

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SÃO CARLOS

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MARIA CLARA CAPUCCI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM DE
GRÃOS DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SÃO CARLOS

2025

MARIA CLARA CAPUCCI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM DE
GRÃOS DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, Campus São Carlos, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof^o. Dr. Rodrigo Béttega

Coorientadora: Prof^a. Dr. Amarílis Severino e Souza

SÃO CARLOS

2025

MARIA CLARA CAPUCCI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM DE
GRÃOS DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química da Universidade Federal de São Carlos.

Data de aprovação: ____/____/____.

Profº. Dr. Rodrigo Béttega
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Profº. Dr. Thiago Faggion de Pádua
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Profª. Dr. Mônica Lopes Aguiar
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que esteve ao meu lado em todos os momentos, me concedendo forças e serenidade para enfrentar cada desafio. Sem Sua presença constante, esta caminhada teria sido muito mais difícil.

Agradeço à minha família, que sempre foi minha base e porto seguro. Em especial, aos meus pais, Ronaldo e Patrícia, que não mediram esforços para me verem realizar meus sonhos, apoiando-me com amor, paciência e dedicação incondicional. Ao meu irmão, Gabriel, que desde sempre foi minha inspiração e exemplo a seguir, meu sincero reconhecimento e carinho.

Às minhas amigas e colegas de casa, Thaiza e Amanda, que estiveram ao meu lado dia após dia, dividindo as alegrias e as dificuldades, e tornando o percurso mais leve com momentos de descontração que guardarei com carinho.

De forma especial, agradeço aos meus professores Amarílis e Rodrigo, pelo apoio, orientação e incentivo em cada etapa deste trabalho, contribuindo não apenas para a construção deste projeto, mas também para meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

A modelagem matemática é uma ferramenta essencial para compreender e otimizar processos industriais. No contexto da secagem de grãos de café (*Coffea arabica L.*), sua aplicação possibilita prever o comportamento da umidade do produto final em diferentes condições operacionais de secagem. Diante disso, este trabalho teve como objetivo aplicar e comparar diferentes modelos matemáticos — Page, Midilli, Lewis e Henderson & Pabis — na descrição da cinética de secagem de grãos de café, utilizando dados experimentais obtidos em estudos prévios. O ajuste dos modelos foi realizado por regressão não linear e a avaliação de desempenho considerou o coeficiente de determinação (R^2) e o parâmetro qui-quadrado (χ^2). O modelo de Midilli apresentou o melhor desempenho, alcançando R^2 de até 0,9999 e χ^2 na ordem de 10^{-6} , seguido pelo modelo de Page, também com ajustes consistentes e coerentes com os dados experimentais. Já os modelos de Lewis e Henderson & Pabis, embora tenham mostrado bom desempenho em temperaturas mais baixas, apresentam um discreto desvio dos dados experimentais. Os resultados indicaram que o coeficiente de secagem (K) aumentou substancialmente com a elevação da temperatura, evidenciando a aceleração do processo de redução de umidade e a coerência física dos resultados obtidos. Dessa forma, o estudo reforça o potencial da modelagem matemática como ferramenta de otimização da secagem de café, contribuindo para a melhoria das etapas pós-colheita e para a manutenção da qualidade dos grãos, fator essencial para o valor agregado e a competitividade do produto no mercado.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Secagem. Modelagem Matemática.

ABSTRACT

Mathematical modeling is an essential tool for understanding and optimizing industrial processes. In the context of coffee bean drying (*Coffea arabica* L.), its application enables the prediction of the moisture behavior of the final product under different drying operational conditions. Therefore, this study aimed to apply and compare different mathematical models — Page, Midilli, Lewis, and Henderson & Pabis — to describe the drying kinetics of coffee beans using experimental data obtained from previous studies. The models were fitted through nonlinear regression, and their performance evaluation considered the coefficient of determination (R^2) and the chi-square parameter (χ^2). The Midilli model showed the best performance, reaching R^2 values up to 0,9999 and χ^2 on the order of 10^{-6} , followed by the Page model, which also presented consistent and coherent fits with the experimental data. On the other hand, the Lewis and Henderson & Pabis models, although showing good performance at lower temperatures, exhibited a slight deviation from the experimental data. The results indicated that the drying coefficient (K) increased substantially with rising temperature, demonstrating the acceleration of the moisture reduction process and the physical coherence of the obtained results. Thus, the study reinforces the potential of mathematical modeling as a tool for optimizing coffee drying, contributing to the improvement of post-harvest stages and to the maintenance of grain quality — an essential factor for the product's added value and market competitiveness.

Keywords: *Coffea arabica*. Drying. Mathematical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Frutos (a) de café separado entre casca/polpa (b) e grão (c).	4
Figura 2 - Curva típica de cinética de secagem (a) e curva típica de taxa de secagem (b).	7
Figura 3 - Grão de café experimental.	12
Figura 4 - Sistema de aquisição de dados em linha, no qual (a) representa o computador, (b) representa a estufa e (c) representa a balança.....	13
Figura 5 - Dados experimentais coletados em intervalos muito curtos, apresentando ruídos e flutuações instrumentais.	13
Figura 6 - Ruídos e Flutuações presentes nos dados experimentais.	14
Figura 7 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Page.	17
Figura 8 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Page.	17
Figura 9 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Midilli.....	20
Figura 10 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Midilli.....	20
Figura 11 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Lewis.	23
Figura 12 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Lewis.	23
Figura 13 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Henderson & Pabis.....	26

Figura 14 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Henderson & Pabis..... 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos de regressão não-linear utilizados para prever as curvas de secagem para grãos.	9
Tabela 2 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Page. ...	16
Tabela 3 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Midilli....	19
Tabela 4 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Lewis....	22
Tabela 5 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Henderson & Pabis.....	25

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação para Adimensional de Umidade (RU).....	9
Equação 2 - Modelo de Page	9
Equação 3 - Modelo de Midilli.....	9
Equação 4 - Modelo de Lewis	9
Equação 5 - Modelo de Henderson & Pabis.....	9
Equação 6 - Equação para o Coeficiente de Determinação.....	15
Equação 7 - Equação para parâmetro qui-quadrado.....	15

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

b.u.	Base Úmida
°C	Graus Celsius
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
et. al.	et alli (e outros)
RU	Adimensional de Umidade/Razão de Umidade
SP	São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. ESTADO DA ARTE: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 CAFÉ: EVOLUÇÃO HISTÓRICA E IMPACTO NA ECONOMIA.....	4
3.2 SECAGEM	5
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	8
3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DO CAFÉ	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS	12
4.1 DADOS DE SECAGEM DOS GRÃOS DE CAFÉ (CAPUCCI, 2024). 12	
4.2 TRATAMENTO DE DADOS E MODELAGEM MATEMÁTICA.....	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5.1 AJUSTE PELO MODELO DE PAGE.....	16
5.2 AJUSTE PELO MODELO DE MIDILLI.....	19
5.3 AJUSTE PELO MODELO DE LEWIS	22
5.4 AJUSTE PELO MODELO DE HENDERSON & PABIS.....	25
5.5 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS ABORDADOS	27
6. CONCLUSÕES	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das principais commodities agrícolas do Brasil, com expressiva relevância econômica para o setor de exportações e grande inserção na cultura e hábitos da população. O consumo da bebida, obtida a partir do processamento dos grãos, está profundamente enraizado no cotidiano brasileiro (SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA, 2016). A variedade *Coffea arabica* L. corresponde a aproximadamente 47% da produção mundial, com destaque para a região de Minas Gerais, sendo responsável por 95,8% das sacas de café colhidas no país em 2020, distribuídas em uma área superior a 1,52 milhão de hectares cultivados (EMBRAPA, 2020).

A valorização do café no mercado está diretamente relacionada à sua qualidade sensorial, que inclui aroma, sabor e coloração. Nesse contexto, torna-se fundamental a aplicação de técnicas de processamento adequadas, especialmente na etapa de pós-colheita, para preservar e aprimorar essas características. Desse modo, observa-se que a análise da qualidade dos grãos tem sido amplamente incentivada no país (SOUZA, 1996; POLTRONIERI E ROSSI, 2016).

Após a colheita, os grãos passam por diversos processos, e a alta umidade presente exige atenção especial. Quando não controlada, essa umidade pode favorecer o desenvolvimento de fungos, insetos e microrganismos produtores de microtoxinas, comprometendo tanto a qualidade quanto a segurança do produto final (YAZDANI et al., 2006). Com esse fator, a etapa de secagem torna-se crucial para manter as propriedades físico-químicas e sensoriais dos grãos (OLIVEIRA, 2018), influenciando diretamente a qualidade da bebida obtida após a torra.

Além de assegurar a qualidade, a secagem eficiente contribui para a conservação dos grãos e a redução de perdas pós-colheita. Uma secagem prolongada pode causar danos estruturais ao grão, enquanto uma secagem incompleta pode deixar umidade residual elevada, favorecendo a deterioração durante o armazenamento (ANDRADE, 2023). Portanto, o controle adequado desse processo permite ganhos em eficiência energética e integridade do produto.

A modelagem matemática aplicada à secagem de grãos tem se mostrado uma alternativa estratégica para compreender o processo e otimizar seus resultados. A utilização de modelos permite simular a dinâmica da secagem em diferentes

condições de operação, oferecendo suporte na escolha das configurações mais adequadas (VITORINO, 2009). Com a abordagem por modelagem matemática, há possibilidade de redução de testes experimentais, diminuindo custos e tempo de pesquisa sem comprometer a confiabilidade dos dados. Nesse sentido, a previsão de valores como o da umidade e da taxa de secagem em função do tempo mostra-se essencial para manter a qualidade do material e promover maior eficiência do processo (BRITO, 2022).

Autores como Leonardo et al. (2025) e Resende et al. (2009), focados em grãos de regiões como Viçosa e Rondônia, demonstraram que modelos como o de Page são eficazes para descrever essa cinética. Outros trabalhos, como o de Corrêa et al. (2010), também confirmaram a importância da modelagem, chegando a identificar parâmetros termodinâmicos cruciais, sendo eles a energia de ativação, entropia, entalpia e energia livre de Gibbs.

