

SECAGEM DE GRÃOS E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: MÉTODOS, TECNOLOGIAS E TENDÊNCIAS

Data de submissão: 30/01/2025

Data de aceite: 05/03/2025

Leonardo França da Silva

Universidade Federal da Grande
Dourados
Dourados – Mato Grosso do Sul (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-9710-8100>

José Rafael Franco

Faculdade de Ciências Agrônômicas FCA
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
<https://orcid.org/0000-0002-7129-4304>

Cássio Furtado Lima

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Pará - IFPA
<https://orcid.org/0000-0001-5461-1809>

Marcos Antônio Pereira da Fonseca Maltez

Universidade Federal Rio Grande do Sul
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
<https://orcid.org/0000-0003-0941-8051>

Silvana Ferreira Bicalho

Universidade Estadual do Sudoeste da
Bahia
Vitória da Conquista - Bahia (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-5502-6430>

Ariadna Faria Vieira

Universidade Estadual do Piauí
Uruçuí- Piauí (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-1185-4269>

Cristiano Márcio Alves de Souza

Universidade Federal da Grande
Dourados
Dourados – Mato Grosso do Sul (Brasil)

Matheus Mendes Reis

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
(IFNMG), Januária - Minas Gerais (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0003-2100-2438>

Luciano José Minette

Universidade Federal de Viçosa, Campus
Viçosa, Viçosa - MG (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-2038-334X>

Stanley Schettino

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS
GERAIS

RESUMO: A secagem de grãos é um processo essencial para a conservação de alimentos, reduzindo sua umidade e prevenindo reações químicas e biológicas que afetam a qualidade e segurança dos produtos. O estudo explora diferentes métodos de secagem, destacando a secagem natural, que depende das condições ambientais, e a artificial, que utiliza ventilação forçada em temperaturas controladas. Além disso, são analisados secadores específicos, como os rotativos, de leito fixo e solares, com ênfase na

secagem do café, um produto altamente sensível às condições desse processo. Os resultados mostram que a escolha adequada do método de secagem é crucial para minimizar perdas e garantir a qualidade do produto final. A análise fluidodinâmica computacional (CFD) surge como uma ferramenta eficaz na otimização dos processos, permitindo avaliar a distribuição de temperatura, o fluxo de ar e a eficiência energética dos equipamentos. A utilização de CFD contribui para o aprimoramento dos sistemas de secagem, reduzindo custos operacionais e aumentando a produtividade. Conclui-se que a inovação tecnológica e a otimização dos equipamentos de secagem são fundamentais para melhorar a eficiência e sustentabilidade da agroindústria, garantindo alimentos de maior qualidade e durabilidade no armazenamento e comercialização.

PALAVRAS-CHAVE: Conservação de alimentos, sistemas de secagem, fluidodinâmica computacional.

GRAIN DRYING AND ENERGY EFFICIENCY: METHODS, TECHNOLOGIES AND TRENDS

ABSTRACT: Grain drying is an essential process for food preservation, reducing its moisture content and preventing chemical and biological reactions that affect product quality and safety. The study explores different drying methods, highlighting natural drying, which depends on environmental conditions, and artificial drying, which uses forced ventilation at controlled temperatures. Additionally, specific dryers such as rotary, fixed-bed, and solar dryers are analyzed, with an emphasis on coffee drying, a product highly sensitive to the conditions of this process. The results show that the proper selection of the drying method is crucial to minimizing losses and ensuring the quality of the final product. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis emerges as an effective tool for process optimization, allowing the evaluation of temperature distribution, airflow, and energy efficiency of the equipment. The use of CFD contributes to the improvement of drying systems, reducing operational costs and increasing productivity. It is concluded that technological innovation and the optimization of drying equipment are fundamental to improving efficiency and sustainability in the agro-industry, ensuring higher-quality food with greater durability during storage and commercialization.

KEYWORDS: food preservation, drying systems, computational fluid dynamics.

1 | CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS

Todos os alimentos, sejam de origem vegetal ou animal, passam por um processo natural de deterioração no período entre a colheita ou abate e o consumo. Essa deterioração resulta de transformações físicas, químicas e biológicas que podem alterar as características nutricionais, sensoriais e microbiológicas dos alimentos, comprometendo sua qualidade. Os fatores que influenciam a vida útil dos alimentos podem ser classificados em intrínsecos e extrínsecos (Ordóñez, 2005).

Os fatores intrínsecos estão relacionados às características da própria matriz alimentar, como composição química (tipo e quantidade de nutrientes), atividade de água (a_w), pH, potencial de oxirredução, presença de constituintes antimicrobianos naturais e estruturas biológicas, como cascas e películas. Já os fatores extrínsecos referem-se às condições ambientais de armazenamento, incluindo temperatura, umidade relativa (UR), incidência de luz e/ou outras radiações, concentração de gases atmosféricos e presença de micro-organismos deteriorantes e/ou patogênicos (Jay, 2005).

Entre os métodos convencionais mais utilizados, destacam-se a conservação pelo calor (pasteurização e esterilização), conservação pelo frio (refrigeração e congelamento), secagem ou desidratação, salga, defumação, fermentação, uso de atmosfera modificada e aditivos alimentares (Fellows, 2006).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar os principais métodos de conservação de alimentos, destacando suas aplicações e impactos na preservação da qualidade e segurança dos produtos. A conservação visa reduzir a velocidade das alterações indesejáveis, manter as características dos alimentos e prevenir a multiplicação de micro-organismos, prolongando sua vida útil (Fellows, 2006).

2 | PRINCÍPIOS DA SECAGEM DE GRÃOS

A partir da crescente demanda de oferta de produtos agrícolas em maior quantidade e qualidade, torna-se necessário o armazenamento destes (Martins, 2015), o que ocorre entre a produção (iniciada no campo) e comercialização (até o consumidor final). Neste sentido, no caso específico de grãos, realiza-se a secagem dos produtos colhidos a fim de reduzir as 17 atividades químicas e biológicas na matriz alimentar, para que se mantenha a qualidade e seguridade durante a estocagem (Bala, 2017).

