

MODELAGEM E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA PARA PREDIÇÃO DA SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTEAmanda Siqueira Restani¹ (IC), Maximilian Joachim Hodapp (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Ansys CFD. Biomassa. CDRC.**Introdução**

O crescimento populacional acelerado, acompanhado da constante evolução do setor industrial, tem ocasionado um aumento na demanda energética e consequentemente, um esgotamento dos recursos naturais (Kumar; Bhattacharya; Hasnain, 2020). Portanto, a busca por fontes de energia sustentáveis, que permitam reduzir a emissão de poluentes, tornou-se uma pauta global. No contexto atual, com a alta geração de resíduos industriais e agrícolas, a utilização da biomassa apresenta-se como uma solução viável para a geração de energia limpa, além de ser um processo capaz de promover uma valorização da matéria orgânica (Linhares *et al.*, 2016).

Dentre a alta variedade de fontes de biomassa, se destaca o bagaço de malte, o principal resíduo proveniente do processo produtivo da cerveja. O bagaço de malte possui um potencial térmico elevado e quando submetido à conversão termoquímica, é transformado em combustível com valor energético significativo (Pereira; Perazzini, 2023). Em 2022, um estudo estimou que a indústria cervejeira no Brasil gera anualmente cerca de 2,8 milhões de toneladas de bagaço de malte (Muniz, 2022). Por conseguinte, dado a alta disponibilidade e potencial energético, este recurso apresenta-se como uma alternativa promissora a fim de diversificar a matriz energética.

Para que haja o aproveitamento térmico da biomassa, é necessário realizar a remoção da umidade em excesso presente em sua composição, por meio da secagem. Os grãos podem ser submetidos a uma ventilação forçada à temperatura elevada, no interior de um secador industrial. O processo de secagem do bagaço de malte engloba fenômenos de transferência de massa e calor e requer um diferencial de pressão de vapor entre as superfícies do material e fluido.

Outrossim, existem desafios associados à secagem do material orgânico, visto que, a eficiência do processo depende de diversos fatores associados às características estruturais variáveis dos grãos de malte,

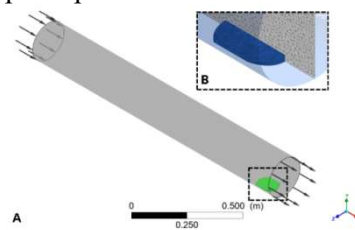
assim como propriedades termodinâmicas. Tendo em vista tal complexidade, torna-se interessante a introdução da ferramenta *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para um estudo avançado da secagem.

O software comercial ANSYS se destaca por permitir a realização de simulações completas, solucionando modelagens matemáticas multifásicas em diferentes condições. Logo, essa pesquisa tem como propósito empregar duas modelagens para prever o fenômeno de secagem do malte, sendo uma abordagem a parâmetros concentrados e outra a distribuídos, a fim de efetuar simulações sob diferentes condições experimentais, com dados obtidos empiricamente.

Metodologia

A metodologia empregada no presente trabalho adotou resultados obtidos em um experimento prévio de secagem do bagaço de malte, conduzido por Junqueira (2021). A unidade experimental consistia em um secador de túnel de vento, escala laboratorial, com 0,20 m de diâmetro e 1,5 m de comprimento, a fim de garantir escoamento desenvolvido do ar, com velocidade de 1,8 m/s, na região em que se encontra o material. O bagaço de malte foi disposto em uma placa Petri, inserida no secador, com 0,105 m de diâmetro, formando uma camada delgada com espessura de 0,00299 m. Com o uso do ANSYS Space Claim, foi desenvolvida uma geometria 3D do equipamento, Figura 1, com as dimensões apresentadas anteriormente.

Figura 1 – (A)Vista transversal da geometria. (B)Vista ampliada da placa petri e da malha dos domínios.



Fonte: Autoria Própria (2025)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Para a criação das malhas numéricas utilizou-se o ANSYS Meshing, com o propósito de encontrar a discretização adequada, realizou-se um teste de independência de malha com refinamentos de $1,98 \cdot 10^5$, $5,27 \cdot 10^5$ e $1,02 \cdot 10^6$ elementos, sendo esta última a selecionada. Foram definidos dois domínios com malhas compostas por elementos de estrutura tetraédrica. Para o domínio sólido, compreendido pelo agrupamento de partículas de malte, foi gerada uma malha mais refinada com 460.075 elementos. Para o domínio fluido, estabelecido como uma mistura de vapor de água, ar e dióxido de carbono com o modelo de gás ideal, gerou-se uma malha com 564.387 elementos.

