

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA PRESERVAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DE SEMENTES DE TRIGO SUBMETIDAS À SECAGEM CONVENCIONAL E INTERMITENTE

MODELING AND ASSESSMENT OF ANTIOXIDANT ACTIVITY PRESERVATION OF WHEAT SEEDS SUBMITTED TO CONVENTIONAL AND INTERMITTENT DRYING

VICTOR HUGO CORREA¹, EMERSON BARRIOS MOGOLLÓN², DEISE MOLINARI³, BRUNA CLARA ROMANSINA⁴, LUCAS SILVA FIGUEIREDO⁵, DAIANE MARQUES DE OLIVEIRA⁶, ANA CAROLINE RAIMUNDINI ARANHA^{7*}

1. Doutorando, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil; 2. Doutorando, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil; 3. Pós-Doutoranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil; 4. Doutoranda, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil; 5. Engenheiro Químico, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo – Paraná, Brasil; 6. Professora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil; 7. Professora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil.

* Avenida Colombo, 5790, Maringá, Paraná, Brasil. CEP: 87020-900. acaranha@uem.br

Recebido: 27/08/2025. Aceito: 08/09/2025

RESUMO

A secagem é uma operação unitária de extrema importância para materiais que podem ser rapidamente degradados devido ao teor de umidade em seu interior. A secagem intermitente é um processo que tem sido estudado, pois apresenta vantagens em comparação à convencional. Assim, este estudo avaliou o efeito da secagem intermitente e convencional em sementes de trigo, em termos de atividade antioxidante, utilizando o método DPPH. Além disso, modelos matemáticos foram ajustados com base em dados experimentais para ambas as operações, convencional e intermitente. Observou-se que a secagem intermitente a 40 °C, nos tempos de 5 e 10 minutos, proporcionou uma menor redução no percentual de atividade antioxidante em comparação aos resultados obtidos com a semente in natura. Em relação aos modelos cinéticos da secagem convencional, verificou-se que o modelo de Hii, Law e Cloke apresentou melhor ajuste, com eficiência média do modelo em relação aos dados experimentais de 0,9976. Para a modelagem da secagem intermitente, observou-se que o melhor ajuste foi obtido considerando o coeficiente global de transferência de massa como uma função do tipo quadrática e em função da temperatura. Esse modelo ajustado possibilitou descrever os dados experimentais com um desvio global máximo em torno de 10%.

PALAVRAS-CHAVE: DPPH, compostos bioativos, cinética, coeficiente global de transferência de calor, coeficiente global de transferência de massa.

ABSTRACT

Drying is an extremely important unit operation for materials that can be rapidly degraded due to the moisture content inside. Intermittent drying is a process that has been studied, as it has advantages compared to the conventional. Therefore, this study evaluated the effect of intermittent and

conventional drying on wheat seeds, in terms of antioxidant activity, using the DPPH method. In addition, mathematical models were adjusted based on experimental data for both conventional and intermittent operations. It was observed that intermittent drying at 40°C in the times of 5 and 10 minutes provided a lower reduction in the percentage of antioxidant activity compared to the results obtained with the seed in natura. In relation to the kinetic models of conventional drying, it was found that the Hii, Law and Cloke model presented better fits, with average model efficiency compared to the experimental data with a value of 0.9976. For the modeling of intermittent drying, it was observed that the best fit was obtained considering the global mass transfer coefficient as a quadratic-type function and as a function of temperature. This adjusted model made it possible to describe the experimental data with a maximum global deviation of around 10%.

KEYWORDS: DPPH, bioactive compounds, kinetics, overall heat transfer coefficient, overall mass transfer coefficient.

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente, uma das indústrias mais influentes é o agronegócio, tendo como principais grãos o arroz, a cevada, o sorgo, o milho e o trigo.¹ A produção de trigo (*Triticum aestivum* L) ocorre de forma sazonal e, para atender à demanda dessa matéria-prima ao longo do ano, é necessário armazenar os grãos.

Para o armazenamento do trigo, o teor de umidade deve variar entre 12,5 – 14,0 % em base seca (b.s.), entretanto, o trigo é colhido com altos teores de umidade, variando de 18,0 – 20,0 % (b.s.), o que torna necessário o processo de secagem.^{2,3}

Os tipos de secagem mais utilizados são o fluxo contínuo e o intermitente, em que a transferência de massa e calor ocorre simultaneamente entre a semente

e o ar. Devido a problemas na qualidade da semente durante a secagem contínua, como quebra, perda do poder germinativo, redução do vigor e fissuração, a técnica de secagem intermitente pode ser utilizada como alternativa.⁴

Durante a secagem intermitente, ocorre a redução da umidade em períodos alternados de contato da semente com o ar aquecido e no período de repouso, em que a semente permanece em contato com o ar em temperatura ambiente.⁴ No processo intermitente podem ser observadas vantagens em relação à secagem convencional, como a redução do consumo de energia e a melhoria na qualidade de produtos sensíveis a altas temperaturas, como hortaliças e frutas, devido ao menor tempo de contato do material com o ar quente, proporcionando maior preservação da atividade antioxidante.⁵

Os compostos antioxidantes estão presentes em muitos alimentos naturais e reagem com radicais livres no organismo, interrompendo reações em cadeia e evitando danos a moléculas essenciais.⁶ Estudos têm demonstrado que a ingestão de alimentos ricos em antioxidantes aumenta a imunidade e está relacionada à redução de doenças como câncer, Alzheimer, Parkinson e problemas cardiovasculares.⁷

A semente de trigo contém diversos compostos antioxidantes, como compostos fenólicos (incluindo ácido gálico, vanílico, ferúlico e p-cumárico), carotenoides, lignanas, esteróis, β -glucanas e fitatos, sendo de grande interesse a extração desses compostos.^{8,9}

Pesquisas têm sido realizadas para otimizar o processo de secagem intermitente, de modo a obter as condições mais satisfatórias para maximizar a preservação da qualidade do material e minimizar o consumo de energia. Nesse sentido, modelos matemáticos são desenvolvidos e aprimorados, sendo aplicados em estudos de otimização, simulação e dimensionamento de equipamentos.¹⁰⁻¹⁶

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram avaliar a influência da temperatura, do tipo de operação e do tempo de secagem no potencial antioxidante das sementes de trigo, a fim de determinar as melhores condições para maximizar a preservação da qualidade da semente. Além disso, modelos matemáticos foram ajustados para a secagem das sementes tanto em operação convencional quanto intermitente, com base em dados experimentais de teor de umidade e temperatura. Os experimentos de secagem convencional e intermitente foram realizados nas temperaturas de 40, 55 e 70 °C, com tempos de repouso de 5, 10 e 15 minutos. O solvente utilizado para a extração dos compostos antioxidantes foi metanol/água 70/30 (v/v), com tempo de extração de 4 horas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Secagem

Para a realização da secagem das sementes de trigo, tanto convencional quanto intermitente, utilizou-se

uma estufa convencional (Nova Ética), nas temperaturas de 40 °C, 55 °C e 70 °C. Os experimentos foram conduzidos em duplicata, com tempos de repouso de 5, 10 e 15 minutos.

