



**LAURA LEITÃO PONCIANO FREIRE**

**ESTUDO DA SECAGEM CONVECTIVA ASSISTIDA POR  
MICRO-ONDAS DE CAFÉS ESPECIAIS**

**LAVRAS – MG  
2023**

**LAURA LEITÃO PONCIANO FREIRE**

**ESTUDO DA SECAGEM CONVECTIVA ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS DE  
CAFÉS ESPECIAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

**LAURA LEITÃO PONCIANO FREIRE**

**ESTUDO DA SECAGEM CONVECTIVA ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS DE  
CAFÉS ESPECIAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

**Banca:**

Mrs. Guilherme Mathias Lopes – UFLA

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Suéllen Mendonça do Nascimento – UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior - UFLA

**LAVRAS – MG  
2023**

*Aos meus pais.  
Às minhas avós.  
Ao meu avô.  
Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, por ser minha inspiração, meu abrigo e minha força.

Ao meu irmão, por ser meu exemplo e meu conselheiro.

À minha tia, avó, primas e meu tio, pela preocupação e pelo suporte durante todos os anos.

À Juju, Jaislan e Laurinha, por estarem do meu lado colecionando momentos desde o início da faculdade.

À Andressa, Juju e Tatiane, pela verdadeira amizade que compartilha altos e baixos, luta, apoia e comemora junto dentro e fora da faculdade.

À Juju, por ser meu par na UFLA e na vida, em especial.

À Marcella, que deixou toda a vida mais leve, feliz e amável com nossos cafés e encontros, assim como ela é.

Ao Henrique, meu irmão de coração que nunca me abandona nas dificuldades e vibra comigo como ninguém nos melhores momentos.

Aos meus amigos do Conselho e do AA, que me divertiram ao máximo e me faziam rir em qualquer situação.

À Lulu, minha dupla que tem a energia e a risada contagiantes e traz luz mesmo nos piores dias.

Ao Igor, pelo companheirismo, paciência e apoio a qualquer hora e por dividir e comemorar cada passo comigo.

Ao NEPetro, por ter me proporcionado conhecimentos além da faculdade e me permitido conhecer e conviver com pessoas excepcionais que eu trouxe para minha vida.

Ao Irineu, que é um orientador incrível, didático e humano e tem meu respeito e minha admiração como pessoa e profissional.

À Suéllen e ao Guilherme, por me acompanharem em um dos dias mais importantes da minha graduação.

A todos os professores, por todos os ensinamentos referentes à Engenharia Química e à vida.

À Universidade Federal de Lavras, por me permitir escrever uma parte da história da minha vida tão marcante e maravilhosa de ser lembrada.

Enfim, muito obrigada a todos!

## RESUMO

Nos últimos anos, os cafés especiais conquistaram espaço a nível global e, dentre as etapas fundamentais de produção desses cafés, a que possui influência significativa na qualidade final da bebida é a secagem. Apesar dos seus benefícios, esse processo é a etapa com maior demanda de energia e, conseqüentemente, a mais cara, e com maior probabilidade de causar danos aos grãos. Novas tecnologias estão sendo aplicadas para melhorar o processo de secagem de grãos, dentre elas se destaca a secagem micro-ondas. Logo, o objetivo deste trabalho é aplicar a secagem convectiva assistida por micro-ondas com ar à temperatura ambiente em cafés especiais, a fim de avaliar a influência da temperatura, massa de grãos e presença da convecção nos resultados de cinética e taxa de secagem e verificar sua viabilidade de utilização. Primeiramente foram caracterizadas as propriedades físicas dos grãos de café arábica cv. Paraiso II por meio de sua densidade, umidade, teor de cinzas e diâmetro médio. As secagens foram realizadas em um secador micro-ondas hexagonal (600W) em leito fixo com tampas perfuradas para permitir o fluxo cruzado ascendente de ar à temperatura ambiente. O leito de grãos era alocado em uma haste de metal acoplada em uma balança semi-analítica e, durante a secagem, os grãos eram aquecidos pelas micro-ondas, sua temperatura aferida por um termopar e controlada por meio do liga/desliga do magnetron. Foram avaliadas as massas de 200, 300 e 400 g, temperaturas de 45 e 55°C, presença ou ausência de convecção de ar ambiente, na secagem de cafés em coco e descascados. A caracterização dos grãos obteve resultados compatíveis com os valores da literatura, com pequenos desvios justificados pela diferença de cultivares. Os resultados de cinética e taxa de secagem dos grãos comprovaram que a redução de temperatura gera uma secagem mais lenta, assim como o aumento da massa, a utilização da secagem sem convecção e a presença da casca no grão de café. O ajuste dos dados aos modelos matemáticos de cinética de secagem possibilitou a seleção do modelo de Page como o melhor baseado seu coeficiente de determinação. A eficiência energética apresentou resultados semelhantes aos de taxa e cinética de secagem referente à vantagem do aumento da temperatura e da aplicação da secagem híbrida. Esse estudo comprovou a superioridade da secagem convectiva assistida por micro-ondas para grãos de cafés especiais em relação à secagem puramente micro-ondas, sendo um método promissor para diminuição do tempo de secagem, necessitando apenas avaliar a influência desse tipo de secagem na qualidade sensorial da bebida.

**Palavras-chave:** café arábica; cinética de secagem; taxa de secagem; cavidade hexagonal, leito fixo.

## ABSTRACT

In recent years, specialty coffees have gained global prominence, and among the fundamental stages of their production, the one that significantly affects the final quality of the beverage is the drying process. Despite its benefits, this process is the most energy-intensive and consequently the most expensive stage, with the highest likelihood of causing damage to the beans. New technologies are being applied to enhance the grain drying process, with microwave drying standing out. Therefore, the objective of this work is to apply convective drying assisted by microwave with ambient temperature air to specialty coffees, in order to evaluate the influence of temperature, grain mass, and the presence or absence of convection on drying kinetics and drying rate results, and to assess its feasibility for use. Firstly, the physical properties of Arabica coffee beans cv. Paraiso II were characterized through density, moisture content, ash content, and mean diameter. Drying experiments were carried out in a hexagonal microwave dryer (600W) with a fixed bed and perforated lids to allow for cross-flow of ambient temperature air. The grain bed was placed on a metal rod attached to a semi-analytical balance, and during drying, the beans were heated by microwaves, with their temperature measured by a thermocouple and controlled through the on/off operation of the magnetron. Masses of 200g, 300g, and 400g, temperatures of 45°C and 55°C, and the presence or absence of ambient air convection were evaluated in the drying of both husked and peeled coffees. The grain characterization yielded results for density, moisture content, ash content, and mean diameter consistent with literature values, with slight deviations justified by the difference in cultivars. The drying kinetics and drying rate results demonstrated that a reduction in temperature leads to slower drying, as does an increase in mass, the use of drying without convection, and the presence of the coffee husk. The use of thinner layers (200g) resulted in more uniform drying. Drying rates revealed a purely diffusive drying period, indicating minimal influence from the drying air flow rate. Purely microwave drying (without air convection), while widely used in the literature, did not yield satisfactory results compared to microwave-assisted convective drying. The presence of the coffee husk hinders mass transfer, making the drying process slower, even for microwave drying, where heating occurs from the inside out. Fitting the data to mathematical drying kinetics models allowed for the selection of the Page model as the best fit based on its coefficient of determination. Energy efficiency showed results similar to drying rate and kinetics in terms of the advantages of higher temperature and hybrid drying application. This study confirmed the superiority of the microwave-assisted convective drying for specialty coffee beans in relation to purely microwave drying, representing a promising method for reducing drying time, with the need to only assess the sensory quality influence of this drying method on the beverage.

**Keywords:** Arabica coffee; drying kinetics; drying rate; hexagonal cavity; fixed bed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de café arábica em Minas Gerais em 2022. ....	4
Figura 2 – Estrutura do fruto do café.....	5
Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo do café. ....	5
Figura 4 –Taxa de secagem em função da umidade.....	9
Figura 5 – Teor de umidade em função do tempo de secagem. ....	10
Figura 6 – Grãos de café (a)descascados e (b)do tipo coco utilizados nas secagens. ....	15
Figura 7 – Unidade experimental de secagem micro-ondas.....	17
Figura 8 - Cinética de secagem de café descascado a (a) 45°C e (b) 55°C.....	22
Figura 9 - Cinética de secagem com e sem convecção a (a) 45°C e (b) 55°C. ....	24
Figura 10 – Ajuste aos modelos matemáticos de cinética de secagem a 45 e 55°C.....	26
Figura 11 - Taxa de secagem de café descascado a (a) 45°C e (b) 55°C. ....	27
Figura 12 – Taxa de secagem com e sem convecção para cafés com e sem casca a (a) 45°C e (b) 55°C. ....	28

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Parâmetros dos ajustes dos modelos de cinética de secagem.....	25
Tabela 2 - Gasto energético da secagem de café submetidas a diferentes condições. ....	30

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Constante do modelo matemático	[-]
$b$	Constante do modelo matemático	[-]
$E_a$	Energia de ativação	[J/mol]
$k$	Constante do modelo matemático	[ $min^{-1}$ ]
$m_a$	Massa de água	[g]
$m_s$	Massa do sólido seco	[g]
$MR$	Razão de Umidade	[-]
$n$	Constante do modelo matemático	[-]
$R$	Taxa de secagem	[kg água/kg sólido seco.h]
$r$	Constante universal dos gases ideis	[J/mol.K]
$\rho_R$	Densidade real da partícula	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	Densidade bulk da partícula	[kg/m <sup>3</sup> ]
$T$	Temperatura do ar de secagem	[°C]
$t$	Tempo de secagem	[min]
$X$	Umidade instantânea	[kg/kg]
$X_i$	Umidade inicial	[kg/kg]
$X_{bs}$	Umidade em base seca	[kg/kg]
$X_{bu}$	Umidade em base úmida	[kg/kg]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Café .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2 Secagem .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.1 Taxa de secagem .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.2 Cinética de secagem.....</b>	<b>10</b>
<b>3.3 Micro-ondas .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 Trabalhos correlatos .....</b>	<b>13</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Caracterização do café .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 Unidade experimental .....</b>	<b>16</b>
<b>4.3 Secagem .....</b>	<b>17</b>
<b>4.4 Taxa de secagem .....</b>	<b>18</b>
<b>4.5 Cinética de secagem.....</b>	<b>19</b>
<b>4.6 Eficiência de secagem .....</b>	<b>19</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>5.1 Caracterização do café .....</b>	<b>21</b>
<b>5.2 Cinética de secagem.....</b>	<b>22</b>
<b>5.3 Modelos matemáticos de cinética de secagem.....</b>	<b>25</b>
<b>5.4 Taxa de secagem .....</b>	<b>26</b>
<b>5.5 Eficiência energética.....</b>	<b>29</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A palavra café tem origem do árabe *kahwah* e significa “força” (MOREIRA *et al.*, 2001). O sabor e o aroma desse produto favoreceram para que conquistasse a população global e seu consumo fizesse parte do cotidiano se tornando a segunda bebida mais consumida no mundo (JÚNIOR *et al.*, 2022). Isso fortaleceu sua participação na economia devido à sua comercialização, fonte de renda e de lucro para os países exportadores.

Segundo Agriannual (2017), o Brasil é responsável por cerca de 40% da produção mundial de café distribuídos em 15 estados, o que permite grande variabilidade de tipos de café atendendo a todos os perfis de consumidores devido à diversidade genética e ambiente. A Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC) afirma ser necessário o aprimoramento da qualidade final do café graças à crescente competição e exigência do mercado.

A bebida final possui sua qualidade influenciada pela composição físico-química do grão, que interfere diretamente nas propriedades sensoriais. Essa composição está relacionada ao processo produtivo, incluindo as condições ambientais, manejo, maturação e colheita dos grãos, beneficiamento e armazenamento (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012).

Nos últimos anos, os cafés especiais ou também chamados cafés *gourmets* conquistaram espaço a nível global (MONTEIRO *et al.*, 2019). Em 2013, o preço dos cafés especiais eram de 30 a 40% superiores aos convencionais (BSCA, 2013) e em 2017, as exportações de cafés especiais atingiram um percentual de 18% em relação ao total exportado (CECAFÉ, 2017). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022a), a cultura de café arábica (*Coffea arábica L.*) representa uma das mais importantes produções agrícolas do Brasil, sobretudo da região sudeste onde foram produzidas 1.874.321 toneladas na safra de 2022, correspondente a 92,43% da produção nacional.

