

# MODELAGEM MATEMÁTICA E ANÁLISE DE CALOR DE UMA GARRAFA DE CERVEJA EXPOSTA AO AMBIENTE



<https://doi.org/10.22533/at.ed.135162517037>

*Data de aceite: 02/09/2025*

### **Gustavo De Souza Matias**

Professor, Departamento de Engenharia Industrial, Universidade Estadual do Paraná, Paranaguá – Paraná, Brasil

### **Ana Caroline Raimundini Aranha**

Professora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Emerson Barrios Mogollón**

Doutorando, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Deise Molinari**

Pós-Doutoranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Valderice Herth Junkes**

Professora, Departamento de Engenharia Industrial, Universidade Estadual do Paraná, Paranaguá – Paraná, Brasil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa – Paraná, Brasil

### **Luiz Mario De Matos Jorge**

Professor, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Tânia Maria Coelho**

Professora, Universidade Estadual do Paraná, Campo Mourão – Paraná, Brasil

**RESUMO:** Considerando a importância econômica da cerveja, este estudo aborda a modelagem matemática da transferência de calor e massa na superfície de uma garrafa de cerveja resfriada exposta à temperatura ambiente, em uma situação semelhante à de um Happy Hour. O objetivo do estudo é avaliar os efeitos da convecção e da condensação de água na superfície da garrafa. Propõe-se um sistema de equações diferenciais relacionado ao balanço transiente de massa e energia. Os coeficientes de transferência de calor por convecção e por condensação de água são determinados experimentalmente, sendo posteriormente ajustadas correlações para esses coeficientes. Por fim, propõe-se um modelo para a solução de sistemas de equações diferenciais. Foi utilizado o software R CRAN, no qual o sistema de equações é integrado numericamente e tem seus parâmetros ajustados. Assim, é possível traçar os perfis dos coeficientes de calor e massa em função da temperatura e

obter um modelo capaz de simular as variações de temperatura e massa. O modelo representa bem o fenômeno, com resíduos adequados e bom ajuste aos dados experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transferência de Massa; Transferência de Calor; Engenharia Térmica; Convecção Natural; Condensação.

## MATHEMATICAL MODELING AND HEAT ANALYSIS OF A BEER BOTTLE EXPOSED TO THE ENVIRONMENT

**ABSTRACT:** Knowing the economic importance of beer, this study addresses the mathematical modeling of heat and mass transfer on the surface of a chilled beer bottle exposed to room temperature, similar to what occurs during a Happy Hour. This study aims to evaluate the effects of convection and condensation of water on the surface of the bottle. A system of differential equations regarding the transient mass and energy balance is proposed. The heat transfer coefficients for convection and water condensation are determined experimentally, and then correlations are intended for the coefficients. Finally, a model for the solution of differential equation systems is proposed. The R CRAN software was used, in which the system of equations is numerically integrated and have their parameters adjusted. Thus, it is possible to profile the heat and mass coefficients concerning temperature and obtain a model to simulate temperature and mass variations. The model represents well the phenomenon, with adequate residuals and a good fit to the experimental data.

**KEYWORDS:** Mass Transfer; Heat Transfer; Thermal Engineering; Natural Convection; Condensation.

## INTRODUÇÃO

A cerveja é uma bebida alcoólica popular no contexto global por razões que transcendem os aspectos sociais e econômicos.<sup>1,2</sup> Os três maiores produtores de cerveja do mundo são China, Estados Unidos e Brasil, o que evidencia a importância global dessa indústria.<sup>3</sup> A indústria cervejeira é responsável por uma vasta rede que envolve desde pesquisa, cultivo, processamento e comercialização de insumos e matérias-primas até a entrega do produto ao consumidor final.<sup>4,5</sup>

Segundo Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup>, agradar o consumidor final do produto é uma tarefa que exige, além de conhecimento de mercado, o entendimento de como o produto se comporta em diferentes condições. Os autores acrescentam que o aquecimento da cerveja é um efeito indesejado por esse público consumidor. Portanto, conhecer esse processo e identificar suas principais causas é necessário para contribuir efetivamente com a questão.