Foram separados 100,00 g de trigo em uma bandeja de camada fina, que permaneceu na estufa por 90 minutos, nas temperaturas previamente determinadas, sendo a perda de massa inerente à evaporação quantificada a cada 5 minutos. Após a secagem, as amostras das sementes permaneceram na estufa por 24 horas a 105 °C, para a completa remoção da água presente no trigo e para a quantificação da massa seca.

Ambos os processos de secagem foram realizados com amostras com teores de umidade iniciais variando entre 10 e 28 % (b.s.). Para o ajuste do teor de umidade inicial, as amostras foram umedecidas. Para isso, as sementes foram submersas em água por períodos de 1, 3, 5, 10, 15 e 20 minutos. Após esse tempo, as sementes foram expostas ao ar ambiente por um período de 10 minutos, para a completa absorção da água. Em seguida, o teor de umidade foi determinado em estufa por 24 horas a 105 °C.

Foi construído um gráfico do teor de umidade em base seca em função do tempo de umedecimento (minutos) e, a partir do ajuste de uma equação ao gráfico, determinou-se o tempo de hidratação necessário em função do teor de umidade inicial do material.

2.2 Extração

Para as extrações, utilizou-se como solvente a mistura MeOH:H₂O na proporção 70:30 (v/v), empregando 1,0000 g de amostra moída e 100 mL de solvente, sob agitação por 4 horas a 180 rpm em um agitador (Marconi, modelo MA-420). O extrato foi filtrado em funil analítico com papel de filtro qualitativo e armazenado sob refrigeração para análises posteriores.

2.3 Determinação da ação antioxidante pelo método de sequestro do radical livre DPPH

Para a análise da atividade antioxidante, utilizou-se o método de sequestro do radical livre DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil).¹⁷ Foi preparada uma solução de DPPH em MeOH a 0,1192 mM. Para a análise, foi preparado um controle com a adição de 1,0 mL de MeOH e 2,0 mL da solução de DPPH (A_{controle}) e um branco para cada amostra, utilizando 1,0 mL de extrato e 2,0 mL de solvente (A_{branco}). As amostras foram preparadas com 1,0 mL de extrato e 2,0 mL de DPPH (A_{amostra}).

As absorbâncias foram lidas em um espectrofotômetro (Agilent Technologies, modelo Cary 60 UV-VIS) a 517 nm após 30 minutos de reação. O percentual de atividade antioxidante (%AA) foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$\%AA = \frac{[A_{\text{controle}} - (A_{\text{amostra}} - A_{\text{branco}})]}{A_{\text{controle}}} \cdot 100 \quad (1)$$

2.4 Balanço de massa do processo de secagem

Para a modelagem matemática do processo de secagem, utilizou-se a equação global do balanço de massa, descrita pela Equação 2:¹⁸

$$[\text{Acúmulo}] = [\text{Entrada}] - [\text{Saída}] + [\text{Geração}] - [\text{Consumo}] \quad (2)$$

Para o processo de secagem, o limite do sistema foi definido pela área superficial da semente. A secagem é um processo transiente, no qual existem apenas os termos de acúmulo e saída de água:

$$[\text{Acúmulo}] = -[\text{Saída}] \quad (3)$$

O acúmulo pode ser expresso em termos da variação da massa da semente ao longo do tempo de secagem, e a saída é equivalente à taxa de água removida, a qual pode ser obtida pelo produto da área superficial do material ($A_{s \text{ semente}}$) e o fluxo mássico de água ($N_{\text{água}}$). A partir dessas informações e da Equação 3, obtém-se a Equação 4:

$$\frac{dm_{\text{semente}}}{dt} = -N_{\text{água}} \cdot A_{s \text{ semente}} \quad (4)$$

A massa da semente (m_{semente}) pode ser obtida pelo produto do teor de umidade do material em base seca (Y) e a quantidade de massa seca (m_{ss}). O fluxo mássico depende do coeficiente de transferência de massa (K_s), da umidade e da umidade de equilíbrio (Y_{eq}). Portanto, a Equação 4 pode ser reescrita como:

$$\frac{d(Y \cdot m_{ss})}{dt} = [K_s(Y - Y_{eq})] \cdot A_{s \text{ semente}} \quad (5)$$

Sabe-se que a quantidade de massa seca é constante e que um novo fator denominado coeficiente global de transferência de massa (K) pode ser evidenciado na equação, conforme demonstrado na Equação 6.¹⁹

$$\frac{dY}{dt} = K(Y - Y_{eq}) \quad (6)$$

Em que: $K = K_s \cdot A_{s \text{ semente}} / m_{ss}$.

2.5 Balanço de energia do processo de secagem

Para a modelagem do balanço de energia correspondente ao processo de secagem, considerou-se o princípio da conservação de energia aplicado a um volume de controle descrito por uma semente, conforme a Equação 7:²⁰

$$dE/dt = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{ent}(u_{ent} + V_{ent}^2/2 + gx_{ent}) - \dot{m}_{sai}(u_{sai} + V_{sai}^2/2 + gx_{sai}) \quad (7)$$

E representa a energia do sistema, Q e W as taxas líquidas de transferência de energia por calor e trabalho, respectivamente, m corresponde ao fluxo mássico, enquanto u , V , g e x correspondem à energia interna, velocidade, aceleração da gravidade e altura, respectivamente. Os subscritos *sai* e *ent* representam os

termos de saída e entrada do sistema.

O termo E é representado pela soma das energias interna (U), cinética (KE) e potencial (PE). No processo de secagem da semente, devido às variações de temperatura e ao fato de a semente estar em repouso, a variação da energia interna é muito superior às variações de KE e PE . Além disso, o termo correspondente ao trabalho pode ser subdividido em suas contribuições, e, para o processo em estudo, há apenas trabalho relacionado à pressão do fluido (Equação 8):

$$\dot{W} = (P_{sai} \dot{m}_{sai}) V_{sai} - (P_{ent} \dot{m}_{ent}) V_{ent} \quad (8)$$

Onde P e V são a pressão e o volume específico, respectivamente. Com essas considerações, desconsiderando variações de velocidade e altura, e sabendo que, para este estudo de secagem, o termo de saída de energia do sistema é inerente à taxa de evaporação da água, o balanço de energia resulta em:

$$dU/dt = \dot{Q} - \dot{m}_{ev}(u_{ev} + P_{ev}V) \quad (9)$$

A Equação 9 pode ser reescrita em termos de entalpia:

$$dU/dt = \dot{Q} - \dot{m}_{ev} H_{ev} \quad (10)$$

Neste processo, a taxa líquida de transferência de calor ocorre devido ao processo convectivo, correspondente à transferência de energia entre duas superfícies de diferentes fases, descrito pela Equação 11, segundo a lei de resfriamento de Newton:^{21,22}

$$\dot{Q} = -hA_s(T - T_{ar}) \quad (11)$$

Os termos A_s , h , T_{ar} e T correspondem, respectivamente, à área superficial na qual ocorre a transferência de calor por convecção, ao coeficiente de transferência de calor por convecção, à temperatura do ar e à temperatura da semente, considerando temperatura homogênea em toda a superfície do material.^{21,22}