A Figura 1, a seguir, indica o fluxograma convencional do beneficiamento de grãos em uma unidade armazenadora.

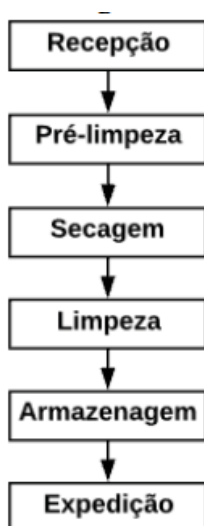


Figura 1 – Fluxograma do beneficiamento de grãos em uma unidade armazenadora.

Fonte: Autores (2025)

De forma geral, a secagem consiste no processo de remoção de água e outros líquidos orgânicos voláteis de um material sólido que, no caso dos grãos, é formado por uma matriz complexa, contendo carboidratos, lipídeos, proteínas, vitaminas e sais minerais em proporções variáveis, mais água e vapor d'água, que ocupa os espaços intercelulares vazios, gerando uma pressão de vapor na superfície do grão, formando o que se conhece por microclima. Além disso, o ar atmosférico também exerce uma pressão sobre o produto, denominada como pressão parcial de vapor do ar (Silva, 2005; Taborda, 2017).

Neste contexto, os grãos podem ser considerados como produtos higroscópicos, cuja superfície é formada por uma camada delgada de ar (microclima). Nesta camada de ar que circunvizinha o alimento, o comportamento termodinâmico é regulado pelas variáveis de teor de água do produto e temperatura (Silva, 2005).

Durante a operação de secagem, a água é removida na forma de vapor por meio da ação de um ar de secagem, normalmente previamente aquecido, por meio do mecanismo de vaporização térmica, em uma temperatura inferior à de ebulição d'água. Deste modo, a operação baseia-se nos fenômenos de transferência de calor e de massa que podem ocorrer de forma simultânea ou separadamente (Geankoplis; Hersel; Lepek, 2018).

Este processo ocorre em razão do gradiente de pressão de vapor d'água entre a superfície do grão e o ar. Para que a água seja evaporada, a pressão de vapor na superfície do produto (microclima) deve ser maior do que a pressão de vapor do ar de secagem, o qual deve ser insaturado. Nestas condições, ocorre a transferência de calor do ar quente para o grão, e a transferência de massa (vapor d'água) do grão para o ar quente, até que o produto atinja um teor de água desejado ou o equilíbrio higroscópico seja alcançado e a transferência de massa cesse (Silva, 2008; Tadini et al., 2019).

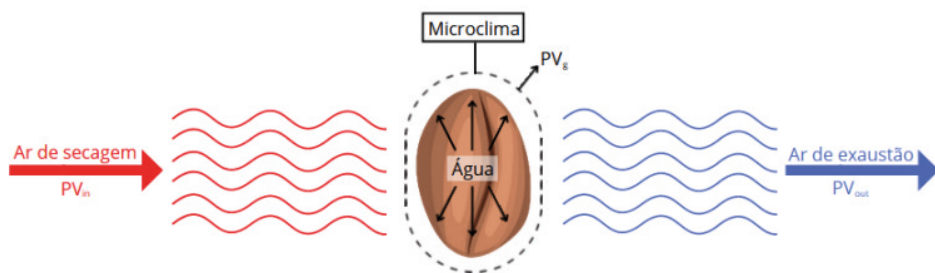


Figura 2 – Representação do movimento de ar e de água durante o processo de secagem.

Fonte: Adaptado de Silva (2005) e Taborda (2017).

em que, PV_{in} – Pressão de vapor do ar de secagem que entra; PV_g – Pressão de vapor do microclima do grão, e; PV_{out} – Pressão de vapor do ar de secagem que sai.

Em geral, o fluxo de transferência de massa pode ocorrer de três formas (Silva, 2005):

- a) Quando a pressão de vapor da massa de grãos é superior à pressão de vapor do ar circundante ($PV_g > PV_{in}$), ocorre a secagem propriamente dita, conforme supracitado;

b) Quando a pressão de vapor do ar de secagem é maior do que a pressão de vapor do microclima ($PV_g < PV_{in}$), ocorre o umedecimento do produto, isto é, um fenômeno contrário à secagem, e;

c) Quando as pressões de vapor relativas da massa de grãos e do ar de secagem são iguais ($PV_g = PV_{in}$), observa-se o equilíbrio higroscópico.

O ar que entra em contato com a massa de grãos possui um teor de água que está relacionado com a sua quantidade de vapor, sendo que a umidade relativa correspondente pode variar de 0 a 100%. O ar que possui baixas porcentagens de umidade relativa está mais apto para receber água durante o processo de transferência de massa (alta capacidade higroscópica), ao passo que o ar com 100% de umidade relativa está saturado (Tadini et al., 2019).

A movimentação da água contida nos grãos durante a operação de secagem é descrita por três etapas. Na primeira, ocorre a transferência de calor do ar para o produto, o que promove evaporação e migração da água presente no interior dos grãos para o microclima, formando o gradiente de transferência de massa. Na segunda etapa, o vapor contido no microclima é transferido para o ar de secagem, em razão da diferença de concentrações e pressões entre os dois sistemas. A terceira etapa é caracterizada pela diminuição da temperatura do ar de secagem, o qual passa a ter sua capacidade de secagem reduzida até que esta seja esgotada, caracterizando o ar saturado (Silva, 2005; Silva, 2008; Bala, 2017).