A transferência de calor é um fenômeno comum na indústria alimentícia, mas pode representar um risco para os produtos: o aquecimento pode alterar o sabor e a textura ou até mesmo afetar a segurança dos alimentos. A indústria alimentícia deve garantir que todas as etapas do produto tenham sido suficientemente processadas, com os devidos cuidados, para assegurar sua segurança.<sup>7-9</sup> O aquecimento de bebidas engarrafadas deve-se principalmente a dois processos de transferência de calor: convecção natural e condensação, que são majoritariamente influenciados pela temperatura do ar e umidade relativa.<sup>6,10</sup>

A transferência de calor por convecção envolve a troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente.<sup>11</sup> Um exemplo clássico é um corpo imerso em um fluido estático com diferença de temperatura. Essa diferença ocorre entre o fluido e o corpo adjacente, de modo que as massas de fluido em contato com o corpo trocam energia para mudar de temperatura, promovendo o movimento dessas massas devido à diferença de temperatura e densidade. Ou seja, a massa de fluido quente torna-se menos densa e tende a subir, enquanto a massa fria torna-se mais densa e tende a descer.<sup>12,13</sup>

Alguns estudos que demonstram a importância de modelos para a transferência de calor e massa em produtos engarrafados incluem Dilay et al. (2006)<sup>14</sup>, que apresentaram um modelo computacional para simular a pasteurização da cerveja, aplicável a qualquer processo de pasteurização na indústria. O modelo foi obtido por meio da combinação de equações empíricas, fenomenológicas e princípios da termodinâmica. Como se trata de um modelo com parâmetros distribuídos, os autores utilizaram um método numérico para sua discretização. Por fim, propuseram uma otimização e, assim, determinaram a configuração geométrica ideal para reduzir o consumo de energia em túneis de pasteurização.

Outros autores que estudaram o efeito do aquecimento em bebidas engarrafadas foram Bailey e Elban (2010)<sup>15</sup>, que investigaram o desempenho térmico de garrafas de cerveja de alumínio e vidro. Para isso, utilizaram modelos teóricos e computacionais para avaliar os efeitos da condução, radiação e convecção interna dentro da garrafa de cerveja. Concluíram que a transferência de calor é controlada pela convecção natural e radiação, e que não há impacto significativo da diferença de condutividade na variação da temperatura ao longo do tempo para ambos os tipos de garrafa. No entanto, quando as garrafas estão em contato com a mão, por exemplo, os resultados são diferentes, pois a condução térmica do alumínio é maior que a do vidro, sendo este último mais eficiente para manter a bebida fria.

Liga, Montesanto e Mannella (2016)<sup>16</sup> estudaram diferentes sistemas de resfriamento para garrafas PET. Avaliaram o coeficiente de transferência de calor sob várias condições fluidodinâmicas. Para isso, utilizaram um modelo de parâmetros concentrados baseado na Lei de Resfriamento de Newton para calcular o calor no interior da garrafa. Avaliaram convecção, condução e radiação no modelo, observando que os efeitos da radiação poderiam ser desprezados na maioria das condições estudadas, exceto quando a convecção da água no interior da garrafa era maior que o fluxo de calor convectivo externo. Por meio do estudo, foi possível propor sugestões para melhorar o processo de resfriamento das garrafas.

Augusto, Pinheiro e Cristianini (2010)<sup>17</sup> utilizaram simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para analisar a influência da orientação da lata de cerveja durante o processo de pasteurização. Os autores examinaram os perfis de temperatura e convecção para diferentes posições da lata. Como a técnica utilizada foi CFD, os perfis de temperatura e deslocamento das massas convectivas no interior da lata puderam ser determinados em três dimensões. O estudo mostrou que, ao contrário das bebidas engarrafadas, em que a orientação da garrafa influencia significativamente os perfis de temperatura, no caso das latas, isso não ocorre.

Fu e Duh (1988)<sup>18</sup> analisaram a transferência combinada de calor e massa em uma placa porosa. Como na maioria dos estudos encontrados na literatura, a temperatura da superfície foi considerada constante e a concentração de água na superfície considerada uniforme ou com fluxo contínuo de calor e massa. Nesse contexto, investigaram os efeitos da transferência de calor e massa por difusão e convecção natural em uma placa exposta ao ar úmido. Utilizaram o método de diferenças finitas para resolver o modelo e avaliar os efeitos da convecção, condução e difusão. Segundo os resultados, o efeito da diferença de temperatura é maior do que o efeito da concentração de água entre a superfície e o ambiente. No entanto, observaram que a diferença na difusão de calor pode ocorrer na mesma direção ou em direções opostas, ou seja, quando estão na mesma direção, o calor latente é maior que o sensível na transferência de calor. Mas quando estão em direções opostas, o calor sensível é maior que o latente.