Como o sistema do volume de controle encontra-se nos estados sólido e líquido, a variação da energia interna pode ser escrita em função da capacidade calorífica a pressão constante (c_p), uma vez que essa propriedade é próxima ao valor da capacidade calorífica a volume constante (c_v) nessas condições:

$$U = m_{\text{semente}} c_p \Delta T \quad (12)$$

Durante a secagem, tanto a massa da semente quanto a temperatura variam ao longo do tempo.^{21,22} Contudo, a massa de sólido seco é constante. Assim, pode-se expressar a massa da semente em função da massa seca, conforme a Equação 13:

$$m_{\text{semente}} = (1 + Y) m_{ss} \quad (13)$$

Com base nessas considerações e assumindo que o valor de c_p das sementes é constante na faixa de temperatura estudada para a validação do modelo, o balanço de energia resulta na Equação 14:

$$\frac{d((1+Y)T)}{dt} = hA_s(T_{ar} - T)/c_p m_{ss} - \dot{m}_{ev} H_{ev}(T)/c_p m_{ss} \quad (14)$$

Onde o valor de h foi determinado com base em dados experimentais, de acordo com a metodologia apresentada no item 2.6.

2.6 Ajuste do coeficiente de transferência de calor convectivo

Para a obtenção do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) utilizado na Equação 14, correspondente ao balanço de energia, foi empregado um pirômetro SCANTEMP ST-600.00, uma bandeja com trigo completamente seco em camada fina e uma estufa.

Na determinação deste parâmetro, utilizaram-se amostras totalmente secas. Por esse motivo, não ocorre variação de massa ao longo do processo e, consequentemente, não há saída de energia devido ao termo da taxa de evaporação de água, resultando na Equação 15:

$$dT/dt = hA_s(T_{ar} - T)/c_p m_{semente} \quad (15)$$

As amostras de sementes de trigo completamente secas, distribuídas em monocamada, foram adicionadas à bandeja, e o recipiente foi levado à estufa nas temperaturas de 40, 70 e 100 °C, em triplicata, até que as sementes atingissem a temperatura do ar. Em seguida, as amostras foram retiradas da estufa e as temperaturas superficiais foram medidas a cada 30 segundos até que o sistema atingisse a temperatura ambiente.

Com base nesses resultados, o modelo descrito na Equação 15 foi resolvido e seus resultados foram comparados aos dados experimentais, de acordo com a função objetivo (Equação 16), que foi minimizada para obtenção do parâmetro h em cada condição experimental:

$$\Phi = \sum (T_{exp} - T_{cal})^2 \quad (16)$$

2.7 Modelos utilizados para a secagem convencional

Tabela 1. Cinética de secagem convencional: modelos matemáticos empíricos utilizados.

Modelo	Equação	Referências
Newton	$MR = \exp(-kt)$ (17)	19
Page	$MR = \exp(-kt^n)$ (18)	23
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ (19)	24
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$ (20)	25
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$ (21)	26
Dois termos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$ (22)	27
Aproximação da difusão	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ (23)	28
Hii, Law e Cloke	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$ (24)	29

Fonte: Autoria própria (2025).

Para a análise da cinética de secagem convencional, foram utilizados modelos matemáticos empíricos, conforme apresentado na Tabela 1^{19,23-29}.

Nos modelos, t é o tempo de secagem, em horas; a , b , c , g e n são os coeficientes de cada modelo; k , k_0 e k_1 são as constantes de secagem, em h^{-1} . A razão de teor de umidade (MR) é obtida a partir do teor de umidade de equilíbrio em base seca e do teor de umidade inicial, de acordo com a Equação 25:

$$MR = \frac{Y - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} \quad (25)$$

Onde Y é o teor de umidade do produto (b.s.), Y_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio (b.s.) e Y_0 é o teor de umidade inicial (b.s.).^{19,23-29} Para a obtenção do teor de umidade de equilíbrio, uma equação foi ajustada por meio da Figura 1.

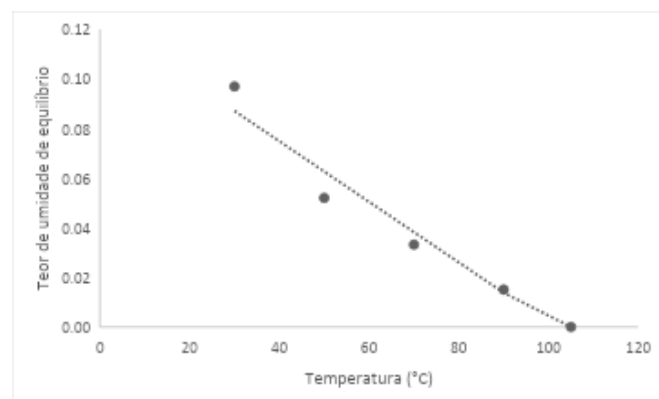


Figura 1. Teor de umidade de equilíbrio vs Temperatura. Fonte: Autoria própria (2025).

2.8 Área superficial onde ocorre a transferência de calor por convecção

Para obter o valor da área superficial na qual ocorre a transferência de calor por convecção, foram utilizadas 100 sementes, sendo 50 delas não secas e as outras 50 completamente secas.

Para realizar os ajustes matemáticos dos balanços de massa e energia, primeiramente foi determinada a área superficial das sementes de trigo. Considerando que as sementes de trigo possuem o formato de um elipsoide, aplicaram-se as Equações 26 e 27.³⁰

$$Vol = \pi x y z / 6 \quad (26)$$

$$A_s = 4\pi \left(\left(\left(\frac{yz}{4} \right)^{1.6075} + \left(\frac{xz}{4} \right)^{1.6075} + \left(\frac{xy}{4} \right)^{1.6075} \right) / 3 \right)^{1/1.6075} \quad (27)$$

2.9 Teor de umidade de equilíbrio

Para determinar o teor de umidade de equilíbrio, foram utilizados 10 cadinhos, nos quais amostras de trigo foram adicionadas em monocamada. A massa de cada cadinho foi medida juntamente com o trigo à temperatura ambiente (26 °C) e as amostras foram colocadas em uma estufa por 5 dias.

Essas amostras permaneceram por 24 horas em contato com o ar a uma determinada temperatura. A

cada dia, a temperatura da estufa foi elevada, sendo os respectivos valores: 30 °C, 50 °C, 70 °C, 90 °C e 105 °C. A massa das amostras foi quantificada diariamente para determinar o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura.

Sabe-se que o teor de umidade de equilíbrio também varia com o teor de umidade do ar. Neste caso, o ajuste foi realizado para um conteúdo absoluto de umidade do ar de 0,008 kg m⁻³. Secagens também foram realizadas em dias com o mesmo teor de umidade absoluta.

2.10 Análise estatística

Foram realizadas análises estatísticas para avaliar os modelos ajustados, sendo calculados os seguintes parâmetros: qui-quadrado reduzido (χ^2), erro quadrático médio (MSE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE) e eficiência do modelo (EF) (Equações 28 a 32).

