



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**REBECA AQUINO BARBOSA**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO  
INDIRETA PARA SECAGEM DE ALIMENTOS**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2023**

REBECA AQUINO BARBOSA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO  
INDIRETA PARA SECAGEM DE ALIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

**Área de concentração:** Simulação Numérica

**Orientadora:** Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz

**Coorientadora:** Profa. Dra. Ivonete Batista dos Santos

**CAMPINA GRANDE - PB  
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B238s Barbosa, Rebeca Aquino.  
Simulação numérica via CFD um secador solar de  
exposição indireta para secagem de alimentos [manuscrito] /  
Rebeca Aquino Barbosa. - 2023.  
19 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da  
Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação : Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz, Coordenação  
do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT. "

"Coorientação: Profa. Dra. Ivonete Batista dos Santos ,  
Coordenação do Curso de Física - CCT."

1. Modelagem matemática. 2. CFD. 3. Secadores solares.

I. Título

21. ed. CDD 628

REBECA AQUINO BARBOSA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO  
INDIRETA PARA SECAGEM DE ALIMENTOS**

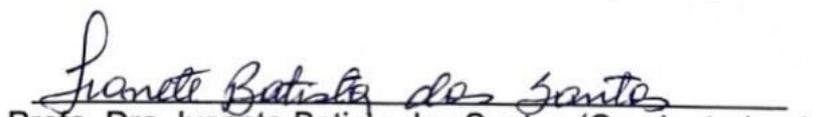
Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

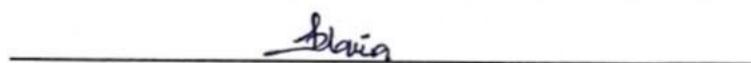
Área de concentração: Simulação Numérica

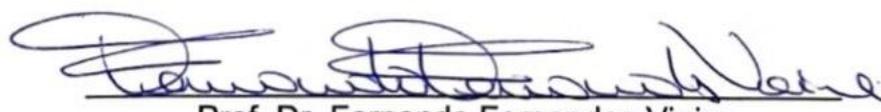
Aprovada em: 29/11/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz (Orientadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ivonete Batista dos Santos (Coorientadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais, Sheila e Reinaldo, pelo apoio, dedicação e companheirismo, DEDICO.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Secagem de Alimentos .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Secadores Solares .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Simulação Numérica .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>17</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>17</b>

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO INDIRETA PARA SECAGEM DE ALIMENTOS

### NUMERICAL SIMULATION VIA CFD OF AN INDIRECT EXPOSURE SOLAR DRYER FOR FOOD DRYING

Rebeca Aquino Barbosa\*  
Ivonete Batista dos Santos\*\*  
Márcia Ramos Luiz\*\*\*

#### RESUMO

A secagem de alimentos é uma técnica de conservação de alimentos antiga, porém ainda muito utilizada, seja na secagem natural ou artificial. Os secadores convencionais utilizados nesse processo possuem altos custos em relação ao funcionamento e manutenção, por utilizarem fontes não renováveis de energia. Na busca pelo desenvolvimento sustentável, os secadores solares vêm ganhando espaço, pois utilizam energia limpa e são mais econômicos. Entender como ocorre o processo de aquecimento do ar através da radiação solar dentro desses equipamentos é de extrema importância, principalmente, quando se trata de desenvolver melhores estratégias para o funcionamento desse tipo de tecnologia e a simulação numérica com a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), nos permite isso. A proposta deste trabalho foi mostrar como ocorre a dinâmica do ar de secagem no interior de um secador solar e analisar sua viabilidade para a secagem de alimentos. Para isso, foi realizada uma simulação numérica utilizando o programa computacional Ansys CFX na versão estudante. Foi feita a construção da geometria do secador, com as especificações físicas e definições das condições iniciais e de contorno. Considerou-se a entrada do ar a 25°C, com velocidade de 0,1 m/s. A simulação foi realizada considerando um regime de escoamento permanente. Por meio da simulação no Ansys CFX foi possível entender a dinâmica do ar de secagem no interior do secador solar. De acordo com as condições iniciais e de contorno que foram estabelecidas, o equipamento se mostrou apto para secagem de alimentos. A temperatura alcançada na câmara de secagem foi de cerca de 33,99°C, que é considerada dentro dos padrões ideais para a secagem de frutas com alto grau de açúcar. É importante destacar que a simulação numérica não substitui totalmente os testes experimentais, pois é extremamente necessário validar os dados da simulação com valores medidos experimentalmente. Por meio dos resultados obtidos foi possível compreender melhor como se dá o aquecimento do ar no interior do equipamento.

**Palavras-chave:** secadores solares; modelagem matemática; CFD.

---

\* Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental. E-mail: [rebeca.aquino@aluno.uepb.edu.br](mailto:rebeca.aquino@aluno.uepb.edu.br)

\*\*Doutora em Engenharia de Processos. E-mail: [ivonetebs@servidor.uepb.edu.br](mailto:ivonetebs@servidor.uepb.edu.br)

\*\*\*Doutora em Engenharia Mecânica. E-mail: [marciarluiz@servidor.uepb.edu.br](mailto:marciarluiz@servidor.uepb.edu.br)

## ABSTRACT

Food drying is an old food preservation technique, but still widely used, whether natural or artificial drying. Conventional dryers used in this process have high costs in relation to operation and maintenance, as they use non-renewable energy sources. In the search for sustainable development, solar dryers have been gaining ground, as they use clean energy and are more economical. Understanding how the air heating process occurs through solar radiation within this equipment is extremely important, especially when it comes to developing better strategies for the operation of this type of technology and numerical simulation with Computational Fluid Dynamics (CFD), allows us to do this. The purpose of this work was to show how the dynamics of drying air occurs inside a solar dryer and analyze its viability for drying food. For this, a numerical simulation was carried out using the Ansys CFX computer program in the student version. The dryer geometry was constructed, with physical specifications and definitions of initial and boundary conditions. Air entry was considered at 25°C, with a speed of 0.1 m/s. The simulation was carried out considering a permanent flow regime. Through simulation in Ansys CFX, it was possible to understand the dynamics of the drying air inside the solar dryer. According to the initial and boundary conditions that were established, the equipment proved to be suitable for drying food. The temperature reached in the drying chamber was around 33.99°C, which is considered within the ideal standards for drying fruits with a high sugar content. It is important to highlight that numerical simulation does not completely replace experimental tests, as it is extremely necessary to validate simulation data with experimentally measured values. Through the results obtained, it was possible to better understand how the air heats up inside the equipment.