Com base nos estudos expostos, observa-se que a modelagem pode reduzir custos e tempo de pesquisa, ao mesmo tempo em que auxilia na determinação de parâmetros essenciais para o estudo da secagem. Considerando que ainda há escassez de estudos voltados para modelagens dos grãos produzidos no noroeste do estado de São Paulo, nota-se a importância de direcionar pesquisas nesta área a fim de auxiliar na preservação da qualidade desta bebida.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi aplicar modelos matemáticos consolidados na literatura para descrever a cinética de secagem de grãos de café, avaliando o desempenho de diferentes equações na representação da cinética de secagem do material. Para alcançar esse objetivo geral, os objetivos específicos foram:

- Obter, na literatura, dados experimentais de secagem de grãos de café em diferentes condições operacionais;
- Ajustar os modelos de Page, Midilli, Lewis e Handerson & Pabis às curvas de cinética de secagem obtidas;
- Avaliar a capacidade dos modelos em representar o processo por meio de parâmetros estatísticos, sendo eles o coeficiente de determinação (R^2), o qui-quadrado (χ^2) e o intervalo de confiança (IC);
- Analisar o comportamento dos coeficientes ajustados frente às condições operacionais aplicadas;

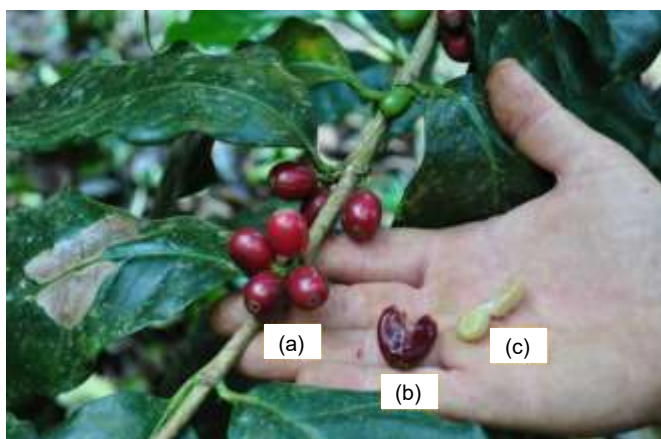
3. ESTADO DA ARTE: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que embasa o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são discutidos aspectos relacionados à evolução histórica do café e sua relevância econômica, seguidos por uma abordagem sobre o processo de secagem, destacando sua importância para a qualidade do produto final. Por fim, são apresentados os principais conceitos de modelagem matemática aplicados a processos de secagem, com ênfase nos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café.

3.1 CAFÉ: EVOLUÇÃO HISTÓRICA E IMPACTO NA ECONOMIA

O protagonismo do Brasil na economia mundial do café é tão duradouro que muitos acreditam que o grão tenha se originado no próprio território. No entanto, o café foi introduzido no país e, desde então, sua trajetória tem sido marcada por adaptações e inovações promovidas por diferentes grupos sociais. Brasileiros e imigrantes desempenharam papel fundamental na consolidação da cafeicultura, ao implementar práticas agrícolas modernas e identificar variedades mais produtivas (TOPIK, 2019). Na figura 1, observa-se o fruto separando o grão, casca e polpa.

Figura 1 - Frutos (a) de café separado entre casca/polpa (b) e grão (c).



Fonte: FOLHA DE SÃO PAULO (2023), DOMÍNIO PÚBLICO.

Mais do que uma cultura agrícola, o café tornou-se identidade econômica e, principalmente, cultural do país. As características naturais do Brasil, como clima, relevo e localização, associadas a processos históricos, contribuíram para consolidá-lo como uma potência global na produção cafeeira (VARTAN, 2023). O ambiente propício favoreceu a expansão do cultivo para diversas regiões do mapa nacional, o que levou não apenas a avanços no setor agrícola, mas também na urbanização de

áreas até então pouco desenvolvidas (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2017).

Durante grande parte do século XIX e início do século XX, o café representou a principal fonte de riqueza do país. Seu impacto foi decisivo para o surgimento e crescimento de cidades no interior dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Paraná. São Paulo, em especial, destacou-se como epicentro desse crescimento, transformando-se em um polo financeiro e industrial (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2017).

Nos dias atuais, o Brasil continua sendo o maior exportador de café do mundo. De acordo com dados da International Coffee Organization (2024), os produtos derivados do grão movimentam diversos segmentos da economia, promovendo receitas em diferentes pontos da cadeia produtiva, desde o cultivo até a comercialização internacional.

Com o avanço tecnológico e as mudanças sociais, houve a mecanização de processos entre os grandes produtores, ao passo que a agricultura familiar ganhou relevância no setor. Dessa forma, o café consolidou-se como a principal *commodity* agrícola do país. Seu papel histórico, no entanto, vai além da economia: sustentou o processo de industrialização do Brasil (MEDEIROS; RODRIGUES, 2017).

Com base nessa trajetória, nota-se que a qualidade do café produzido vem ganhando destaque. A produção em larga escala, voltada principalmente para o mercado de commodities, muitas vezes não contempla práticas que valorizem os atributos sensoriais da bebida, o que limita seu valor agregado no cenário internacional. Desta forma, mudanças atuais no comportamento dos consumidores faz com que os produtores busquem cafés com sabores e aromas diferenciados, incentivando transformações na cadeia produtiva. A busca por qualidade passou a ser um diferencial competitivo, oferecendo ao produtor a oportunidade de agregar valor ao produto (PEREIRA, 2022).

3.2 SECAGEM

A qualidade de um material está diretamente relacionada à sua aplicação. No caso dos grãos de café, destinados ao consumo alimentício, é fundamental que o processamento envolva etapas que garantam sua conservação e mantenham suas características desejáveis, como aroma, sabor e aparência. Com isso, utiliza-se a

secagem a fim de garantir produtos adequados para transporte e armazenamento e, ainda, preservar a qualidade e prolongar a vida útil do material (MUJUMDAR, 2014). Desta forma, o processo de secagem torna-se primordial para evitar a proliferação de contaminantes (YAZDANI et al., 2006).

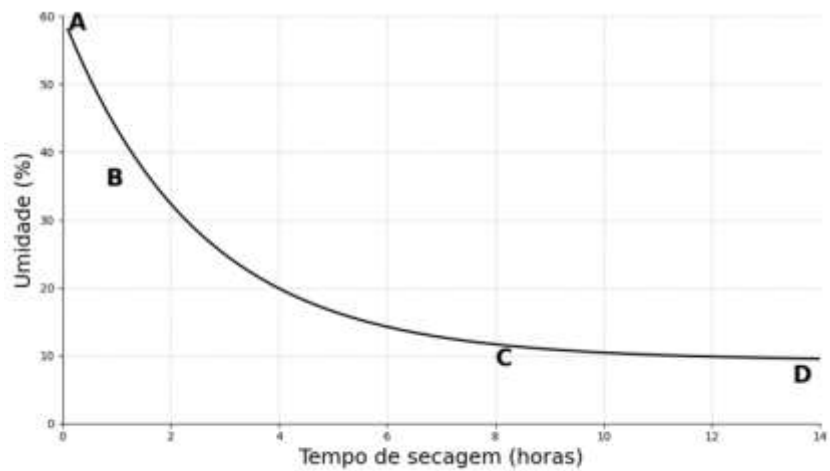
A secagem é uma operação unitária amplamente difundida, a qual é usada em diferentes áreas de estudo. Ainda assim, ela possui complexidade diante das modelagens matemáticas e dos fenômenos de transporte (MUJUMDAR, 2014). Os fenômenos de transporte presentes em uma secagem abrangem a transferência simultânea de calor e massa. De forma geral, a secagem descreve o processo de remoção térmica de substâncias voláteis, principalmente água, com o objetivo de produzir um produto sólido. Essa umidade pode se apresentar de duas formas principais, sendo a umidade ligada aquela retida na microestrutura do sólido ou presente como solução líquida em seu interior, com pressão de vapor inferior à da água pura, enquanto a umidade não ligada corresponde à água que não apresenta esse tipo de interação com o material sólido. (MUJUMDAR, 2014).

Quando um sólido úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente: a transferência de energia do ambiente para evaporar a umidade presente na superfície e a transferência de umidade interna para a superfície do sólido, seguida de sua evaporação como consequência do primeiro processo. A taxa de secagem é determinada pela velocidade com que ambos os processos ocorrem. A transferência de calor para o material pode se dar por convecção, condução, radiação, ou por combinações destes mecanismos (MUJUMDAR, 2014).

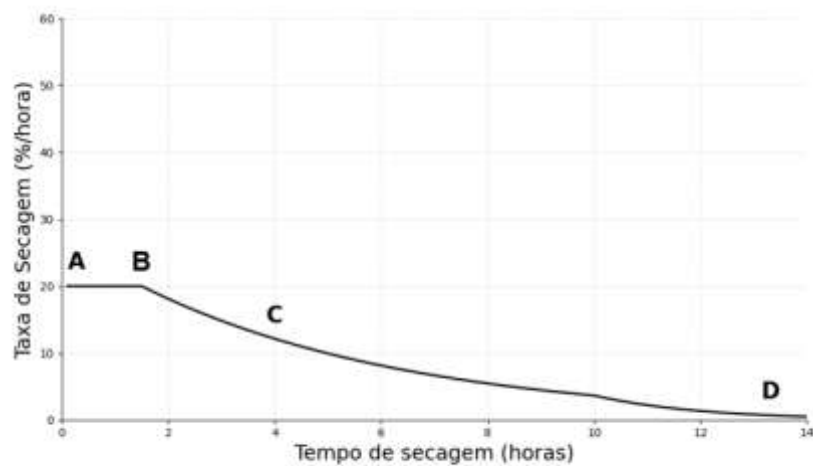
Somado a isso, o processo de remoção de água como vapor da superfície do sólido dependerá de fatores como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, área de superfície exposta e pressão ambiente, sendo que os secadores industriais, bem dimensionados, são capazes de controlar essas variáveis a fim de estimar melhores condições de operação e performance (MUJUMDAR, 2014).

Assim, a compreensão da cinética de secagem é essencial para o entendimento e controle desse processo. A secagem de sólidos úmidos costuma ser descrita a partir de uma curva típica, apresentada pela Figura 2, que relaciona a taxa de secagem a umidade do material ao longo do tempo.

Figura 2 - Curva típica de cinética de secagem (a) e curva típica de taxa de secagem (b).



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de PORTELLA; EICHELBERGER (2001), DOMÍNIO PÚBLICO.

A fase inicial é o período de taxa de secagem constante (AB). Neste período, a remoção de água é rápida e estável, o que garante que a taxa de secagem seja constante. Na prática, essa fase geralmente é observada quando o teor de água do grão está muito acima do ponto de colheita (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001).

Em seguida, o processo entra no período de velocidade de secagem decrescente (BD), onde a secagem se torna mais lenta e o fator limitante passa a ser o transporte interno da umidade do grão para a superfície. Isso ocorre porque a taxa de transporte de água de dentro para fora do grão se torna inferior à taxa de evaporação. O processo se encerra quando a umidade do grão atinge o ponto de equilíbrio em relação à umidade relativa do ar (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001).