No que se diz respeito aos modelos matemáticos implementados, para o movimento do gás fez-se o uso das equações de Navier-Stokes, presentes na biblioteca do software. Como não há velocidade de escoamento no interior do domínio sólido, não foi inserido um balanço de quantidade de movimento. Para a resolução da parte térmica, as equações de transporte de entalpia descrevem ambas as fases, mas no domínio sólido não há termo convectivo. A interação entre os domínios é descrita através do termo fonte de troca de calor, Equação 1, que leva em conta a perda de energia decorrente da evaporação da água na secagem.

$$S_T = h \times A_{sup} \times (T_g - T_s) - \frac{dX}{dt} \times \lambda \times M_s \quad (1)$$

Sendo h o coeficiente de transferência de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), A_{sup} é a área superficial (m^2), T_g é a temperatura do gás (K) e T_s é a temperatura do sólido (K), λ é o calor latente de vaporização ($J \cdot kg^{-1}$), M_s é a massa do sólido (kg). Para o cálculo do calor latente de vaporização, utilizou-se a Equação 2, baseada na metodologia proposta por Bala (1983).

$$\lambda = (2500,6 - 2,36 T_g) \times (1 + 0,5904 e^{-0,1367X}) \times 10^3 \quad (2)$$

Para a resolução do transporte de espécies químicas na fase sólida, foram utilizados dois grupos de equações, a fim de trabalhar com duas abordagens e compreender o efeito destas na predição da secagem. Para a análise a parâmetros concentrados as três condições operacionais elucidadas na Tabela 1 foram usadas, denominadas Simulação 1A, 2A e 3A, enquanto que para a parâmetros distribuídos, a simulação foi realizada apenas do caso 2 a $60^\circ C$, sendo denominada Simulação 2B. Para fase gás, as equações de transporte de componentes seguem a abordagem distribuída.

Tabela 1 – Condições de operação das simulações.

	Temperatura Domínio Fluido [$^\circ C$]	Deff [m^2/s]	k_f [kg/m^2s]	X_e []
1	50	$1,5 \times 10^{-8}$	0.00018598	0,000444
2	60	$2,1 \times 10^{-8}$	0.00026218	0,000424
3	70	$2,4 \times 10^{-8}$	0.00030185	0,000309

Fonte: Autoria Própria (2025)

No que concerne a configuração das Simulações 1A, 2A e 3A, foi inserido um subdomínio com um termo fonte, conforme a Equação 3, para calcular o balanço de massa do sólido tendo em vista a perda de umidade. Ademais, um termo fonte também foi modelado na interface do domínio fluido, para contabilizar o transporte de umidade.

$$S_{Umidade} = \frac{k_f \times A_{esp} \times \frac{(X - X_e)}{(X_c - X_e)}}{\rho_{leito}} \quad (3)$$

Em que k_f é o coeficiente de transferência de massa convectiva ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), A_{esp} é área específica ($m^2 \cdot m^{-3}$), X é a umidade do sólido em base seca, X_e é a umidade de equilíbrio em base seca, X_c é a umidade crítica do sólido em base seca, definida como 1, ρ_{leito} é a densidade do leito ($kg \cdot m^{-3}$). Para a Simulação 2B, utilizou-se um modelo matemático tendo em conta a metodologia desenvolvida em Santos *et al.* (2025), com base na construção da *Characteristic Drying Rate Curve* (CDRC). Para tanto, foi preciso inicialmente calcular o coeficiente de transferência de massa h_m com o uso da Equação 4, correlação adequada para secagem em placa plana, apresentada em Incropera *et al.* (2007).

$$Sh = 0,664 \times Re^{1/2} \times Sc^{1/3} \quad (4)$$

Onde Sh é o número de Sherwood, Re é o número adimensional de Reynolds e Sc é o número de Schmidt. Na interface do domínio sólido, introduziu-se um termo, elucidado na Equação 5, referente ao fluxo de umidade que deixa a superfície do material.

$$Fluxo = h_m \times \rho_g \times (Y_s - Y_\infty) \times f \quad (5)$$

Sendo h_m o coeficiente de transferência de massa (m/s), ρ_g a densidade do gás ($kg \cdot m^{-3}$), Y_s a umidade do gás na superfície de evaporação e Y_∞ a umidade absoluta do gás, ambas em base seca, f é um fator de correção a depender das condições do processo.