De modo geral, a literatura sobre transferência de calor em embalagens de bebidas, como latas e garrafas, não leva em consideração o calor trocado pela condensação da água presente no ar sobre a embalagem. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo simular a transferência de calor e massa em uma garrafa de cerveja resfriada exposta à temperatura ambiente em condições semelhantes às de um *Happy Hour*. Além da análise da influência do calor trocado por convecção e da condensação da massa de água presente no ar sobre a superfície da garrafa, apresenta-se também uma análise dos coeficientes de transferência de calor por convecção e condensação ( $h_{\text{conv}}$  e  $h_{\text{cond}}$ ).

Este estudo possui contribuições práticas e teóricas. Do ponto de vista teórico, o estudo fornece um modelo que pode ser utilizado para garantir a qualidade de bebidas engarrafadas, pois permite simular a temperatura que a garrafa pode atingir. Já do ponto de vista prático, as metodologias levantadas demonstram o tempo em que uma garrafa de bebida resfriada atinge a temperatura de estabilização quando exposta ao ambiente.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Modelagem Matemática

A equação mais comumente utilizada para descrever o processo de secagem em camada fina é semelhante à Lei de Resfriamento de Newton. Essa equação foi sugerida inicialmente por Lewis (1921)<sup>19</sup>, na qual uma constante única de secagem é utilizada com o objetivo de combinar os diversos fenômenos de transporte existentes.<sup>20-29</sup> Os fenômenos de transferência de calor e massa estão sempre associados e ocorrem em situações cotidianas, como no aquecimento de uma garrafa de cerveja, de modo que ambos os fenômenos acontecem simultaneamente até que o sistema atinja o equilíbrio termodinâmico.<sup>6</sup>

Com base nisso, a determinação da taxa de troca de calor requer o conhecimento do coeficiente de transferência de calor por convecção natural, conforme apresentado na Equação 1:

$$q_{conv} = h_{conv} A_o (T_{\infty} - T_s) \quad (1)$$

Como a massa de água presente no ar condensa sobre a garrafa, essa transferência de calor ocorre paralelamente à transferência de massa por condensação. Assim, de forma análoga à Equação 1, temos a Equação 2 para o calor de condensação  $q_{cond}$ :

$$q_{cond} = h_{cond} A_o (T_{\infty} - T_s) \quad (2)$$

Alternativamente, o calor de condensação também pode ser avaliado pela Equação 3, considerando  $\Delta H_{cond}$ , a entalpia de condensação, caso a taxa de condensação da água seja conhecida:

$$q_{cond} = m_{cond} \Delta H_{cond} \quad (3)$$

Por meio do balanço de energia, é possível chegar a uma equação que considera  $q_{cond}$  e  $q_{conv}$ , conforme a Equação 4:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_{cond}}{(m.Cp)} + \frac{q_{conv}}{(m.Cp)} \quad (4)$$

Substituindo as Equações 2 e 3 na Equação 4, obtém-se:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_{conv} A_o (T_{\infty} - T_s)}{m.Cp} + \frac{h_{cond} A_o (T_{\infty} - T_s)}{m.Cp} \quad (5)$$

Como  $q_{cond}$  também pode ser representado pela Equação 3, segue uma alternativa à Equação 5:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_{conv} A_o (T_{\infty} - T_s)}{m.Cp} + \frac{\dot{m}_{cond} \Delta H_{cond}}{m.Cp} \quad (6)$$

A equação da transferência de massa foi obtida a partir do balanço transiente de massa e representa a massa de água presente no ar que condensa sobre a superfície da garrafa, conforme a Equação 7:

$$\dot{m}_{cond} = \frac{\bar{dm}}{dt} = k_m A_o [C_{A\infty} - C_A(t)] \quad (7)$$

Onde  $k_m$  é a constante de transferência de massa ( $m \cdot s^{-1}$ ). A concentração molar de vapor d'água no ar  $C_{A\infty}$  ( $mol \cdot cm^{-3}$ ) e a concentração de água na interface líquida sobre a superfície da garrafa  $C_A(t)$  ( $mol \cdot cm^{-3}$ ) foram avaliadas pelas equações seguintes:

$$C_{A\infty} = RH \frac{P_{A SAT}(T_{\infty})}{RT_{\infty}} \quad (8)$$

$$C_A(t) = \frac{P_{A SAT}(T)}{RT} \quad (9)$$

As pressões de saturação de vapor de água  $P_{Asat}(T)$  foram estimadas pela Equação de Antoine:

$$P_{ASAT}(T) = 1000 * \exp\left(16.3872 + \frac{3885.70}{T-42.98}\right) \quad (10)$$

## Procedimento Experimental

Para este estudo, foram utilizados os dados de Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup>. Primeiramente, os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção ( $h_{conv}$ ), de transferência de calor por condensação ( $h_{cond}$ ) e de transferência de massa ( $k_m$ ) foram determinados utilizando o método proposto por Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup>. Em seguida, foi proposto um modelo fenomenológico por meio dos balanços de calor e massa para simular a variação de temperatura e massa em função do tempo.

## Determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor e massa

Para obter os valores experimentais de  $dT/dt$ , a Equação 11 foi ajustada aos dados experimentais de temperatura e, posteriormente, sua derivada foi obtida:

$$\frac{dT}{dt} = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (11)$$

A Equação 12 foi ajustada para determinar os valores de  $M_{cond}$ .

$$\dot{m}_{cond} = b_1 \exp(k_1 t) + b_2 \exp(k_2 t) \quad (12)$$

Para a determinação dos valores experimentais de  $h_{conv}$  e  $h_{cond}$ , foi utilizada uma abordagem semelhante à de Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup>, na qual o calor de condensação  $q_{cond}$  é determinado pela Equação 3, e  $h_{cond}$  é obtido substituindo-se  $q_{cond}$  na Equação 2. No entanto, enquanto Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup> identificaram o calor convectivo no sistema por meio de uma equação empírica da literatura, neste trabalho o calor por convecção foi calculado a partir da determinação do calor total do sistema  $q_{total}$ , subtraindo-se a parcela correspondente ao calor de condensação. A equação para o cálculo de  $q_{total}$  é:

$$q_{total} = \frac{dT}{dt} m * cp \quad (13)$$

A seguinte equação é utilizada para o cálculo de  $q_{conv}$ , substituindo as Equações 3 e 13 na Equação 4:

$$q_{conv} = \frac{dT}{dt} m * cp - \dot{m}_{cond} \Delta H_{cond} \quad (14)$$

Para a determinação dos valores experimentais de  $h_{conv}$ , o valor de  $q_{conv}$  determinado pela Equação 14 é igualado à Equação 1, isolando-se então  $h_{conv}$ . Com os valores experimentais de , as Equações 2 e 3 são igualadas para isolar o valor de  $h_{cond}$ . Já o valor de  $k_m$  foi determinado utilizando a mesma abordagem de Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup>, que consiste em isolar  $k_m$  na Equação 7.

## Modelagem e Perfilagem dos Parâmetros do Modelo

O ajuste polinomial com a função “nls” do pacote do software R foi utilizado sobre os valores determinados experimentalmente para obter um modelo que representasse os perfis de  $h_{conv}$  e  $k_m$ , utilizando as seguintes duas equações:

$$h_{conv} = x_1 + x_2 T \quad (15)$$

$$k_m = y_1 + y_2 T \quad (16)$$

A integração numérica das Equações 6 e 7 foi realizada para obter um modelo matemático que representasse os dados de temperatura e massa. Considerando que as concentrações  $C_A(t)$  e  $C_{A\infty}$  são funções da temperatura para o cálculo da massa, e que a Equação 6 considera para o cálculo da temperatura. Destaca-se também que tanto  $h_{conv}$  quanto  $k_m$  são funções da temperatura, conforme as Equações 15 e 16. Como ambas as equações são interdependentes, as Equações 6 e 7 foram integradas simultaneamente pelo método de Runge-Kutta no pacote R Cran, utilizando a função “rk4”.

## Ajuste de Parâmetros

A estimativa dos parâmetros das Equações 15 e 16, assim como das Equações 11 e 12, foi realizada pelo método dos mínimos quadrados utilizando a função “nls” do pacote do software R, buscando-se minimizar o erro quadrático  $\Phi$ , conforme a Equação 17:

$$\Phi = \sum (Y_{exp_i} - Y_{calc_i})^2 \quad (17)$$

Onde:  $Y_{exp_i}$  é o i-ésimo valor experimental de T, M,  $h_{conv}$  ou  $k_m$ , e  $Y_{calc_i}$  é a estimativa correspondente de  $Y_{exp_i}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a determinação dos valores experimentais de  $dT/dt$  e  $ddt$ , as Equações 11 e 12 foram ajustadas aos dados experimentais de temperatura (T) e massa (M). A Figura 1 apresenta esses ajustes. Conforme mostrado na Figura 1, observa-se que tanto  $M(t)$  quanto  $T(t)$  crescem proporcionalmente ao tempo, o que está de acordo com o modelo do problema, já que ambas são variáveis interdependentes e proporcionais.

