



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

ESTUDO TEÓRICO DAS VARIÁVEIS PSICROMÉTRICAS DE UM PROCESSO DE SECAGEM SOLAR

Jeice Dias do Nascimento, dias.jeice@ufvjm.edu.br ¹
Leonardo Rabelo e Silva, rabelo.silva@ufvjm.edu.br ¹
Natália de Souza Freitas, natalia.freitas@ufvjm.edu.br ¹
José Ricardo Ferreira Oliveira, jose.ricardo@ufvjm.edu.br ¹

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e Tecnologia. Rodovia MGT 367 – Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, CEP 39100-000.

Resumo. Entre as diferentes fontes de energia renováveis, a energia solar é a principal fonte devido à sua disponibilidade abundante. Aproveitar a energia solar térmica para secar frutas e vegetais através de um secador solar concebido de forma eficaz é uma opção economicamente viável para esta finalidade. A secagem de alimentos é uma técnica de preservação que reduz a água nos alimentos, diminuindo o risco de deterioração por microrganismos. Neste sentido, controle das variáveis psicrométricas nos secadores solares é crucial para a qualidade final do alimento a ser secado. O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo teórico das variáveis psicrométricas envolvidas num processo convencional de secagem solar. De modo específico, este trabalho objetiva a razão de mistura e a temperatura de saída no processo de umidificação de um secador solar, através do software Interactive Thermodynamics 3.2.

Palavras-chave: Modelagem. Balanço de Energia. Secador Solar. Umidificação. Razão de Mistura.

Abstract. Among the different renewable energy sources, solar energy is the primary source due to its abundant availability. Harnessing solar thermal energy to dry fruits and vegetables using an efficiently designed solar dryer is a cost-effective option for this purpose. Food drying is a preservation technique that reduces the water content in foods, decreasing the risk of spoilage by microorganisms. In this regard, controlling the psychrometric variables in solar dryers is crucial for the final quality of the dried food. The aim of this work is to conduct a theoretical study of the psychrometric variables involved in a conventional solar drying process. Specifically, this work aims to determine the mixing ratio and the outlet temperature in the humidification process of a solar dryer using the Interactive Thermodynamics 3.2 software.

Keywords: Modeling. Energy Balance. Solar Dryer. Humidification. Mixing Ratio.

1. INTRODUÇÃO

A secagem de alimentos é uma das técnicas mais antigas de preservação de alimentos. Ao remover a água dos alimentos, a secagem diminui a atividade de água disponível para os microrganismos, reduzindo assim o risco de deterioração causada por bactérias, fungos e enzimas. A secagem reduz o teor de água nos alimentos, tornando-os mais leves e compactos. Isso facilita o transporte, o armazenamento e a distribuição de alimentos, especialmente em áreas onde o acesso a alimentos frescos é limitado ou durante viagens prolongadas. Em comparação com outras formas de processamento de alimentos, como enlatamento ou congelamento, a secagem geralmente requer menos energia e recursos. Além disso, os alimentos secos têm uma vida útil mais longa, o que reduz a necessidade de descarte e reprocessamento.

O controle das variáveis termodinâmicas envolvidas em processos de secagem é muito relevante para a qualidade do produto. O estudo da psicrometria é um dos pilares de sustentação da análise e do entendimento dos processos termodinâmicos de ar úmido (MOREIRA e NETO, 2019). Em outras palavras, a relação entre a secagem de alimentos e a psicrometria é fundamental, pois a psicrometria fornece os princípios e ferramentas necessários para entender e controlar as condições de secagem dos alimentos.

Entre as diferentes fontes de energia renováveis, a energia solar é a principal fonte devido à sua disponibilidade abundante em todo o mundo. Aproveitar a energia solar térmica para secar frutas e vegetais através de um secador solar concebido de forma eficaz é uma opção economicamente viável para esta finalidade (CHAUHAN e RATHOD, 2020).

Os secadores são utilizados na indústria alimentícia e na agricultura para prolongar a vida útil de determinados produtos. A energia térmica é necessária para a remoção de água no processo de secagem, que pode ser fornecida por diferentes fontes. A energia solar térmica é uma das fontes mais aplicáveis para processos de secagem com diversos benefícios como evitar emissão e disponibilidade de gases de efeito estufa (BANI HANI *et al.*, 2022). Os principais componentes dos sistemas de secagem solar incluem coletor solar, trocadores de calor, conjunto de sopradores e uma câmara de secagem (MALAKAR *et al.*, 2023).