Dentre as etapas fundamentais de produção desses cafés, a que possui influência significativa na qualidade final da bebida é a secagem. A secagem é uma operação unitária que remove uma quantia de água presente em um material por meio das transferências de massa e de energia. Industrialmente, as vantagens desse processo é a desaceleração do crescimento de micro-organismos, escurecimento e reações de oxidação e a facilitação do transporte e do armazenamento dos materiais (BELL, 2020).

Apesar dos seus benefícios, esse processo é a etapa com maior demanda de energia e, conseqüentemente, a mais cara, e com maior probabilidade de causar danos aos grãos. Além disso, comparado aos demais produtos, a secagem de café é mais complexa devido ao elevado teor de umidade do grão que garante alta taxa de deterioração logo após a colheita.

Esse procedimento pode ser realizado de forma natural ou artificial. Na secagem natural, o produto é distribuído sobre um terreno e seca pela ação das condições naturais enquanto a secagem artificial ocorre em equipamentos com circulação forçada de ar e/ou sistema de aquecimento (COSTA, 2008). Devido a secagem artificial ser mais rápida e independente das condições climáticas, o desenvolvimento de secadores que elevem a taxa de secagem se tornou promissor, porém com o desafio de conservar as propriedades organolépticas e nutricionais do café (ISQUIERDO, 2013).

Industrialmente, a secagem convectiva é o procedimento mais utilizado e envolve a exposição do grão a uma corrente de ar quente. Porém, o produto final desse tipo de técnica está sujeito a problemas como alteração de cor, encolhimento em excesso, perda nutricional em maior proporção, avarias na estrutura além de necessitar de um longo período de operação e ser considerado de baixa eficiência (MAIA, 2021).

Nas últimas décadas, outra técnica que ganhou visibilidade graças a busca por inovações que complementem ou substituam os processos convencionais é a secagem micro-ondas. A utilização de micro-ondas acelera a cinética de secagem, pois, fornece um aquecimento rápido, volumétrico e instantâneo e o produto gerado pode apresentar melhor qualidade que aquele produzido pelas secagens convencionais (MAIA, 2021). A aplicação de micro-ondas em conjunto com circulação forçada de ar fornece um produto poroso, com menor encolhimento e com boa capacidade de reidratação, além de reduzir o tempo de processo (LOPES, 2013).

Com o intuito de aliar as vantagens da secagem micro-ondas com as vantagens da secagem convencional, o estudo da secagem micro-ondas com convecção de ar (secagem híbrida) torna-se uma alternativa promissora.

## 2 OBJETIVOS

Como a secagem é uma etapa determinante nesse aspecto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação da secagem micro-ondas com convecção de ar à temperatura ambiente em cafés especiais.

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização dos grãos de café para definir suas propriedades físicas;
- Realizar a secagem de grãos de café avaliando a influência da massa, temperatura, presença de casca e da presença de convecção;
- Análise da taxa e cinética de secagem a fim de avaliar o efeito das alterações das variáveis de operação;
- Ajustar as curvas de cinética de secagem aos modelos encontrados na literatura;
- Avaliar a eficiência térmica da operação de secagem micro-ondas com e sem convecção de ar.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

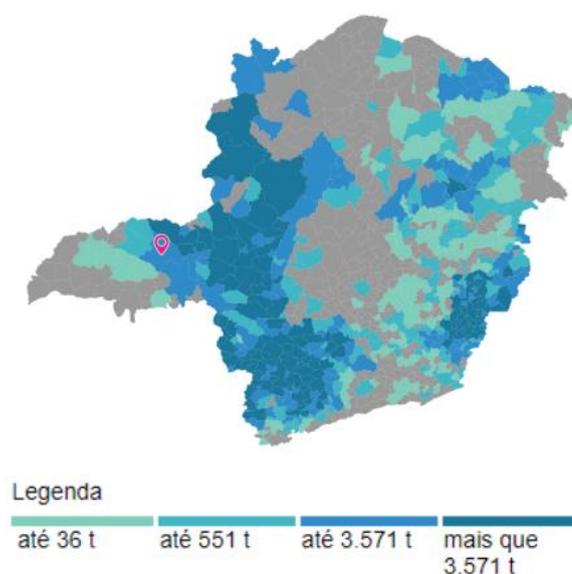
Nesta seção é apresentada uma revisão da literatura sobre café, a operação de secagem e as técnicas de secagem convectiva e micro-ondas.

#### 3.1 Café

As primeiras mudas de café chegaram ao Brasil no século XVIII. Desde então, ocupou posição de destaque economicamente e permitiu que o país se tornasse o maior produtor e segundo maior consumidor de café mundial segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2017). A produção mundial estimada para a safra 2022/2023 foi 171,3 milhões de sacas de 60kg, 1,7% maior que a anterior (EMBRAPA, 2022a). No Brasil, foi prevista uma produção de 54,94 milhões de sacas para 2023, sendo 37,43 milhões da espécie *Coffea arábica* (EMBRAPA, 2023b).

Esse aumento de produção foi acompanhado pelo crescimento do consumo global de café de 0,6% (EMBRAPA, 2023a) e exigência de qualidade do mercado, observada pelo avanço dos cafés especiais exemplificado pela produção significativa do estado de Minas Gerais demonstrada na Figura 1. Este fator fez surgir uma necessidade de estudos para o desenvolvimento de inovações e melhorias em processos.

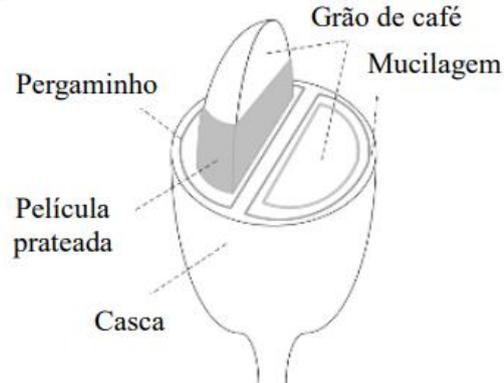
Figura 1 – Produção de café arábica em Minas Gerais em 2022.



Fonte: IBGE (2022b).

O fruto do café, apresentado na Figura 2, é constituído por dois grãos revestidos por uma película fina, denominada de película prateada. Essa película é envolvida pelo pergaminho, que possui contato externo com a polpa. A polpa, também chamada mucilagem, é envolta por pela casca (ROCHA, 2019).

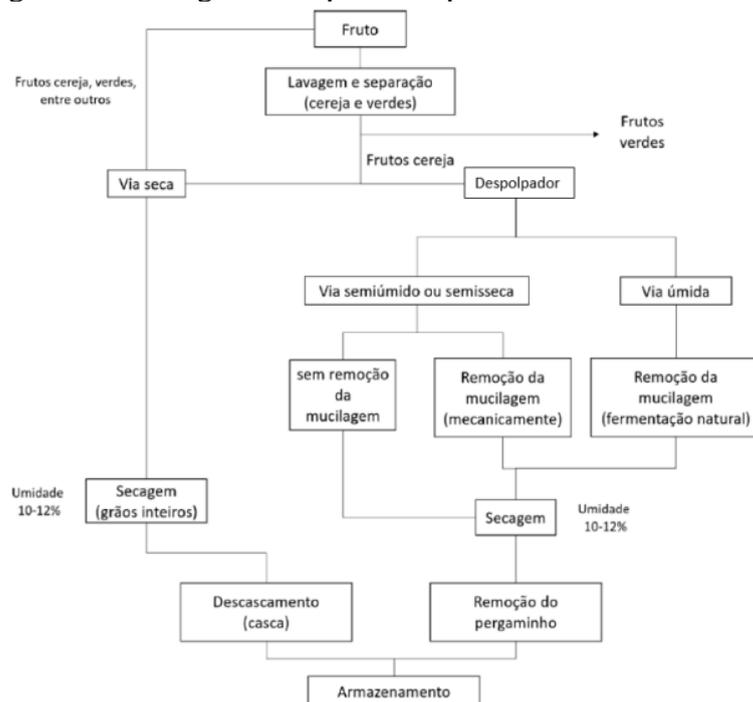
Figura 2 – Estrutura do fruto do café.



Fonte: ROCHA (2019).

As características físicas e a composição química do café são diretamente influenciadas por fatores genéticos, ambientais, práticas de manejo na lavoura, colheita e processos de preparo. Essas etapas do ciclo de vida dos grãos são demonstradas na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo do café.



Fonte: Durán et al., 2017.

As técnicas de manejo da lavoura devem ser aplicadas desde a implementação do cafezal, iniciando com a seleção da variedade conivente ao clima e ao solo, adequando os espaçamentos considerando a disponibilidade dos recursos. A melhoria da qualidade do grão requer o foco em alguns pontos ligados à colheita e preparo. O primeiro corresponde aos grãos pretos, verdes e ardidos, que prejudicam o aspecto, a cor, o tipo e a bebida e devem ser minimizados. Outros pontos críticos obrigatórios à qualidade são a uniformidade do lote, a umidade final e a ausência das contaminações (MESQUITA, 2016).

Para a colheita, é necessário avaliar o grau de maturação. O estágio cereja é o ponto ideal de maturação, no qual a composição química está desenvolvida e equilibrada, com o potencial de qualidade de bebida máximo. O grande número de grãos verdes gera perda qualitativa no tipo, bebida, sabor e aroma. Além disso, é preciso ter cuidado aos danos nos ramos e folhas visando a preservação da próxima produção e evitar ferimentos pelos quais podem adentrar agentes patogênicos (MOREIRA, 2015).

Após a colheita, o café deve passar por pré-limpeza retirando impurezas grosseiras. Posteriormente, é transportado para o processo de limpeza que elimina as impurezas remanescentes da pré-limpeza a fim de facilitar os procedimentos seguintes. A próxima etapa consiste na lavagem e separação que utiliza água para retirar impurezas e separar frutos verdes, verde-cana e maduros por diferença de densidade (BORÉM, 2008).

O preparo do café pode ser feito por via seca e via úmida. O preparo por via seca é o mais comum no Brasil e corresponde à obtenção de dois lotes pós lavagem e separação: um de café cereja e verde e outro de café boia. Esses lotes passam por processos de secagem separados. Neste método, o café é processado em forma de fruto com todas as suas partes: os dois cotilédones envolvidos pelo tegumento, pelo endocarpo ou pergaminho, pela mucilagem, pelo mesocarpo ou polpa e pela casca. Nesse formato, a deterioração pode ocorrer mais acelerada devido ao seu alto teor de umidade (HII; BORÉM, 2019). Já no preparo por via úmida, os frutos são descascados depois da lavagem-separação originando os cafés cereja descascados ou despulpados. Isso reduz o volume e o tempo gasto na etapa posterior de secagem (MESQUITA, 2016). No despulpamento, há redução parcial da umidade que promove uma menor deterioração. Esse processo é realizado pela compressão das cerejas entre superfícies fixas e móveis que separam as partes carnosa e a casca dos grãos cobertos pelo pergaminho. Como o processo é mecânico, é comum restar resíduos da mucilagem. Para removê-la, os frutos são depositados em tanques de fermentação nos quais enzimas naturais atuam tornando possível sua remoção por lavagem. (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014).

Posterior ao processamento, os grãos são direcionados para a secagem. O café colhido no tempo ideal possui alto teor de umidade, variando entre 45 e 55%, favorável ao desenvolvimento de micro-organismos e acelerando a atividade (MESQUITA, 2016). Essa etapa é responsável pela remoção de umidade até um teor de aproximadamente 11%. A secagem excessiva origina grãos quebradiços que podem se partir e tornar defeituosos e a secagem insuficiente gera grãos úmidos e sujeitos a ataque de micro-organismos (QUEIROZ, 2008). Logo, essa etapa é determinante na aquisição das condições adequadas para as fases seguintes de armazenamento e comercialização e na qualidade final do produto destinado ao consumidor.

### 3.2 Secagem

O principal objetivo da secagem é diminuir a quantidade de água a fim de garantir condições seguras de armazenamento. A redução de água é acompanhada pela redução da atividade da água e, conseqüentemente, da velocidade das reações químicas, bioquímicas e de crescimento de micro-organismos (MOREIRA, 2015).