Este período decrescente pode ser dividido em duas subfases. No período BC (decréscima rápida), a perda de água por unidade de tempo ainda é considerável, mesmo que o deslocamento interno da água já esteja lento. Já no período CD (decréscima lenta), a perda de água é muito baixa. Neste período, é preciso uma quantidade elevada de energia para remover a pouca umidade restante, o que resulta em um baixo rendimento térmico (PORTELLA; EICHELBERGER, 2001).

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é uma ferramenta essencial para interpretar comportamentos de diferentes materiais diante dos mais distintos processos. Partindo da premissa de secagem de materiais, a estratégia de modelar possibilita estimar a redução do teor de água em função do tempo e das condições de operação, auxiliando tanto no projeto de equipamentos, quanto na escolha coerente do método de secagem a ser utilizado (ARAÚJO et al., 2021).

De acordo com Brito (2022), o fundamento da simulação matemática apoia-se em dispor de um conjunto de expressões numéricas que descrevem integralmente o sistema a ser representado. Assim, a resolução das equações permitirá antecipar variáveis do procedimento, considerando os estados iniciais, as restrições e as aproximações.

Os modelos que se fundamentam nas leis de transporte de calor e massa, em especial na segunda Lei de Fick, são chamados de teóricos. Esses modelos consideram a difusão da umidade no interior do produto, demandando soluções numéricas com maior complexidade matemática. Ademais, há modelos que buscam conciliar fundamentos teóricos com a aplicação prática, incorporando simplificações das leis físicas e parâmetros ajustáveis, de modo a representar, de forma aproximada, fenômenos como a difusão molecular, o transporte capilar, a migração de vapor e o fluxo hidrodinâmico da água no interior do material. Esses modelos são classificados como semiempíricos e apresentam validade restrita às faixas de condições experimentais em que foram obtidos (GONELI, 2014).

Segundo Goneli (2014), existem modelos que se classificam como empíricos. Diversos autores já sugeriram modelos na literatura com o objetivo de estudar o processo de secagem de materiais higroscópicos (MARTINAZZO et al., 2007), destacando os principais modelos: Page, Midilli, Lewis, Henderson & Pabis. As

equações referentes aos modelos citados são descritas na tabela 1, na qual t é o tempo de secagem; K , a , b , n são coeficientes ajustáveis; RU indica o adimensional de umidade, calculado pela equação 1.

$$RU = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

em que M é o teor de umidade no tempo t , M_0 é o teor inicial e M_e é o teor de equilíbrio. Essa relação é amplamente utilizada na modelagem da cinética de secagem de grãos (KHIR et al., 2011).

Tabela 1 - Modelos matemáticos de regressão não-linear utilizados para prever as curvas de secagem para grãos.

Autor		Modelo	Equação
Page	(PAGE, 1949)	$RU = \exp(-K \cdot t^n)$	(2)
Midilli	(MIDILLI, 2002)	$RU = a \cdot \exp(-K \cdot t^n) + b \cdot t$	(3)
Lewis	(LEWIS, 1921)	$RU = \exp(-K \cdot t)$	(4)
Henderson & Pabis	(HENDERSON & PABIS, 1961)	$RU = a \cdot \exp(-K \cdot t)$	(5)

Fonte: Autor (2025).

Um dos coeficientes mais relevantes nesses modelos é a constante de secagem (K), a qual expressa a velocidade com que o processo ocorre e está diretamente relacionada à temperatura do ar de secagem (BRITO, 2022). Em geral, valores mais elevados de K correspondem a processos mais rápidos, devido à intensificação da transferência de calor e massa.

Para definir os coeficientes dos modelos, utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados, ferramenta fundamental da otimização estatística. O Método dos Mínimos Quadrados garante que a curva do modelo escolhido se ajuste aos dados obtidos experimentalmente com a melhor precisão possível, visto que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados (dados experimentais) e os valores previstos pelo modelo (MONTGOMERY; RUNGER, 2021). O critério de minimização de erros do Método dos Mínimos Quadrados estabelece a referência de quão bem as modelagens podem representar o comportamento dos dados (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DO CAFÉ

A secagem de grãos, especialmente do café, é um processo fundamental para a preservação da qualidade do produto pós-colheita. No entanto, trata-se de um fenômeno complexo, no qual a transferência simultânea de calor e massa está diretamente relacionada à estrutura do grão, à umidade e às condições ambientais. Por essa razão, diversos estudos têm buscado na modelagem matemática uma ferramenta capaz de descrever, prever e otimizar a secagem.

Corrêa et al. (2010) demonstram esse potencial ao aplicar diferentes modelos matemáticos para descrever a secagem de grãos de café arábica em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. Nesse estudo, além de avaliar a cinética de secagem, os autores determinaram parâmetros termodinâmicos como entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. O trabalho evidenciou que o modelo de Midilli se ajustou melhor aos dados experimentais.

Somado isso, Leonardo et al. (2025) explorou a otimização da secagem do café por meio de modelos matemáticos. Este estudo ressaltou que a modelagem não deve ser entendida apenas como um recurso teórico, mas como uma estratégia prática para encontrar condições ideais de operação. Ao integrar variáveis do processo, o estudo apontou caminhos para minimizar o tempo de secagem habitual dos grãos, preservando características de qualidade do café. Nessa abordagem, nota-se que o modelo de Lewis foi eficiente descrever o processo de secagem, indicando possível redução do tempo de secagem somado a garantia de qualidade dos grãos.

Ademais, Resende et al. (2009) voltaram-se para a secagem de clones de *Coffea canephora* em terreiro de concreto, ajustando diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. Os clones, nesse contexto, correspondem a linhagens geneticamente uniformes da espécie, obtidas por propagação vegetativa e desenvolvidas pela Embrapa Rondônia. Entre os modelos testados, o de Page destacou-se como o mais adequado para representar o fenômeno. Este estudo mostra a importância do uso da modelagem matemática em sistemas tradicionais de secagem, como o terreiro, que ainda predominam em diversas regiões produtoras.

Os resultados observados pelos autores citados reforçam que os modelos matemáticos são capazes de traduzir fenômenos físicos complexos em equações preditivas, de forma que não só contribuem para a melhoria da eficiência energética e

operacional do fenômeno de secagem, como também contribui para a garantia da qualidade final do produto a ser comercializado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos adotados para a realização do estudo. Apresentam-se, inicialmente, os dados experimentais de secagem dos grãos de café utilizados na pesquisa. Em seguida, são detalhados os procedimentos empregados no tratamento dos dados e na aplicação da modelagem matemática.

4.1 DADOS DE SECAGEM DOS GRÃOS DE CAFÉ (CAPUCCI, 2024)

Os dados experimentais utilizados para as modelagens matemáticas deste trabalho foram obtidos em Iniciação Científica referente ao Edital ProPq 001/2023. (CAPUCCI, 2024). O material experimental consistiu em grãos de café verde (*Coffea arabica*, safra de Setembro de 2023), proveniente da região noroeste do estado de São Paulo. As dimensões dos grãos eram de $7,97\pm 0,72$ mm (largura), $5,87\pm 0,32$ mm (comprimento) e $4,38\pm 0,30$ mm (espessura) (CAPUCCI, 2024), observando-se o grão característico na Figura 3.

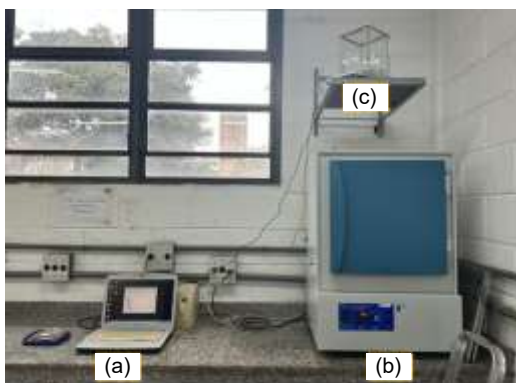
Figura 3 - Grão de café experimental.



Fonte: Autor (2025).

As secagens foram realizadas em estufa com circulação e renovação de ar (TECNAL – TE 394/1), onde os grãos de café eram dispostos em camada delgada em placas de Petri em distintas umidades e temperaturas, 20% e 25% em base úmida e 40° e 60°C, respectivamente. O processo foi monitorado por um sistema de aquisição de dados em linha, representado pela Figura 4, no qual as medições de massa eram registradas de forma contínua e automática por uma balança de precisão acoplada a um computador, utilizando o *software* Ohaus para a construção das curvas cinéticas (CAPUCCI, 2024).

Figura 4 - Sistema de aquisição de dados em linha, no qual (a) representa o computador, (b) representa a estufa e (c) representa a balança.

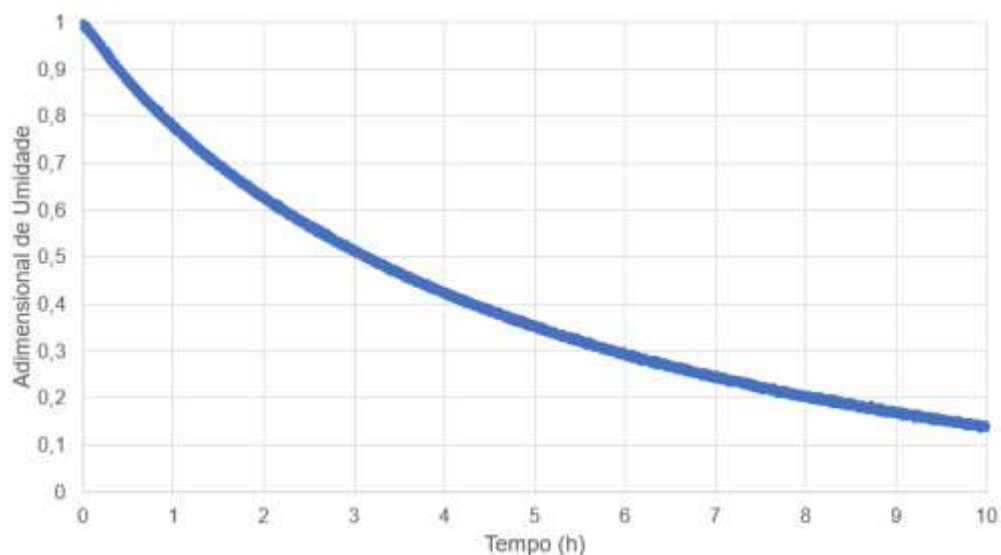


Fonte: Autor (2025).