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo teórico das variáveis psicrométricas envolvidas num processo convencional de secagem solar. Especificamente, o presente trabalho objetiva a razão de mistura (w_2) e a temperatura de saída (T_2) no processo de umidificação de um secador solar, através do software *Interactive Thermodynamics 3.2*, (MORAN *et al.*, 2018).

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O secador solar em análise é apresentado na Figura 1.

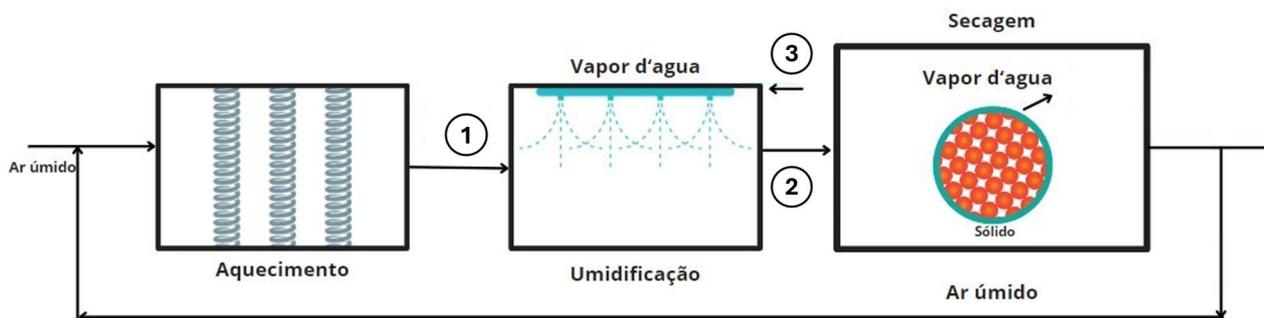


Figura 1. Aspecto geral do circuito de secagem.

O circuito de secagem apresentado na Figura 1 pressupõe a existência de uma entrada de ar externa e uma entrada do ar de retorno, que irá ocorrer após o primeiro ciclo. O ar de entrada no circuito é apenas o externo, do meio. Como considerações sobre o processo de secagem, podemos admitir que a análise será feita considerando que não haverá qualquer perda de massa ou calor pelo sistema. Em outras palavras, não haverá perdas na tubulação, no aquecedor, no umidificador ou no secador. Admite-se ainda que a vazão mássica de ar seco é a mesma durante todo o processo. Por outro lado, a vazão mássica de vapor d'água terá variação na etapa de umidificação e na etapa de secagem.

A Figura 2 apresenta o volume de controle definido para o balanço de massa e energia no processo de umidificação. Para tal, é necessário realizar algumas considerações: a) Regime Permanente; b) Variação da energia cinética igual a zero; c) Não há transferência de calor para vizinhanças; d) Pressão permanece constante em todo processo; e) Os fluxos de ar úmido são considerados mistura de gases ideais.

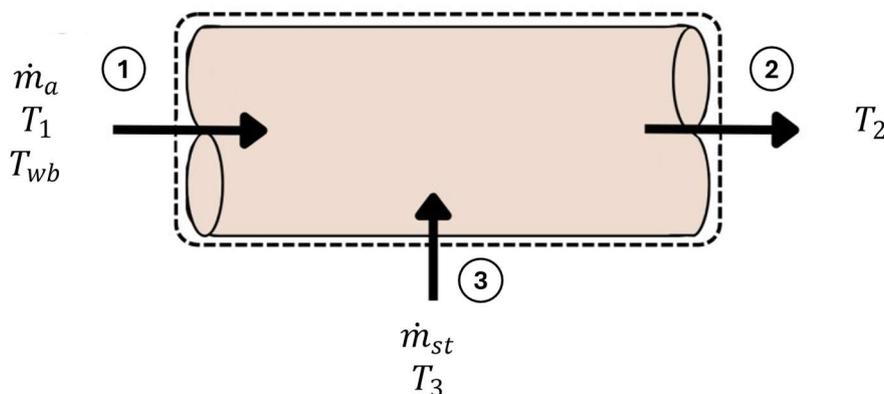


Figura 2. Volume de controle definido para o balanço de massa e energia no processo de umidificação.