De acordo com Taborda (2017), a movimentação da água presente no interior do grão até a superfície determina o grau de dificuldade da secagem do produto. O fenômeno de transporte da água do interior até a superfície do grão envolve a:

a) Difusão líquida, na qual o gradiente de concentração de água em uma região mais úmida para uma região mais seca favorece o mecanismo de transporte d'água.

b) Difusão de vapor, na qual o gradiente de pressão de vapor d'água no interior do grão causa a movimentação d'água, em razão da diferença de temperatura dentro do grão.

c) Escoamento de líquido e vapor, no qual o movimento d'água ocorre tanto pelo gradiente de pressão, concentração, temperatura, contração e capilaridade.

3 | SISTEMAS DE SECAGEM DE GRÃOS

Os sistemas de secagem podem ser classificados como secagem natural e artificial, sendo que os sistemas artificiais podem ser divididos em ventilação natural (por convecção) e forçada. Nos sistemas de ventilação forçada, há métodos que envolvem altas temperaturas, baixas temperaturas, sistemas combinados, e a seca-aeração.

Os sistemas de secagem de grãos são classificados conforme indicado no Quadro 1.

Sistemas de secagem	Natural			
	Artificial	Ventilação por convecção	Terreiros e paióis Secagem solar	
		Ventilação forçada	Altas temperaturas	Camada fixa
				Cruzados
				Concorrentes
				Contracorrente
				Rotativo
				Solar híbrido
		Baixas temperaturas		
		Sistemas combinados		
Seca-areação				

Quadro 1 – Classificação dos principais métodos de secagem de grãos

Fonte: Adaptado de Silva (2008).

3.1 Secagem natural

O processo de secagem natural ocorre na própria planta, logo após a maturação fisiológica do produto, de tal forma que, à medida que o produto entra em contato com o ar, ocorre a perda de água por evaporação, pela ação combinada do potencial de secagem do ar e do aumento da temperatura do grão decorrido do calor recebido do ambiente (Silva, 2008). Nestas circunstâncias, o processo de transferência de massa é altamente variável, pois depende das variações climáticas do ambiente no qual os grãos estão submetidos, uma vez que umidade do ar, temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento sofrem frequentes alterações (Martins; Franco; Oliveira, 1999).

Este método de secagem geralmente é realizado em locais de clima favorável, onde não há disponibilidade de recursos tecnológicos e financeiros, e é menos custoso. Além disso, nesta categoria de secagem não há a interferência humana para modificar o processo. Contudo, a qualidade do produto pode sofrer perdas consideráveis, pois, por ser exigido um maior tempo de permanência da conexão do grão à planta mãe, as etapas posteriores de processamento são atrasadas, e o maior tempo de exposição dos grãos os torna suscetíveis aos ataques de pragas e intempéries, além de poder ocorrer o tombamento das plantas, dificultando o manejo da cultura em questão (Silva, 2005; Silva, 2008).

3.2 Secagem artificial

A secagem artificial utiliza de artifícios que modificam as condições naturais com o intuito de promover ou acelerar o processo de secagem, e pode ocorrer mediante ventilação natural (por convecção) ou forçada (Silva, 2008), conforme visto anteriormente.

3.2.1 Secagem com ventilação por convecção

Neste primeiro caso, os grãos colhidos são espalhados em forma de camadas em terreiros de concreto, asfalto, chão batido ou de alvenaria, a fim de que se realize a secagem por meio da incidência solar e do potencial de higroscópico do ar, sendo necessário o revolvimento periódico dos grãos. Porém, este processo também está sujeito às variações climáticas, uma vez que não é totalmente passível de ser controlado, de forma que ainda é suscetível à ação de intempéries e de pragas (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL, 2018).

3.2.2 Secagem com ventilação forçada em baixas temperaturas

Este sistema de secagem se baseia no escoamento forçado do ar ambiente promovido por um ventilador, o qual é direcionado à massa de grãos. O potencial de transferência de massa do ar de secagem é o fator determinante sobre o qual a eficiência do processo está relacionada. Tal método de secagem é realizado em silos de armazenamento, cujos pisos são construídos por chapas metálicas perfuradas, que permitem que o ar seja insuflado na cama de grãos (Schmidt; Lorencena; Teixeira, 2018).

Na secagem em leito fixo, seja por altas ou baixas temperaturas, a perda do teor de água ocorre de forma gradual, isto é, em camadas, conforme pode ser observado na Figura 3.

O processo de secagem inicia-se na camada inferior da massa de grãos e vai avançando até atingir a parte superior, com a formação de três faixas de umidade distintas: a primeira é formada pelos grãos secos que já se encontram em equilíbrio de umidade com o ar de secagem; a segunda camada (denominada frente de secagem) é composta pela faixa de grãos na qual ainda ocorre o processo de transferência de calor e massa entre o ar e o produto, e; a terceira faixa é composta pelos grãos que ainda não iniciaram a secagem. Torna-se importante ressaltar que o ar que entra na terceira faixa apresenta capacidade de secagem reduzida, pois o seu teor de umidade é elevado e a sua temperatura é diminuída durante o processo de transferência de massa e calor ocorrido nas faixas anteriores (Silva, 2008).

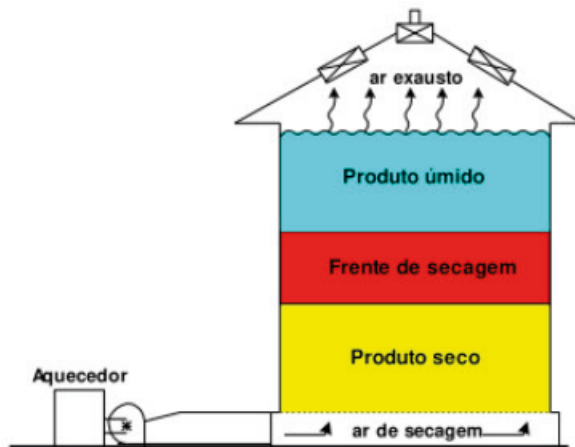


Figura 3 – Formação de camadas na secagem em leito fixo (baixas e altas temperaturas)

Fonte: Silva (2005).