**Keywords:** solar dryers; mathematical modeling; CFD.

## 1 INTRODUÇÃO

A secagem de alimentos é uma técnica bastante antiga e que desempenha um papel extremamente importante na conservação dos alimentos, uma vez que é capaz de interromper a deterioração natural por microrganismos e alterações químicas e enzimáticas que são causadas, principalmente, pela presença de água. Além disso, devido a remoção da umidade, os alimentos se tornam mais leves e compactos, o que facilita o armazenamento e transporte dos alimentos (Celestino, 2010).

Com o processo de secagem, a atividade de água e o teor de umidade dos alimentos são reduzidos, de modo que o crescimento de microrganismos nos alimentos é amplamente evitado/adiado (Alp e Bulantekin, 2021). As frutas são alimentos altamente perecíveis, devido ao seu alto teor de água, fragilidade de sua estrutura e quantidade de açúcar (Bauer, Wally e Peter, 2014). Há uma grande perda desses produtos entre a colheita e o consumidor final. Técnicas de secagem bem desenvolvidas podem reduzir essas perdas significativamente (Lingayat et al., 2020).

De modo geral, a secagem é um processo complexo e de grande demanda energética. Portanto, é imprescindível o aprimoramento de tecnologias de secagem que já existem e o desenvolvimento de novas abordagens que sejam capazes de reduzir o consumo de energia e o tempo de secagem, assegurando a qualidade do produto final (Araújo, 2019).

Embora existam várias formas e técnicas de secagem de alimentos, uma das maneiras mais convencionais de desidratação é por meio de secadores que além de serem caracterizados por possuírem altos custos de investimento e manutenção, são equipamentos que utilizam fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis, o que acaba contribuindo para o agravamento de problemas ambientais (Silveira, 2016). Tendo em vista que a produção desse tipo de energia gera gases que contribuem para o efeito estufa e conseqüentemente provoca e intensifica o processo de mudanças climáticas (Asnaz e Dolcek, 2021).

A crescente preocupação mundial com relação as mudanças climáticas gera uma grande pressão global pela redução da dependência de fontes não renováveis de energia e uma busca por soluções inovadoras e sustentáveis.

Diante desse cenário, vários estudos vêm sendo realizados sobre o uso de energia solar no processo de secagem de alimentos, principalmente, com a utilização de secadores solares. Já que a energia proveniente do sol é amplamente disponível, sendo um tipo de energia limpa, de caráter renovável, sua produção não gera poluentes nem prejudica o meio ambiente. O seu aproveitamento é uma das alternativas mais promissoras quando se trata de desenvolvimento sustentável. Com isso, o uso de secadores solares se torna uma alternativa muito mais segura, econômica e ao mesmo tempo sustentável para a desidratação de alimentos (Lingayat et al., 2020).

Com os avanços da tecnologia computacional, a simulação numérica através da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) se tornou um processo promissor no desenvolvimento desses secadores solares, pois por meio desta é possível prever o processo de secagem, o fluxo de ar e a temperatura dentro dos secadores. Ela surge como uma forma de otimizar e prever o funcionamento, antes mesmo da construção do equipamento, além de reduzir os custos e riscos de falhas em um novo projeto (Jha e Tripathy, 2021).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio da simulação numérica, a viabilidade de utilização de um secador solar indireto para a secagem de alimentos.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Secagem de alimentos**

A secagem é uma operação unitária que consiste na adição de calor e remoção de água de um produto, que ocorre simultaneamente. Essa transferência de calor através do ar aquecido faz com que a água presente no alimento seja evaporada, sendo a temperatura e a umidade relativa fatores importantes nesse processo (Celestino, 2010).

Como a água presente nos alimentos é o principal fator responsável pela deterioração por microrganismos e alterações químicas e enzimáticas, sua remoção por meio da secagem garante que o alimento tenha sua vida útil prolongada. Além disso, a secagem se torna um processo econômico, já que o produto desidratado passa a ter baixo custo de armazenagem e fácil transporte (Celestino, 2010).

Alimentos como frutas e hortaliças são considerados perecíveis em virtude do alto teor de água que as compõe e da fragilidade de suas estruturas (Bauer, Wally e Peter, 2014), havendo grandes perdas desses produtos após a colheita.

O desperdício de alimentos é um problema em vários âmbitos: social, já que grande parcela da população brasileira se encontra em situação de insegurança

alimentar; ambiental, pois gera uma grande quantidade de resíduos que impactam os aterros sanitários e; econômico, pelos custos associados à perda e à destinação do resíduo orgânico. O varejo é uma das etapas mais importantes no sistema alimentar, entretanto, são poucos os estudos com dados primários sobre o desperdício (Campos e Melhem, 2022).

Com isso, a secagem é considerada um processo bastante importante na indústria agrícola, já que reduz as perdas de alimentos entre a colheita e o consumo e garante o armazenamento desses alimentos por longos períodos (Asnaz e Dolcek, 2021). Bauer, Wally e Peter (2014) destacam que em termos comerciais alguns dos alimentos desidratados mais populares são a banana, maçã, uva passa, ameixa, tomate, orégano, cebola, cenoura e batata. As frutas desidratadas podem ser empregadas na fabricação de diversos doces e produtos de confeitaria. Já as hortaliças são utilizadas em sopas e macarrões instantâneos.

Nos últimos anos, várias pesquisas e estudos vêm sendo realizados a fim de melhorar as técnicas e as tecnologias de secagem de alimentos, capazes de fornecer produtos desidratados de boa qualidade e com baixo custo (Mota, 2005).