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y_{exp} - Y_{calc})^2}{N_0 - N_c} \quad (28)$$

$$MSE = \frac{1}{N_0} \sum (Y_{exp} - Y_{calc})^2 \quad (29)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N_0} \sum (Y_{exp} - Y_{calc})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Y_{max} - Y_{min}} \quad (31)$$

$$EF = \frac{\sum (Y_{exp} - \bar{Y}_{exp})^2 - \sum (Y_{calc} - Y_{exp})^2}{\sum (Y_{exp} - \bar{Y}_{exp})^2} \quad (32)$$

N_0 e N_c correspondem ao número de observações e ao número de constantes do modelo em estudo, respectivamente, Y_{exp} é o valor do teor de umidade experimental (b.s.), Y_{max} e Y_{min} são, respectivamente, os teores de umidade máximos e mínimos observados (b.s.).

Para os parâmetros χ^2 , MSE, RMSE e NRMSE, o melhor ajuste é indicado pelo valor mais próximo de zero, já para EF, quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste.³¹

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Perfil de umidade

A partir da secagem realizada nas temperaturas de 40 °C, 55 °C e 70 °C, tanto de forma convencional quanto intermitente, foi possível obter gráficos que representam os perfis de umidade ao longo do tempo para o trigo sem umidificação, conforme mostrado na Figura 2.

Observa-se que os perfis sem umidificação apresentam baixos teores de umidade iniciais, variando entre 10 e 16 % (b.s.). Devido a isso, foi realizada a umidificação para obter as curvas de secagem conforme as sementes chegam da colheita (Figura 1). No entanto, para a análise dos compostos

antioxidantes, utilizou-se o trigo sem umidificação, devido ao interesse em verificar os efeitos térmicos sobre o potencial antioxidante.

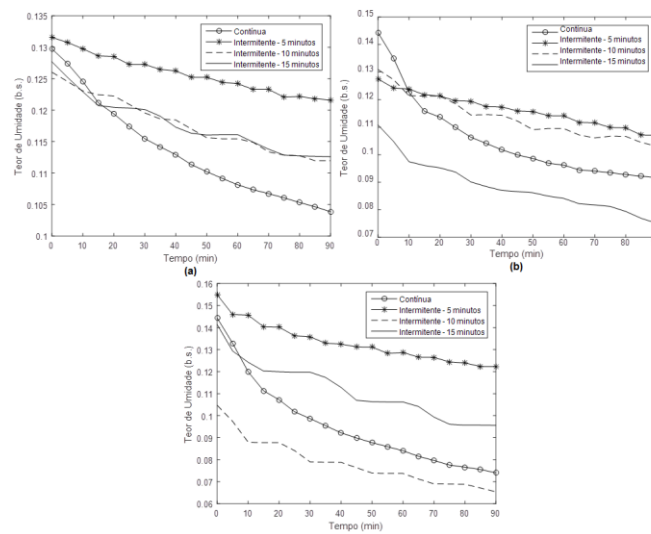


Figura 2. Perfis de umidade do trigo sem umidificação seco nas temperaturas de: (a) 40°C, (b) 55°C e (c) 70°C. **Fonte:** Autoria própria (2025).

O ajuste que melhor se adequou aos dados de teor de umidade foi a lei de potência, com R^2 igual a 0,9640. Para se obter o teor de umidade inicial desejado (aproximadamente 20 % (b.s.)), o tempo necessário de umidificação foi de 3 minutos, considerando o teor médio de umidade das sementes na colheita. Após a determinação do tempo de umidificação, realizou-se a secagem contínua e intermitente pelos períodos de 5, 10 e 15 minutos. Os gráficos do perfil de umidade das sementes de trigo submetidas às três temperaturas estão apresentados na Figura 3.

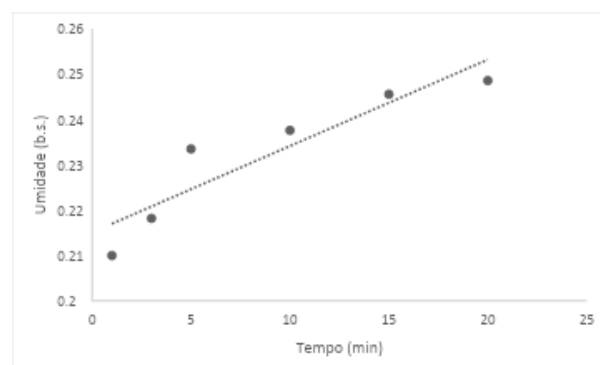


Figura 3. Dados de teor de umidade dos grãos de trigo. **Fonte:** Autoria própria (2025).

Observa-se, a partir dos gráficos da Figura 3, que temperaturas de secagem mais altas favorecem a obtenção de menores teores finais de umidade (b.s.), em comparação com a secagem realizada em temperaturas mais baixas e com o mesmo período de temperagem.

Também é possível observar a partir desses resultados que variações nas temperaturas do ar de secagem impactam a cinética de secagem das sementes.

As curvas de secagem apresentam maiores inclinações quando as amostras estão em contato contínuo com o ar quente, proporcionando maiores taxas de secagem.

Durante o tempo de temperagem, ocorre uma redução na quantidade de água evaporada, observada pelas menores inclinações das curvas de secagem. Gradientes de umidade ocorrem durante a secagem, estando esses gradientes relacionados à uniformidade na distribuição de água dentro do material. Portanto, o tempo de temperagem promove a difusão da umidade do centro para a superfície da amostra, resultando em sementes mais uniformes.³²

Além do nivelamento da umidade, a secagem intermitente pode proporcionar redução no consumo de energia do processo em comparação à secagem convencional, uma vez que o tempo em que as amostras permanecem em contato com o ar quente é reduzido, e o processo de secagem de produtos agrícolas é predominantemente controlado pelos efeitos difusivos da massa de água no interior do material.

3.2 Análise da atividade antioxidante pelo método de captura do radical livre DPPH

A análise da atividade antioxidante foi realizada com o trigo sem umidificação, devido ao interesse em verificar os efeitos térmicos sobre esse potencial. Os resultados do percentual de inibição do radical DPPH para as sementes de trigo submetidas ao processo de secagem, bem como para o trigo in natura, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados de porcentagem de atividade antioxidante pelo método DPPH para os grãos de trigo *in natura*, submetidos a secagem convencional e intermitente.

Amostras (Extratos)	DPPH (Média)	% Redução com a Secagem
In natura	12,67±0,76 ^a	-
Convencional 40°C	11,05±0,23 ^{a,b}	12,79
Intermitente 40°C 5 minutos	11,75±0,60 ^a	7,26
Intermitente 40°C 10 minutos	11,53±0,34 ^a	9,00
Intermitente 40°C 15 minutos	8,91±0,44 ^{b,c}	29,20
Convencional 55°C	3,74±0,18 ^f	70,48
Intermitente 55°C 5 minutos	7,07±0,53 ^{c,d}	44,20
Intermitente 55°C 10 minutos	6,25±0,15 ^{d,e}	50,67
Intermitente 55°C 15 minutos	3,70±0,26 ^f	70,80
Convencional 70°C	4,43±0,71 ^{e,f}	65,04
Intermitente 70°C 5 minutos	5,46±0,14 ^{d,e,f}	56,91
Intermitente 70°C 10 minutos	4,10±0,64 ^{e,f}	67,64
Intermitente 70°C 15 minutos	4,70±0,41 ^{e,f}	62,90

*Resultados expressos como médias ± desvio padrão. Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05). Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se na Tabela 2 que a secagem intermitente por 5 e 10 minutos, à temperatura de 40 °C, apresentou as melhores respostas, não havendo diferenças significativas entre suas médias (p < 0,05). Esse

resultado demonstra que o uso da secagem intermitente, em temperaturas mais baixas, constitui uma alternativa para a preservação dos compostos antioxidantes nas sementes de trigo.