Como o ar utilizado em baixas temperaturas possui menor capacidade de secagem, por vezes, é necessário utilizar fontes suplementares de energia (como resistência elétrica, energia solar e outros), para que o ar tenha o seu potencial de secagem elevado, de modo com que se torne apto para a realização do processo. Contudo, é necessário que o teor de umidade e a temperatura sejam monitorados por meio de um termostato e um umidóstato, para que a fonte de energia seja controlada com o objetivo de evitar a supersecagem (Silva, 2011). Em geral, o potencial de secagem do ar do ambiente de forma conjunta com o aquecimento de 2°C a 3°C fornecidos pelo ventilador são suficientes para que a massa de grãos atinja o teor de umidade desejável (Silva, 2008).

3.2.3 *Secagem com ventilação forçada em altas temperaturas*

Na secagem com ventilação forçada realizada em temperaturas elevadas é utilizado um ar aquecido em mais de 10°C acima da temperatura ambiente, o que promove a redução do teor de água presente no ar e potencializa sua capacidade higroscópica (Silva, 2008). Desta forma, ocorre a formação de um maior gradiente de transferência de massa entre o ar de secagem e a superfície da massa de grãos, permitindo que o produto seja retirado do secador antes de entrar em equilíbrio com o ar de secagem, pois a alta capacidade higroscópica do ar torna muito mais rápido o processo (Martins; Franco; Oliveira, 1999; Silva, 2005).

3.3 Secagem de café

A qualidade do café arábica (*Coffea arabica* L.) depende de vários fatores, tais como: do método de produção; do manejo na lavoura; do cultivo da região onde o café é produzido; das condições climáticas às quais o fruto é exposto no decorrer do processo de maturação, e; dos cuidados necessários durante o beneficiamento. Tais fatores influenciam diretamente nas características sensoriais do café, como cor, aroma e sabor (Gomes, 2014).

Na pós-colheita, a secagem do café apresenta grande importância por impactar significativamente a qualidade final do grão, uma vez que a utilização incorreta das variáveis envolvidas nesta operação unitária pode causar prejuízos às características químicas, físicas e sensoriais do produto (Isquierdo et al., 2011). Neste contexto, há diversos fatores envolvidos no processo capazes de afetar a qualidade do café, destacando-se a temperatura, a umidade relativa do ar, a metodologia e o tempo de secagem (Borém et al., 2008).

A operação de secagem deve ser realizada imediatamente após a colheita, já que o objetivo desta etapa consiste em reduzir de forma rápida o elevado teor de água da polpa, da casca e da mucilagem. A partir deste processo, o teor de água dos grãos é reduzido de 60% para 11,5% em base úmida (b.u.), e as taxas de respiração, oxidações e de fermentações são reduzidas, assim como o desenvolvimento de micro-organismos (Borém et al., 2008).

A velocidade do ar de secagem também é responsável pela qualidade dos grãos, pois maiores taxas podem provocar danos físicos, descoloração do fruto, manchas, trincamento, entre outros defeitos (Malta et al., 2013). Quando o processo de secagem é mal conduzido, ocorrem danos de natureza térmica que causam trincamentos e o efeito de degradação e desestruturação das membranas celulares dos grãos de café, permitindo o contato dos componentes químicos contidos nos grãos com enzimas hidrolíticas e oxidativas que atuam alterando as características sensoriais (Taveira, 2009; Isquierdo et al., 2011).

Além disso, torna-se indispensável que o processo de secagem seja uniforme, pois a presença de zonas com teor de água discrepantes na massa dos grãos favorece o desenvolvimento de micro-organismos capazes de realizar processos fermentativos que causam quedas consideráveis na qualidade de bebida (Silva; Batista; Schwan, 2008).

Neste sentido, os fatores acima citados influenciam na qualidade sensorial da bebida e, conseqüentemente, no preço de comercialização do café (Konopatzki et al., 2019).

3.4 Secadores utilizados na cafeicultura

3.4.1 Secador rotativo

O sistema de secagem rotativo com operação em batelada consiste, de forma geral, em um cilindro tubular instalado de forma horizontal, o qual rotaciona em torno de seu eixo longitudinal em uma velocidade angular de até 15rpm. Neste equipamento, o ar quente é direcionado à câmara de secagem por meio de um sistema de distribuição de ar constituído por uma câmara central (carambola) – responsável por difundir o ar de forma radial – e por um dispositivo de transição entre o ventilador e a câmara – cuja função é promover o escoamento uniforme do ar aquecido (Silva et al., 2014). Neste modelo (Figura 4), o produto úmido é inserido pela parte mais elevada do secador e descarregado na parte mais baixa da lateral do cilindro. Durante a operação de secagem, os grãos são revolvidos à medida em que o ar é difundido de forma radial através da camada de grãos (SANTOS, 2002).



Figura 4 – Secador rotativo.

Fonte: Palinialves (2021b).

Entre as principais vantagens deste sistema, destacam-se a boa uniformidade de secagem e a função de pré-limpeza realizada pelo próprio secador. No entanto, tal modelo apresenta desvantagens tais como alto custo de investimento e baixa eficiência energética, além de provocar danos mecânicos aos grãos (Silva et al., 2014).

3.4.2 Secador de leito fixo

O secador de leito fixo consiste em um sistema de secagem dotado de ventilador, câmara de distribuição de ar (plenum) e câmara de secagem (Figura 5). Nesta última, há um piso de placa metálica perfurada para que o ar de secagem seja insuflado através da camada de grãos, sendo que a direção do ar pode ser alternada de acordo com as especificações do modelo. Nestes sistemas, forma-se um gradiente de umidade muito acentuado ao longo de toda a camada de grãos, em razão das zonas de secagem, de tal modo que por vezes é necessário modificar a direção do fluxo do ar em determinados períodos de tempo, para evitar a secagem excessiva dos grãos que entram em contato direto com o ar de maior temperatura (Laverde; Agudelo, 2013; Bitti, 2020). As variáveis que regulam o funcionamento de um sistema de secagem estacionário são o fluxo de ar, o teor de umidade inicial, a espessura da camada, além da temperatura do ar, que por sua vez, atua diretamente na taxa de secagem, influenciando na uniformidade do teor de água final do produto (Silva, 2008).