A desidratação de alimentos pode ser realizada de forma natural (quando o material a ser seco fica exposto à radiação solar por um certo período, dependendo de condições climáticas, como altas temperaturas, ventos moderados e baixas umidades relativas) ou por meio de secadores (caracterizada pelo uso de equipamentos, onde é possível ter um controle de parâmetros como a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem). A escolha do secador ideal depende das características da qualidade final desejada para cada alimento (Francisquetti, 2017).

O tipo de secagem solar ao natural é um dos métodos mais antigos e comuns de secagem e preservação. Embora ainda seja uma opção bastante utilizada nos dias de hoje, esta por ser a céu aberto apresenta vários problemas e riscos aos alimentos, já que ficarão expostos ao vento, chuva, umidade e poeira, além de sofrerem danos e perdas devido a presença de pássaros e outros animais, reduzindo assim a qualidade do produto (Nukulwar e Tungikar, 2021).

Outra opção disponível é secagem artificial de alimentos, porém essa é uma técnica bem mais cara, demanda a utilização de uma grande quantidade de combustíveis fósseis, por isso é considerada não sustentável, podendo causar poluição. Já o secador solar é a alternativa mais segura, higiênica e econômica, pois nele os produtos são secos de forma mais rápida, com boa qualidade e sustentável (Asnaz e Dolcek, 2021).

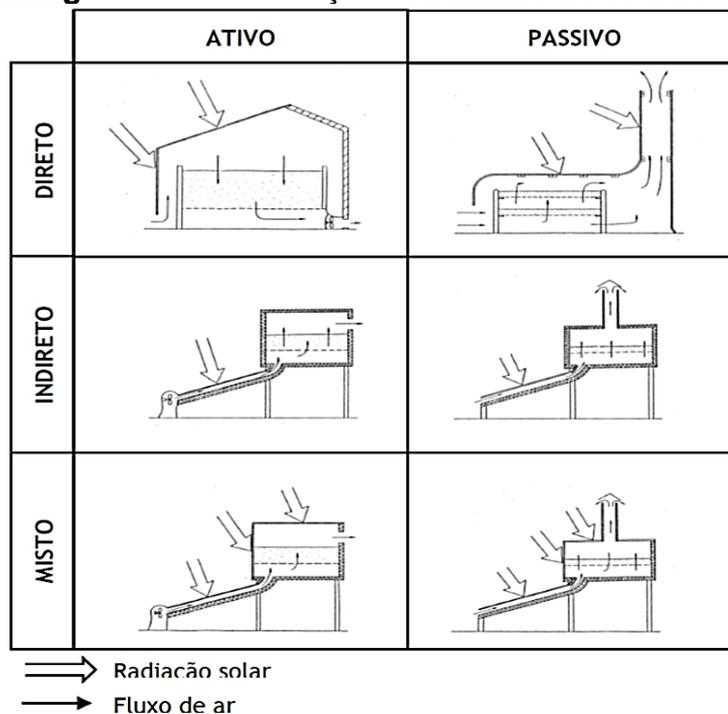
A partir da utilização de sistemas de secagem solar bem desenvolvidos é possível reduzir significativamente as perdas pós-colheita de produtos agrícolas, o que ainda é um grande problema nos países em desenvolvimento (El-Sebaei e Shalaby, 2012; El-Mesery et al., 2022).

## **2.2 Secadores Solares**

O secador solar consiste em um equipamento que utiliza o sol como fonte de energia para retirar a umidade de um produto (El Hage et al., 2018). Ao contrário dos secadores convencionais, esses equipamentos exigem baixo custo de investimento, além de serem uma alternativa sustentável que pode oferecer qualidade e segurança para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios (Kumar, Sansanuval e Khatak, 2016).

Os secadores solares apesar de serem consideradas tecnologias simples podem ter diferentes junções de elementos. São equipamentos que podem variar bastante em sua construção (Belessiotis e Delyannis, 2011). Estes podem ser classificados em relação a forma de exposição do produto e em relação a forma de passagem do ar de secagem (Basso, 2017), como pode ser verificado na Figura 1.

**Figura 1 - Classificação dos secadores solares.**



**Fonte:** Parente (2016).

Quanto a forma de exposição do produto a radiação solar, eles podem ser do tipo direto, indireto ou misto. No secador solar do tipo direto, o produto a ser seco fica exposto diretamente a radiação solar. Geralmente, esses equipamentos são compostos por uma câmara contendo uma cobertura transparente, que pode ser de vidro e aberturas para a entrada e saída de ar (Basso, 2017). Essa é uma maneira simples e barata de secar um produto e garantir que ele estará protegido de poeira, chuva e demais interferências que possam influenciar negativamente no processo de secagem (Getahun et al., 2021).

Em um secador do tipo indireto, o material a ser seco fica disposto em prateleiras dentro de uma câmara de secagem, onde recebe o ar aquecido através do coletor solar. O coletor solar, por sua vez, é uma estrutura muito importante para a secagem solar indireta, composto por uma cobertura de vidro, essa estrutura precisa ter uma certa inclinação (Lingayat et al., 2020). Esse ângulo de inclinação irá depender da latitude do local em que o secador se encontra, e tem influência direta no escoamento do ar e na eficiência de absorção da radiação solar pelo coletor (Lima, 2019).

No secador solar indireto, à medida que o ar entra no coletor vai sendo aquecido pela radiação solar que atinge a cobertura do vidro. Assim, o ar quente entra na câmara de secagem, retirando a umidade do alimento. Para uma melhor absorção da radiação solar, também é recomendado que o coletor solar seja revestido na cor preta (Lingayat et al., 2020), no intuito de absorver com mais precisão a luz e o calor

do sol. O ideal, inclusive, é que ela seja fosca, para que absorva a iluminação sem refletir e realizar a transformação perfeita dessa absorção em calor.

O secador solar do tipo misto reúne os dois processos citados anteriormente, ou seja, o alimento poderá ser seco tanto de maneira direta como indireta (El-Mesery et al., 2022).

Em relação ao modo de passagem do ar de secagem, os secadores solares podem ser de dois tipos: passivos ou ativos. Eles serão definidos como passivos quando a passagem do ar de secagem em seu interior for por convecção natural. Já os secadores solares classificados como ativos são aqueles em que a passagem do ar se dá por meio da convecção forçada, com o uso de um ventilador, compressor ou exaustor (Lima, 2019).

