilita mais tempo ao escoamento do ar de se aquecer no interior do secador, e com isso uma maior área do coletor solar é utilizada, e consequentemente maior energia é absorvida pelo escoamento do ar.

Sendo assim, mesmo com índices de irradiação solar inferiores, os testes realizados no secador solar com chicanas apresentaram valores significativamente maiores com os ensaios sem chicanas, corroborando com os ideais apresentados no presente estudo.

As chicanas influenciam diretamente nos parâmetros mensurados nos ensaios do coletor solar, pois elas tendem a direcionar o escoamento de ar ao longo de toda a superfície absorvedora, diferentemente do que acontece quando não se tem essas barreiras. Portanto, é de se considerar que em valores de eficiência térmica a utilização das chicanas se torna interessante, e é um viés a mais a se considerar em futuros trabalhos, principalmente levando em consideração a viabilidade econômica comparada a sua eficiência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUBAKAR, S *et al.* Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryers with and without thermal storage. **Renewable Energy**, v. 128, Part A, p. 285-298, 2018.

AKPINAR, Ebru Kavak; KOÇYIGIT, Fatih. **Experimental investigation of thermal performance of solar air heater having different obstacles on absorber plates.** International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 37, p. 416-421, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0735193309002681>. Acesso em: 12 de maio.2019.

AZAIZIA, Zaineb *et al.* Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1972-1984, 2020.

BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Sol Energy**, v. 85, n. 8, p. 1665–91, 2011.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3rd. ed. [S.I.]: John Wiley Son, 2006.

EKECHUKWU, O.; NORTON, V. Review of Solar-Energy Drying Systems: An Overview of Solar Drying Technology. **Energy Conversion and Management**, v. 40, p. 615-655, 1999.

EKKA, Jasinta Poonam *et al.* Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (*Kaempferia parviflora*) using two successive air mass flow rates. **Renewable Energy**, v. 152, p. 55-66, 2020.

ESSALH, Hajar *et al.* Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 49, p. 58-64, 2018.

FERREIRA, Andre Guimarães. **Avaliação da Viabilidade Técnica de Chaminés Solares para a Secagem de Alimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FETERICH, M. *et al.* Experimental parametric study of a mixed-mode forced convection solar dryer equipped with a PV/T air collector. **Solar Energy**, v. 171, n. 1, p. 751-760, 2018.

FETERICHA, M. *et al.* Experimental parametric study of a mixed-mode forced convection solar dryer equipped with a PV/T air collector. **Solar Energy**, v. 171, n. 1, p. 751-760, 2018.

GONÇALVES, L. M. **Análise experimental da secagem de um resíduo sólido industrial em um secador solar**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

IMRE, L. Solar drying. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of industrial drying**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. chap. 14, p. 303-350.

LAKSHMI, D. V. N. *et al.* Performance analyses of mixed mode forced convection solar dryer for drying of stevia leaves. **Solar Energy**, v. 188, p. 507-518, 2019.

LAKSHMI, D.V.N. *et al.* . Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v. 120, p. 23-34, 2018.

LINGAYAT, Abhay Bhanudas *et al.* A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. **Applied Energy**, v. 258, 2020a.

LINGAYAT, Abhay Bhanudas *et al.* Development of indirect type solar dryer and experiments for estimation of drying parameters of apple and watermelon. **Thermal**

**Science and Engineering Progress**, v. 16, n. 1, 2020b.

LOPEZ-VIDAÑA, Erick César *et al.* Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). **Renewable Energy**, v. 147, p. 845-855, 2020.

MACIEL, Paulo Fernando Figueiredo. **Análise energética e exergética da secagem de cacau em secador elétrico e em secador solar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NEPOMUCENO, Mateus Santos. **Análise teórico-experimental de secagem utilizando secador solar com diferentes formatos de placa absorvedora**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, A. M. **Estudo experimental da secagem de banana utilizando secador solar**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

OLIVEIRA, Alexandre Melo De. **Estudo experimental da secagem de banana utilizando secador solar**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PARK, K. J. *et al.* **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. 2007. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional – Apostila).

SANTOS, Vinícius Lopes Vilaça. **Análise numérica do escoamento e do comportamento térmico de um secador solar ativo misto utilizando COMSOL Multiphysics**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2018. 83p.

SHRIVASTAVA, Vipin; KUMAR, Anil. Experimental investigation on the comparison of

fenugreek drying in an indirect solar dryer and under open sun. **Heat Mass Transfer**, v. 52, p. 1963–1972, 2016.

SHRIVASTAVA, Vipin; KUMAR, Anil. Experimental investigation on the comparison of fenugreek drying in an indirect solar dryer and under open sun. **Heat Mass Transfer**, v. 52, p. 1963–1972, 2016.

UDOMKU, Patchimaporn *et al.* Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. **Journal of Environmental Management**, v. 268, n. 15, 2020.