Figura 5 – Secador de leito fixo.

Fonte: Palinialves (2021a).

Entre as principais vantagens deste sistema de secagem, destacam-se a simplicidade da operação, o baixo índice de quebra de grãos, a alta eficiência energética e a menor probabilidade de secagem excessiva. Contudo, tal sistema apresenta a impossibilidade de trabalhar com grãos de alto teor de umidade e demanda um longo tempo de operação (BITTI, 2020).

3.4.3 Secador solar

Os secadores solares utilizam o mecanismo da secagem artificial por meio do aquecimento do ar mediante a energia proveniente da radiação solar. Os modelos mais utilizados são descritos no Quadro 2. Em geral, tais equipamentos são compostos por três módulos: coletor solar, câmara de secagem e exaustor (Bolaji, 2011; Kalogirou 2014; Mustayen; Mekhilef; Saidur, 2014; Andrade et al., 2019).

A Figura 6 ilustra um esquema representativo dos secadores direto, indireto e misto.

Classificação		Descrição
Incidência da radiação solar no alimento	Direto	O produto é disposto em bandejas perfuradas no interior de uma câmara de secagem e entra em contato direto com a radiação solar. A perfuração das bandejas permite uma melhor circulação de ar e, conseqüentemente, transferência de calor e massa.
	Indireto	O ar é aquecido em um coletor solar e, posteriormente, direcionado à câmara de secagem, onde entra em contato com o alimento. O produto não é exposto diretamente à radiação solar.
	Misto	Se assemelha com o método indireto, com a diferença de que, neste caso, o alimento contido na câmara de secagem também é exposto à radiação solar direta.
Convecção	Natural	O escoamento do ar ocorre de forma natural.
	Forçada	O escoamento do ar de secagem se dá, geralmente, por meio de um ventilador e um exaustor.
Fonte de energia	Única	Utiliza apenas energia solar.
	Híbrido	Combina a energia solar com outra fonte de energia, oriunda de energia elétrica, combustível fóssil ou biomassa. Em geral, cada fonte de energia é utilizada de forma alternada, em determinados períodos do dia (diurno ou noturno).

Quadro 2 – Classificação dos secadores solares mais utilizados

Fonte: Bolaji (2011); Kalogirou (2014); Mustayen, Mekhilef e Saidur (2014); Andrade et al. (2019).

O coletor solar é constituído por uma placa plana de vidro (instalada na parte superior do módulo), paredes e placa absorvedora (fundo), sendo estes últimos construídos por um material absorvedor de energia térmica, o qual tem a finalidade de aprimorar o processo de transferência de calor e isolamento térmico (Andrade et al., 2019; Firmo, 2020). Neste módulo, pode ser instalado um ventilador para promover a convecção forçada. Os coletores mais usuais, do tipo estacionário, são fixos e não seguem o movimento do sol (Firmo, 2020).

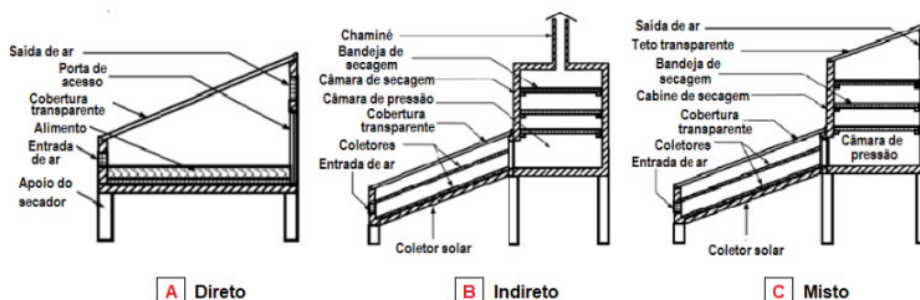


Figura 6 – Secador solar (A) direto (B) indireto e (C) misto, respectivamente.

Durante a secagem, a placa transparente de vidro capta a radiação solar incidente e é responsável por produzir um efeito estufa no interior do módulo, isto é, o vidro transmite e retém a radiação, ao passo que a placa absorvedora (fundo, geralmente revestido com tinta preta fosca) e as paredes laterais absorvem a radiação e transmitem o calor para o ar por meio da convecção (Gomes, 2015), o que promove o aumento da temperatura deste entre 10°C a 30°C (Matthew; Schwarz, 2001). Durante este processo, o ar é aquecido à medida em que se desloca em direção à saída do coletor solar (junção), em razão do diferencial de pressão gerado entre a entrada e a saída do módulo.

Na câmara de secagem, o ar quente e de baixa umidade passa através da massa de grãos contida em bandejas perfuradas (Andrade et al., 2019), enquanto o exaustor atua promovendo o escoamento do ar saturado e menos aquecido para fora da câmara, diminuindo o fenômeno de backflow (fluxo reverso do ar).

Entre as principais desvantagens deste tipo de secador, destacam-se a baixa capacidade de operação, uma vez que eles possuem um pequeno potencial de carga estática, e a dificuldade de controle operacional, pois as variações da intensidade da luz solar e temperatura ambiente influenciam significativamente na eficiência do processo de secagem (Khaldi, 2018). Já em relação às vantagens, destacam-se o baixo custo de construção e operação, a utilização de fonte de energia renovável e limpa, e a maior qualidade do produto final (Martins et al., 2002).