Devido ao fato de não precisarem de nenhum componente mecânico para circulação do ar, os secadores que utilizam convecção natural são considerados mais simples e apresentam custos menores. Porém, segundo Nukulwar e Tungikar (2021), os secadores de convecção forçada acabam apresentando uma maior taxa de secagem, sendo ideais para secagem de produtos com elevado teor de umidade.

Há ainda os secadores solares híbridos, que utilizam além da energia solar outra fonte auxiliar de energia para adicionar calor ao processo de secagem do produto (Basso, 2017), como por exemplo a energia elétrica, biomassa, geotérmica ou fotovoltaica. O desenvolvimento desses secadores é recente, sendo motivado pelo crescimento significativo da produção agrícola.

Devido ao uso de energia adicional, esses equipamentos não são totalmente dependentes da radiação solar, isso faz com que eles ofereçam uma maior eficiência no processo de secagem, principalmente, em condições climáticas mais desfavoráveis.

O tipo de secador solar pode influenciar bastante na eficiência de secagem e a escolha do mais adequado vai depender de várias questões como a quantidade e as características do material que se deseja secar, as condições climáticas e os recursos disponíveis.

Além disso, a velocidade do ar de secagem, a umidade relativa do ar e a temperatura alcançada no interior do secador solar são alguns exemplos de fatores que também irão afetar o desempenho do equipamento (El Hage et al., 2018), influenciando na qualidade do alimento desidratado.

### **2.3 Simulação Numérica**

Utilizando métodos matemáticos e computacionais, a simulação numérica é capaz de analisar e projetar o comportamento de sistemas físicos complexos (Silva, 2019a). Nos últimos anos, houve um aumento expressivo do uso da simulação numérica na resolução de problemas na área de engenharia, inclusive para modelar sistemas de secagem (Jha e Tripathy, 2021). Isso se deve, principalmente, ao avanço da tecnologia e o desenvolvimento de computadores cada vez mais potentes e com maior capacidade de processamento.

Dentre os diversos métodos computacionais avançados que surgiram nos últimos anos, a Dinâmica de Fluidos Computacional - CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) vem ganhando bastante destaque na simulação de fenômenos como escoamentos de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos associados. Sua aplicação vem se tornando muito importante no desenvolvimento e otimização dos secadores solares, permitindo criar modelos capazes de descrever o

comportamento desses equipamentos de maneira mais precisa e realista (Jha e Tripathy, 2021).

De acordo ainda Jha e Tripathy (2021), por meio da simulação numérica via CFD é possível prever parâmetros como o perfil de temperatura, o fluxo de ar e a umidade nos sistemas de secagem. Além disso, vários cenários podem ser explorados de forma rápida e eficiente. O *design*, assim como os materiais que compõem o secador solar podem ser alterados de forma a satisfazer uma melhor eficiência no processo de secagem, facilitando na escolha do modelo de secador solar mais adequado. Dessa forma, a simulação numérica em CFD dispensa a necessidade de realização de testes empíricos extensivos, economizando tempo e recursos.

O CFD resolve equações que descrevem o escoamento de fluidos, em uma região de interesse sob condições de contorno definidas. No mercado, existem diversos pacotes e códigos computacionais com *softwares* que fazem análises de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), um exemplo notável é o Ansys CFX, uma ferramenta de grande potencial que se baseia no chamado Método dos Volumes Finitos. Nesse método, a área de resolução é subdividida em numerosas regiões extremamente pequenas chamadas de volumes de controle, onde as equações são discretizadas e calculadas individualmente para cada um desses volumes (Silva, 2019a).

Segundo Martins et al. (2010) algumas das principais equações que podem ser resolvidas são as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e a equação de conservação da energia. Essas equações podem ser escritas na seguinte forma:

A Conservação de massa na Equação (1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

Sendo  $\rho$  a massa específica do ar,  $t$  é o tempo e  $U$  é a velocidade do ar.

A Quantidade de movimento linear de acordo com a Equação (2).

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho U U) - \nabla p + \nabla \{ \mu_{\text{eff}} [\nabla U + (\nabla U)^T] \} + SM \quad (2)$$

Onde,  $\nabla p$  é o gradiente de pressão,  $\mu_{\text{eff}}$  é a viscosidade dinâmica efetiva e  $SM$  é o termo fonte do momento linear.

A Conservação da energia de acordo com a Equação (3).

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_t) = +\nabla \cdot (k(\nabla T)) + SE \quad (3)$$

Onde,  $h_t$  é a entalpia específica total;  $k$  é a condutividade térmica,  $T$  é a temperatura e  $SE$  é o termo fonte da equação da energia.

### 3 METODOLOGIA

Para o presente estudo foi realizada uma simulação do escoamento do ar de secagem no interior de um secador solar do tipo indireto, utilizando o programa computacional Ansys CFX na versão estudante, o qual trabalha com a técnica de CFD.

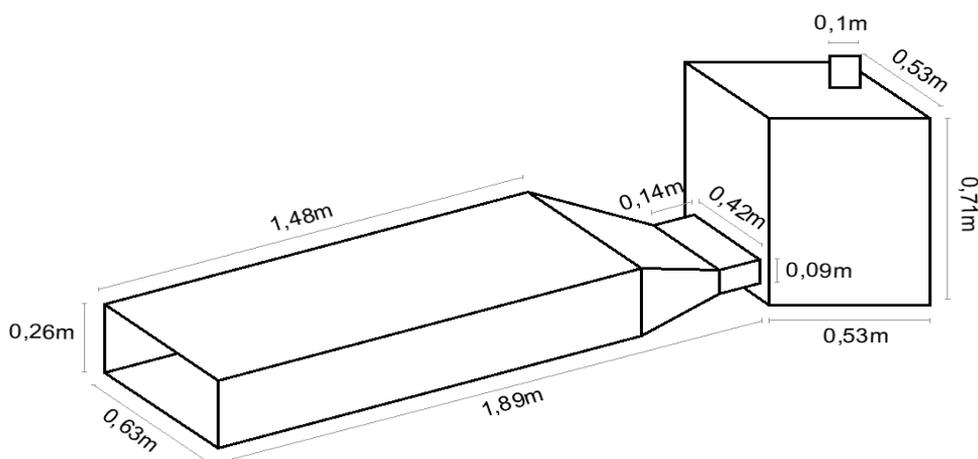
O secador utilizado na simulação possui medidas e *design* semelhantes ao secador híbrido solar-elétrico indireto ativo utilizado por Silva (2019b), que foi construído de madeira reaproveitada e equipamentos de sucata do depósito da Universidade Estadual da Paraíba. O modelo do secador solar pode ser observado na Figura 2. Na Figura 3 podem ser observadas as dimensões reais e utilizadas na simulação.