4.2 TRATAMENTO DE DADOS E MODELAGEM MATEMÁTICA

Durante o monitoramento experimental, a coleta de dados foi realizada em intervalos muito curtos, o que resultou em uma curva original com elevado nível de ruídos e flutuações instrumentais, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Dados experimentais coletados em intervalos muito curtos, apresentando ruídos e flutuações instrumentais.

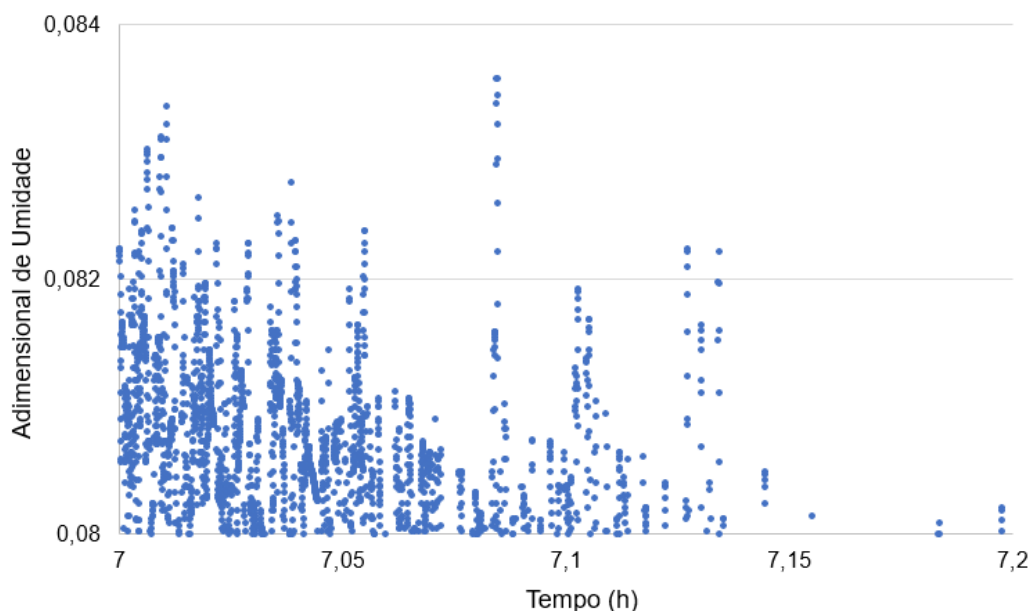


Fonte: Autor (2025).

Essas oscilações, ilustradas de forma ampliada na Figura 6, dificultaram a interpretação direta do comportamento do processo. Diante disso, adotou-se uma janela temporal de 5 minutos, correspondente à média de aproximadamente 3000

pontos experimentais, com o objetivo de reduzir a imprecisão associada às leituras e evidenciar de maneira mais clara a tendência real do processo.

Figura 6 - Ruídos e Flutuações presentes nos dados experimentais.



Fonte: Autor (2025).

Aplicou-se um filtro de média móvel aos valores médios de umidade utilizando o *software* Microsoft Excel. Este tratamento minimizou o ruído sem alterar significativamente os parâmetros cinéticos médios observados. A partir dos dados filtrados, estimou-se os adimensionais de umidade em função do tempo.

A fim de realizar os ajustes dos resultados experimentais de cinética de secagem, foram aplicados modelos matemáticos empíricos, sendo eles: Page, Midilli, Lewis e Henderson & Pabis, Equações de 2 a 5, respectivamente. No procedimento de ajuste não-linear dos modelos, os parâmetros de cada modelo — como o coeficiente de secagem (K) e as constantes adimensionais — foram estimados a partir da técnica de regressão não linear.

Para isso, foi utilizado o método dos mínimos quadrados, que busca minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores experimentais e os valores previstos pelos modelos. Esse processo permite identificar os coeficientes que melhor descrevem a curva de secagem observada, garantindo maior precisão no ajuste. Para a avaliação estatística e a seleção do modelo que melhor representa o fenômeno, o

ajuste foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), pelo parâmetro estatístico qui-quadrado (χ^2) e pelo intervalo de confiança de cada coeficiente.

O termo R^2 mensura a proporção da variação total dos dados de secagem que é efetivamente explicada pelo modelo de regressão. Sua determinação se baseia na razão entre a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQ_{res}) e a Soma dos Quadrados Total (SQ_{tot}), conforme a Equação 6 (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad (6)$$

Adicionalmente, o parâmetro qui-quadrado (χ^2) é empregado como um critério de erro. Esse parâmetro atua quantificando a discrepância entre os valores preditos (Y_{pred}) e os valores experimentais (Y_{exp}), ponderado pelos graus de liberdade do sistema (diferença entre a quantidade de dados experimentais e o número de parâmetros do modelo abordado), conforme a Equação 7 (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{exp,i} - Y_{pred,i})^2}{N-p} \quad (7)$$

Por fim, o intervalo de confiança (IC) foi utilizado para avaliar os coeficientes do modelo, verificando se são significativamente diferentes de zero, com base em um nível de confiança de 95%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos a partir do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem. São discutidos, de forma comparativa, os desempenhos dos modelos abordados, considerando critérios estatísticos e o comportamento das curvas ajustadas.

5.1 AJUSTE PELO MODELO DE PAGE

Na Tabela 2 encontram-se reunidos os parâmetros cinéticos e estatísticos ajustados pelo Modelo de Page, considerando as condições de temperatura e umidade analisadas.

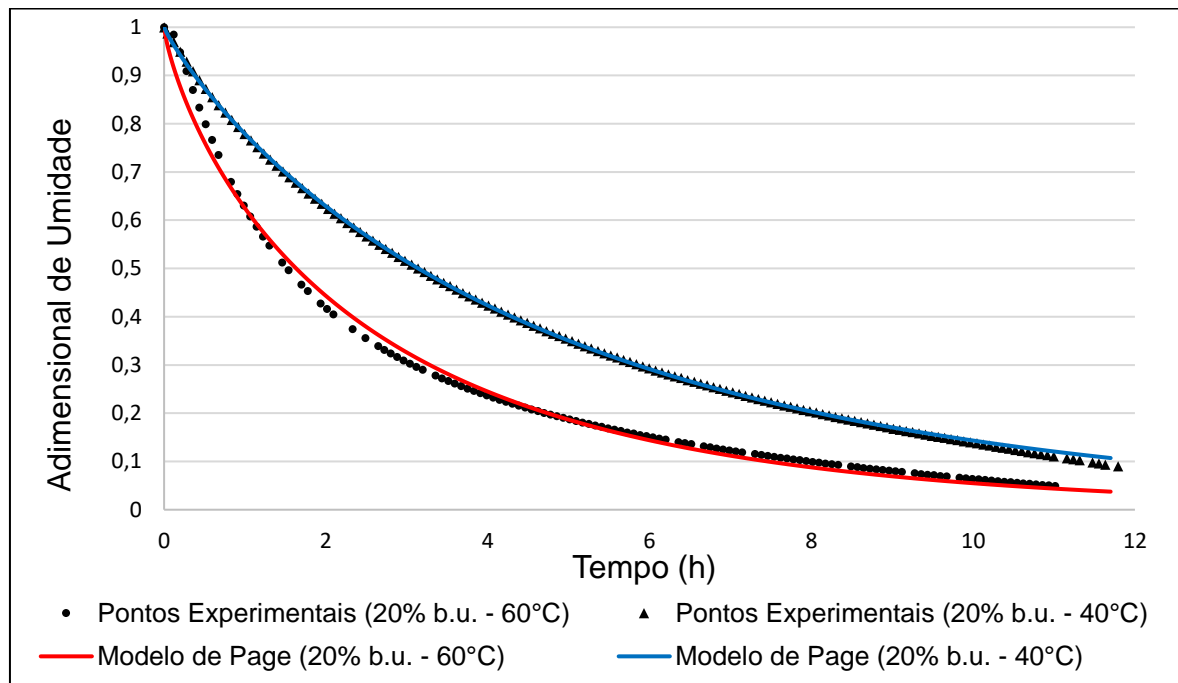
Tabela 2 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Page.

Umidade (b.u.)	T (°C)	R ²	χ^2 . (10 ⁶)	Constantes	IC
20%	40	0,9999	3,28	K = 0,2501	±0,00038
				n = 0,8903	±0,00092
	60	0,9941	340	K = 0,4706	±0,00616
				n = 0,7901	±0,00872
25%	40	0,9995	4,00	K = 0,2729	±0,00143
				n = 1,0311	±0,00361
	60	0,9911	530	K = 0,5376	±0,00081
				n = 0,8457	±0,01196

Fonte: Autor (2025).

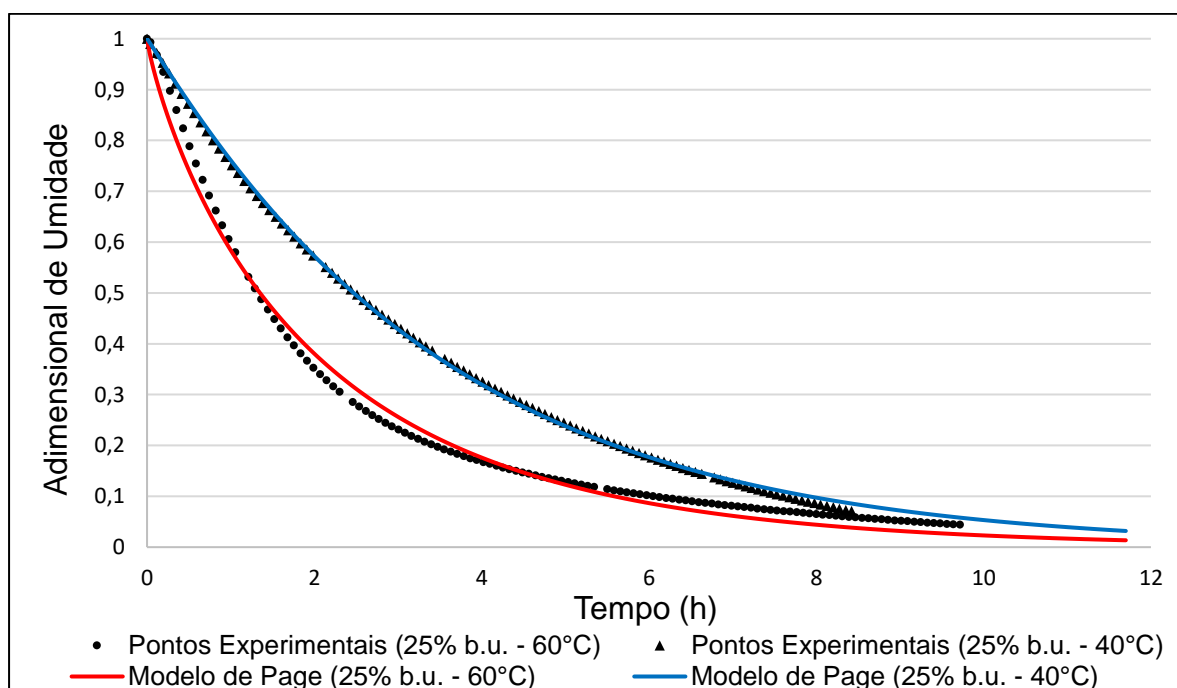
As Figuras 7 e 8 exibem as curvas previstas pela modelagem matemática para as diferentes combinações de temperatura e umidade estudadas.