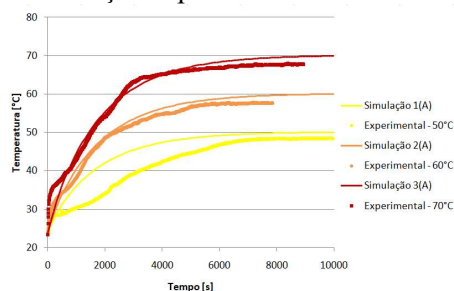
Resultados e discussão

Primeiramente, foram analisados os resultados das Simulações 1A, 2A e 3A. No que se refere ao comportamento térmico do sólido, elaborou-se um gráfico apresentado na Figura 2. O gráfico em questão

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

elucida um comportamento esperado, em que o sólido, na primeira fase da operação, sofre um aumento considerável de temperatura, ocasionada pela diferença térmica com o ar de secagem, força motriz do processo de convecção, fenômeno que prevalece em relação a perda de energia associada a evaporação de água no sólido. No instante de tempo de 2000 s, verificou-se uma maior discrepância entre os dados experimentais e teóricos da condição operacional de 50°C, apresentando um erro relativo de 23,6%. No entanto, uma avaliação do erro relativo no mesmo instante de tempo, para os casos referentes a 60°C e 70°C, resultou em valores de 0,4% e 2,1%, respectivamente. As curvas obtidas através das simulações demonstraram proximidade aos dados experimentais, convergindo para um mesmo valor de temperatura em estágios mais avançados, validando o modelo térmico.

Figura 2 – Gráfico comparativo, dados experimentais e teóricos, de temperatura do sólido em função do tempo, para as três condições operacionais trabalhadas.



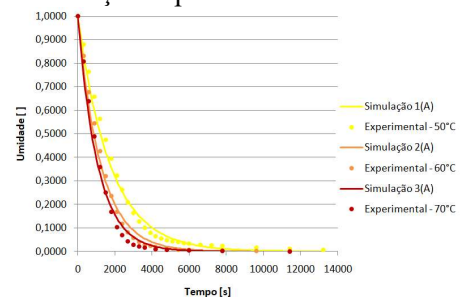
Fonte: Autoria Própria (2025)

A fim de avaliar a cinética da secagem, construiu-se um gráfico demonstrado na Figura 3. Observa-se que a umidade do sólido apresenta um decréscimo em função do tempo, comportamento mais acentuado no início da secagem, período no qual a diferença é significativa entre a umidade do sólido e a que este atinge no equilíbrio, visto que, o bagaço de malte possui um alto teor de água. No entanto, a força motriz da operação reduz com o avanço do tempo, logo, a remoção da umidade deixa de apresentar um perfil acelerado, sofrendo então, uma estabilização.

Cabe ressaltar que o modelo matemático referente ao balanço de espécies químicas demonstrou ser adequado, prevendo um comportamento similar aos dos dados experimentais para todas as condições operacionais. Contudo, observa-se que no intervalo de tempo entre 2000 s e 4000 s as curvas provenientes das simulações prevêm uma secagem mais lenta. As curvas reforçam o que é fisicamente esperado, uma secagem

mais rápida para temperaturas mais elevadas de ar de secagem devido a uma maior transferência de calor do fluido para o material, ocasionando aumento no grau de agitação das moléculas e o rompimento das pontes de hidrogênio, reduzindo a resistência à difusão mássica.

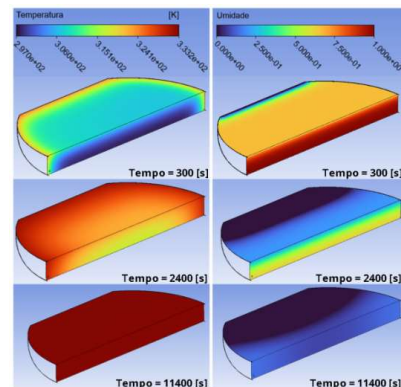
Figura 3 – Gráfico comparativo, dados experimentais e teóricos, de umidade do sólido em função do tempo, para as três condições operacionais trabalhadas.



Fonte: Autoria Própria (2025)

A aplicação do modelo na Simulação 2B permitiu a obtenção de imagens detalhadas, Figura 4, do domínio sólido a fim de efetuar uma análise visual do comportamento do bagaço de malte durante a secagem.

Figura 4 – Imagens do domínio sólido referente à Simulação 2B.