**Figura 2 - Secador híbrido solar-elétrico indireto ativo.**



Fonte: Silva (2019b).

**Figura 3 - Dimensões do secador solar utilizado na simulação.**

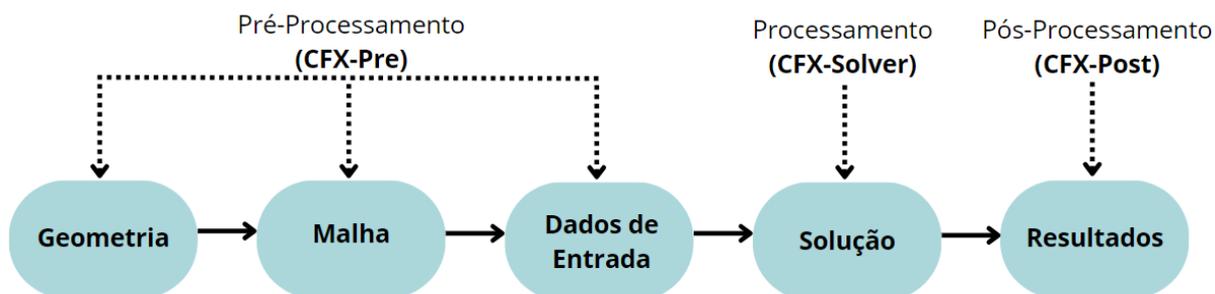


Fonte: Própria (2023).

Esse modelo de secador solar possui duas partes principais, uma câmara de secagem com uma porta em sua lateral e um coletor solar plano com tampo de vidro transparente, inclinado  $17^\circ$  com a horizontal.

A simulação foi iniciada no *Workbench*, plataforma da Ansys que reúne diversos programas, os métodos empregados na simulação podem ser observados na Figura 4.

**Figura 4 - Métodos empregados na simulação.**



**Fonte:** Própria (2023).

O pré-processamento no CFX-Pre, consistiu, inicialmente, na construção da geometria do secador solar, seguindo exatamente as medidas descritas anteriormente. Em seguida, sua malha foi gerada.

Com relação a configuração dos dados de entrada, foram adicionadas as especificações físicas do problema, as definições das condições iniciais e de contorno, as propriedades do fluido, assim como o modelo de turbulência utilizado e os parâmetros de solução.

No coletor solar, considerou-se o ar entrando a uma temperatura ambiente de 25°C, com velocidade de 0,1 m/s. A simulação foi realizada considerando um regime de escoamento permanente.

A escolha do modelo de turbulência é um fator bastante importante, para a simulação foi escolhido o modelo K-épsilon, sendo este amplamente utilizado para esse tipo de simulação. K-épsilon é um modelo de turbulência que resolve duas equações de transporte para duas variáveis principais, a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação específica de energia turbulenta (épsilon) (Pereira, 2010).

As temperaturas do coletor solar foram estabelecidas com base na média dos resultados experimentais obtidos por Silva (2019b), sendo 48°C no vidro e 61°C no interior do coletor solar.

Já as paredes do secador solar foram consideradas adiabáticas e foram estabelecidas condições de não deslizamento.

Na simulação, não foram incluídas as bandejas nem os alimentos dentro do secador solar, apenas foi estudado o comportamento do ar no processo de secagem.

Durante a etapa de processamento da simulação, no CFX-Solver, o *software* resolveu as equações matemáticas que descrevem o comportamento do sistema, de forma iterativa, até atingir a convergência para uma solução estável. Nessa fase, também foi possível monitorar o progresso da solução.

Já a última etapa da simulação, o pós-processamento, realizada no CFX-Post, ocorreu a análise dos resultados para entender o desempenho do sistema modelado.

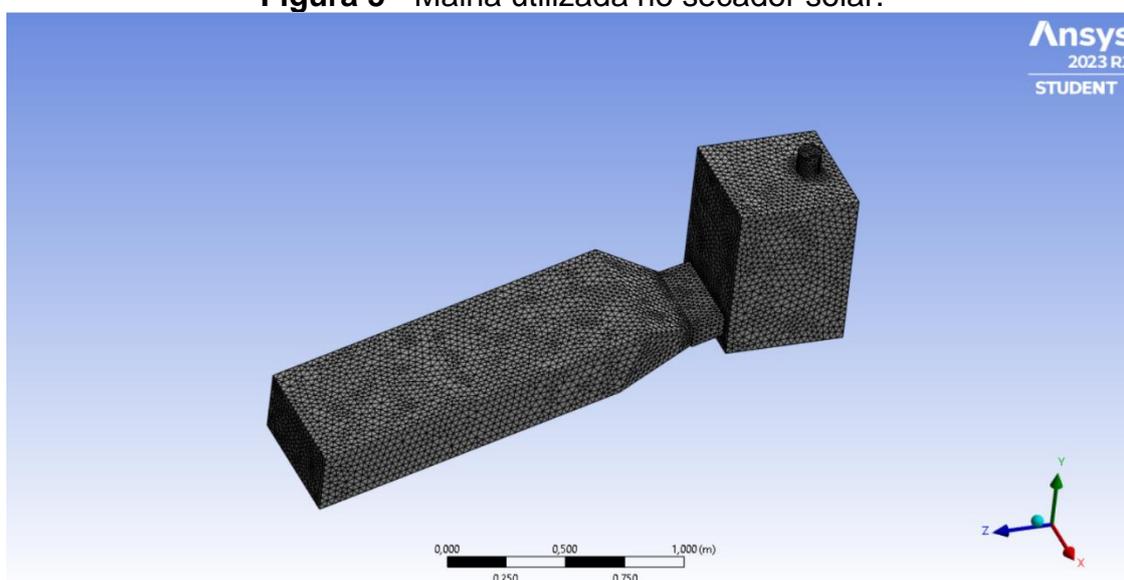
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação foi realizada em um computador com processador core i3 7ª geração, com uma memória RAM de 4GB. Considerando um regime permanente, a simulação durou cerca de 33 minutos. O número total de elementos utilizados na simulação foi de 156.200, já o número de nós foi de 29.662.