Houve uma diminuição nas atividades antioxidantes para secagens realizadas nas temperaturas de 55 e 70 °C, o que pode ser atribuído à decomposição dos compostos antioxidantes devido aos efeitos térmicos.³³⁻³⁶

Também foi observado que, em todas as condições de secagem, houve redução nas atividades antioxidantes quando comparadas ao extrato preparado com a semente in natura. As menores reduções foram de 7,26 % e 9,00 % para a secagem intermitente a 40 °C, com período intermitente de 5 e 10 minutos, respectivamente, e a maior redução foi de 70,80 % para a secagem intermitente à temperatura de 55 °C e tempo de temperagem de 15 minutos. Esses resultados são esperados, devido à exposição dos grãos a tempos e temperaturas mais elevados durante o processo de secagem.³⁷⁻³⁸

3.3 Cinética de secagem em operação contínua

Considerando as temperaturas de secagem utilizadas e as condições de operação com umidificação, foram realizados os ajustes matemáticos da cinética de secagem do trigo. As Tabela 3 a 5 apresentam os resultados dos parâmetros cinéticos e a Tabela 6 as análises estatísticas para a secagem convencional nas temperaturas de 40, 55 e 70 °C.

Tabela 3. Ajuste dos modelos cinéticos de secagem a 40°C.

Modelo	k	n	a	c	b	k ₀	k ₁	5
Page	0,0 288	0,9 863	-	-	-	-	-	-
Newton	0,0 273	-	-	-	-	-	-	-
Henderson e Pabis	0,0 279	-	1,0 201	-	-	-	-	-
Logarítmico	0,0 338	-	0,9 783	0,0 687	-	-	-	-
Dois termos	-	-	0,0 414	-	1,0 045	0,0 050	0,0 328	-
Aprox. da difusão	1,7 929	-	- 0,0 374	-	0,0 159	-	-	-
Hii, Law e Clock	0,0 007	1,6 821	0,4 048	0,5 909	-	-	-	0,0 071
Midilli	0,0 213	1,1 209	1,0 233	-	0,0 010	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir das análises estatísticas para as temperaturas de secagem de 40 °C, 55 °C e 70 °C, observa-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o modelo de Hii, Law e Cloke. Isso é esperado, pois esse modelo possui um maior número de parâmetros. O modelo de Newton foi o menos ajustado, apresentando apenas um único parâmetro.

Tabela 4: Ajuste dos modelos cinéticos de secagem a 55°C.

Modelo	k	n	a	c	b	k ₀	k ₁	g
Page	0,0 157	0,9 949	-	-	-	-	-	-
Newton	0,0 154	-	-	-	-	-	-	-
Henderson e Pabis	0,0 157	-	1,0 148	-	-	-	-	-
Logarítmico	0,0 210	-	0,9 023	0,1 373	-	-	-	-
Dois termos	-	-	1,0 333	-	0,0 009	0,0 172	0,0 486	-
Aprox. da difusão	0,0 160	-	0,9 999	-	4,8 163	-	-	-
Hii, Law e Clock	0,0 973	0,6 351	1,4 596	- 0,4 622	-	-	-	0,4 296
Midilli	0,1 140	0,0 000	1,0 000	-	0,0 078	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 5. Ajuste dos modelos cinéticos de secagem a 70°C.

Modelo	k	n	a	c	b	k ₀	k ₁	g
Page	0,0 989	0,6 573	-	-	-	-	-	-
Newton	0,0 284	-	-	-	-	-	-	-
Henderson e Pabis	0,0 244	-	0,8 893	-	-	-	-	-
Logarítmico	0,0 552	-	0,8 188	0,2 000	-	-	-	-
Dois termos	-	-	0,7 395	-	0,2 869	0,0 639	0,0 045	-
Aprox. da difusão	0,0 588	-	0,7 406	-	0,0 578	-	-	-
Hii, Law e Clock	0,0 331	1,3 256	0,6 321	0,3 771	-	-	-	0,0 019
Midilli	0,4 703	0,0 000	1,0 000	-	0,0 059	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025).

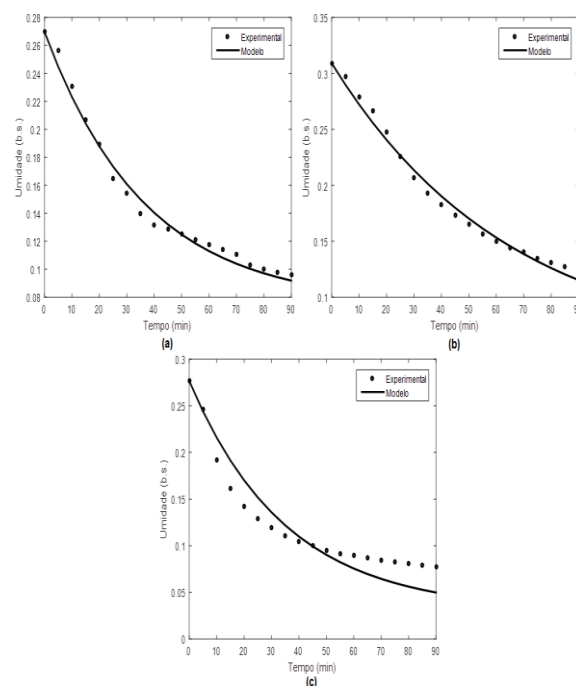
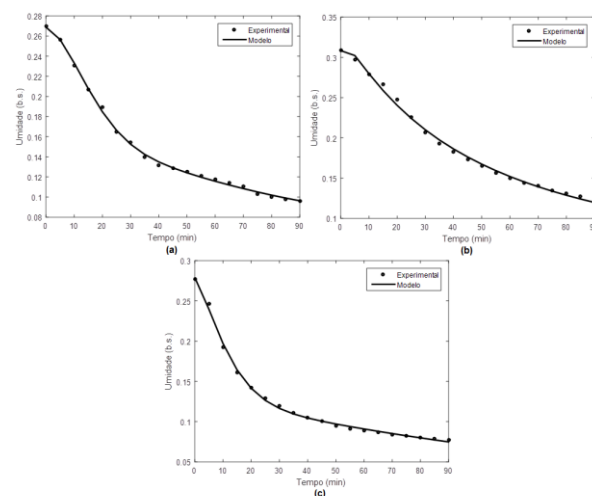
Tabela 6. Análises estatísticas do processo de secagem.