A umidade que pode ser retirada do material é chamada de umidade livre, parcela interessante para o processo de secagem. Porém, o material apresenta uma parte que não pode ser retirado pela secagem chamada de umidade de equilíbrio. A soma da umidade livre e da umidade de equilíbrio resulta na umidade total presente (DIAS, 2013). Na secagem ocorre transferência de calor do ar para o grão, podendo ser advinda de convecção forçada, e transferência de massa, através do fluxo de vapor de água do grão para o ar. A migração da água ocorre por difusão da água e o calor fornecido ao processo é necessário para evaporar a água e remover o vapor na superfície (AMARAL, 2017).

A secagem realizada pela combinação de métodos possui a vantagem de acelerar a desidratação do grão já que o fruto maduro apresenta umidade entre moderada e alta. A seleção da técnica utilizada deve levar em consideração aspectos econômicos ligados ao consumo de energia e a preservação das propriedades físico-químicas do café cru e qualidade da bebida (LIVRAMENTO *et al.*, 2017). No Brasil, os três métodos utilizados são secagem em terreiro, secagem mecânica e secagem combinada.

A secagem em terreiro é predominante devido ao seu custo menor e facilidade de operação, além de produzir cafés com propriedades sensoriais superiores graças ao uso de temperaturas mais amenas (ANDRADE, 2023). Entretanto, há desvantagens como o clima desfavorável que pode gerar secagem não homogênea, mudanças nos grãos e desenvolvimento

de microrganismos que podem gerar grãos ardidos; o elevado tempo de duração e a necessidade de grandes áreas e de mão de obra.

Em secadores mecânicos, o ar passa pelos grãos advindo de um sistema de ventilação forçada, sendo vantajoso por reduzir o tempo de duração do processo, permitir regulagem de temperatura e da velocidade do ar e não ser dependente das condições do clima. Sua desvantagem refere-se ao alto custo, sendo necessário maximizar sua eficiência sem causar danos irreparáveis à produção (MOREIRA, 2015).

A combinação das técnicas de secagem como a convectiva e a micro-ondas ou infravermelho aliada com a micro-ondas é elevar a efetividade proporcionada pela secagem mecânica. A secagem combinada reduz o tempo da operação por aproveitar os pontos fortes dos dois métodos e, portanto, favorece dois parâmetros influentes nesse processo que são denominados de taxa e cinética de secagem.

### 3.2.1 Taxa de secagem

A taxa de secagem é a relação entre a vazão mássica de água evaporada e o tempo gasto para evaporá-la, demonstrada na Equação 1.

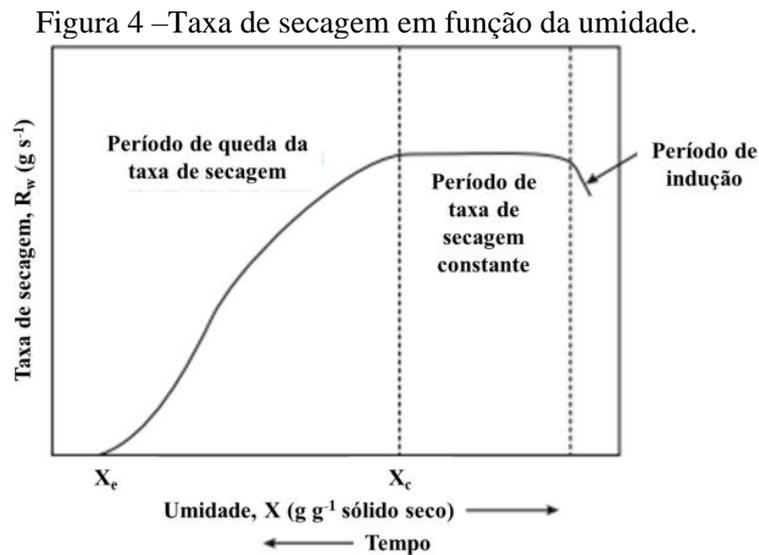
$$R = \frac{dX}{dt} \quad (1)$$

Esse parâmetro é influenciado por condições internas e externas. As condições internas envolvem as variáveis do material submetido à secagem como tamanho, porosidade, teor de umidade e composição. Enquanto as condições externas englobam método de secagem, temperatura e umidade do ar ambiente, temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem e o tempo de secagem. Todos os fatores são determinantes na qualidade do produto final (BORÉM, 2008).

Taxas altas podem gerar descoloração, manchas, trincas e ruptura dos grãos enquanto taxas baixas prejudica o café pelos altos níveis iniciais de umidade que eleva a deterioração. Para Burmester e Eggers (2010), o principal fator influenciador na taxa de secagem é a temperatura do ar de secagem e, assim como Ribeiro *et al.* (2011), notaram que o fluxo de ar influencia na taxa de secagem apenas no início do processo, além de não interferir na qualidade do café. A temperatura do ar de secagem interfere na taxa, na eficiência e na qualidade final.

Temperaturas altas reduzem o tempo de secagem, sendo mais econômicas, entretanto podem deteriorar os grãos.

Essas etapas de transferências de calor e de massa ao longo da secagem permitem dividir a taxa de secagem em períodos, conforme demonstra a Figura 4.



A taxa de secagem é dividida em período de razão constante e de razão decrescente. O primeiro período corresponde à adequação do material às condições de secagem, visto que sua temperatura é inferior à do ar e sua pressão parcial de vapor d'água é baixa. Seu início é caracterizado pelo alto teor de umidade do material e por uma transferência de água líquida para o ar de secagem. Isso gera uma diminuição do volume dos grãos semelhante ao volume de água transferida, a qual é chamada de água livre. O contato inicial com o ar eleva a temperatura, a pressão parcial, a transferência de massa e, conseqüentemente, a taxa de secagem. O período de taxa constante indica que a migração da água do interior do material é suficiente para a manutenção da condição de saturação na superfície devido à grande quantidade de água presente e a velocidade nesse período é constante.

Quando a taxa de transporte interno de água é inferior à de evaporação, inicia-se o período de taxa decrescente. Esse período é composto pelas etapas intermediárias e final e caracterizado pela queda da taxa de secagem e aumento da temperatura tendendo à mesma do ar de secagem (LOPES, 2013). No período intermediário, a água forma pontes líquidas entre as partículas do sólido e movimenta através das paredes capilares devido à transferência de calor que propicia a evaporação. Na última etapa, há necessidade de exposição do material por

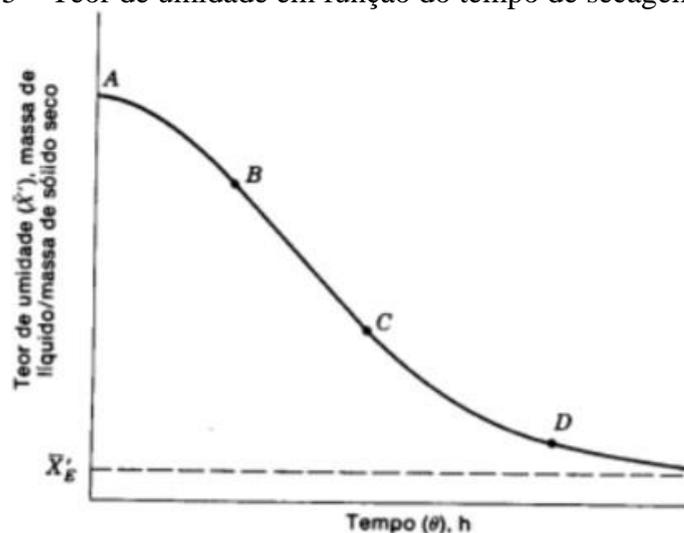
um tempo maior que provoca aumento da temperatura do grão, gerando a possibilidade de danos térmicos (SILVA et al., 2018).

Para otimizar a taxa de secagem, uma opção estudada foi a redução da umidade do ar. Isquierdo *et al.* (2013) analisou a secagem em 35, 40 e 45°C variando a umidade relativa do ar e comprovou que o aumento da taxa de secagem em função da menor umidade relativa do ar de secagem prejudica a qualidade sensorial do café.

### 3.2.2 Cinética de secagem

As curvas de cinética são representações gráficas do teor de água de um material submetido à secagem em função do tempo do processo. Como a taxa de secagem, seu comportamento pode ser dividido em fases apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Teor de umidade em função do tempo de secagem.



Fonte: Foust *et al.* (1982).

As curvas de cinética podem ser ajustadas por modelos matemáticos capazes de selecionar as condições e o método da secagem adequados para determinado material. Os modelos matemáticos principais referentes à cinética de secagem podem ser semi-empíricos ou teóricos. Os modelos semi-empíricos relacionam o tempo e a umidade do produto com uma solução baseada na teoria da difusão da Lei de Fick, desconsiderando a termodinâmica envolvida. Quanto aos modelos teóricos, apresentam solução numérica considerando as fases de transferência de massa e seus parâmetros (BRITO, 2022).

A solução mais simples foi proposta pelo químico Warren K. Lewis baseada na Lei de resfriamento de Newton (LEWIS, 1921) e é apresentada na Equação 2.

$$MR = e^{-kt} \quad (2)$$

Por meio do modelo de Newton e Lewis, surgiram outras soluções com novos parâmetros que tinham como objetivo melhorar a qualidade do ajuste, como o modelo de Page (1949), de Henderson e Pabis (1961), Yaldiz e Ertekin (2001) e Sharaf-Eldeen et al. (1980) representados pelas Equação 3, 4, 5 e 6.

$$MR = e^{-kt^n} \quad (3)$$

$$MR = ae^{-kt} \quad (4)$$

$$MR = ae^{-kt} + b \quad (5)$$

$$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t} \quad (6)$$

Como a qualidade do produto é fortemente influenciada pela etapa de secagem, surgiu a demanda por estudos referentes a novas tecnologias que otimizem a operação de secagem de café sem impactar nas características sensoriais e nutricionais. Uma dessas alternativas tecnológicas se refere às micro-ondas, cujas vantagens envolvem o manuseio seguro, facilidade de operação, necessidade de manutenção reduzida e elevação da taxa de aquecimento (SEBBEN, 2019).

### 3.3 Micro-ondas

O início do uso dos conceitos do eletromagnetismo e da tecnologia micro-ondas se deu em meio a Segunda Guerra Mundial através dos radares e o primeiro micro-ondas doméstico foi inventado após o final desse conflito (MUJUMDAR, 2007). A alta eficiência em aquecimento estimulou sua importância para indústrias como a de alimentos, que realizam diversas operações de transferência de calor (MAIA, 2021). O emprego de micro-ondas na secagem promove um procedimento mais sanitário pelo material não ter contato direto com a fonte de aquecimento, reduzindo a ameaça de contaminação.

As micro-ondas são definidas como ondas eletromagnéticas com frequência entre 0,3 e 300 GHz e comprimento entre 1mm e 1m.

A absorção dessas ondas entre valores de 915 e 2450MHz é capaz de aquecer moléculas de água por meio da conversão de energia eletromagnética em térmica, gerando um aquecimento volumétrico uniforme. Isso ocorre pela penetração das micro-ondas que induzem a rotação e translação das moléculas de água e, conseqüentemente, gera um atrito que libera energia na forma de calor. Esse processo desencadeia a evaporação da água em condições de temperatura e pressão de saturação (MAIA, 2021).

O vapor de água originado aumenta a pressão no interior do material e provoca uma expansão chamada de efeito de sopro que favorece a difusão da água e a secagem (MONTEIRO *et al.*, 2015). Entretanto, a velocidade de secagem também é afetada por fatores como a potência do micro-ondas, a massa e a geometria do material.

O tempo de secagem pode ser diminuído a partir do aumento da potência e da redução da massa de material, cuja relação é denominada densidade de potência e provoca maior difusividade de água (DAK; PAREEK, 2014). Quanto à geometria, o formato de amostras influencia no processo de secagem, visto que formas arredondadas apresentaram resultados mais favoráveis, enquanto formas retangulares e quadradas são medianas e formas triangulares são inferiores (PUN; SUN, 2017). Almeida *et al.* (2010) destacam sobre a seleção da geometria de um material em relação à taxa de aquecimento e na sua uniformidade, que interfere no potencial de infiltração das micro-ondas. A geometria irregular proporciona uma distribuição de calor não uniforme.