A malha é um fator muito importante, pois esta é composta por elementos finitos e um bom refinamento pode tornar os resultados da simulação mais confiáveis, isso porque o tamanho dos elementos é reduzido, aumentando o número de pontos onde as equações são resolvidas. Contudo, quanto mais refinada for a malha mais demorado será o processamento da simulação.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a malha mostrada na Figura 5, onde pode-se observar que ela é do tipo tetraédrica. Malhas desse tipo são compostas por elementos no formato de tetraedros, sólidos com quatro faces triangulares.

**Figura 5 - Malha utilizada no secador solar.**

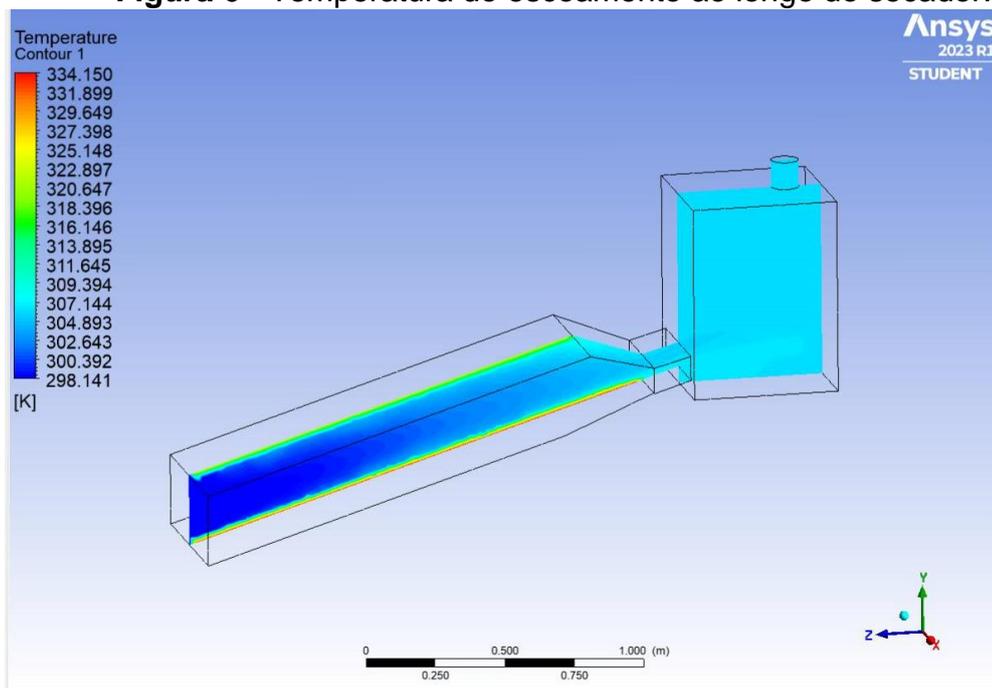


Fonte: Própria (2023).

A malha utilizada foi mais refinada na entrada e saída da câmara de secagem. Foi realizado um estudo da convergência de malha, ou seja, malhas ainda mais refinadas foram testadas. Porém os resultados numéricos obtidos na simulação não mudam significativamente à medida que se aumenta o refinamento da malha utilizada. A convergência da malha é importante para garantir que os resultados numéricos obtidos sejam confiáveis e representem adequadamente o comportamento real do sistema.

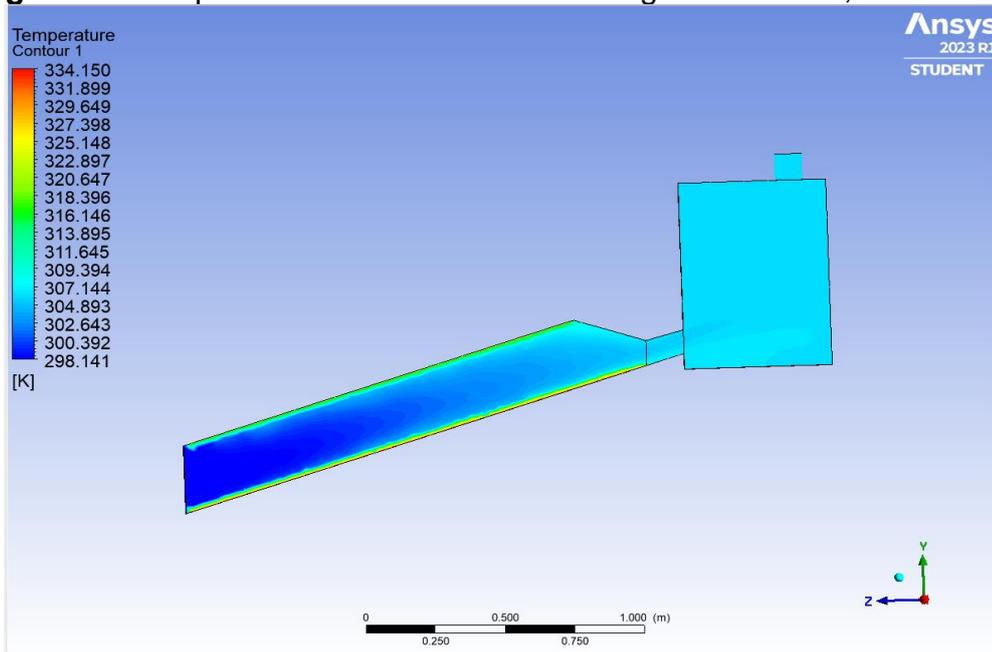
Por meio das Figuras 6 e 7, torna-se possível observar como se deu o aquecimento do ar no interior do secador, no plano vertical YZ, onde o ar entra a uma temperatura ambiente de 25°C e à medida que percorre o coletor solar vai sendo aquecido pelo vidro e pelo fundo do coletor solar que se encontram a 48°C e 61°C, respectivamente. Durante este processo, a temperatura na câmara de secagem chegou a cerca de 33,99°C.