Modelo	X ²	MSE	RMSE	NRMSE	EF
Page	6,04E-04	5,41E-05	7,17E-03	0,0383	0,9829
Newton	1,50E-04	1,42E-04	1,03E-02	0,0539	0,9549
Henderson e Pabis	1,27E-04	1,14E-04	9,41E-03	0,0495	0,9639
Logarítmico	2,42E-05	2,04E-05	4,52E-03	0,0244	0,9935
Dois termos	2,25E-05	1,77E-05	4,20E-03	0,0228	0,9943
Aprox. da difusão	3,00E-05	2,52E-05	4,99E-03	0,0271	0,9919
Hii, Law e Clock	1,06E-05	7,80E-06	2,71E-03	0,0146	0,9976
Midilli	3,03E-04	2,39E-04	1,36E-02	0,0715	0,9264

Fonte: Autoria própria (2025).

Complementarmente, foram construídos gráficos para demonstrar os dados experimentais e o comportamento dos modelos empíricos, tanto para o

modelo que apresentou melhor ajuste quanto para o que apresentou pior ajuste (Figuras 4 e 5, respectivamente).

**Figura 4.** Curva da cinética de secagem convencional: (a) 40°C, (b) 55°C e (c) 70°C – Newton. Fonte: Autoria própria (2025).**Figura 5.** Curva da cinética de secagem convencional: (a) 40°C, (b) 55°C e (c) 70°C – Hii, Law e Clock. Fonte: Autoria própria (2025).

3.4 Modelagem matemática da secagem intermitente

Primeiramente, obteve-se o perfil de temperatura ao longo do tempo para as temperaturas iniciais de 40, 70 e 100 °C, apresentado na Figura 6. A Figura 7 demonstra que o modelo representou os dados experimentais com um desvio global máximo de aproximadamente 5,0 %.

Em seguida, os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção são apresentados na Tabela 7, cujo valor médio resultou em 8,64

$\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$. Esse valor obtido é considerado típico dentro da faixa de valores do coeficiente de transferência de calor por convecção natural, que varia entre 2 e $25 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$.³⁹

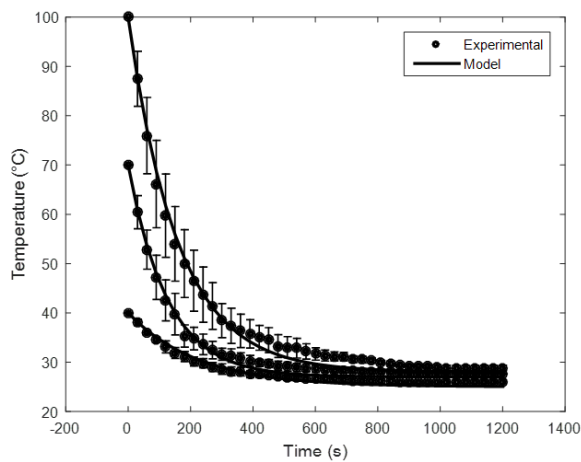


Figura 6. Perfil das temperaturas de 40°C, 70°C e 100°C em função do tempo. **Fonte:** Autoria própria (2025).

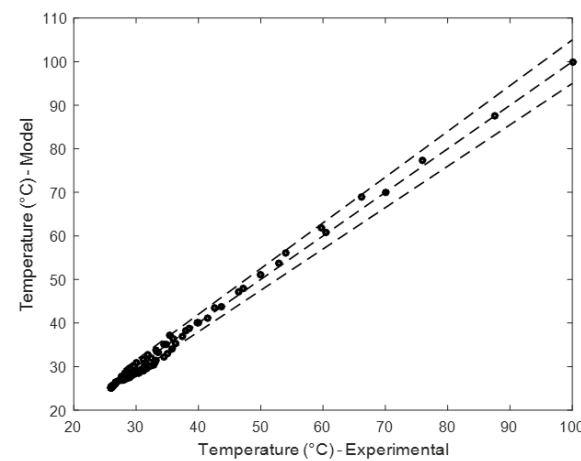


Figura 7. Desvio global do modelo. **Fonte:** Autoria própria (2025).

Tabela 7. Coeficiente de transferência de calor por convecção e análise estatística.

Temperatura inicial (°C)	h (W/m² °C)	X²	MSE	RMSE	NRMSE	EF
40	6,16	4,32E-01	4,21E-01	6,49E-01	4,63E-02	9,64E-01
70	11,03	9,90E-01	9,65E-01	9,83E-01	2,32E-02	9,89E-01
100	8,73	2,24E+00	2,19E+00	1,48E+00	2,08E-02	9,92E-01

Fonte: Autoria própria (2025).

Após a obtenção de h , as equações de balanço de massa e energia foram resolvidas, respectivamente, simultaneamente com o ajuste das equações para o coeficiente global de transferência de massa, K . Três modelos foram analisados: linear, quadrático e exponencial. Estes foram ajustados de acordo com as Equações 33 a 35, respectivamente, e as Tabelas 8 a 10 apresentam as análises estatísticas dos modelos em relação aos pontos experimentais.

$$K(T) = -4,94 * 10^{-4} + 2,70 * 10^{-6} * T$$

(33)

$$K(T) = -3,484 * 10^{-3} + 1,87 * 10^{-4} * T - 2,01 * 10^{-6} * T^2$$

(34)

$$K(T) = 1,00 * 10^{-4} * e^{4,07 * 10^{-2} * T}$$

(35)

Tabela 8. Análises estatísticas das secagens intermitentes para o modelo linear.

Temp. e tempo de intermitência	X²	MSE	RMSE	EF
40°C e 5 min	1,17E-04	9,84E-05	9,92E-03	7,68E-01
40°C e 10 min	7,52E-05	6,33E-05	7,96E-03	9,45E-01
40°C e 15 min	4,09E-05	3,45E-05	5,87E-03	9,70E-01
55°C e 5 min	2,32E-04	1,96E-04	1,40E-02	8,97E-01
55°C e 10 min	1,42E-04	1,12E-04	1,06E-02	9,43E-01
55°C e 15 min	4,35E-04	3,43E-04	1,85E-02	8,25E-01
70°C e 5 min	4,17E-05	3,51E-05	5,93E-03	9,83E-01
70°C e 10 min	2,22E-04	1,87E-04	1,37E-02	8,75E-01
70°C e 15 min	7,23E-04	6,09E-04	2,47E-02	5,93E-01

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 9. Análises estatísticas das secagens intermitentes para o modelo quadrático.

Temp. e tempo de intermitência	X²	MSE	RMSE	EF
40°C e 5 min	8,27E-05	6,96E-05	8,34E-03	8,36E-01
40°C e 10 min	6,67E-05	5,61E-05	7,49E-03	9,51E-01
40°C e 15 min	1,00E-04	8,44E-05	9,19E-03	9,28E-01
55°C e 5 min	5,48E-04	4,62E-04	2,15E-02	7,57E-01
55°C e 10 min	6,62E-05	5,23E-05	7,23E-03	9,73E-01
55°C e 15 min	2,40E-04	1,90E-04	1,38E-02	9,03E-01
70°C e 5 min	7,73E-05	6,51E-05	8,07E-03	9,69E-01
70°C e 10 min	7,10E-05	5,98E-05	7,73E-03	9,60E-01
70°C e 15 min	1,69E-04	1,42E-04	1,19E-02	9,05E-01

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 10. Análises estatísticas das secagens intermitentes para o modelo exponencial.