Fonte: Autoria Própria (2025)

Ao analisar as imagens, constata-se a presença da variação de temperatura e umidade em função do tempo e posição no domínio sólido. Após 300 s, a fração de umidade no sólido ainda possui um valor elevado, assim como nos dados experimentais. Observa-se que o aquecimento foi mais significativo nas extremidades da placa, enquanto que no interior do sólido, a temperatura não sofreu alterações. Portanto, a remoção de umidade se inicia pela superfície, onde as partículas em contato com o ar aquecido sofrem aumento da temperatura. Cabe ressaltar, que os fenômenos ocorreram com maior

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

intensidade nas laterais dado uma simplificação da geometria 3D, em que a espessura é menor que no centro da placa.

Após 2400 s de simulação, a temperatura do sólido já atingiu o equilíbrio térmico com o ar em alguns pontos na interface do domínio. No interior, o aquecimento ocorre mais lentamente, formando um núcleo frio e úmido. Com esse tempo transcorrido, há presença de gradiente de umidade no material, no qual parcela considerável da superfície já está seca, no entanto, devido a uma difusividade efetiva baixa, a retirada de água do interior sofre maior resistência, o que desacelera a taxa de secagem.

Por fim, passados 11400 s, todo o material alcançou o equilíbrio térmico, cessando a transferência de calor com a fase gás. No que se diz respeito a fração de água no material, uma quantidade pequena ainda está presente, portanto, a secagem segue, já que o sólido não atingiu a umidade de equilíbrio com esse tempo transcorrido. Destaca-se que, ao comparar com os dados experimentais, o modelo utilizado para a simulação em questão, previu uma secagem mais lenta, no entanto, os perfis de temperatura e umidade obtidos apresentaram um comportamento esperado, coerente com a tendência observada experimentalmente.

Conclusões

Este trabalho demonstrou que com o uso da ferramenta CFD e a implementação de modelos matemáticos ajustados, foi possível efetuar simulações referentes ao processo de secagem do bagaço de malte. A análise das simulações viabilizou uma melhor compreensão da cinética da secagem e da complexidade desta operação unitária. É importante ressaltar os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que as abordagens utilizadas apresentaram acurácia na previsão do processo de secagem. No que se refere ao modelo a parâmetros concentrados, apesar de ser uma modelagem que trabalha com médias globais, as curvas se ajustaram de forma favorável aos dados. Por outro lado, o modelo a parâmetros distribuídos demonstrou um detalhamento maior, considerando a heterogeneidade das variáveis.

Com isso dito, a pesquisa evidenciou não apenas a relevância da aplicação de softwares de fluidodinâmica computacional no âmbito acadêmico e na otimização de processos, como a importância de investigar a respeito da secagem de biomassa, devido a relevância do tema na diversificação da matriz energética. Em estudos futuros, será interessante ajustar o fator de correção na modelagem distribuída e

aprimorar a geometria utilizada, a fim de obter resultados mais condizentes com a realidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Itajubá pelo suporte oferecido para a realização do trabalho e pelo apoio financeiro na forma de bolsa PIBIC.

Referências

- BALA, B. K. *Deep Bed Drying of Malt*. 1983. Tese (Ph.D.) — University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, 1983.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- JUNQUEIRA, R. *Estudo das Condições Operacionais da Secagem do Bagaço de Malte da Indústria Cervejeira para Utilização na Produção de Energia*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.
- KUMAR, A.; BHATTACHARYA, T.; HASNAIN, S. M. *Applications of biomass-derived materials for energy production, conversion, and storage*. Materials Science in Energy and Technologies, v. 3, p. 905–920, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.10.012>.
- LINHARES, F. A. L.; GOMES, G. F.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. *Avaliação fluidodinâmica e co-combustão de resíduo de biomassa industrial em planta de bancada e planta piloto de leito fluidizado borbulhante*. In: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 7., 2016, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: Instituto Venturi para Estudos Ambientais, 2016.
- MUNIZ, R. *Tecnologia otimiza geração de energia renovável a partir de bagaço de malte pela indústria cervejeira*. Agência FAPESP, São Paulo, 25 maio 2022. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/tecnologia-otimiza-geracao-de-energia-renovavel-a-partir-de-bagaco-de-malte-pela-industria-cervejeira/38702>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- PEREIRA, F. A.; PERAZZINI, H. *Estudo da Cinética de Secagem de Biomassa para Aplicações Bioenergia*. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO NO BRASIL, 5., 2023, Itajubá. Anais [...] Itajubá: 2023. DOI: <https://doi.org/10.29327/1307153.1-175>.
- SANTOS, Y. de C.; FREITAS, M. D. M.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. *Heat and mass transfer in fluidized bed drying of acai agricultural biomass waste*. Fuel, v. 399, p. 135547, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135547>.