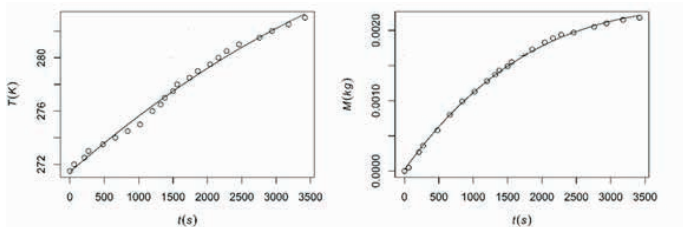


Figura 1 – Correlações empíricas para temperatura e massa.

- Equação empírica; ° dados experimentais.

Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 1 apresenta os valores ajustados dos parâmetros das Equações 11 e 12, bem como os Limites Inferior (LCL) e Superior (UCL) do intervalo de confiança de 95%.

Variável	Parâmetro	LCL 95%	Valor	UCL 95%	Ø
Temperatura (Equação 11)	a1 (K.s <sup>-1</sup> ))	4,013 x 10 <sup>-3</sup>	4,482 x 10 <sup>-3</sup>	4,9500 x 10 <sup>-3</sup>	1,978
	a2(K.s <sup>-2</sup> )	-4,355 x 10 <sup>-7</sup>	-2,973 x 10 <sup>-7</sup>	-1,590 x 10 <sup>-7</sup>	
	a0(K)	2,711 x 10 <sup>3</sup>	2,71 x 10 <sup>3</sup>	2,717 x 10 <sup>3</sup>	
Massa (Equação 12)	b1(kg)	-1,362	-2,475 x 10 <sup>-2</sup>	1,313	1,33 x10 <sup>-8</sup>
	k1 (kg.s <sup>-1</sup> )	-1,817 x 10 <sup>-3</sup>	-2,495 x 10 <sup>-4</sup>	1,318 x 10 <sup>-3</sup>	
	b2(kg)	-1,313	2,477 x 10 <sup>-2</sup>	1,363	
	k2(kg.s <sup>-1</sup> )	1,631 x 10 <sup>-3</sup>	-1,949 x 10 <sup>-4</sup>	1,242 x 10 <sup>-3</sup>	

**Tabela 1.** Parâmetros ajustados do modelo e limites de confiança de 95 %.

Fonte: Autoria própria (2025).

Com os parâmetros ajustados na Equação 11, obtém-se:

$$\frac{dT}{dt} = 4.482 \times 10^{-3} - 5.946 \times 10^{-7}t \tag{18}$$

O mesmo foi feito com os parâmetros ajustados para a equação que descreve M(t):

$$\dot{m}_{cond} = \frac{dM}{dt} = 6.174 \times 10^{-6}e^{(-2.495 \times 10^{-4}t)} - 4.8046 \times 10^{-6}e^{-1.949 \times 10^{-4}t} \tag{19}$$

Conhecendo  $M_{cond}$ , é possível determinar  $h_{cond}$  combinando as Equações 2 e 3. A Figura 2 mostra os valores experimentais determinados de  $h_{cond}$ . De acordo com a Figura 2, os valores de  $h_{cond}$  estão próximos dos definidos por Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup>. No entanto, os valores de  $h_{conv}$  diferem dos determinados por aqueles autores, provavelmente porque eles utilizaram uma equação empírica para determinar esses parâmetros. Além disso, é provável que a equação empírica usada para determinar  $h_{conv}$  não seja válida na faixa de condições experimentais do presente estudo. Os valores de  $k_m$  também diferem daqueles estabelecidos por Monteiro et al. (2010)<sup>6</sup> devido ao uso da escala Celsius na determinação dos parâmetros.



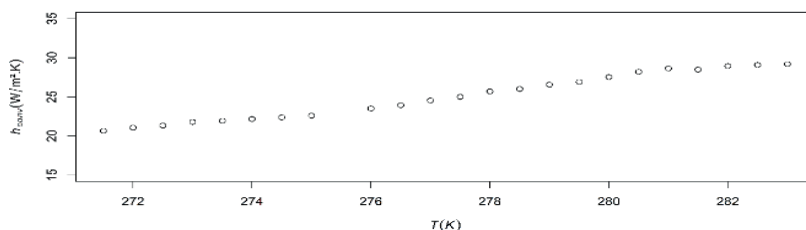


Figura 2 –  $h_{\text{cond}}$  vs. Temperatura.  
 Fonte: Autoria própria (2025).