A secagem micro-ondas pode ser utilizada isolada ou em conjunto com outra técnica, como a convectiva. Esse método híbrido tem como objetivo superar obstáculos presentes no uso isolado das micro-ondas, como a má distribuição da temperatura na área do material a ser seco e o superaquecimento do mesmo, podendo causar queimaduras na superfície (CHONG *et al.*, 2014; PU; SUN, 2015). Além disso, em materiais com alto teor de umidade inicial, há risco de ruptura do mesmo em caso de secagem puramente micro-ondas devido ao efeito de sopro, que originaria uma pressão interna em excesso. A utilização da combinação de micro-ondas e convecção na secagem de cebolas diminuiu o consumo de energia em 30% (MUJUMDAR, 2007).

A secagem convectiva pode ser compreendida como uma simulação do método da secagem solar. Essa técnica é composta por um fluxo contínuo e forçado de ar com baixa umidade que percorre o leito do material a ser seco e é responsável pela transferência de calor e de massa aliado a um sistema de aquecimento.

O mecanismo principal de transferência de calor nesse tipo de secagem é a convecção, que ocorre pelo contato entre a corrente de ar e a superfície do material. Posteriormente, o fluxo de calor é direcionado para o interior do material (MAIA, 2021). Além do processo convectivo predominante, também ocorrem processos secundários de condução, como pelo contato entre o material a ser seco e o suporte onde esse é colocado, geralmente formado por metal que atua como condutor térmico.

Em relação a transferência de massa, o mecanismo predominante é a difusão molecular que consiste na migração de moléculas de água do meio concentrado para um de menor concentração. A força motriz desse processo está ligada à mudança de fase da água líquida para a gasosa que aumenta a pressão de vapor e estimula sua migração ao longo do tempo (MOREIRA, 2015).

As condições mais favoráveis à secagem devem ser analisadas diante de parâmetros que otimizam o tempo de operação, mas também favorecem a qualidade do produto resultante como a velocidade do ar e a temperatura na câmara de secagem. Esses parâmetros devem ser determinados de acordo com as características de cada material, tais como: umidade inicial e sensibilidade térmica. Destaca-se a secagem de amêndoas de castanha do Brasil por micro-ondas que acontece de maneira mais rápida e uniforme segundo Silva e Marsaioli (2003) e a obtenção de noz de macadâmia seca por micro-ondas com características sensoriais semelhantes ao produto da secagem convencional por Silva *et al.* (2006).

### **3.4 Trabalhos correlatos**

Paula (2005) realizou o estudo da secagem do café cereja despulpado em diferentes tempos de fermentação, avaliando seu efeito nas propriedades físicas do grão. Os ensaios foram feitos analisando períodos de fermentação de 0, 24 e 48 horas e secador de leito fixo durante 24 horas, com velocidades do ar de 1 e 2 m/s e temperaturas de 40, 50 e 60°C. Durante a operação, foram observadas as variações de densidade real e aparente, o encolhimento e a coloração dos grãos. A secagem teve sua velocidade influenciada pela temperatura, assim como a coloração dos grãos, e, a 40°C, pela velocidade do ar. Além disso, foi observado que quanto menor o tempo de fermentação, mais rápida é a secagem.

Andrade (2023) desempenhou o estudo da secagem de café arábica despulpado em secador roto-aerado. O trabalho objetivava caracterizar a matéria-prima, avaliar o desempenho da secagem e da transferência de calor e massa entre o café e o ar em um secador rotatório não convencional, relacionar atributos físico-químicos e qualidade do café e, portanto, definir

condições de operação favoráveis ao equilíbrio entre a otimização da secagem e a qualidade do produto. As propriedades físico-químicas do café foram analisadas a partir de testes de umidade, atividade de água, pH, acidez total titulável e teores de açúcares e de ácidos orgânicos. O tempo de operação das secagens variou entre 14,60 a 27,47 minutos, período curto comparado aos demais secadores com uma taxa de secagem aproximadamente 120 vezes superior. Embora a temperatura tenha sido superior a 45°C, o grão não teve sua qualidade prejudicada devido ao reduzido tempo de operação. Além do desempenho superior aos outros secadores, o secador roto-aerado permitiu a manutenção da qualidade dos grãos de café.

Cunha *et al.* (2001) realizou secagem de café cereja descascado através de ar quente e micro-ondas visando reduzir o tempo de operação, otimizar o rendimento do processo e a qualidade do produto comparado às demais técnicas de secagem. Os ensaios foram divididos em duas metodologias. Na primeira, a secagem foi feita em secador rotativo com ar quente e a umidade foi reduzida de 45, 50% para 11, 13% em base úmida. Na segunda, o café foi submetido a uma pré-secagem convencional com ar quente que reduzia a umidade de 45, 50% para aproximadamente 30% e, posteriormente, a secagem por ar quente e micro-ondas, atingindo uma umidade em torno de 11% em base úmida. O tempo de operação da secagem convencional para a secagem combinada diminuiu de 15 a 37,4h para cerca de 10 horas. A qualidade do café pós-secagem foi comprovada satisfatória pela “prova da xícara” e por análises de microscopia eletrônica de varredura.

Rabello *et al.* (2020) comparou processos de secagem de café em diferentes intervalos de exposição por micro-ondas. Por períodos de 20 e 60 segundos, amostras semelhantes de café foram expostas à radiação micro-ondas até que a umidade obtivesse valores compatíveis com a de grãos comercializados. Os resultados demonstraram que os tratamentos fornecem grãos de café de boa qualidade, porém a intensidade de exposição do café à radiação favorece o rendimento da operação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos detalhes da unidade experimental, especificadas as dimensões de seus componentes e apresentado o procedimento experimental. Além disso, é demonstrado como foi feito o preparo do material a ser secado.

O material utilizado nos ensaios experimentais foi o café arábica (*Coffea Arabica l. cv. Catuai*) pertencente a cultivar Paraíso II e obtidos a partir da Agência de Inovação do Café (Inovacafé) localizada na Universidade Federal de Lavras. Os grãos foram colhidos manualmente e foram selecionados somente os grãos maduros. Posteriormente, passaram pelo descascamento e despulpamento via úmida e o armazenamento foi feito com o congelamento dos grãos visando conservação das suas características e propriedades para os ensaios. As secagens foram aplicadas em grãos de café descascados e desmucilados e do tipo coco, ou seja, com casca, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Grãos de café (a)descascados e (b)do tipo coco utilizados nas secagens.



(a)

(b)

Fonte: Do autor (2023).

### 4.1 Caracterização do café

As análises realizadas para caracterização dos grãos de café descascados foram densidade bulk, densidade real, teor de umidade, teor de cinzas e diâmetro dos grãos.

A densidade de bulk consiste na razão entre a massa dos grãos e o volume ocupado pela mesma. Foram aferidas massas de 20 amostras utilizando uma proveta de 100 ml e massa de 106,67g. Para cada amostra, diferentes quantidades de grãos de café foram adicionadas na proveta e os volumes foram registrados no instante do preenchimento e após a compactação dos

grãos, de acordo com a norma ABNT NBR 11221. Por fim, a diferença entre a massa total do café e da proveta e a massa da proveta forneceu a massa dos grãos.

A densidade real foi realizada seguindo a norma ABNT NBR 6508 baseada no método da picnometria e corresponde à razão entre a massa dos grãos de café e o volume ocupado pelos mesmos, desconsiderando os espaços vazios.

O volume do picnômetro foi obtido por gravimetria, ao se completar com água deionizada, seguida de sua multiplicação pela densidade da água à temperatura medida por um termopar tipo espeto. O volume do grão de café foi obtido, por gravimetria, inserindo o grão de café dentro do picnômetro e completando com água deionizada.

Os teores de umidade foram calculados seguindo a norma ABNT NBR 11378. Amostras de grãos de café foram pesadas em placas de Petri e colocadas em uma estufa a 105°C. Após 24h, foram pesadas novamente. A massa de água contida na amostra corresponde à diferença entre as massas antes e após o período na estufa. O teor de umidade em base úmida consiste na razão entre a massa de água ( $m_a$ ) e a massa inicial dos grãos ( $m_i$ ), conforme a Equação 7 enquanto o teor de umidade em base seca relaciona a massa de água e a massa final dos grãos ( $m_f$ ), segundo a Equação 8.

$$X_{bu} = \frac{m_a}{m_i} \quad (7)$$

$$X_{bs} = \frac{m_a}{m_f} \quad (8)$$

O teor de cinzas foi obtido conforme a ABNT NBR 13999 e se refere à quantidade de cinzas presentes nos grãos. Amostras de grãos de café foram pesadas em cadinhos e depositadas em uma mufla a 700°C. Após 1 hora, os cadinhos foram retirados e pesados novamente, obtendo a massa de cinzas presente na amostra. O teor de cinzas é calculado pela razão entre essa massa e a massa inicial da amostra.

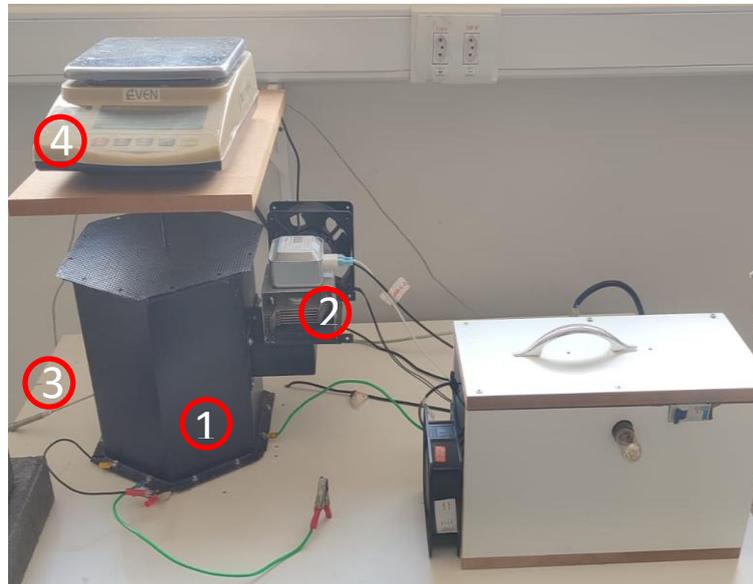
Os grãos de café têm um formato elipsoide, sendo assim as três dimensões dos grãos foram aferidas utilizando um paquímetro. Uma aproximação do seu diâmetro foi calculada por meio da raiz cúbica do produto da largura, espessura e altura do grão. Esse resultado corresponde ao diâmetro de uma esfera de igual volume.

## 4.2 Unidade experimental

A unidade experimental, apresentada na Figura 7, é composta por um secador micro-ondas constituído por uma cavidade hexagonal (1) com 12 cm de largura cada lado, 24,5 cm de

altura, com guia de onda de 12 cm de comprimento WR340 centrado em uma das paredes, magnetron (2) 2M319J com potência de saída de 700W e tampas perfuradas para permitir a passagem do ar de secagem pela cavidade. Um termopar tipo K (3) calibrado foi inserido numa cavidade lateral para monitorar a temperatura dos grãos de café durante o processo. O ar de secagem foi alimentado no sistema através de um ventilador tipo *cooler* de 2.500 rpm fixada na base da cavidade, injetando ar à temperatura ambiente e fluxo de  $54 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ . O sistema de alimentação de energia possuía capacidade de conversão de 127V em 4000V. Para controle do processo o sistema utiliza uma placa NI-USB6009 e o *software* LabView e, para registro da massa ao longo da operação, uma balança semi-analítica marca EVEN (4).

Figura 7 – Unidade experimental de secagem micro-ondas.



Fonte: Do autor (2023).

### 4.3 Secagem

O procedimento experimental para secagem de grãos de café no protótipo consistia em depositar os grãos de café em uma haste com fundo de metal perfurado e bordas de PVC. Em seguida, a cavidade superior era fechada e a haste conectada a uma balança zerada. Para a secagem híbrida, o ventilador era ligado visando uma circulação forçada de ar que percolava o leito de grãos de café em fluxo cruzado ascendente. Essa passagem de ar pelo leito era responsável pela transferência de massa ao arrastar a umidade e promover a secagem do café.

As médias de umidade relativa e a temperatura do ar de entrada ao longo de todos os experimentos foram de  $61 \pm 8\%$  e  $20,7 \pm 2,6^\circ\text{C}$ , respectivamente, ambos medidos por um psicrômetro digital cujos modelo e marca são Relógio termo higrômetro - EXBOM.