**Figura 6 - Temperatura do escoamento ao longo do secador.**



Fonte: Própria (2023).

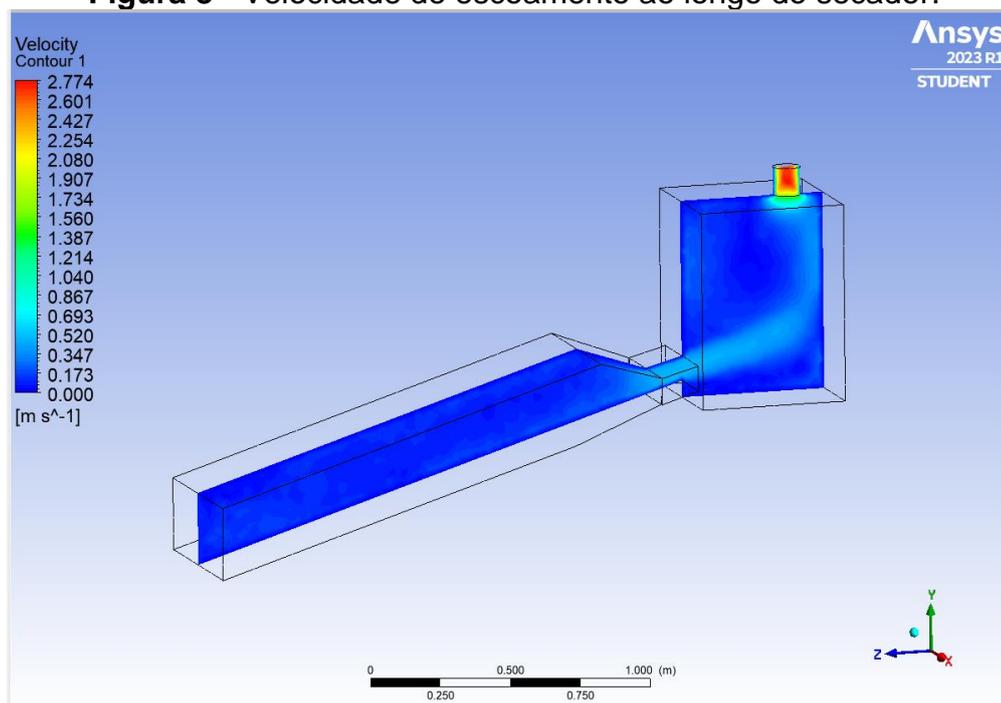
**Figura 7 - Temperatura do escoamento ao longo do secador, vista lateral.**



Fonte: Própria (2023).

A velocidade do ar na entrada do secador foi considerada igual a 0,1 m/s, e é possível observar o escoamento do ar ao longo do secador conforme mostrado na Figura 8. A redução da área faz com que o fluxo de ar se acelere, isso acontece especialmente na parte mais estreita do coletor, quando o ar entra na câmara de secagem. Essa aceleração aumenta ainda mais na saída da câmara de secagem, onde a velocidade foi verificada em 2,77 m/s. Ou seja, dentro da câmara de secagem a velocidade do ar não é homogênea e esse é um fator importante que pode afetar o processo de secagem.

**Figura 8 - Velocidade de escoamento ao longo do secador.**

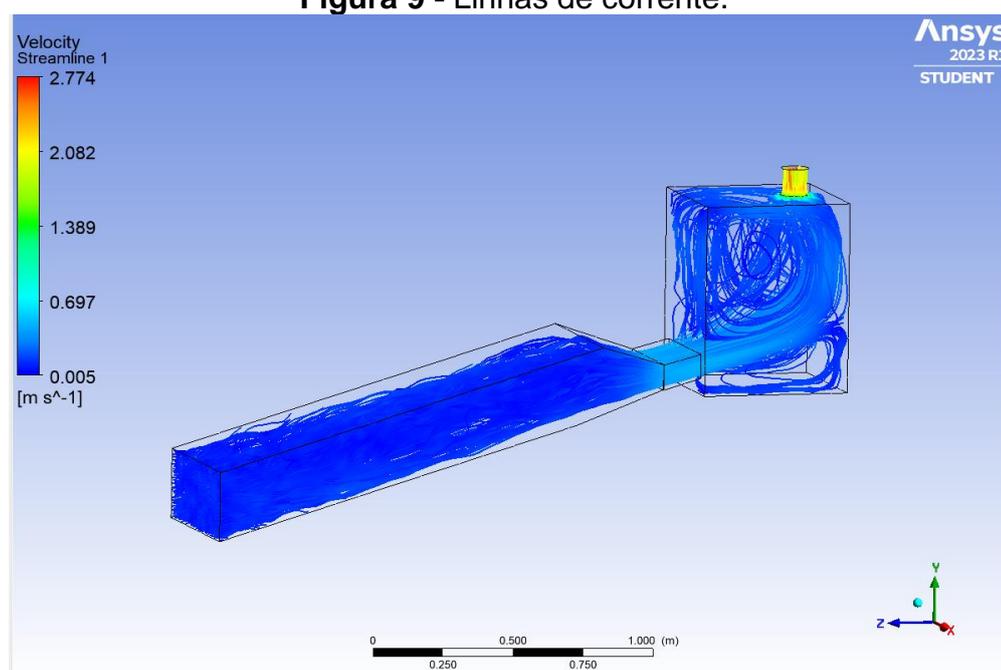


Fonte: Própria (2023).

Na simulação, foram testados outros valores mais altos de velocidade do ar de entrada. No entanto, notou-se que quando a velocidade do ar é aumentada, não ocorre um aquecimento suficiente na câmara de secagem.

Na Figura 9 é possível entender melhor a dinâmica do ar de secagem no interior do secador solar, com as linhas de corrente do escoamento. Vê-se por meio da mesma que o escoamento no coletor solar é um pouco mais suave e que na câmara de secagem ocorre recirculação do ar, devido a brusca redução dele na saída.