3.5 Simulação fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional é um campo de pesquisa que está relacionado à análise de comportamento de fluidos e sólidos, cujo estudo é realizado por meio da utilização de 28 algoritmos numéricos desenvolvidos para descreverem, com precisão, informações a respeito de fenômenos de transporte, como escoamento de fluidos, transferência de calor e massa, e interações entre sistemas multifásicos (Versteeg; Malalasekera, 2007).

No início da utilização do CFD, as aplicações desta ferramenta eram destinadas principalmente às áreas de engenharia aeroespacial, mas, com o decorrer do tempo, o seu desenvolvimento também foi direcionado para o aperfeiçoamento em outras áreas, como engenharia civil, química e ambiental (Tu; Yeoh; Liu, 2018). Atualmente, a análise fluidodinâmica também tem sido utilizada na indústria de alimentos para a estudo de perfis de temperatura e escoamento de fluidos em diversos equipamentos, a exemplo de fornos e secadores, e também para a determinação de gradientes de temperatura e fluxo de calor na matriz dos alimentos, como em frutos, cortes de carne e bebidas diversas (Sun, 2019).

Na área de secagem e armazenamento de grãos, a aplicação da análise fluidodinâmica computacional envolve a obtenção de informações como o escoamento de ar e de outros gases através de grãos, a distribuição da temperatura de secagem e armazenagem ao longo de silos e secadores, bem como a análise de outros dados, como perdas de pressão e linhas de corrente de ar (Bala, 2017; Visconcini; Andrade; Souza, 2019).

Há vários estudos a respeito da aplicação de CFD em secadores solares, assim como o realizado por Santos (2018), o qual utilizou o software COMSOL Multiphysics® para analisar o escoamento do ar por meio de linhas de corrente e a distribuição de velocidade de ar e de temperatura por meio de planos transversais, obtendo-se resultados satisfatórios a respeito da uniformidade dos gradientes de velocidade e de temperatura. Outro estudo relevante consistiu no de Khaldi (2018), o qual se utilizou o software ANSYS® Fluent para avaliar a distribuição de velocidade e de temperatura em um secador solar indireto utilizado para a secagem de figos. Além destes, Warikoda (2020) realizou um estudo sobre o desempenho de um secador solar indireto para alimentos utilizado análise por CFD e validação por dados experimentais.

Outra área na qual aplica-se a análise por CFD, consiste no estudo de eficiência de fornalhas destinadas à secagem de grãos, onde busca-se averiguar os mecanismos de transferência de calor e de escoamento de fluidos relacionados ao processo de combustão. Athanasios et al. (2015) e Goulart e Ricardo (2018) estudaram a otimização de fornalhas a lenha por meio da análise por CFD, averiguando o escoamento dos gases oriundos da combustão dentro do casco e o aquecimento do ar dentro dos tubos internos de uma fornalha indireta, seguido da validação experimental dos dados obtidos por simulações computacionais.

Neste contexto, a análise fluidodinâmica apresenta-se como uma ferramenta que auxilia no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos, seja reduzindo os custos, quando comparado a outros métodos experimentais de construção de protótipo, ou evitando a interrupção dos equipamentos quando uma análise teste necessita de ser realizada (Sun, 2019). Os softwares denominados de CFD atuam como calculadoras especiais na resolução das equações de transporte – momento, massa, energia, outras variáveis e equações de estado –, por meio de técnicas sofisticadas de resolução de equações diferenciais parciais, como o método de volumes finitos (Versteeg; Malalasekera, 2007; Tu; Yeoh; Liu, 2018).

Tal método consiste em uma técnica numérica que transforma as equações diferenciais parciais de transporte em equações algébricas discretizadas sobre volumes finitos ou células (malha computacional). A primeira etapa do processo de solução é a discretização do volume de controle que circunda os nós, conforme ilustrado na Figura 7 (Versteeg; Malalasekera, 2007; Khaldi, 2018).

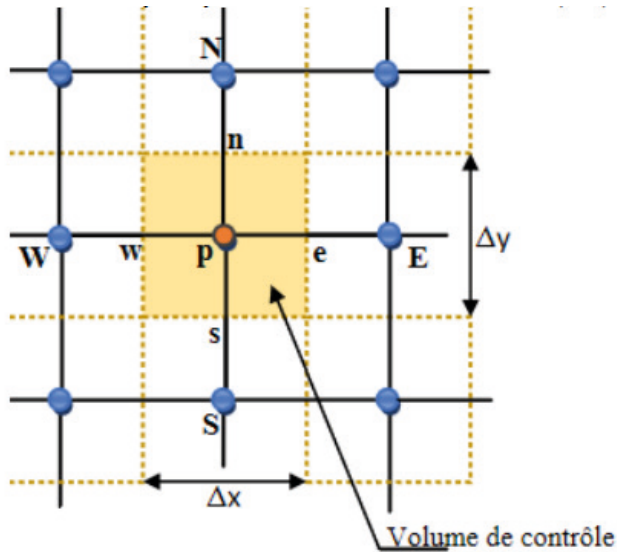


Figura 7 – Volume de controle típico para um caso bidimensional (2D).

Fonte: Khaldi (2018).

As equações diferenciais parciais são então transformadas em equações algébricas para cada volume de controle, sendo que os valores de temperatura e pressão são calculados para cada nó central, enquanto as variáveis de velocidade são calculadas para as faces de cada volume de controle, por um método denominado de acoplamento pressão-velocidade – SIMPLE, PISO ou SIMPLEC (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Para realizar a discretização, torna-se necessária a utilização de um esquema de discretização que seja capaz de determinar os valores das variáveis escalares como pressão e temperatura. O esquema *Upwind*, um dos mais utilizados, determina os valores das variáveis escalares sem recorrer aos métodos de interpolação, uma vez que tal esquema determina os valores destas variáveis por meio dos valores presentes nos nós da malha computacional. Desta forma, o esquema *Upwind* leva em consideração a direção do escoamento para determinar as grandezas convectivas nas faces dos volumes de controle, de modo que para determinar o valor das variáveis escalares nestas faces, são repetidos os valores já presentes nos nós precedentes a cada face (Moukalled; Mangani; Darwish, 2016).