No início do experimento, o termopar era posicionado no interior do leito conforme Figura 7, a temperatura de *setpoint* era selecionada e o magnetron ativado para aquecer os grãos de café. Quando a temperatura do leito ultrapassava o valor do *setpoint*, o magnetron era desligado. Devido à passagem de ar à temperatura ambiente, a temperatura do leito reduzia e quando era inferior à temperatura do *setpoint*, ativava o magnetron. Esse controle ON/OFF foi utilizado para a manutenção da temperatura do leito em torno do *setpoint* durante toda a secagem.

Para avaliar esse tipo de secagem, foi realizada a variação dos parâmetros de temperatura, massa da amostra e grãos cascados e descascados. Além disso, também foram testados a secagem puramente micro-ondas para todas as variações feitas para efeito de comparação. Na temperatura de 45°C, as secagens híbridas e puramente micro-ondas foram realizadas utilizando 200, 300 e 400g de grãos de café com e sem casca. Para 55°C, amostras de 300 e 400g de grãos cascados e descascados também foram submetidas aos dois métodos de secagem mencionados.

Em todos os ensaios experimentais, a massa na balança era registrada de 10 em 10 minutos na primeira hora de secagem e de 20 em 20 minutos durante todo o restante do processo. Para realizar esse registro, o procedimento envolvia as etapas de retirar o termopar do leito, desligar o ventilador responsável pela convecção e o disjuntor do micro-ondas e, por fim, ler a massa fornecida pela balança que corresponde à massa de água removida durante a secagem. O critério de parada das operações de secagem era determinado pelo teor de umidade, que deveria atingir um valor entre 10 e 20%.

A secagem híbrida utilizando ar à temperatura ambiente buscou demonstrar a possibilidade de descartar a etapa de pré-aquecimento do ar, o que pode ser vantajoso industrialmente. Sua vantagem é que o leito de café é aquecido por micro-ondas em vez de necessitar de aquecimento e desumidificação do ar, permitindo economia de energia.

#### **4.4 Taxa de secagem**

A análise da taxa de secagem demonstra a quantidade de água perdida pelo material em um período. Seu comportamento está ligado com o movimento da água intragranular em direção à superfície e expressa a influência de fatores como do estado de maturação, do percentual de umidade, da permeabilidade das camadas do grão, da temperatura e do fluxo de ar (GARCIA *et al.*, 2004).

A taxa de secagem (R) do café foi calculada por meio da Equação 1, definida pela razão entre a variação de umidade (dX) e o intervalo de tempo (dt).

A partir dos dados obtidos através das pesagens periódicas durante os experimentos, foram plotadas as curvas de taxa de secagem em função da umidade dos grãos abrangendo todo o período de secagem.

#### 4.5 Cinética de secagem

As razões de umidade (MR), calculadas ao longo da secagem a partir da relação entre a umidade instantânea ( $X_i$ ) e a inicial ( $X$ ) demonstrada pela Equação 9, foram plotadas em função do tempo de secagem, obtendo os gráficos de cinética de secagem.

$$MR = \frac{X_i}{X} \quad (9)$$

Esses dados foram ajustados aos modelos matemáticos de Lewis (1921), Page (1949) e Henderson e Pabis (1961) definidos pelas Equações 2, 3 e 4 por meio de uma regressão não-linear utilizando o *software* STATISTICA 8.0®.

Cada ajuste foi feito considerando ensaios experimentais com amostras de massa semelhante e forneceram as constantes empíricas “n” e “a” dos modelos de Page (1949) e Henderson e Pabis (1961) respectivamente. O parâmetro “k”, descrito pela Equação 10, foi calculado por meio de uma aproximação de Arrhenius para ajustar o modelo com diferentes temperaturas.

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{r \cdot T}} \quad (10)$$

O melhor modelo matemático para cada ajuste foi selecionado com base no parâmetro do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o qual pode variar entre 0 e 1. Valores próximos ou iguais a 1 indicam os ajustes mais satisfatórios.

#### 4.6 Eficiência de secagem

Após a finalização do estudo referente aos ensaios experimentais, foi analisada a eficiência energética de secagem, estudo justificado pelo processo consumir no mínimo 60% de toda a energia gasta na fabricação de produtos agrícolas. Por isso, foi realizado o cálculo

referente ao gasto energético de cada operação para visualizar a efetividade de cada variável aplicada nesse aspecto.

A definição de eficiência energética consiste na razão entre a energia necessária para a migração da água do material para o ar e a energia disponibilizada à operação. Para obtê-la, foram utilizadas planilhas geradas pelo *LabView* que informavam, a cada segundo, quando o micro-ondas esteve ligado e desligado durante as secagens. O tempo total que o micro-ondas ficou ligado e potência de 1,5kW do equipamento forneceram a energia gasta nas operações híbridas que, relacionada com a massa de café, resulta na energia específica para cada secagem. Para as secagens puramente micro-ondas, foi utilizada uma potência de 1,47kW para o cálculo do gasto energético desconsiderando a potência de 30W do ventilador responsável pela convecção.

Quanto maior a energia específica, maior é o custo daquele processo e menor é a eficiência energética. A partir disso, foi possível comparar a viabilidade e comprovar o custo-benefício das condições operacionais consideradas vantajosas para o processo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção foram apresentados os resultados calculados a partir dos dados obtidos por meio da secagem em micro-ondas.

### 5.1 Caracterização do café

A caracterização do café foi realizada para os grãos de café descascados, o principal objeto de estudo do trabalho. As operações dos grãos com casca foram realizadas apenas para efeito de comparação do tipo de café sujeito à secagem, a fim de verificar a eficiência do processo para ambas as condições.

A análise da densidade de bulk consiste na relação entre a massa de café e os volumes observados na proveta, antes e após a compactação. A densidade de *bulk* média calculada para os grãos com volume não compactado foi  $585 \pm 27 \text{ kg/m}^3$  enquanto para o volume compactado,  $603 \pm 23 \text{ kg/m}^3$ . A média geral entre as duas variações é  $594 \pm 9 \text{ kg/m}^3$ . Na literatura, o valor médio da densidade bulk foi de  $617 \text{ kg/m}^3$  (VITORINO *et al.*, 2001). A distinção entre os valores encontrados por Vitorino *et al.* (2001) e experimental pode ser justificada pela imprecisão na leitura do volume intragranular devido à atuação da casca como um obstáculo e da ausência do auxílio da passagem da compactação. Outro fator envolve os diferentes tipos e tamanhos do café empregado no experimento e daquele utilizado na literatura referencial.

A densidade real foi obtida baseada no método da picnometria. Inicialmente, a calibração do picnômetro permitiu calcular seu volume exato de  $25,309 \text{ cm}^3$ . A densidade real do café resultou em um valor médio de  $1049 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ , enquanto o valor obtido por Sath *et al.* (2015) foi  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Essa diferença pode ser justificada pela presença de pergaminho nos grãos utilizados no experimento e ausência dessa estrutura nos grãos estudados por Sath *et al.* (2015).

Os teores de umidade em base seca e úmida, cujos resultados foram, respectivamente, 90% e 47%. Os resultados obtidos por Teixeira (2014) foram 82% em base seca e por Coelho (2022), 46,2% em base úmida. A distância entre os resultados está relacionada à colheita do café utilizado ter sido feita logo após o término do período chuvoso e o grão ainda conter umidade advinda das chuvas. Quando a colheita do grão é feita em meio ao período da seca, eles apresentam menor teor de umidade. Essa propriedade também foi obtida para os grãos de café cascados pela sua importância nas análises de taxa e cinética de secagem. A partir da mesma metodologia, o teor de umidade em base úmida desses grãos foi 65,39%.

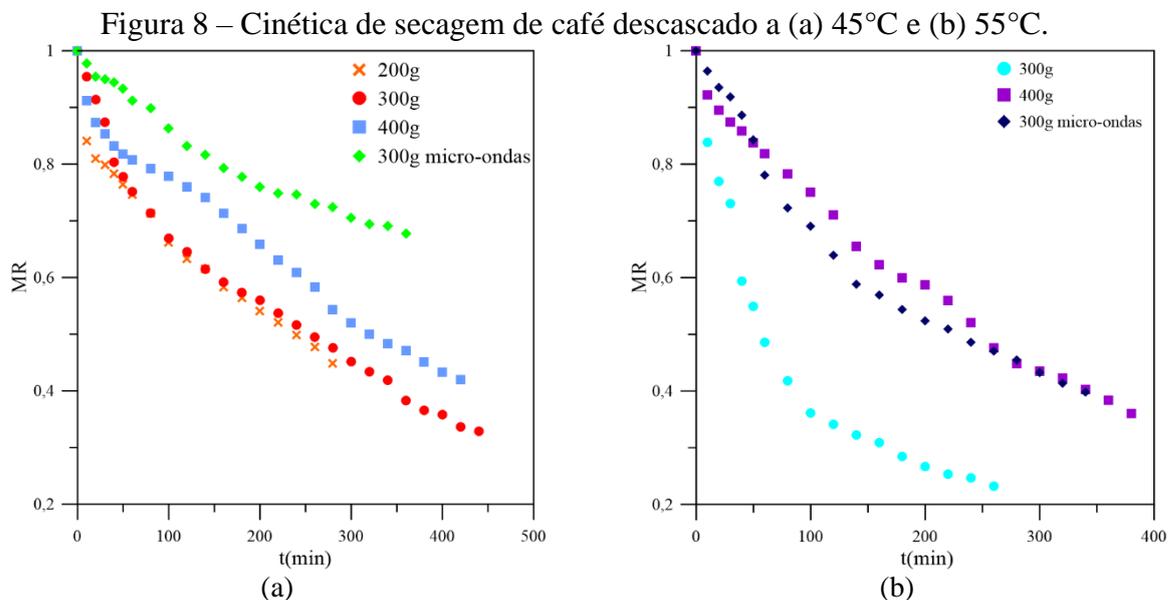
As medidas diretas de largura, altura e espessura de grãos de café sortidos aferidas com um paquímetro foram relacionadas para cálculo do diâmetro médio. O valor resultante foi 8,812 mm, enquanto na literatura foi obtido 8,4 mm (PEREIRA *et al.*, 2013). Essa divergência de resultados pode originada por erros experimentais ligadas ao posicionamento do paquímetro, visto que os grãos de café são irregulares e assimétricos. Além disso, os grãos de cafés especiais podem variar de tamanho dependendo da sua espécie e da qualidade de adubação no seu cultivo. Quanto melhor a adubação, maior é o grão.

O teor de cinzas do café foi obtido utilizando uma mufla, na qual a massa de café antes e a massa de cinzas restante após 1h no equipamento a 700°C foram relacionadas para o cálculo. O valor médio foi 1,09%, coerente com a literatura que define um teor até 5% (SAASP, 2010).

Outro fator de influência nas divergências entre os valores teóricos e experimentais consiste nas variações nos métodos de cultivo e colheita do café localizados em regiões com condições ambientais distintas. Isso porque o grão de café é fortemente influenciado pelo meio desde a sua plantação, o que é refletido na sua composição e nas suas propriedades.

## 5.2 Cinética de secagem

Para verificar a eficiência da secagem em cada temperatura aplicada e compará-las, foram obtidas curvas de cinética de secagem para as operações híbridas e puramente micro-ondas com amostras de 200, 300 e 400g de grãos de café, apresentadas na Figura 8.



Fonte: Do autor (2023).

Na temperatura de 45°C, a cinética para amostras de 200 g e 300g submetidas a secagem micro-ondas foi semelhante enquanto para 400g, o processo foi mais lento com uma redução menor da umidade para um mesmo período. Isso ocorre porque as duas primeiras massas formam uma camada de leito fina, a qual recebe influência uniforme do ar e do sistema de aquecimento favorecendo a transferência de massa do processo. Já para a amostra de 400g, o leito formado é mais espesso e atua como um obstáculo à transferência de massa por dificultar a perda de água, principalmente dos grãos posicionados nas camadas internas. Isso torna o processo mais lento e gera um gradiente de temperatura e umidade.