O calor trocado por convecção foi calculado pela Equação 14, e os valores experimentais de  $h_{\text{conv}}$  foram determinados isolando seu valor na Equação 1. Da mesma forma, os valores de  $k_m$  foram calculados pela Equação 7. A Figura 3 apresenta os valores experimentais de  $k_m$  e  $h_{\text{conv}}$ , bem como o ajuste linear obtido para os valores experimentais de cada parâmetro. Comparando a Figura 2 com a Figura 3, observa-se que o mecanismo dominante na transferência de calor é a convecção, já que  $h_{\text{cond}}$  é muito maior que  $h_{\text{conv}}$ . Como mostrado nas Figuras 2 e 3,  $h_{\text{cond}}$  diminui com o tempo, indicando que a troca de calor por condensação é mais intensa nos primeiros momentos. Por outro lado,  $h_{\text{conv}}$  aumenta com o tempo, o que demonstra que o oposto ocorre para a convecção. A diminuição de  $h_{\text{cond}}$  ao longo do tempo também é confirmada na Figura 3 pela queda em  $k_m$ , indicando uma redução da transferência de massa com o passar do tempo.

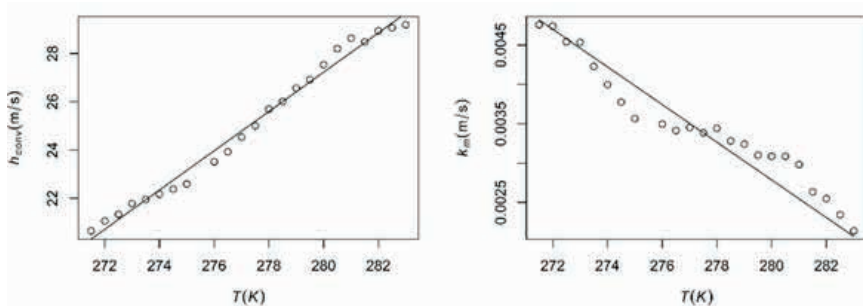


Figura 3 – Valores do modelo de  $h_{\text{cond}}$  e  $k_m$ .  
 - Regressão linear; ° dados experimentais.

Fonte: Autoria própria (2025).

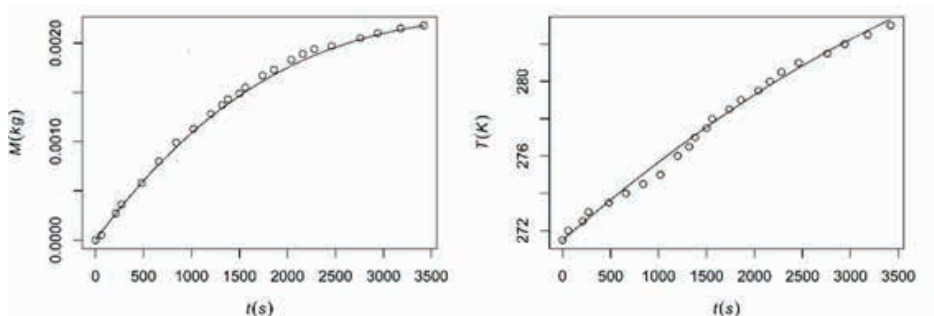
A Tabela 2 apresenta os parâmetros polinomiais ajustados para prever  $k_m$  e  $h_{\text{cond}}$ , incluindo os limites superior e inferior dos intervalos de confiança de 95%.

Variável	Parâmetro	Limite inferior	Valor	Limite superior	$\phi$
$h_{\text{cond}}$	$x_1$	$5,246 \times 10^{-2}$	$5,857 \times 10^{-2}$	$6,469 \times 10^{-2}$	1,978
	$x_2$	$-2,208 \times 10^{-4}$	$-1,987 \times 10^{-4}$	$-1,766 \times 10^{-4}$	
$k_m$	$y_1$	$-2,126 \times 10^2$	$-2,001 \times 10^2$	$-1,89300 \times 10^2$	$6,712 \times 10^{-7}$
	$y_2$	$7,73 \times 10^1$	$8,150 \times 10^1$	$8,57 \times 10^1$	

**Tabela 2.** Intervalos de confiança dos parâmetros do modelo.

Fonte: Autoria própria (2025).