Na etapa de solução por meio do método de acoplamento pressão-velocidade, utiliza-se de algoritmos como o SIMPLE, SIMPLEC ou PISO, sendo o SIMPLE um dos algoritmos mais utilizados na solução das equações discretizadas. Para resolver tais equações, é necessário conhecer o campo de pressão, já que este é desconhecido antes da solução, sendo então necessário a utilização de uma equação de pressão. No processo de solução, o algoritmo SIMPLE define valores iniciais de pressão, velocidade e temperatura (guessed values), aplicando-se os valores de pressão nas equações discretizadas de momento para se obter as variáveis de velocidade, as quais são então aplicadas na equação de correção de pressão, a fim de obter-se o campo de pressão corrigido (Tu; Yeoh; Liu, 2018).

O próximo passo consiste em aplicar as variáveis de velocidade e de pressão encontradas nas etapas anteriores nas equações de correção de velocidade e de pressão, com o objetivo de obter os novos valores dos campos de velocidade e pressão. Uma vez obtido tais valores, estes são aplicados em conjunto com as variáveis escalares iniciais (guessed values) nas demais equações discretizadas, com a finalidade de se obter os valores corrigidos das variáveis escalares de temperatura, umidade e outras. Desta forma, se houver a convergência dessas variáveis escalares, o processo de solução é finalizado, mas caso não ocorra a convergência, os últimos valores encontrados são utilizados para iniciar uma nova iteração (Moukalled; Mangani; Darwish, 2016).

No mercado, há várias opções de softwares disponíveis para análise por CFD, tais como ANSYS® CFX, ANSYS® Fluent, Autodesk® CFD, COMSOL MultPhysics®, além de versões livres e gratuitas como o OpenFOAM®.

4 | CONCLUSÃO

O estudo apresentado aborda de forma abrangente os princípios e métodos de conservação de alimentos, com ênfase na secagem de grãos e no uso de diferentes sistemas de secagem. A análise destaca a importância desse processo na manutenção da qualidade, segurança e durabilidade dos produtos agrícolas, especialmente no contexto do armazenamento e comercialização.

A secagem de grãos é um processo essencial para minimizar as reações químicas e biológicas que comprometem a qualidade dos alimentos. O estudo detalha os princípios da secagem, destacando os mecanismos de transferência de calor e massa, e as características higroscópicas dos grãos. Diferentes métodos de secagem são discutidos, incluindo a secagem natural, que depende das condições climáticas, e a secagem artificial, que envolve técnicas como ventilação forçada em baixas e altas temperaturas, bem como métodos específicos para a secagem de café.

Além disso, a pesquisa explora a utilização de secadores industriais, como os secadores rotativos, de leito fixo e solares, ressaltando suas vantagens e limitações. O estudo também destaca a aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) na otimização dos processos de secagem, permitindo análises detalhadas do escoamento de ar, distribuição de temperatura e eficiência energética dos sistemas.

Em conclusão, a pesquisa evidencia a relevância da escolha adequada do método de secagem para garantir a qualidade final dos grãos e do café, além de enfatizar a necessidade de inovação tecnológica e aprimoramento dos equipamentos para aumentar a eficiência e reduzir custos operacionais. A aplicação de ferramentas computacionais, como CFD, demonstra-se uma abordagem promissora para otimizar processos e desenvolver novas tecnologias no setor agroindustrial.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V. C. V. et al. **Aplicações contemporâneas da energia solar com abordagens sociais no estado do Sergipe**. Aracaju: IFS, 2019. 176 p.
- ATHANASIOS, N. et al. Optimization of a log wood boiler through CFD simulation methods. **Fuel Processing Technology**, v. 137, p. 75-92, 2015.
- BALA, B. K. **Drying and storage of cereal grains**. 2. ed. Chichester, West Sussex (Reino Unido): John Wiley & Sons, Ltd., 2017. 352 p. E-book.
- BITTI, V. S. **Modelagem matemática da secagem de café cereja em leito fixo**. 2020. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.
- BOLAJI, B. O. Exergetic analysis of solar energy drying systems. **Natural Resources**, v. 2, n. 2, p. 92-97, 2011.
- BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1609-1615, set./out. 2008.
- BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.) Pós-colheita do café. Lavras: UFLA, 2008. p. 205-240.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: café**. Brasília, DF, v. 8, n. 3, p. 1-58, set. 2021. Safra 2021, terceiro levantamento. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 02 out. 2021.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e práticas**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.
- FIRMO, N. S. H. **Secador solar indireto**. 2020. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Dupla Titulação entre o Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Bragança (Portugal), 2020.
- GEANKOPLIS, C. J.; HERSEL, A. A.; LEPEK, D. H. **Processes and separation process principles**. 5. ed. Estados Unidos da América: Pearson Education, 2018. 1836 p. E-book.
- GOMES, I. A. **Desenvolvimento experimental de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.
- GOMES, L. M. **Efeito de diferentes técnicas de secagem na qualidade do café arábica (Coffea arabica L.) em Timor Leste**. 2014. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica) - Universidade de Évora, Évora (Portugal), 2014.
- GOULART, W. C.; RICARDO, J. R. **Estudo numérico computacional para análise de escoamento de uma fornalha de pequeno porte**. 2018. 29 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade SATC, Criciúma, 2018.
- IBGE. **Instituto Nacional de Geografia e Estatística**. Geociências: download. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Mapa de estações**. 2022. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>>. Acesso em 05 mai. 2022.
- ISQUIERDO, E. P. et al. Qualidade do café cereja desmucilado submetido ao parcelamento da secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-90, jan./abr. 2011.
- JAY, J. M. **Microbiologia de alimentos**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. 712 p.
- KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. Estados Unidos da América: Academic Press, 2014. 819 p. E-book.
- KHALDI, S. **Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage**. 2018. 119 f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Dupla Titulação entre a Université Bourgogne Franche-Comté e a University Abu Bekr Belkaid, Tlemcen (Argélia), 2018.
- KONOPATZKI, E. A. et al. Price and quality of coffee (*Coffea arabica* L.) Dried using air dehumidified by convection. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, p. 649-658, set./out. 2019.
- LAVERDE, J. F. L.; AGUDELO, C. A. D. **Modelamiento y diseño de un secador estatico de café pergamino (silo de café)**. 2013. 250 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidad Tecnologica de Pereira, Pereira (Colômbia), 2013.
- MALTA, M. R. et al. Alterações na qualidade do café submetido a diferentes formas de processamento e secagem. **Revista Engenharia na Agricultura-Revend**, Viçosa, v. 21, n. 5, p. 431-440, set./out. 2013.
- MARTINS, E. A. S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.
- MARTINS, R. R. et al. Secador de grãos com uso de energia solar. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, v. 3, p. 29-35, jan./mar. 2002.
- MARTINS, R. R.; FRANCO, J. B. R.; OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologia de secagem de grãos. Passo Fundo: Embrapa Trigo / EMATER-RS**, 1999. 90 p. E-book.
- MATTHEW, G. G.; SCHWARZ, D. **Solar drying technology for food preservation**. Alemanha: GTZ-GATE Eschborn, 2001. 8 p.
- MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. The finite volume method in computational fluid: an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab. Suíça: Springer International Publishing, 2016. 791 p. E-book.
- MUSTAYEN, A. G. M. B.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. Performance study of different solar dryers: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 463-470, 2014.
- OLIVEIRA, L. C. T. G.; PAES, J. L.; GUIMARÃES, C. L. **Avaliação da eficiência do coletor solar plano acoplado em secador híbrido**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018. Anais eletrônicos... Gramado: Associação Brasileira de Energia Solar, 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/449>>. Acesso em: 02 out. 2021.