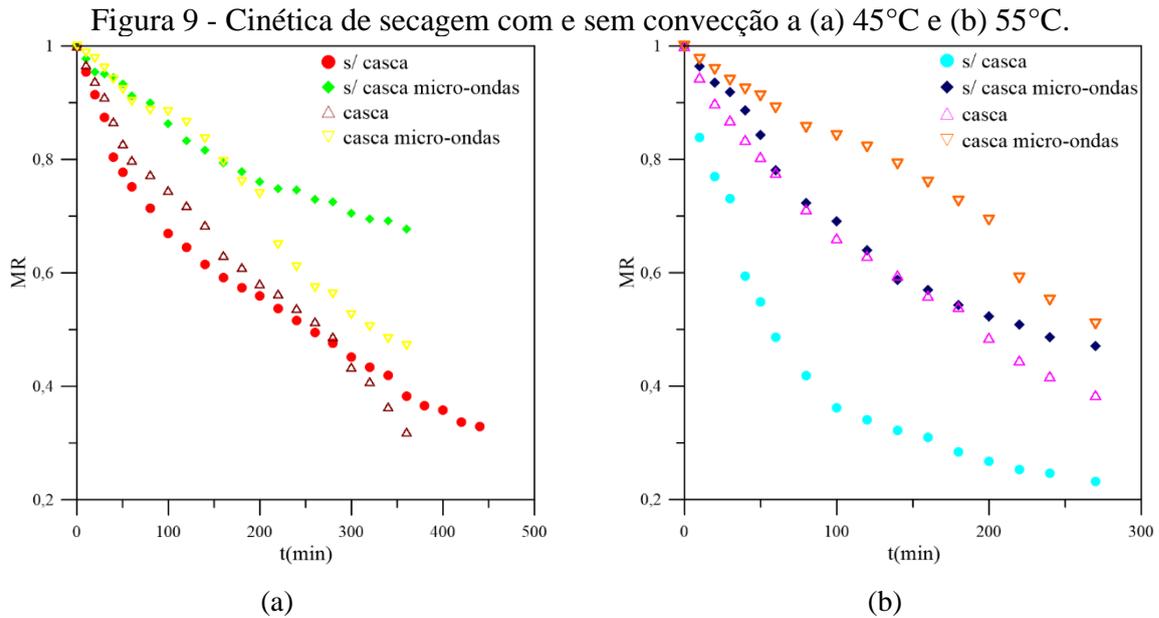
Outra comparação possível se refere ao tipo de secagem aplicada a amostras de 300g. A secagem puramente micro-ondas foi mais lenta que a micro-ondas e convecção combinadas. A passagem de ar, mesmo que na temperatura ambiente, favorece a transferência de massa por se comportar com um fluido com baixo teor de umidade quando comparado ao café.

Nessa temperatura, o aumento da massa para 400g foi menos prejudicial à eficiência do processo quando comparado à não aplicação da secagem convectiva pois a inclinação da curva foi superior, indicando uma diminuição do teor de umidade mais rápida.

Para 55°C, a curva de cinética de secagem a 300g apresentou inclinação superior às outras, indicando uma redução mais rápida da umidade e um processo mais eficiente. Nessa temperatura, o efeito da aplicação da secagem puramente micro-ondas gerou uma curva com inclinação inferior à da amostra de 300g submetida à secagem híbrida, indicando um prejuízo à operação.

Por fim, analisando o efeito da temperatura, nota-se que a curva da amostra de 300g a 55°C atingiu uma razão de umidade próxima a 0,2 antes de 300 minutos, enquanto a mesma amostra a 45°C apresentava cerca de 0,4 para esse mesmo tempo. Para a amostra de 400g no tempo de 400 minutos, a razão de umidade era superior a 0,4 na temperatura de 45°C e inferior a 0,4 na temperatura de 55°C. Essas comparações permitem comprovar o benefício do aumento da temperatura quando se trata do tempo de operação. Entretanto, o café é um produto termicamente sensível então, além desse aspecto, deve ser observado até que ponto esse aumento não é capaz de danificar o grão e prejudicar suas características nutricionais e organolépticas.

Outro tipo de distinção utilizada envolve a secagem de amostras cafés descascados de 300g também submetidos às operações puramente micro-ondas e híbrida nas temperaturas de 45 e 55°C a fim de compará-los com os procedimentos com cafés cascados. A Figura 9 consiste na análise das secagens híbrida e puramente micro-ondas de cafés com e sem casca.



Fonte: Do autor (2023).

Para 45°C, as curvas de café com e sem casca apresentaram inclinações próximas quando realizadas em uma técnica de secagem semelhante, indicando que a presença de casca não retardou a operação. Outro comportamento semelhante para ambas as técnicas é que a redução da razão de umidade em tempos maiores para o café com casca é superior à do café descascado. Entretanto, o fator de maior influência foi a presença ou não da convecção. A secagem micro-ondas foi mais lenta tanto para o café cascado, quanto para o descascado, o que é identificado por uma menor inclinação da curva.

Na temperatura de 55°C, a secagem híbrida do café sem casca foi mais eficiente que as demais. As secagens de café descascado e sem presença de convecção e de café com casca obtiveram eficiência intermediária com curvas de inclinações próximas até o meio do processo. No final, ambas se distanciaram e a operação do café com casca se tornou mais vantajosa. Por fim, a secagem mais ineficaz foi a de café com casca e sem convecção. Esse comportamento era esperado pelo acréscimo de teor de umidade na casca e de dificuldade de saída da água intragranular devido à atuação da casca como um obstáculo e da ausência do auxílio da passagem de ar à transferência de massa.

Os resultados obtidos foram coerentes com a literatura. Costa *et al.* (2021) analisou o comportamento de diferentes técnicas de secagem, incluindo a híbrida, a puramente micro-ondas e a convectiva. Em seus resultados, foi verificado o beneficiamento do processo da secagem micro-ondas quando aplicada em conjunto a secagem convectiva, considerada como a melhor técnica. Em seguida, a secagem convectiva foi comprovada como a segunda melhor

técnica e a secagem puramente convectiva, como a pior desse estudo. Os resultados obtidos foram coerentes com a literatura.

### 5.3 Modelos matemáticos de cinética de secagem

Após análise da cinética de secagem, os dados foram ajustados aos modelos matemáticos de Lewis, Page e Henderson e Pabis e da aproximação de Arrhenius para adequação a diferentes temperaturas, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros dos ajustes dos modelos de cinética de secagem.

Modelo		Parâmetros			
		$k_0$	$E_a/r$	$R^2$	
Lewis	300g	1,2386	273,1860	0,9818	
	400g	0,0087	62,4912	0,9820	
	300g s/ convecção	0,2125	232,0840	0,9879	
	300g c/ casca	0,0130	69,0181	0,9953	
	300g c/ casca s/ convecção	0,0025	7,3704	0,9866	
Page		$k_0$	$E_a/r$	n	$R^2$
	300g	1,6656	205,1097	0,6723	0,9933
	400g	0,0214	55,2264	0,8101	0,9912
	300g s/ convecção	0,4839	223,2148	0,8144	0,9955
	300g c/ casca	0,0200	67,4828	0,9135	0,9969
300g c/ casca s/ convecção	0,0008	8,3493	1,2031	0,9921	
Henderson e Pabis		$k_0$	$E_a/r$	a	$R^2$
	300g	1,1537	277,9089	0,9044	0,9749
	400g	0,00831	65,8001	0,9440	0,9940
	300g s/ convecção	0,2575	245,4694	0,9736	0,9909
	300g c/ casca	0,012934	70,92375	0,9753	0,9968
300g c/ casca s/ convecção	0,00262	7,089179	1,0189	0,9880	

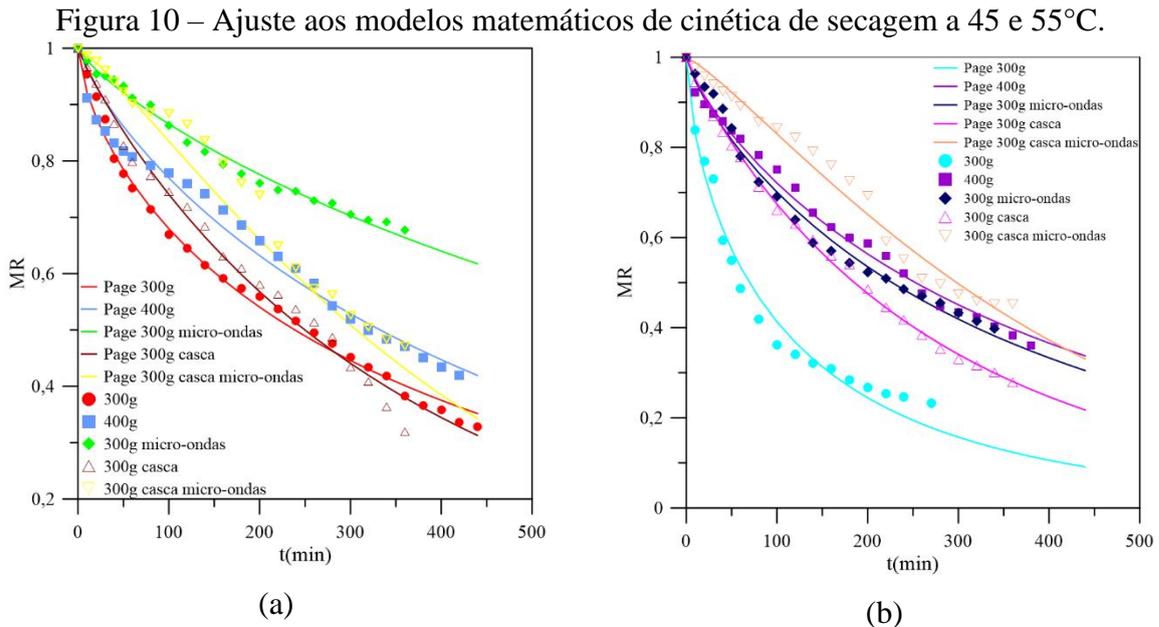
Fonte: Do autor (2023).

Para cada modelo matemático de cinética de secagem, os ajustes foram divididos de acordo com a condição aplicada no processo, incluindo a variação de massa e da técnica de secagem. A seleção do ajuste foi baseada no valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que pode variar entre 0 e 1 e, quanto mais próximo de 1, melhor.

Todas as condições obtiveram o coeficiente de determinação superior para o modelo de Page, com exceção da secagem a 400g que foi superior com o modelo de Henderson e Pabis. Os valores dos coeficientes de determinação para os melhores ajustes em todas as variações de secagem foi de 0,99. Entretanto, como a triagem para os ajustes é realizada considerando o material, o modelo selecionado foi o de Page que foi majoritariamente superior. Além desse

coeficiente, foram determinados os parâmetros por meio da regressão não linear para os respectivos modelos de cada condição, também apresentados na Tabela 1.

Esses parâmetros permitiram a confecção das curvas de cinética de secagem teóricas através do modelo de Page para efeito de comparação com os dados experimentais na temperatura de 45°C e de 55°C, demonstradas na Figura 10.



Fonte: Do autor (2023).

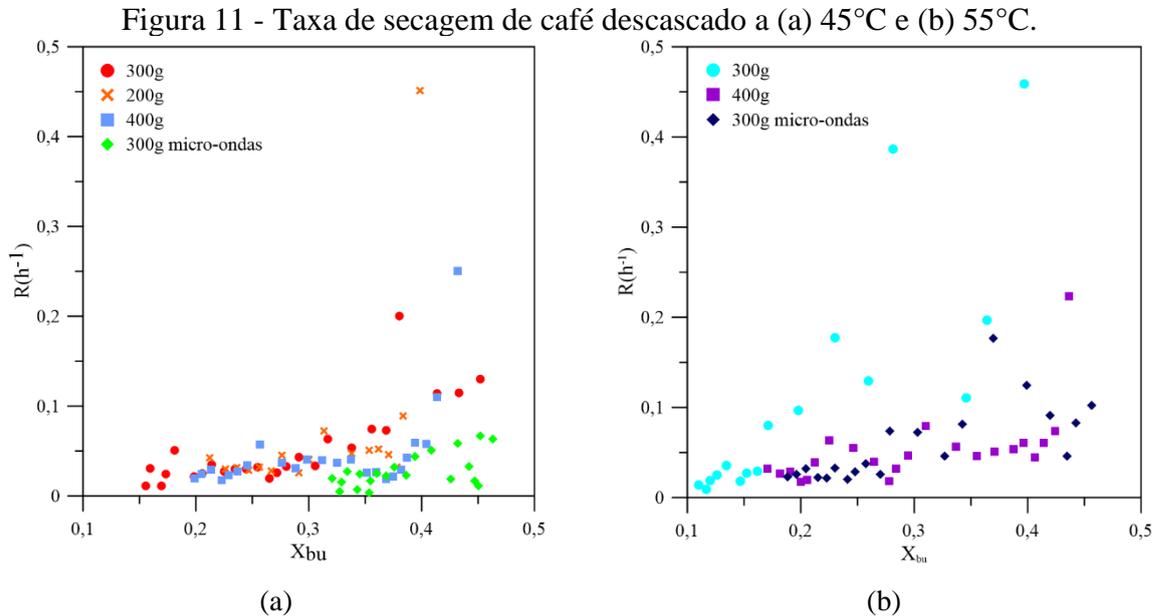
As curvas obtidas a partir dos modelos matemáticos de cinética de secagem se aproximaram do comportamento dos dados experimentais, exceto para a secagem de 300g de café sem convecção. Para esse experimento, os dados se distanciaram da curva do modelo principalmente até o tempo de 200 minutos.