Temp. e tempo de intermitência	X²	MSE	RMSE	EF
40°C e 5 min	2,05E-04	1,73E-04	1,32E-02	5,93E-01
40°C e 10 min	1,40E-04	1,18E-04	1,08E-02	8,97E-01
40°C e 15 min	6,43E-05	5,42E-05	7,36E-03	9,54E-01
55°C e 5 min	1,88E-04	1,58E-04	1,26E-02	9,17E-01
55°C e 10 min	1,81E-04	1,43E-04	1,20E-02	9,27E-01
55°C e 15 min	5,16E-04	4,07E-04	2,02E-02	7,93E-01
70°C e 5 min	3,05E-05	2,57E-05	5,07E-03	9,88E-01
70°C e 10 min	2,12E-04	1,79E-04	1,34E-02	8,80E-01
70°C e 15 min	7,49E-04	6,31E-04	2,51E-02	5,79E-01

Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com as tabelas ajustadas, verificou-se que o modelo que melhor se adequou aos dados experimentais foi o de K como função quadrática, pois apresentou melhores valores em relação à análise estatística. Além disso, constatou-se que o modelo quadrático para o coeficiente global de transferência de massa representou os pontos experimentais com um

desvio global máximo de aproximadamente 10,0 % (Figuras 8 a 10). Esses resultados indicam que os modelos podem ser aplicados para estudos de otimização, simulação de processos e dimensionamento de equipamentos.

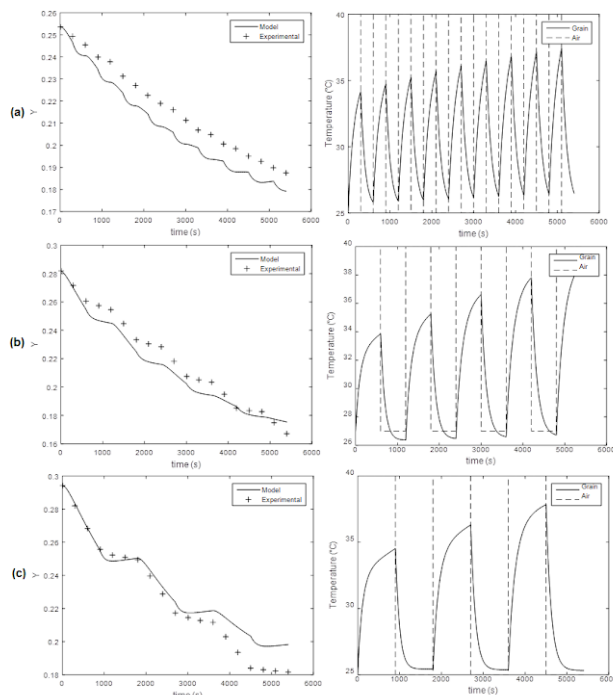


Figura 8. Modelo quadrático: Perfil de umidade e temperatura em relação ao tempo para secagem de 40°C, respectivamente: (a) com intermitência de 5 minutos, (b) com intermitência de 10 minutos e (c) com intermitência de 15 minutos. **Fonte:** Autoria própria (2025).

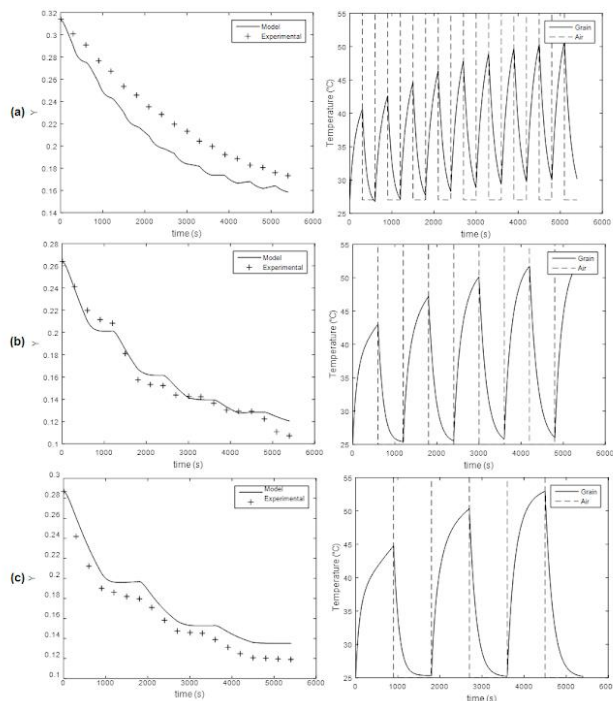


Figura 9. Modelo quadrático: Perfil de umidade e temperatura em relação ao tempo para secagem de 55°C, respectivamente: (a) com intermitência de 5 minutos, (b) com intermitência de 10 minutos e (c) com intermitência de 15 minutos. **Fonte:** Autoria própria (2025).

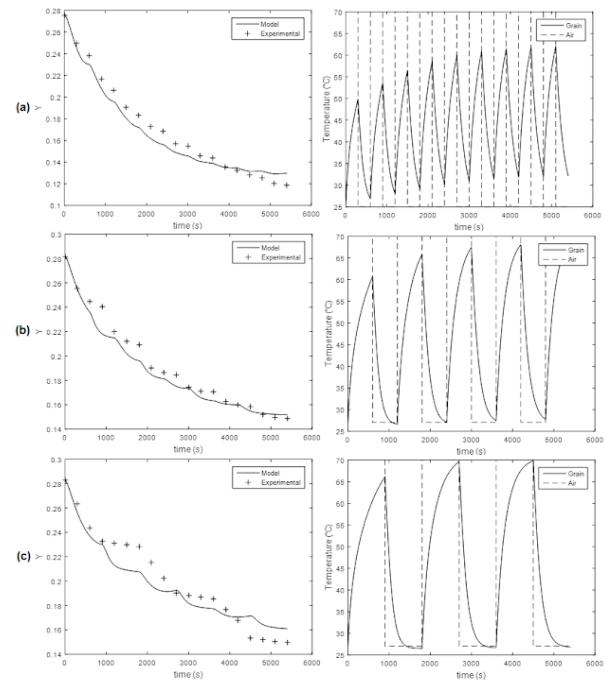


Figura 10. Modelo quadrático: Perfil de umidade e temperatura em relação ao tempo para secagem de 70°C, respectivamente: (a) com intermitência de 5 minutos, (b) com intermitência de 10 minutos e (c) com intermitência de 15 minutos. **Fonte:** Autoria própria (2025).

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que as sementes de trigo submetidas à secagem intermitente, especialmente em baixas temperaturas, apresentaram maior preservação da atividade antioxidante quando comparadas à secagem convencional. Constatou-se que variações elevadas de temperatura têm interferência negativa sobre os compostos bioativos, conforme analisado nos processos de secagem intermitente e convencional nas temperaturas de 55 e 70 °C.

Quanto à modelagem matemática do processo de secagem convencional, verificou-se que o modelo de Hii, Law e Cloke apresentou o melhor ajuste, com eficiência média em torno de 0,9976. Já para a modelagem do processo intermitente, o coeficiente médio de transferência de calor convectivo obtido foi de 8,64 Wm⁻²°C⁻², e o melhor coeficiente global de transferência de massa ajustado foi representado por uma equação quadrática em função da temperatura, na qual os dados experimentais foram descritos com um desvio global máximo em torno de 10,0%. Esses resultados indicam que esses modelos podem ser aplicados em estudos de simulação de processos e no projeto de equipamentos.