As regressões de  $h_{\text{cond}}$  e  $k_m$  foram utilizadas como correlações para esses parâmetros no modelo composto pelas Equações 6 e 7, que foram integradas simultaneamente pela função “rk4” no R. A Figura 4 mostra uma comparação do modelo com os dados experimentais: o modelo ajusta-se bem aos dados.



**Figura 4 –** Modelo vs. Dados experimentais de massa (M) e temperatura (T).

- Modelo; ° dados experimentais.

Fonte: Autoria própria (2025).

O teste de Shapiro-Wilk foi realizado para confirmar a adequação dos resíduos. A Tabela 3 apresenta os valores de p para os resíduos de massa e temperatura. Observa-se que os resíduos são normais, pois  $p > 0,05$ . Esses resultados indicam que o modelo representa bem os dados experimentais.

Parâmetro	p-valor
Temperatura	0,2365

**Tabela 3.** Valores de p para massa e temperatura.

Fonte: Autoria própria (2025).

## CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, é possível obter um modelo capaz de simular simultaneamente a transferência de calor e massa em uma garrafa de cerveja exposta à temperatura ambiente. O modelo desenvolvido descreve bem o processo de transferência de calor e massa, apresentando resíduos adequados e bom ajuste gráfico. Segundo os resultados do presente estudo, a transferência de calor ocorre, em sua maior parte, por convecção e não por condensação. Isso difere do estudo de Monteiro, no qual ocorreu o contrário. Verificou-se que a transferência de energia por condensação é muito maior nos períodos iniciais, diminuindo com o tempo devido à redução da transferência de massa.

Por outro lado, o oposto ocorre para a transferência de calor por convecção, que apresenta um aumento gradual da energia transferida por esse mecanismo ao longo do tempo. Vale destacar que, neste trabalho, foram utilizados os dados experimentais do estudo de Monteiro. No entanto, os valores do coeficiente de transferência de calor por condensação diferem dos valores determinados experimentalmente pelos autores, pois eles utilizaram uma equação empírica na determinação do coeficiente de transferência de calor por condensação. Os coeficientes de transferência de massa também diferem daqueles apresentados no estudo de Monteiro, já que esses autores utilizaram uma unidade de temperatura diferente.

## AGRADECIMENTOS OU FINANCIAMENTO

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio financeiro da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, e do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

## REFERÊNCIAS

1. Anderson K. The emergence of lower-alcohol beverages: The case of beer. *Journal of Wine Economics*. 2023;18:66-86.
2. Cabras I, Kogler DF, Davies RB, Higgins D. Beer, brewing, and regional studies. *Regional Studies*. 2023;57:1905-1908.
3. VinePair. These Are The Top 20 Beer Producing Countries In The World (2024). [acesso em 01 jul. 2025]. Disponível em: <https://vinepair.com/booze-news/top-20-beer-producing-countries-2024/>.
4. CERVBRASIL – Associação Brasileira da Indústria da Cerveja. [acesso em 30 jun. 2019]. Disponível em: [http://www.cervbrasil.org.br/novo\\_site/anuarios/CervBrasil-Anuario2016\\_WEB.pdf](http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/anuarios/CervBrasil-Anuario2016_WEB.pdf).
5. Sturm B, Hugenschmidt S, Joyce S, Hofacker W, Roskilly AP. Opportunities and barriers for efficient energy use in a medium-sized brewery. *Applied Thermal Engineering*. 2013;53:397-404.