Observando os dados experimentais a 55°C, é possível notar uma proximidade ao comportamento das curvas dos modelos matemáticos superior ao da temperatura de 45°C, indicando um ajuste melhor para a temperatura de 55°C. Entretanto, a secagem de 300g de café com casca sem convecção foi uma exceção na qual os pontos experimentais se distanciaram da sua respectiva curva. Isso poderia ser previsto pelo ajuste nessa condição apresentar coeficiente de determinação inferior aos demais.

#### 5.4 Taxa de secagem

Após a caracterização e secagem do café especial em diferentes condições, foram feitas análises das taxas de secagem em função da umidade do grão. A primeira, demonstrada na

Figura 11, apresenta as taxas referentes aos ensaios experimentais com os grãos de café sem casca a 45 e 55°C.



Fonte: Do autor (2023).

Para ambas as temperaturas, são observadas taxas superiores para secagens com amostras de menor massa acompanhadas de uma redução maior de umidade. Isso comprova a influência da massa nessa operação e indica que quantidades maiores de materiais possuem um processo mais lento devido às taxas mais baixas.

Em relação à comparação da secagem híbrida com a secagem puramente micro-ondas sem convecção com amostras de massas semelhantes de 300g, nota-se que, na operação híbrida para 45 e 55°C, as taxas de secagem são superiores e os valores de umidade atingidos são menores. Logo, a presença de ar contribui para o processo permitindo que finalize com um teor de umidade mais baixo. Isso pode ser explicado pela corrente de ar atravessar o leito e, por conter menor teor de umidade, absorver a água superficial presente no grão, favorecendo a transferência de massa.

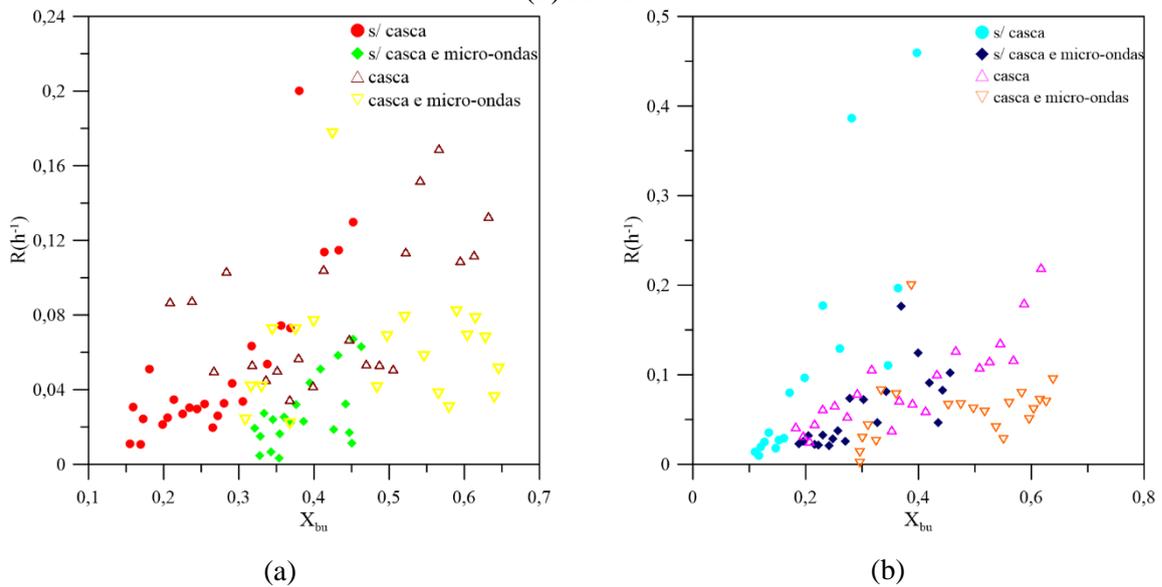
Para 45°C, as taxas de secagem para amostras de massas semelhantes são inferiores às de 55°C. Com isso, pode-se afirmar que temperaturas mais elevadas acarretam uma secagem mais eficiente, visto que promovem taxas de secagem maiores, logo atinge os valores de umidade mais rapidamente.

Além disso, foi identificado os períodos referentes às taxas de secagens. A 45°C, apenas a secagem sem convecção apresentou período de taxa transiente, um intervalo no qual os grãos de café perdem parte de sua umidade denominada de água não ligada. Em contrapartida, todas

possuem períodos taxas de secagem decrescentes evidentes. Já para 55°C, em todas as secagens são perceptíveis apenas períodos de taxas decrescentes. A identificação de períodos decrescentes remete à uma secagem puramente difusiva, a qual é responsável pela eliminação da água ligada do material que está localizada no interior dos grãos. Essa verificação possibilita presumir que alterações na velocidade do ar de secagem não interferiria de forma expressiva na operação, principalmente em pontos de umidade baixa.

A segunda análise consiste em uma comparação entre as taxas de secagem de grãos de café com e sem casca, submetidos à secagem híbrida e puramente micro-ondas, sem convecção. Essa análise é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Taxa de secagem com e sem convecção para cafés com e sem casca a (a) 45°C e (b) 55°C.



Fonte: Do autor (2023).

Para 45°C, as taxas de secagem mais elevadas foram para amostras com e sem casca sujeitas a secagem híbrida, assim como os menores teores de umidade finais. Isso demonstra que a convecção contribui para a aceleração da operação puramente micro-ondas e comprova o benefício da combinação de técnicas de secagem.

Ao observar separadamente as secagens híbrida e puramente micro-ondas, nota-se que os grãos de café com casca apresentaram taxas menores que os grãos descascados e finalizaram o processo com uma umidade maior. A casca se comporta como uma barreira que dificulta tanto a transferência de calor para aquecimento do grão, quanto a transferência de massa pela qual a água é removida do grão. Além disso, a presença de casca significa que o material apresenta

uma maior capacidade de reter água e, conseqüentemente, possui um teor de umidade inicial maior que o grão sem casca.

O comportamento para 55°C foi semelhante ao da temperatura de 45°C. As secagens feitas combinando os métodos de convecção e micro-ondas foram mais eficientes, com taxas superiores e umidades finais inferiores. Em relação à presença de casca, os grãos descascados também apresentaram perda de umidade com maior facilidade e, portanto, a casca é um obstáculo à secagem mesmo sob temperaturas mais altas.

A secagem sob a temperatura mais alta de 55°C obteve resultados melhores. Durante o processo, os grãos com casca apresentaram taxas mais próximas às dos grãos descascados enquanto há uma maior discrepância dos valores à 45°C e atingiram teores de umidade finais inferiores aos grãos a 45°C submetidos às mesmas condições.

Em relação aos períodos de taxa de secagem, apenas a operação híbrida com café sem casca não apresentou período transiente para 45°C. Já para 55°C, não houve presença de período transiente. Isso indica que a alteração da velocidade do ar poderia influenciar o início dos processos a 45°C quando há o período transiente e favorecer a eliminação da água extra granular. Entretanto, em todas as secagens para ambas as temperaturas, o período majoritário é o decrescente e, portanto, essa variável seria pouco relevante.

Apesar dos períodos observados compatíveis com a literatura, nota-se nos gráficos de taxa das Figuras 11 e 12 comportamentos incoerentes identificados como *outliers*. Esses pontos podem ser resultantes de gradientes de temperatura ao longo do experimento, visto que os leitos possuíam certa espessura que pode ocasionar um aquecimento desigual dos grãos. Outro fator se refere ao termopar não ser inserido em uma posição fixa, interferindo no sistema de controle sob influência do gradiente de temperatura. Logo, o café pode ter sido aquecido de forma mais intensa em alguns períodos que em outros.

## 5.5 Eficiência energética

A fim de verificar a viabilidade econômica das diferentes condições operacionais aplicadas às secagens, foram obtidos os resultados referentes ao estudo da eficiência energética apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Gasto energético da secagem de café submetidas a diferentes condições.

Temperatura(°C)	Secagem	Tempo total de secagem (h)	Tempo magnetron ligado (h)	Energia (kWh)	Energia específica (kWh/Kgcafé)
45	200g	4,742	3,496	5,244	26,218
	300g	7,088	5,619	8,429	28,097
	400g	6,706	5,405	8,108	20,271
	300g, sem ar	6,000	5,510	8,099	26,998
	300g, casca	5,880	4,534	6,802	22,672
	300g, casca sem ar	6,129	5,692	8,368	27,893
55	300g	4,293	2,824	4,235	14,118
	400g	6,377	4,938	7,406	18,516
	300g, sem ar	5,877	5,309	7,805	26,016
	300g, casca	5,803	4,124	6,187	20,622
	300g, casca sem ar	5,490	4,654	6,841	22,803

Fonte: Do autor (2023).

Submetido a uma condição semelhante, o tempo em que o secador permaneceu ligado e o consumo de energia foi inferior na temperatura de 55°C para todas as variáveis. Entretanto, essa diferença foi mais significativa para a secagem híbrida de amostras de 300g de grãos descascados. Isso é justificável pela operação apresentar uma massa menor, o método de secagem determinado como mais eficiente, a ausência de casca nos grãos e a utilização da temperatura mais alta, todos considerados fatores capazes de favorecer o processo.

Em contrapartida, as operações com menor eficiência foram aquelas cujo método empregado foi puramente micro-ondas para as duas temperaturas. Considerando as variáveis isoladamente, sua desvantagem para a secagem foi maior que a presença de casca, evidenciado pelo gasto energético mais alto além de ter sido comprovado como o processo o mais lento. Jordan *et al.* (2020) estudou a secagem de cafés descascados em secador convencional, cuja potência média era 7,36kW. Como a potência do equipamento é 1,5kW, o gasto energético para realizar as operações em um mesmo tempo seria 4,907 vezes superior no secador convencional. Essa comparação permite confirmar a alta eficiência das micro-ondas em relação ao método convencional, embora a aliança entre elas seja a escolha mais econômica como afirmado anteriormente.

Assim como nas análises de taxa de cinética de secagem, o estudo da eficiência energética também comprova a superioridade da aplicação de temperaturas mais altas, que atingem teores mais baixos de umidade gastando menos tempo e menos energia. Apesar disso, por se tratar de um produto biológico termicamente sensível, é necessário avaliar até que ponto essa elevação na temperatura contribui para o custo-benefício sem prejudicar as características sensoriais do café.

## 6 CONCLUSÕES

Esse trabalho estudou a secagem de café especial a partir das variações das condições de operações, sendo capaz de comprovar e comparar a eficiência de cada uma dessas condições a que o processo foi submetido. Essa análise é importante por demonstrar alternativas de otimizar o processo produtivo do café, produto que possui forte influência na economia do mundo, com destaque para o Brasil.

A caracterização dos grãos obteve resultados compatíveis com os valores da literatura. Os resultados referentes às propriedades de densidade *bulk*, densidade real, teor de umidade, diâmetro médio e teor de cinzas não apresentaram desvios discrepantes. Entretanto, a distância entre os valores pode ser justificada pela distinção entre as regiões, época de cultivo e tipos dos grãos de café.

O estudo da cinética de secagem dos grãos descascados comprovou que a redução de temperatura é acompanhada por uma redução das inclinações das curvas, indicando um processo mais lento. Já para uma mesma temperatura, o aumento da massa e a alteração da secagem híbrida para a puramente micro-ondas são duas variações que retardam o processo.