Figura 7 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Page.



Fonte: Autor (2025).

Figura 8 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Page.



Fonte: Autor (2025).

A análise do coeficiente de determinação (R^2) mostrou que, em todas as condições, o Modelo de Page explicou de forma adequada a variância dos dados experimentais, com valores variando de 0,9911 a 0,9999. Tais valores, consistentemente acima de 0,99, comprovam que a curva é adequadamente predita pelo modelo abordado. A análise visual das curvas de umidade adimensional em função do tempo, apresentadas nas Figuras 6 e 7, reforça os resultados obtidos pelos indicadores estatísticos. Observa-se que, em todas as condições avaliadas, o Modelo de Page apresentou um excelente ajuste aos dados experimentais, com a linha modelada praticamente coincidindo com a maioria dos pontos experimentais.

Entretanto, nota-se um comportamento sutil no estágio final da secagem, em que os valores experimentais começam a se descolar da curva predita, posicionando-se levemente acima dela. Esse desvio mostra que o modelo acaba prevendo valores um pouco menores do que os observados nas etapas finais da secagem, quando o material oferece maior resistência à perda de umidade, próximo do ponto de equilíbrio.

Observa-se também uma tendência do parâmetro K. Este parâmetro, que representa a constante de secagem, mostrou-se fortemente influenciado pela temperatura de secagem. Observou-se que, ao elevar a temperatura de 40°C para 60°C, ocorreu um aumento expressivo em seu valor, evidenciando uma secagem mais rápida. Esse comportamento se deve ao acréscimo de energia térmica ao sistema, que intensifica a difusão da umidade e facilita seu caminho para a superfície do material.

Somado a isso, a análise do parâmetro qui-quadrado (χ^2), que quantifica o erro residual entre os valores preditos e observados, reforça essa conclusão ao apresentar valores baixos. Essa proximidade de zero indica que a dispersão dos dados experimentais em torno da curva de regressão modelada é mínima, evidenciando a boa aplicabilidade do Modelo de Page ao fenômeno estudado. Observa-se, no entanto, que para a temperatura mais elevada (60 °C), o valor de χ^2 foi superior em comparação às temperaturas menores (40 °C). Embora todos os valores permaneçam muito próximos de zero, esse aumento em temperaturas mais altas sugere que o Modelo de Page descreveu o processo com uma precisão menor nessas condições.

Essa diferença pode estar associada à intensificação dos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem em altas temperaturas, os quais podem

não ser totalmente contemplados pelas simplificações assumidas pelo modelo. Ademais, a precisão com que os parâmetros cinéticos K e n foram estimados é confirmada pelo intervalo de confiança (IC). Os valores de IC apresentaram uma amplitude mínima, variando de 0,00038 a 0,01196, o que confere confiabilidade aos parâmetros obtidos, visto que o valor zero não foi incluído no intervalo de confiança, portanto os parâmetros são significativos para o Modelo de Page.

5.2 AJUSTE PELO MODELO DE MIDILLI

Na Tabela 3, ilustrada abaixo, encontram-se reunidos os parâmetros cinéticos e estatísticos ajustados pelo Modelo de Midilli.

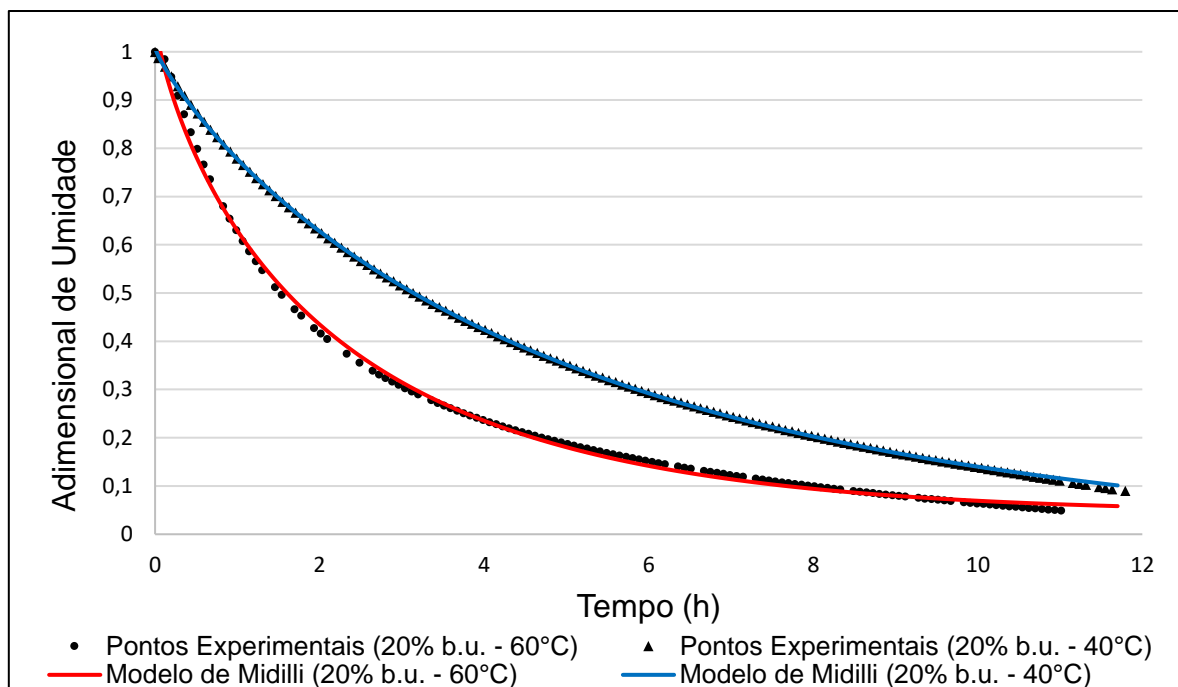
Tabela 3 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Midilli.

Umidade (b.u.)	T (°C)	R ²	$\chi^2 \cdot (10^6)$	Constantes	IC
20%	40	0,9999	1,38	a = 1,0072	±0,00068
				K = 0,2572	±0,00068
				n = 0,8648	±0,00205
				b = -0,0013	±0,00011
	60	0,9976	140	a = 1,0655	±0,00809
				K = 0,5304	±0,00948
				n = 0,7745	±0,01240
				b = 0,0024	±0,00037
25%	40	0,9999	0,651	a = 1,0047	±0,00044
				K = 0,2800	±0,00046
				n = 0,9643	±0,00014
				b = -0,0050	±0,00007
	60	0,9976	140	a = 1,0480	±0,00762
				K = 0,5783	±0,00946
				n = 0,8935	±0,01310
				b = 0,0050	±0,00032

Fonte: Autor (2025).

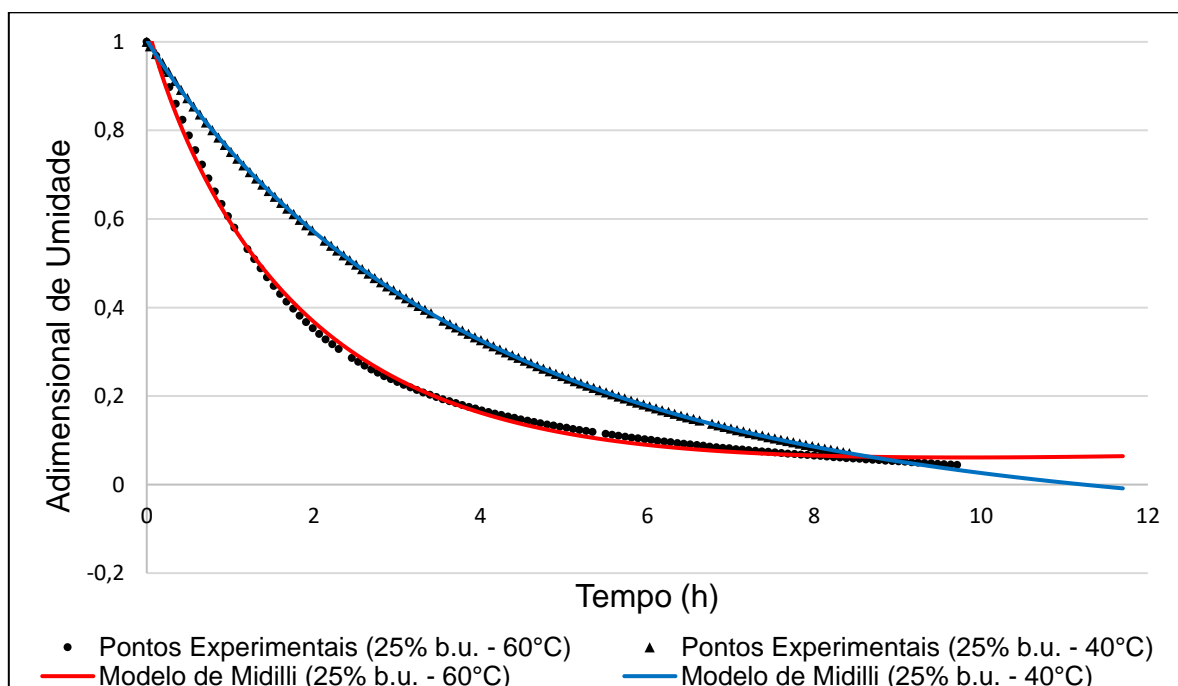
Nas Figuras 9 e 10, são apresentadas as curvas obtidas pela modelagem matemática de Midilli, sob as distintas combinações de temperatura e umidade avaliadas.

Figura 9 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Midilli.



Fonte: Autor (2025).

Figura 10 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Midilli.



Fonte: Autor (2025).