**Figura 9 - Linhas de corrente.**



Fonte: Própria (2023).

## 5 CONCLUSÃO

Os secadores solares são uma alternativa barata e sustentável para a secagem de alimentos como frutas e hortaliças. Sendo uma boa opção, principalmente, para pequenos produtores rurais, que poderão desidratar seus próprios alimentos de forma segura, aumentando sua renda e ao mesmo tempo evitando o desperdício de suas colheitas.

Um projeto de secador solar bem desenvolvido pode garantir uma secagem altamente eficiente, por meio da simulação numérica em CFD, onde é possível conhecer o comportamento do ar de secagem e prever a temperatura no interior do secador solar. Esses são fatores extremamente importantes para que se tenha um processo de secagem adequado. Dessa forma, a simulação numérica em CFD permite reconhecer pontos a serem melhorados e planejar novas estratégias para alcançar uma melhor eficiência do secador solar sem a necessidade de testes empíricos exaustivos.

Através da simulação no Ansys CFX foi possível entender a dinâmica do ar de secagem no interior do secador solar. De acordo com as condições iniciais e de contorno que foram estabelecidas, o equipamento se mostrou apto para secagem de alimentos. A temperatura alcançada na câmara de secagem foi de cerca de 33,99°C, que ainda é considerada dentro dos padrões para a secagem de alimentos como frutas com alto teor de açúcar e algumas hortaliças.

Acredita-se que os resultados com a simulação ainda possam ser melhorados futuramente. O ajuste de alguns parâmetros utilizados pode tornar a simulação ainda mais confiável. Também é importante destacar que a simulação numérica não substitui totalmente os testes experimentais, pois é extremamente necessário validar os dados da simulação com valores medidos experimentalmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALP, D.; BULANTEKIN, Ö. The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: a review. **European Food Res Technology**, v. 2471, p. 333-1343, 2021.
- ARAÚJO, M. V. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos Industriais**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- ASNAZ, M. S. K.; DOLCEK, A. O. Comparative performance study of different types of solar dryers towards sustainable agriculture. **Energy Reports**, v.7, p. 6107–6118, 2021.
- BASSO, D. M. **Simulação do sistema de aquecimento de ar de um secador solar híbrido de produtos agro alimentícios usando o TRNSYS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- BAUER, V. R. P. WALLY, A. P. PETER, M. Z. **Tecnologia de frutas e hortaliças**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Pelotas, 2014.
- BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar Energy**, v. 85, p. 1665–1691, 2011.

- CAMPOS, L. R.; MELHEM, L. C. **Mensuração do desperdício de Frutas, Legumes e Verduras em um varejo de pequeno porte**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- CELESTINO, Sonia Maria Costa. **Princípios de Secagem de Alimentos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010.
- EL HAGE, H. *et al.* An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. **Energy**, v. 157, p. 815-829, 2018.
- EL-MESERY, H. S. *et al.* Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157 p. 112070, 2022.
- EL-SEBAIL, A. A.; SHALABY, S. M. Solar drying of agricultural products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, p. 37–43, 2012.
- FRANCISQUETTI, M. C. C. **Produção de uvas-passas variedade Crimson: modelagem matemática e estudo experimental**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- GETAHUN, E. *et al.* Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review. **Solar Energy**, v. 220, p. 88–110, 2021.
- JHA, A.; TRIPATHY, P. P. Recent Advancements in Design, Application, and Simulation Studies of Hybrid Solar Drying Technology. **Food Engineering Reviews**, v. 13, p. 375–410, 2021.
- KUMAR, M.; SANSANIWAL, S. K.; KHATAK, P. Progress in solar dryers for drying various commodities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 346–360, 2016.
- LIMA, G. S. **Análise experimental da operação de um secador solar passivo distribuído para a secagem de hortaliças**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- LINGAYAT, A. B. *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, p. 114005, 2020.
- MARTINS, O. T. *et al.* Simulação numérica do escoamento de ar dentro de um secador solar. *In*: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., 2010, Campina Grande. **Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**.
- MOTA, R. V. Avaliação da qualidade físico-química e aceitabilidade de passas de pêssego submetidas à desidratação osmótica. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 789-794, 2005.
- NUKULWAR, M. R.; TUNGIKAR, V. B. A review on performance evaluation of solar dryer and its material for drying agricultural products. **Materials Today: Proceedings**, V. 46, p. 345–349, 2021.

PARENTE, D. F. M. **Desenvolvimento de uma unidade experimental para o estudo do processo de secagem solar.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica) - Universidade da Beira Interior, Covilhã-PT, 2016.

PEREIRA, I. A. B. B. **Escoamento turbulento em torno de um cilindro a baixo número de Reynolds: Comparação entre modelos de turbulência.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto-PT, 2010.

SILVA, C. V. **Introdução ao Ansys CFX.** 2019a. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, GEAPI - Grupo de Engenharia Aplicada a Processos Industriais, LABSIM - Laboratório de Simulação Numérica.

SILVA, T. F. **Análise da eficiência de um secador solar indireto ativo.** 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019b.

SILVEIRA, L. R. **Modelagem de um secador solar de produtos agrícolas com sistema de armazenagem de energia térmica.** 2016. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2016.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a toda minha família, em especial aos meus pais, cujo apoio incondicional e incentivo foram fundamentais durante toda essa jornada, meus exemplos de dedicação e persistência. Cada conquista alcançada é resultado direto da confiança e do suporte que sempre me proporcionaram.

Aos meus amigos do curso, pela amizade construída ao longo desses anos, por todos os momentos e experiências compartilhadas. Pela cumplicidade e companheirismo e por tornarem essa jornada acadêmica muito mais leve e repleta de risadas e aprendizados.

Às minhas orientadoras pela orientação, paciência e ensinamentos valiosos ao longo deste trabalho.

Aos professores da banca, pela disponibilidade em contribuir com seus conhecimentos e avaliar este trabalho. E a todos os demais professores do departamento por todo conhecimento passado durante o curso.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através da bolsa de iniciação científica, que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.