ORDÓÑEZ, J. A. (Org.) Tecnologia de alimentos: componentes dos alimentos e processos. Porto Alegre: Artmed, 294 p. 2 v. 2005.

PALINIALVES. **Secador estático**. 2021a. Disponível em: <https://www.palinialves.com.br/produto.php?produto=191&secador_estatico>. Acesso em: 04 out. 2021.

PALINIALVES. **Secador rotativo para café e outros grãos**. 2021b. Disponível em: <https://www.palinialves.com.br/produto.php?produto=54&pa_sr_10>. Acesso em: 04 out. 2021.

SANTOS, R. R. **Modificação e avaliação de um secador rotativo horizontal, com distribuição radial do fluxo de ar, para secagem de café**. 2002. 62 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SANTOS, V. L. V. **Análise numérica do escoamento e do comportamento térmico de um secador solar ativo misto utilizado COMSOL Multiphysics**. 83 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del-Rei, Belo Horizonte, 2018.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Grãos: armazenamento de milho, soja, feijão e café**. Brasília: SENAR, 2018. 100 p.

SCHMIDT, L.; LORENCENA, M. C.; TEIXEIRA, M. Controle de operações em secadores de grãos com redução do consumo de recursos naturais. **Revista de Informática Aplicada**, v. 14, n. 1, 2018.

SILVA, C. F.; BATISTA, L. R.; SCHWAN, R. F. Incidence and distribution of filamentous fungi during fermentation, drying and storage of coffee (*Coffea arabica* L.) beans. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 39, p. 521-526, 2008.

SILVA, J. P. S. Utilização de energia solar para secagem de microalgas. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SILVA, L. C. Aeração de grãos armazenados. *Grãos Brasil: Da Semente ao Consumo*, v. 3, n. 50, p. 7-10, set./out. 2011.

SILVA, L. C. Secagem de grãos. *Grãos Brasil: Da Semente ao Consumo*, v. 4, n. 14, p. 10- 14, mai. 2005.

SILVA, J. S. et al. Manual de construção e manejo de equipamentos: pós colheita do café. Viçosa: Os autores, 2018. 275 p. E-book.

SILVA, J. S. (Ed.) Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p. E-book.

SILVA, J. S. et al. Forno a lenha para secagem de café e grãos. Brasília: Embrapa Café, 2014, 14 p. (Embrapa Café. Comunicado Técnico, n. 6).

SILVA, J. S.; VITOR, D. G.; LOPES, R. P. Construção de ventiladores centrífugos para uso agrícola. Brasília: Embrapa Café, 2013, 13 p. (Embrapa Café. Comunicado Técnico, n. 3).

SUN, D. W. Computational fluid dynamics in food processing. 2 ed. Boca Raton (Estados Unidos da América): CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. 632 p. E-book.

TABORDA, D. M. **Uso de energia solar para o aquecimento do ar em secadores de grãos**. 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2017.

TADINI, C. C. et al. (Org.) Operações unitárias na indústria de alimentos. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 509 p. 2 v. E-book.

TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. Computational fluid dynamics: a practical approach. 3 ed. Índia: Butterworth-Heinemann, 2018. 498 p. E-book.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2 ed. Harlow (Reino Unido): Pearson Education, 2007. 503 p. E-book.

VISCONCINI, A. R.; ANDRADE, C. M. G.; SOUZA, A. M. Modelagem, simulação e análise dos contornos de velocidade do ar em um secador industrial do tipo torre de fluxo misto. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2019, Maringá. Anais eletrônicos... Maringá: UniCesumar, 2019. Disponível em: <<http://rdu.unicesumar.edu.br/handle/123456789/3346>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

WARIKODA, L. T. Estudo do desempenho de um secador solar indireto para alimentos. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Dupla Titulação entre o Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Bragança (Portugal), 2020.