A análise do coeficiente de determinação (R^2) revelou que o Modelo de Midilli foi adequado para a descrição da cinética de secagem, com valores variando entre 0,9976 e 0,9999. Esses resultados, muito próximos da unidade, indicam que o modelo foi capaz de representar com precisão a variância dos dados experimentais, descrevendo de forma consistente o comportamento da umidade ao longo do tempo sob as condições avaliadas.

A análise visual das curvas de adimensional de umidade em função do tempo, apresentadas nas Figuras 8 e 9, confirma os resultados estatísticos obtidos. Observa-se que, em todas as condições estudadas, as curvas modeladas exibiram aderência aos pontos experimentais. Pode-se destacar, para a temperatura de 40°C (curvas azuis), que o modelo reproduziu o comportamento dos dados. Já nas condições de temperatura mais elevada, de 60°C (curvas vermelhas), observou-se apenas um discreto afastamento dos pontos experimentais em relação à curva predita, especialmente no estágio final da secagem.

O elevado desempenho do Modelo de Midilli está associado, em parte, à sua estrutura matemática. Por se tratar de um modelo com quatro parâmetros (a , K , n e b), ele apresenta maior capacidade de adaptação às particularidades dos dados experimentais quando comparado a modelos mais simples, como o de Page, que possui apenas dois parâmetros. Essa característica confere ao modelo maior capacidade para prever comportamentos do processo de secagem, garantindo um melhor ajuste aos dados experimentais.

É importante destacar que o uso de um número maior de parâmetros também pode representar uma desvantagem, pois aumenta a complexidade do ajuste e o risco de superajuste (overfitting) — situação em que o modelo se ajusta excessivamente aos erros experimentais, comprometendo sua capacidade de representar o fenômeno de forma geral. Além disso, a análise do parâmetro qui-quadrado (χ^2) reforça a qualidade da modelagem, apresentando valores mínimos, o que indica uma baixa dispersão dos resíduos entre os valores experimentais e preditos.

A constante K , que está diretamente relacionada à velocidade de remoção da umidade, apresentou aumento expressivo com a elevação da temperatura. Esse comportamento confirma que temperaturas mais altas aceleram a secagem, uma vez que fornecem maior energia térmica ao sistema.

Por fim, a confiabilidade dos parâmetros ajustados é confirmada pelos intervalos de confiança (IC). Observou-se que os valores de IC apresentaram amplitudes mínimas, sem incluir o valor zero em nenhum dos casos. Essa baixa amplitude evidencia a significância estatística dos parâmetros, confirmando a adequação do Modelo de Midilli para a descrição da cinética de secagem nas condições experimentais estudadas.

5.3 AJUSTE PELO MODELO DE LEWIS

A Tabela 4, apresentada a seguir, ilustra os parâmetros cinéticos e estatísticos ajustados pelo Modelo de Lewis.

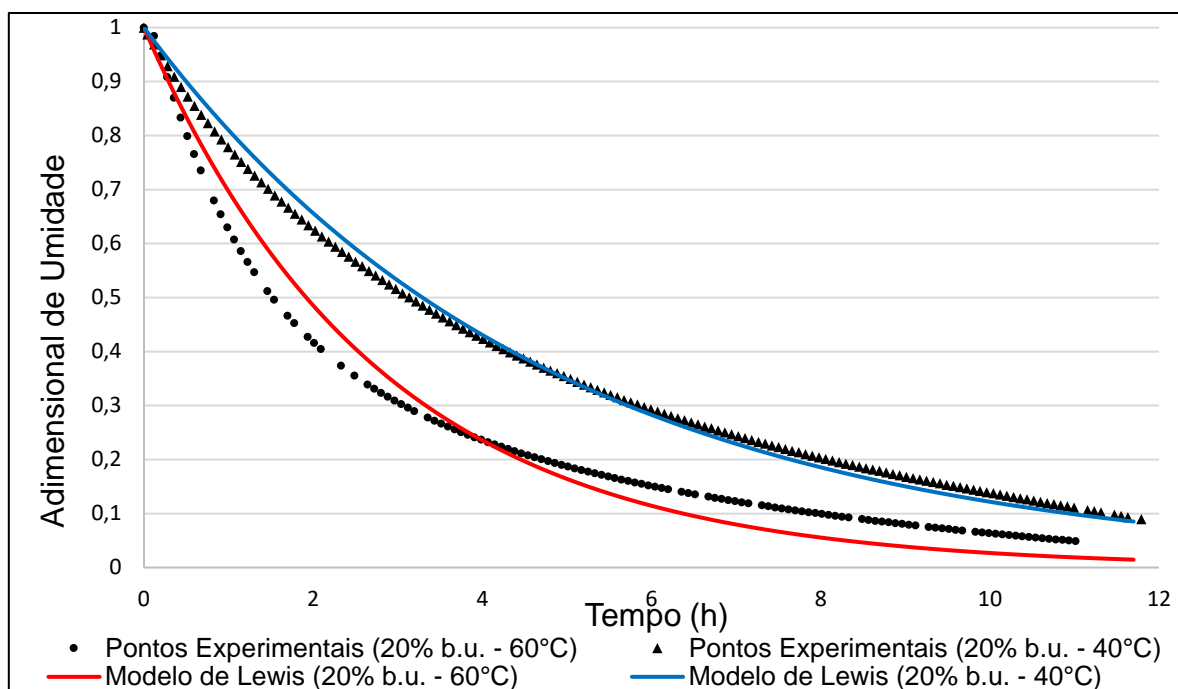
Tabela 4 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Lewis.

Umidade (b.u.)	T (°C)	R ²	χ^2 . (10 ⁵)	Constantes	IC
20%	40	0,9936	35	K = 0,2105	±0,00115
	60	0,9710	163	K = 0,3613	±0,00537
25%	40	0,9991	6	K = 0,2846	±0,00072
	60	0,9809	111	K = 0,4641	±0,00606

Fonte: Autor (2025).

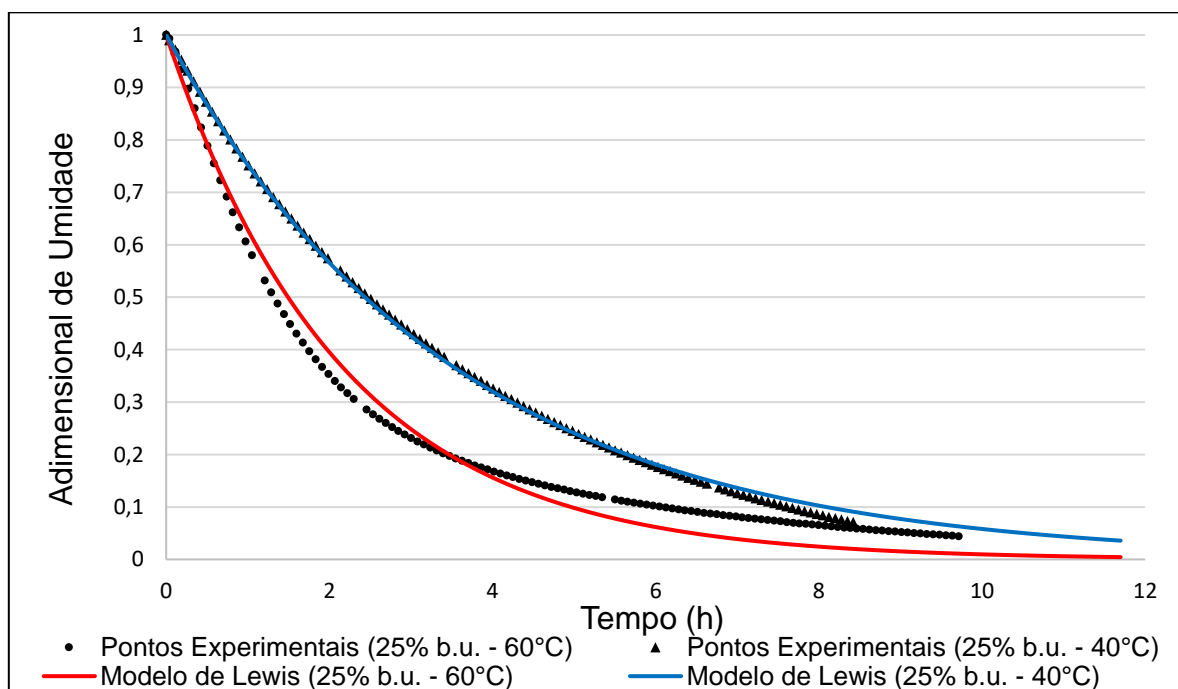
As Figuras 11 e 12 mostram as curvas previstas pela modelagem matemática de Lewis para as condições de temperatura e umidade estudadas.

Figura 11 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Lewis.



Fonte: Autor (2025).

Figura 12 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Lewis.



Fonte: Autor (2025).

A análise do coeficiente de determinação (R^2), apresentado na Tabela 4, indicou que o Modelo de Lewis, mesmo com sua formulação matemática simples e de apenas um parâmetro (K), apresentou desempenho estatístico satisfatório na representação da cinética de secagem, com valores de R^2 variando de 0,9710 a 0,9991. À primeira vista, esses resultados indicam que o modelo foi capaz de descrever adequadamente a variabilidade dos dados experimentais. No entanto, um R^2 elevado não garante, por si só, que o modelo seja o mais adequado.

É fundamental avaliar também a distribuição dos resíduos, verificando se estão aleatoriamente dispersos em torno de zero. Além disso, a adequação física do modelo deve ser considerada: no caso do Modelo de Lewis, é importante que o coeficiente de secagem (K) apresente coerência com o aumento da temperatura, caso contrário, o bom ajuste estatístico pode mascarar uma interpretação física incorreta do fenômeno.

A análise visual das curvas de umidade adimensional em função do tempo, apresentadas nas Figuras 10 e 11, reforça as observações estatísticas. Nota-se que, nas condições de 40°C (curvas azuis), o modelo acompanhou com boa precisão os pontos experimentais, descrevendo de forma coerente a tendência dos dados. Porém, nas curvas referentes à temperatura de 60°C (linhas vermelhas), observa-se um descolamento evidente entre os valores experimentais e os preditos.

Essa diferença de ajuste entre as temperaturas é confirmada pelos valores do parâmetro qui-quadrado (χ^2), que mede o erro residual entre os valores observados e preditos. Para a temperatura de 40°C, os valores de χ^2 foram menores do que para 60°C, evidenciando que o modelo se ajusta melhor a processos conduzidos em menores temperaturas. Apesar disso, os valores de χ^2 permaneceram em ordem de grandeza mínima, o que demonstra que, de modo geral, o Modelo de Lewis apresentou uma modelagem satisfatória.