6. Monteiro CVB, Righetto AR, Souza LC, Paraíso PR, Jorge LMM. Heat and mass transfer during the warming of a bottle of beer. *Acta Scientiarum. Technology*. 2010;32.
7. Okpala COR, Korzeniowska M. Understanding the relevance of quality management in agro-food product industry: From ethical considerations to assuring food hygiene quality safety standards and its associated processes. *Food Reviews International*. 2023;39:1879-1952.
8. Lebelo K, Malebo N, Mochane MJ, Masinde M. Chemical contamination pathways and the food safety implications along the various stages of food production: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18:5795.
9. Madilo FK, Kunadu APH, Tano-Debrah K. Challenges with food safety adoption: A review. *Journal of Food Safety*. 2024;44:e13099.
10. Maderic D, Pavkovic B, Lenic K. An experimental research on energy efficiency of a beverage cooler with the latent heat storage. *Applied Thermal Engineering*. 2019;148:270-277.
11. Vakilzadeh AH, Sarvestani AB, Javaherdeh K, Kamali R, Panchal S. Heat transfer and fluid flow in a PCM-filled enclosure: Effect of heated wall configuration. *Journal of Energy Storage*. 2024;87:111448.
12. Daadoua M, Mathew B, Alnaimat F. Experimental investigation of pressure drop and heat transfer in minichannel with smooth and pin fin surfaces. *International Journal of Thermofluids*. 2024;24:100542.
13. Cham BM, Islam S, Majeed AH, Ali MR, Hendy AS. Numerical computations of magnetohydrodynamic (MHD) thermal fluid flow in a permeable cavity: A time dependent based study. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;61:104905.
14. Dilay E, Vargas JVC, Amico SC, Ordonez JC. Modeling, simulation and optimization of a beer pasteurization tunnel. *Journal of Food Engineering*. 2006;77:500-513.
15. Bailey RT, Elban WL. Thermal performance of aluminum and glass beer bottles. *Heat Transfer Engineering*. 2010;29:643-650.
16. Liga A, Montesanto S, Mannella GA, Carrubba V, Brucato V, Cammalleri M. Study on heat transfer coefficients during cooling of PET bottles for food beverages. *Heat and Mass Transfer*. 2016;52:1479-1488.
17. Augusto PD, Pinheiro TF, Cristianini M. Using computational fluid-dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: Effect of orientation of cans. *Food Science and Technology*. 2010;30:980-986.
18. Fu WS, Duh FC. Combined heat and mass transfer in natural convection on a vertical flat plate. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 1988;15:179-191.
19. Lewis WK. The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 1921;13:427-432.
20. Babalis SJ, Papanicolaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*. 2006;75:205-214.

21. Aranha ACR, Defendi RO, Suzuki RM, Santos Júnior OO, Madrona GS, Ferrari AL, Matias GS, Mogollón EB, Molinari D, Ferreira CSR, Jorge LMM. Mathematical modeling, energy consumption, and quality evaluation of wheat seeds subjected to intermittent drying. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024;103:2837-2850.
22. Aranha ACR, Defendi RO, Bissaro CA, Ferrari AL, Nardino DA, Suzuki RM, Madrona GS, Paschoal SM, Carmona GG, Matias GS, Jorge LMM. Analysis of the composition of Brazilian black soybean seeds and mathematical modelling of intermittent drying and extraction of antioxidant compounds using fractional calculus. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024;103:2386-2405.
23. Bissaro CA, Defendi RO, Aranha ACR, Ferrari AL, Matias GS, Jorge LMM. Mathematical modeling of Brazilian black soybean: Lumped and distributed parameter models. *Journal of Food Process Engineering*. 2023;46:e14487.
24. Aranha ACR, Ferrari AL, Paschoal SM, Sgorlon JG, Gomes MCS, Jorge LMM, Tonin LTD, Defendi RO. Heat consumption and modeling of corn seeds intermittent drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture (JSFA Reports)*. 2023;3:588-596.
25. Ferrari AL, Aranha ACR, Nascimento FM, Romansina BC, Jorge LMM, Nicolin DJ, Gomes MCS, Defendi RO. Mathematical modeling of beans, corn and wheat drying by fractional calculus. *Journal of Food Process Engineering*. 2023;45:e14390.
26. Aranha ACR, Ferrari AL, Bissaro CA, Matias GS, Defendi RO, Paschoal SM, Jorge LMM. Mathematical modelling of wheat drying by fractional order and assessment of transport properties. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2023;102:996-1006.
27. Aranha ACR, Defendi RO, Jorge LMM. Conventional and intermittent drying modeling of agricultural products: A review. *Journal of Food Process Engineering*. 2022;46:e14206.
28. Matias GS, Lermen FH, Bissaro CA, Nicolin DJ, Fischer C, Jorge LMM. Fractional calculus to control transport phenomena in food engineering: A systematic review of barriers and data agenda. *Journal of Food Process Engineering*. 2022;45:e14060.
29. Matias GS, Lermen FH, Gonçalves KY, Jorge LMM, Ribeiro JLD, Coelho TM. A Semi-Empirical Model for Mass Transfer in Carbohydrate Polymers: A Case of Native Cassava Starch Hydration Kinetic in Hot Water Media. *Starch/Stärke*. 2020;72:1900308.