Na comparação entre a cinética de grãos cascados e descascados, a presença da casca não influencia de forma significativa na secagem a 45°C, visto que as curvas das amostras com e sem casca submetidas a uma mesma técnica apresentam comportamentos próximos. Em contrapartida, para 55°C, a secagem híbrida de café descascado foi superior, seguida pelas secagens híbrida de café com casca e puramente micro-ondas de café descascado que apresentaram desempenho semelhante e, por fim, a secagem puramente micro-ondas de café com casca.

O ajuste dos dados aos modelos matemáticos de cinética de secagem resultou em coeficientes de determinação que possibilitaram a seleção do melhor modelo. O escolhido foi o modelo de Page pois obteve coeficiente de determinação mais próximo de 1 para a maioria das condições de secagem estudadas. Além disso, também foram definidos os parâmetros por meio da regressão não linear para os modelos. A partir desses, gráficos foram construídos e permitiram verificar que, quando melhor o coeficiente de determinação, maior é a proximidade dos dados experimentais com a curvas teóricas.

A análise da taxa de secagem para as variações de condições empregadas em cafés descascados expressou resultados que acompanharam a cinética de secagem. Temperaturas superiores e a aplicação do método de secagem híbrido contribuíram para a eficiência do processo. Entretanto, o aumento da massa gerou prejuízo ao rendimento da secagem. Já a

comparação entre a taxa de secagem de grãos cascados e descascados comprovou a atuação da casca como um obstáculo à perda de umidade, além de concentrar uma parcela a mais de água em sua estrutura.

O comportamento da taxa de secagem obteve pontos chamados de *outliers* que se diferem da literatura. Isso é justificado pela espessura do leito de café ocasionar um aquecimento desigual dos grãos e, conseqüentemente, um gradiente de temperatura que influencia no controle feito a partir do termopar.

A eficiência energética apresentou resultados semelhantes aos de taxa e cinética de secagem. Foi comprovado que o aumento da temperatura contribui para o custo-benefício da operação, a secagem híbrida com amostra de massa inferior representou a melhor condição dentre as avaliadas enquanto a aplicação da secagem puramente micro-ondas foi a variável mais desfavorável ao processo.

As operações de secagem aplicadas aos cafés especiais permitiram verificar a efetividade dos métodos puramente micro-ondas e micro-ondas assistido de convecção e comprovar superioridade da técnica híbrida. Além disso, as diferentes condições empregadas nos processos afirmaram o dano gerado pelo aumento da massa e à ausência da convecção em oposição ao benefício da temperatura para a sua eficiência. Entretanto, o café é um produto termicamente sensível e a elevação desmoderada de temperatura é capaz de prejudicar a qualidade da bebida, é importante estabelecer um equilíbrio que favoreça aspectos econômicos para os produtores e sensoriais para os consumidores.

### **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

A partir do conhecimento da importância da secagem no processo produtivo dos grãos de cafés especiais, é possível propor a continuidade do estudo baseado nesse trabalho. As sugestões envolvem a aplicação de configurações que não foram analisadas, dentre elas:

- aplicação secagem de café em micro-ondas com leito fluidizado a fim de verificar a influência da movimentação das partículas na operação e se ocorre eliminação do gradiente de temperatura;
- avaliar a viabilidade da alteração da velocidade do ar, redução da sua umidade ou aquecimento anterior à entrada no secador;
- verificar as características dos grãos após a secagem, principalmente quando submetidas às temperaturas mais altas.

## REFERÊNCIAS

- AGRIANUAL. Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: IEG/FNP. 2017. 432p.
- ALMEIDA, D.; ROCHA, J.; LAGES, S.; COIMBRA, H. **Micro-ondas: Processamento Geral de Alimentos**. Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC), 2010.
- AMARAL, D. M. F. **Estudo de caso: Secagem Artificial Do Café – Fazenda Boa Vista/Mg**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrícola e Ambiental). Universidade Federal de Fluminense, Niterói, 2017.
- ANDRADE, P. S. **ESTUDO DA SECAGEM DE CAFÉ ARÁBICA (Coffea Arabica L.) DESPOLDADO EM SECADOR ROTO-AERADO**. Dissertação (Programa de PósGraduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Sumário executivo do café, dezembro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.
- BELL, L. N. **Moisture Effects on Food's Chemical Stability**. In: Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications: Jonh Wiley & Sons, Inc. 2 ed., p. 227-253, 2020.
- BORÉM, F. M. **Processamento do café**. In: BORÉM, F. M. Pós-colheita do café. Lavras: Editora da UFLA, 2008. p. 127-158.
- BORÉM, F. M.; ISQUIERDO, E. P.; TAVEIRA, J. H. DA S. Coffee processing. Handbook of coffee post-harvest technology, p. 51–67, 2014.
- BRITO, B. T. **Modelagem Matemática De Curvas Típicas De Secagem De Frutas Tropicais**. Monografia (Graduação em Química Tecnológica). Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- BSCA – BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. Cafés especiais são destaque em Minas Gerais.
- BURMESTER, K.; EGGERS, R. **Heat and mass transfer during the coffee drying process**. Journal of Food Engineering, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, 2010.
- CECAFÉ. Associação Brasileira da Indústria do Café. Colheita acaba, e café deve ter pior qualidade. 2017. Disponível em: Acesso em: 3 set. 2023.
- CHONG, Chien Hwa et al. **Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuummicrowave, and intermittent techniques**. Food and Bioprocess Technology, v. 7, n. 4, p. 975- 989, 2014.
- COELHO, E. G. **Avaliação físico-química e sensorial do grão de café arábica submetido à secagem solar, convectiva e por cast-tape drying**. 2022. Dissertação (Mestrado em

Desenvolvimento de Processos e Produtos) - Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2022.

- COSTA, A. R. S. **Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- COSTA, F. O.; ALVARENGA, T. F.; MESQUITA, T. V. C.; PETRI, I. J. (2021), Hybrid drying of pulped arabica coffee cherry beans (*Coffea arabica* L. cv. Catuai) using a hexagonal microwave dryer designed by numerical simulations. *Journal of Food Process Engineering*, Vol 44, p. 1-13.
- CUNHA, M.L.; CANTO, M.W.; MARSAIOLI JR, A. Secagem de café cereja descascado por ar quente e microondas. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* [online]. 2003, v.23, n.3, p. 381-385. 2003.
- DAK, Manish; PAREEK, N. K. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, v. 122, p. 117-121, 2014.
- DIAS, L. G. **Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Microondas de Compósitos Cerâmicos de Argila e Resíduos de Esteatito**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia). Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.
- DURÁN, C. A. A., TSUKUI, A., SANTOS, F. K. F., MARTINEZ, S. T., BIZZO, H. R., REZENDE, C. M. Café: aspetos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. *Revista Virtual de Química*, Rio de Janeiro, v. 9, n.1, p. 107-134, 2017.
- ESQUIVEL, P.; JIMÉNEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, v. 46, n. 2, p. 488–495, maio 2012.
- EMBRAPA. Produção mundial de café foi estimada em 171,3 milhões de sacas de 60kg para safra 2022-2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80815479/producao-mundial-de-cafe-foi-estimada-em-1713-milhoes-de-sacas-de-60kg-para-safra-2022-2023>>. Acesso em: 4 out. 2023a.
- EMBRAPA. Produção dos Cafés do Brasil ocupa 1,9 milhão de hectares em 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81515963/producao-dos-cafes-do-brasil-ocupa-19-milhao-de-hectares-em-2023>>. Acesso em: 4 out. 2023b.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípios das operações unitárias*. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.
- GARCIA, D. C. et al. **A secagem de sementes**. *Ciência Rural*, v. 34, n. 2, p. 603–608, 1 abr. 2004.
- GARDENAL, A. C. **Desenvolvimento De Um Secador De Bandejas Para A Secagem De Folhas Mediciniais E Análise Da Secagem De Ramos De Barbatimão (*Stryphnodendron Adstringens*)**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

- HENDERSON, S. M.; Pabis, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, n.3, p.169-174, 1961.
- HII, C. L.; BORÉM, F. M. Drying and roasting of cocoa and coffee. 2019.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Tabela 1618. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>. Acesso em: 3 set. 2023.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades: Produção Agrícola - Lavoura Permanente (município de Uberlândia). Disponível em: . Acesso em: 3 set. 2023.
- ISQUIERDO, E. P. et al. **Drying kinetics and quality of natural coffee**. Transactions of the ASABE, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, June 2013.
- LIVRAMENTO, K. G. DO et al. **Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process**. Food Chemistry, v. 221, p. 1874–1882, abr. 2017.
- LOPES, F. J. **Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, 2013.
- MAIA, H. **Secagem de alimentos por micro-ondas: desenvolvimento de um protótipo de secador a vácuo, análise do processo e aplicação sobre diferentes tipos de alimentos**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Educação, Cultura e Linguagens, 2021.
- MESQUITA, C. M., REZENDE, J. E., CARVALHO, J. S., FABRI JUNIOR, M. A., MORAES, N. C., DIAS, P. T., CARVALHO, R. M., ARAÚJO, W. G. **Manual do café - Colheita e Preparo (Coffea arábica L.)**. Belo Horizonte, EMATER-MG, 2016.
- MONTEIRO, Ricardo L. et al. **Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices**. Journal of Food Engineering, v. 232, p. 1-10, 2018.
- MOREIRA, R.V. **Caracterização do processo de secagem do café natural submetido a diferentes métodos de secagem**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. 3 ed. Estados Unidos: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- PAGE, G. E. 1949. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Unpublished M.S. thesis, Purdue University, West Lafayette, Ind., 1949.
- PAULA, L. T. **Estudo da secagem do café cereja despulpado em diferentes tempos de fermentação**. 2005. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2005.

- PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, v. 156, p. 108-119, 2017.
- QUEIROZ, A. F. **Influência do processo de secagem do café na ocorrência do grão melado.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Cafeicultura). Escola Agrotécnica Federal de Muzambinho, Muzambinho, 2008.
- RABELLO, A. A.; GOMES, F. C. O.; MACHADO, A. M. R.; GUIRLANDA, C. P. **Estudo Comparativo de Processos de Secagem de Café em Diferentes Intervalos de Exposição por Micro-ondas.** Equidade e Sustentabilidade no Campo da Segurança Alimentar Global. Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.
- REINATO, C. H. R.; BORÉM, F. M. **Variação da temperatura e do teor de água do café em secador rotativo usando lenha e GLP como combustíveis.** Eng. Agríc. Jaboticabal. V. 26. N. 2. 2006.
- RIBEIRO, F. C. et al. Storage of green coffee in hermetic packaging injected with CO<sub>2</sub>. *Journal of Stored Products Research*, Oxford, v. 47, n. 4, p. 341- 348, Oct. 2011.
- ROCHA, T. A. F. **Contribuições ao estudo da secagem da borra de café em leito vibrofluidizado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- SAASP. Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Resolução SAA - 19, de 5 de abril de 2010. **Norma de Padrões Mínimos de Qualidade para Café Torrado em Grão e Torrado e Moído – Característica: CAFÉ TRADICIONAL.** Diário Oficial [Poder Executivo], São Paulo, 2010.
- SCHOLZ, M. B. dos S.; FIGUEIREDO, V. R. G.; SILVA, J. V. N.; KITZBERGER, C. S. G. *Coffee Science*, Lavras, v. 6, n. 3, p. 245-255, set./dez. 2011.
- SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for air corn drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, v. 23, p. 1261-1265. 1980.
- SILVA, J. S.; NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D. **Os impactos das barreiras fitossanitárias nas exportações de café e o papel das operações pós-colheita na qualidade dos grãos.** 2006.
- SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. **Secagem e Secadores.** 2018. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.
- SILVA, F. A., MARSAIOLI JR. **Aspecto econômico de um processo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) assistida a micro-ondas.** *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 5 (2):157-167. 2003.
- SILVA, F.C; FERREIRA, V.F; SOUZA, M.C.B.V. Adaptação de forno de microondas doméstico para realização de reações de transesterificação sob refluxo e catálise por

argilas. Departamento de Química Orgânica, Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói – RJ, 2006.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. **Secagem e Secadores**. 2018. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

TEIXEIRA, A. A. **Secagem e teor de umidade na qualidade física e sensorial do café** – ASSI CAFÉ, S. Coffe Company. 2014.

VITORINO M. D.; FRANÇA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; ANDRADE, F. M. **Variação de características físicas e químicas de café durante a torra. Parte I: Características físicas**. Trabalho apresentado no Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Embrapa Café, 181p., 2001.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, v. 19, p. 583-597. 2001.