A análise do parâmetro cinético K indicou a influência da temperatura e da umidade inicial na redução da umidade. Observou-se que, com o aumento da temperatura o valor de K cresceu de forma expressiva, confirmando o comportamento esperado para processos de secagem. Para a umidade inicial de 20% b.u., o parâmetro K passou de 0,2105 a 40°C para 0,3613 a 60°C. Enquanto, para 25% b.u., variou de 0,2846 a 0,4641. Esse comportamento de K reflete de forma matemática a

maior redução de umidade que ocorre no processo de secagem quando maiores temperaturas são utilizadas.

Além disso, ao comparar as duas umidades iniciais em uma mesma temperatura, nota-se que o material com maior teor de umidade (25% b.u.) apresentou valores mais altos de K, o que pode indicar que, nas fases iniciais do processo, a maior disponibilidade de água implica em uma maior taxa de secagem. Esse comportamento pode indicar que, nas fases iniciais do processo, a presença de maior quantidade de umidade resulta em uma remoção mais eficiente da mesma.

Por fim, a confiabilidade do parâmetro K é reforçada pelos resultados dos intervalos de confiança (IC), que apresentaram amplitudes muito pequenas, variando entre 0,00072 e 0,00606. A ausência do valor zero dentro desses intervalos confirma a significância estatística do parâmetro. Dessa forma, o Modelo de Lewis, ainda que simples, demonstrou desempenho consistente.

5.4 AJUSTE PELO MODELO DE HENDERSON & PABIS

Na Tabela 5, ilustrada abaixo, apresenta-se os parâmetros cinéticos e estatísticos ajustados pelo Modelo de Henderson & Pabis.

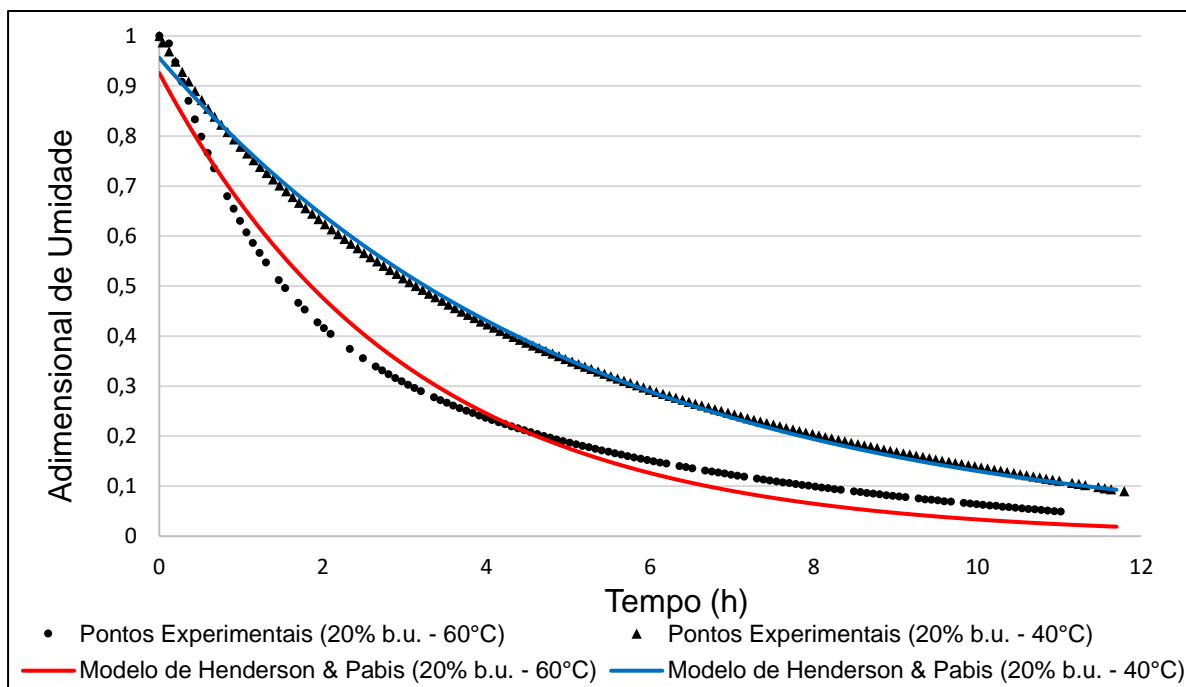
Tabela 5 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos no Modelo de Henderson & Pabis.

Umidade (b.u.)	T (°C)	R ²	χ^2 . (10 ⁵)	Constantes	IC
20%	40	0,9976	13	a = 0,9563	±0,00296
				K = 0,1994	±0,00101
	60	0,9778	126	a = 0,9259	±0,01142
				K = 0,3323	±0,00603
25%	40	0,9992	6	a = 1,0079	±0,00219
				K = 0,2871	±0,00098
	60	0,9823	104	a = 0,9637	±0,01140
				K = 0,4454	±0,00779

Fonte: Autor (2025).

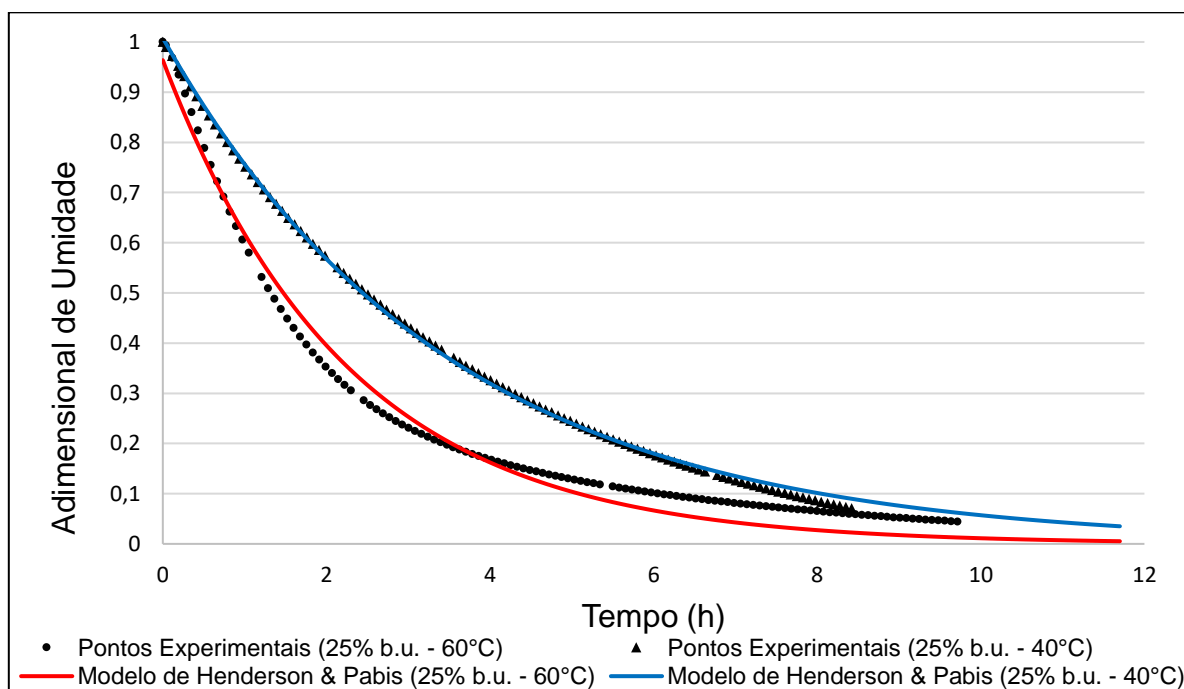
Nas Figuras 13 e 14, apresentam-se as curvas da modelagem matemática do Modelo de Henderson & Pabis para as condições de temperatura e umidade estudadas.

Figura 13 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 20% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Henderson & Pabis.



Fonte: Autor (2025).

Figura 14 - Dados experimentais de cinética de secagem de grãos de café a umidade inicial de 25% b.u. e temperaturas do ar de 40 °C e 60°C (CAPUCCI, 2024). Regressão não-linear pelo Modelo de Henderson & Pabis.



Fonte: Autor (2025).

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5 demonstra que o Modelo de Henderson & Pabis apresentou desempenho satisfatório na representação da cinética de secagem nas condições experimentais estudadas. O coeficiente de determinação (R^2) apresentou valores variando de 0,9778 a 0,9992, evidenciando que o modelo foi capaz de explicar de maneira adequada a variação observada nos dados experimentais.

Além disso, os valores do parâmetro qui-quadrado (χ^2) auxiliam na comprovação que o modelo se adequou aos dados experimentais, apresentam valores muito pequenos. Observa-se que, a 60°C, o χ^2 apresentou valores ligeiramente superiores aos observados a 40°C, indicando uma dispersão um pouco maior dos dados experimentais em torno da curva modelada. Esse resultado sugere que, embora o Modelo de Henderson & Pabis forneça um bom ajuste global, sua capacidade de representar o processo diminui maiores temperaturas do ar, o que é esperado para modelos de estrutura mais simples, assim como visto no Modelo de Lewis.

A análise dos parâmetros cinéticos reforça essas observações. A constante de secagem (K) mostrou clara dependência da temperatura, aumentando significativamente com o aumento dessa condição. O parâmetro adimensional a , por sua vez, apresentou valores muito próximos de 1,0 (entre 0,92 e 1,00), indicando que o modelo inicia a descrição do processo em uma condição coerente com a umidade relativa inicial.

Apesar disso, observa-se nas Figuras 12 e 13 que o Modelo de Henderson & Pabis apresenta desvio na etapa inicial da secagem, subestimando os valores experimentais de umidade. Esse comportamento sugere uma limitação do modelo em representar adequadamente o período inicial do processo, possivelmente associado à rápida remoção de umidade livre nessa etapa.

Por fim, a análise dos intervalos de confiança (IC) evidencia a confiabilidade dos parâmetros ajustados. Os IC apresentaram amplitudes muito pequenas, sem incluir o valor zero, o que confirma a significância estatística dos parâmetros estimados e a precisão do ajuste obtido.

5.5 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS ABORDADOS

De modo comparativo, observa-se que todos os modelos avaliados foram capazes de representar satisfatoriamente a cinética de secagem estudada,

apresentando coeficientes de determinação (R^2) elevados e valores de qui-quadrado (χ^2) reduzidos. No entanto, diferenças significativas de desempenho foram identificadas entre eles. O modelo de Midilli destacou-se como o mais eficiente, apresentando os maiores valores de R^2 (próximos de 1,0) e os menores χ^2 , refletindo sua maior flexibilidade matemática decorrente dos quatro parâmetros ajustáveis, o que lhe confere elevada capacidade de adaptação às variações experimentais.