5. AGRADECIMENTOS ou FINANCIAMENTO

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio financeiro da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Statista. Worldwide production of grain in 2018/19, by type. Online (2020). [acesso em 15 ago. 2022]. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type>
- [2] Absollahpour S, Kosari-Moghaddam A, Bannayan M. Prediction of wheat moisture content at harvest time through ANN and SVR modeling techniques. *Inf. Process. Agric.* 2020; 7: 500–510.
- [3] Karunakaran C, Muir WE, Jayas DS, White NDG, Abramson D. Safe storage of high moisture wheat. *J. Stored Prod. Res.* 2001; 37: 303–312.
- [4] Do Carmo JEF, Lima AGBD, Silva CJE. Continuous and intermittent drying (tempering) of oblate spheroidal bodies: modeling and simulation. *Int. J. Food Eng.* 2012.
- [5] Szadzińska J, Mierzwa D, Pawłowski A, Musielak G, Pashminehazar R, Kharaghani A. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Dry. Technol.* 2020; 38: 93–107.
- [6] Oroian M, Escriche I. Antioxidants: characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Res. Int.* 2015; 74: 10–36.
- [7] Seyidoglu N, Aydin C, eds. *The Health Benefits of Foods – Current Knowledge and Further Development*. Intechopen 2020.
- [8] Zhou K, Yu L. Effects of extraction solvent on wheat bran antioxidant activity estimation. *LWT* 2004; 37: 717–721.
- [9] Zilic S. Phenolic compounds of wheat: their content, antioxidant capacity and bioaccessibility. *MOJ Food Process. Technol.* 2016; 2: 85–89.
- [10] Defendi RO, Nicolin DJ, Paraíso PR, Jorge LMDM. Assessment of the initial moisture content on soybean drying kinetics and transport properties. *Dry. Technol.* 2016; 34: 360–371.
- [11] Franco CMR, Lima AGBD, Farias VSO, Silva WPD. Modeling and experimentation of continuous and intermittent drying of rough rice grains. *Heat Mass Transfer* 2020; 56: 1003–1014.
- [12] Golmohammadi M, Assar M, Rajabi-Hamaneh M, Hashemi SJ. Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: modeling and experimental study. *Food Bioprod. Process.* 2015; 94: 275–283.
- [13] Lima AGBD, Nebra SA. Theoretical study of intermittent drying (tempering) in prolate spheroidal bodies. *Dry. Technol.* 2001; 19: 1569–1589.
- [14] Park HW, Yoon WB. Prediction of the intermittent drying behavior of soybeans (*Glycine max* (L.)) using novel multilayered mass transfer simulation with image analysis. *Dry. Technol.* 2019; 37: 1228–1238.
- [15] Saleh RM, Emiliozzi A, Kulig B, Hendel O, Sturm B. The effect of intermittent drying on drying kinetics and quality change dynamics of organic carrot (*Daucus carota* v. *Laguna*). In: *Proceedings of Eurodrying*. 2019.
- [16] Shei HJ, Chen YL. Computer simulation on intermittent drying of rough rice. *Dry. Technol.* 2002; 20: 615–636.
- [17] Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT* 1995; 28: 25–30.
- [18] Himmelblau DM, Riggs JB, eds. *Engenharia química: princípios e cálculos*, 8ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2017.
- [19] Lewis WK. The rate of drying of solid materials. *Ind. Eng. Chem.* 1921; 13: 427–432.
- [20] Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bayler MB, eds. *Princípios de termodinâmica para engenharia*, 8ª ed. Rio de Janeiro, 2018.
- [21] Çengel YA, Ghajar AJ, eds. *Transferência de calor e massa*, 4ª ed. AMGH, 2012.
- [22] McCabe WL, Smith JC, Harriott P, eds. *Operaciones unitarias en ingeniería química*, 7ª ed. McGraw-Hill International, 2007.
- [23] Page G. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer (MSc thesis). Dept. Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 1949.
- [24] Henderson SM, Pabis S. Grain drying theory II: temperature effects on drying coefficients. *J. Agric. Eng. Res.* 1961; 6: 169–174.
- [25] Yaldız O, Ertekin C, Uzun HI. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 2001; 26: 457–465.
- [26] Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single-layer drying. *Dry. Technol.* 2002; 20: 1503–1513.
- [27] Colson KH, Young JH. Two-component thin-layer drying model for unshelled peanuts. *Trans. ASAE* 1990; 33.
- [28] Sobukola OP, Dairo OU, Odunewu AV. Convective hot air drying of blanched yam slices. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2007; 43: 1233–1238.
- [29] Hii CI, Law CL, Cloke M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *J. Food Eng.* 2009; 90: 191–198.
- [30] Vcalc. Ellipsoid. Online (2020). [acesso em 24 nov. 2021]. Disponível em: <https://www.vcalc.com/wiki/vCalc/Ellipsoid+-+Volume>.
- [31] Meisami-Asl E, Rafiee S, Keyhani A, Tabatabaeeefar A. Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab). *Plant Omics* 2010; 3: 103–108.
- [32] Kumar C, Karim MA, Joardder MUH. Intermittent drying of food products: a critical review. *J. Food Eng.* 2014; 121: 48–57.
- [33] Nagel A, Neidhart S, Née Wulfkühler SK, Elstner P, Anders T, Korhummel S, Sulzer T, Kienzle S, Winkler C, Qadri S, Rentschler C, Pholpipattanapong N, Wuthisomboon K, Endress HU, Srumsiri P, Carle R. Applicability of fruit blanching and intermittent microwave-convective belt drying to industrial peel waste of different mango cultivars for the recovery of functional coproducts. *Ind. Crops Prod.* 2017; 109: 923–935.
- [34] Serpen A, Gokmen V, Fogliano V. Solvent effects on total antioxidant capacity of foods measured by direct Quencher procedure. *J. Food Compos. Anal.* 2012; 26: 52–57.
- [35] Vaher M, Matso K, Levandi T, Helmja K, Kaljurand M. Phenolic compounds and antioxidant activity of the bran, flour and whole grain of different wheat varieties. *Procedia Chem.* 2010; 2: 76–82.
- [36] Yu L, Haley S, Perret J, Harris M, Wilson J, Qian M. Free radical scavenging properties of wheat extracts. *J. Agric. Food Chem.* 2002; 50: 1619–1624.
- [37] Keser D, Guclu G, Kelebek H, Keshin M, Soysal Y, Sekerli YE, Arslan A, Selli S. Characterization of aroma and phenolic composition of carrot powders obtained from intermittent microwave drying using GC-MS and LC-MS/MS. *Food Bioprod. Process.* 2020; 119: 350–359.

- [38] Li L, Zhang M, Chitrakar B, Jiang H. Effect of combined drying method on phytochemical components, antioxidant capacity and hygroscopicity of Huyou (*Citrus changshanensis*) fruit. LWT 2020; 123.
- [39] Bergman TL, Lavine AS, eds. Incropera Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 8ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2019.