Em seguida, o modelo de Page também apresentou resultados consistentes e ótimo ajuste aos dados, mostrando-se adequado para representar o processo de secagem com boa precisão e simplicidade. Por outro lado, os modelos de Henderson & Pabis e de Lewis, embora tenham apresentado desempenho estatístico aceitável, demonstraram limitações na descrição de algumas etapas do processo, especialmente sob temperaturas mais elevadas.

Esses resultados estão de acordo com o que é relatado em outros estudos sobre a secagem de grãos e de materiais com comportamento semelhante. Midilli et al. (2002) já haviam observado que o modelo proposto por eles apresentava desempenho superior aos demais modelos. Da mesma forma, Siqueira et al. (2013), ao estudarem a secagem de grãos de café a 40 °C, também destacaram o modelo de Midilli como o que apresentou os maiores valores de R^2 e os menores desvios em relação aos dados experimentais.

Em relação à constante de secagem (K), os valores obtidos neste trabalho ficaram dentro da faixa observada na literatura para grãos de café, conforme relatado por Corrêa et al. (2010). Os autores também observaram que o aumento da temperatura acelera o processo de remoção de umidade, o que justifica o crescimento da constante de secagem com a elevação da temperatura (CORRÊA et al., 2013).

6. CONCLUSÕES

A análise dos resultados mostrou que a modelagem matemática foi uma ferramenta eficiente para representar o comportamento de secagem dos grãos de café. A partir dos ajustes realizados por regressão não linear, foi possível compreender como as condições operacionais influenciaram a cinética do processo. Entre os modelos estudados, o Modelo de Midilli apresentou o melhor desempenho, reunindo bons parâmetros estatísticos e um ajuste visual satisfatório, assim como no estudo de Corrêa et al. (2010), o que reforça sua aplicabilidade para este tipo de material. Somado a isso, o Modelo de Page também se destacou, apresentando resultados consistentes, demonstrando simplicidade e precisão.

Por outro lado, os modelos de Henderson & Pabis e Lewis, apesar de apresentarem bons valores estatísticos, mostraram maior sensibilidade às variações experimentais, especialmente nas etapas iniciais da secagem. Essa sensibilidade se manifesta em desvios mais acentuados entre os valores experimentais e os preditos, particularmente em temperaturas mais elevadas. Embora o coeficiente de determinação (R^2) tenha apresentado valores elevados e próximos de 1, esse parâmetro isolado não assegura que o modelo descreva com precisão o comportamento experimental. Altos valores de R^2 podem ocorrer mesmo em ajustes que não representam fielmente a tendência dos dados ou, ainda, as características físicas do processo.

Dessa forma, é fundamental que a interpretação desse coeficiente seja associada à análise dos demais parâmetros das equações. Considerando tais aspectos, verificou-se que os modelos abordados neste estudo apresentaram ajustes consistentes e válidos para a descrição do processo de secagem dos grãos de café, demonstrando boa concordância com o comportamento observado experimentalmente.

Observou-se também que o coeficiente de secagem (K) foi diretamente influenciado pela temperatura, aumentando consideravelmente quando a secagem passou de 40 °C para 60 °C. A depender do modelo, o valor de K cresceu, aproximadamente, de 67% e 106%, indicando que a elevação da temperatura intensifica significativamente a taxa de remoção de umidade. Nota-se que o modelo de Midilli, por possuir mais parâmetros ajustáveis, apresentou os maiores percentuais de variação, refletindo maior sensibilidade às mudanças nas condições operacionais.

Esse comportamento confirma a relação entre o aumento da energia térmica e a maior velocidade de remoção da umidade, em concordância com os princípios de transferência de calor e massa.

De modo geral, os resultados reforçam que a modelagem matemática é uma importante ferramenta para a otimização da secagem de grãos de café. Sua aplicação permite compreender melhor os mecanismos envolvidos no processo de secagem e, ainda, prever o comportamento do material em diferentes condições. Assim, este trabalho tem papel importante para o avanço dos estudos voltados à secagem do café produzido no noroeste paulista, evidenciando que a modelagem matemática se mostra não apenas como uma ferramenta de análise, mas também como um recurso estratégico no desenvolvimento de tecnologias para o setor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Paulo Sérgio. **Estudo da secagem de café arábica (*Coffea arabica* L.) despulpado em secador roto-aerado**. 111 p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2023.

ARAÚJO, Karoline Thays Andrade; QUEIROZ, Alexandre José de Melo; FIGUEIRÊDO, Rossana Maria Feitosa de; SILVA, Renato Costa da; AMADEU, Lumara Tatiely Santos; PAIVA, Yaroslávia Ferreira. **Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo das polpas de noni e umbu**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 4, e46710413985, 2021.

BRITO, Brenda Tudrei. **Modelagem matemática de curvas típicas de secagem de frutas tropicais**. Monografia submetida ao curso de graduação em Química Tecnológica — Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2022.

CAPUCCI, Maria Clara. Caracterização e Cinética de Secagem de Grãos de Café (*Coffea arabica* L.) Visando a Qualidade do Grão. **Iniciação Científica referente ao Edital ProPq 001/2023**, 2024.

CORRÊA, Paulo Cesar; OLIVEIRA, Gabriel Henrique Horta; BOTELHO, Fernando Mendes; GONELI, André Luis Duarte; CARVALHO, Fábica Martins. **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem**. *Revista Ceres*, Viçosa - MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

EMBRAPA (Brasília, DF). **Sumário Executivo - Café**. In: Estudos socioeconômicos e ambientais: Produção dos Cafés do Brasil da espécie arábica corresponde a 47% da mundial. [S. l.], 4 mar. 2020.

FOLHA DE SÃO PAULO. *O caminho do café: do pé à xícara*. Fotografia – Folha, [s.d.]. Disponível em: <https://fotografia.folha.uol.com.br/galerias/1773686647745243-o-caminho-do-cafe-do-pe-a-xicara>. Acesso em: 19 jul. 2025.

GONELI, André Luís Duarte *et al.* **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. **Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient.** Journal of Agriculture Eng. Research., v.6, p.169-174, 1961.

JACINTHO, Maria Ivone Martins. **Efeito do modo de preparo na composição química de grãos de café cru e torrado.** Relação da composição química com qualidade da bebida. 2002. 102 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2002.

KHIR, Ragab; PAN, Zhongli; SALIM, Adel; HARTSOUGH, Bruce R.; MOHAMED, Sherief. **Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying.** *LWT – Food Science and Technology*, v. 44, n. 5, p. 1126–1132, 2011. DOI: 10.1016/j.lwt.2010.10.003.

LEONARDO, Marcelo Fábio *et al.* **Otimização da Secagem do Café (Coffea arabica L.) utilizando modelagem de sistemas.** Revista Caderno Pedagógico, v. 22, n. 9, p. 01-20, 2025.

LEWIS W. K. **The rate of drying of solid materials.** Indust. Eng. Chem., v.13, p. 423, 1921.

MARTINAZZO, A. P. *et al.* **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

Ministério da Agricultura e Pecuária. **Café no Brasil e Ementário do Café.** 2017.

MEDEIROS, R. de V. V.; RODRIGUES, P. M. A. **A economia cafeeira no Brasil e a importância das inovações para essa cadeia.** A Economia em Revista - AERE, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2017.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAZ, Z. **A new model for single-layer drying.** Drying Technology, (20) 1503-1513, 2002.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of Industrial Drying.** 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

ORIGINLAB CORPORATION. **Origin: graphing and data analysis software.** Versão 6.0. Northampton: OriginLab, 1998.

OLIVEIRA, Josiely Aparecida. **Qualidade de bebida do café secado em diferentes tipos de terreiro**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Centro Universitário do Cerrado Patrocínio – UNICERP, Patrocínio - MG, 2018. ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. A despolpa do café por meio de desmucilaginosos mecânicos sem processo de fermentação e seu efeito na qualidade da bebida de café produzida na região de Apucarana, no estado do Paraná, no Brasil. [S.l.], 1992.

PAGE, G. E. **Drying of shelled corn and other grains**. 1949. Tese (Doutorado em Filosofia) – Purdue University, Lafayette, IN, 1949.

PARK, K. J., **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas, SP – Brasil. 1998.

PEREIRA, Vanessa Vitoriano. **Análise sensorial de genótipos de café Arábica resistentes à ferrugem processados por via úmida**. 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2022.

POLTRONIERI, P.; ROSSI, F. **Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance**. Challenges, v.7, p.1-22, 2016.

PORTELLA, José Antonio; EICHELBERGER, Luiz. **Secagem de Grãos**. Passo Fundo - RS: Embrapa Trigo, 2001. 194 p.

RESENDE, Osvaldo; ARCANJO, Renan Vieira; SIQUEIRA, Valdiney Cambuy; RODRIGUES, Silvestre. **Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá - PR, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.

SIQUEIRA, Valdiney Cambuy; BORÉM, Flávio Meira; ISQUIERDO, Éder Pedroza; ALVES, Guilherme Eurípedes; PINTO, Afonso Celso Ferreira; QUINZANI, Guilherme Antônio. **Modelagem matemática da secagem de café natural beneficiado com alto teor de água**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.7, p.768–775, 2013.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. **Café deixa de ser apenas commodity ao conquistar mercado pelos sabores**. Recursos de Destaques da SNA, 28 de abril

de 2016. Disponível em: <https://sna.agr.br/cafe-deixa-de-ser- apenas-commodity-ao-conquistar-mercado-pelos-sabores/>. Acesso em: 6 set. 2025.

SOUZA, S. M. C. de. **O café (Coffea arabica L.) na Região Sul de Minas Gerais: relação da qualidade com fatores ambientais, estruturais e tecnológicos.** 1996. 171 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 1996.

TOPIK, Steven. **How Brazil Expanded the World Coffee Economy.** *Österreichische Zeitschrift für Geschichtswissenschaften*, v. 30, n. 3, p. 11-41, 2019. DOI: 10.25365/oezg2019-30-3-2.

VARTAN, Julio. **Coffee cultivation and industry in Brazil: a comprehensive review.** *International Journal of Science and Society*, v. 5, n. 3, p. 323-330, 2023.

VITORINO, Raquel Bonacina. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho.** 2009. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS, 2009.

YAZDANI M., SAZANDEHCHI P., AZIZI M. & GHOBADI P. **Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio.** *European Food Research Technology*, 223:577-584, 2006.