Com todos os parâmetros definidos, podemos iniciar o uso do software. O *Interactive Thermodynamics* oferece um ambiente para criar um algoritmo capaz de resolver o problema. Nele, é necessário inserir todos os dados e formulações matemáticas necessárias para a solução. É importante atentar para a forma de inserção dos dados, pois a linguagem utilizada é semelhante ao Matlab®, baseada em C.

Após inserir todos os dados e formulações necessárias para a solução do problema pode-se resolver o código apresentado. A Figura 3 apresenta o código utilizado neste trabalho.

```
// Inserir os dados do problema
T1 = 60 // C
Twb1 = 29.38 // C
mdota = 12.85 * 10^-3 // kg/s
p = 1 // bar
Tst = 100 // C
mdotst = 1.25 * 10^-4 // kg/s

// Obter as razões de umidade
w1 = w_TTwb(T1, Twb1, p)
mdotv1 + mdotst = mdotv2
w1 = mdotv1 / mdota
w2 = mdotv2 / mdota

// Realizar o balanço de energia
0 = Qdot - Wdot + mdota * (h1 - h2) + mdotst * hst
Wdot = 0 // Assumption 1
Qdot = 0 // Assumption 2

// Obter as entalpias
h1 = ha_Tw(T1, w1)
h2 = ha_Tw(T2, w2)
hst = hsat_Px("Water/Steam", psat, 1)
psat = Psat_T("Water/Steam", Tst)
```

Figura 3. Código implementado no *software Interactive Thermodynamics*.

Como condições iniciais, admite-se que o ar úmido com temperatura de 60 °C e temperatura de bulbo úmido de 29,38 °C entra em um umidificador com borrifador de vapor. A vazão mássica do ar seco é de $12,8 \times 10^{-3}$ kg/s. Vapor de água saturado a 100 °C é injetado na mistura a taxa de $1,25 \times 10^{-4}$ kg/s. Não há transferência de calor para a vizinhança, e a pressão mantém-se constante em 1 bar.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dessa maneira, possuímos um algoritmo funcional para a resolução do problema proposto. O objetivo agora é avaliar o comportamento dos parâmetros T_2 e w_2 com a alteração das vazões. Para realizar essa análise, foram abordados dois métodos. O primeiro método utiliza uma faixa de variação menor, partindo de 10 % abaixo do valor inicial até 10 % acima do valor original, variando cada ponto em incrementos de 2 %, obtendo assim 11 pontos de comportamento do sistema. Os valores são apresentados na Tabela 1. O segundo método foi realizado de maneira semelhante, porém em uma faixa menos conservadora, variando o valor original de 10 % em 10 % até obter a mesma quantidade de pontos da primeira análise. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2. Em ambos os métodos abordados foi utilizado uma modificação no código.

Tabela 1: Dados de Temperatura e Razão de mistura: variação de 10 % nas vazões mássicas em relação ao valor inicial.

\dot{m}_a [Kg/s]	\dot{m}_{st} [Kg/s]	T_2 [°C]	w_2 [kg/kg]
0,001157	0,000113	60,47	0,1136
0,001182	0,000115	60,45	0,1132
0,001208	0,000118	60,47	0,1136
0,001234	0,00012	60,45	0,1131
0,001259	0,000123	60,47	0,1136
0,001285	0,000125	60,45	0,1132
0,001311	0,000128	60,47	0,1135
0,001336	0,00013	60,45	0,1132
0,001362	0,000133	60,47	0,1136
0,001388	0,000135	60,45	0,1132
0,001414	0,000138	60,45	0,1132

Tabela 2. Dados de Temperatura e Razão de mistura: variação de 60 % nas vazões mássicas em relação ao valor inicial.

\dot{m}_a [Kg/s]	\dot{m}_{st} [Kg/s]	T_2 [°C]	w_2 [kg/kg]
0,000643	6,25E-05	60,45	0,1132
0,000771	0,000075	60,45	0,1132
0,0009	8,75E-05	60,45	0,1132
0,001028	0,0001	60,45	0,1132
0,001157	0,000113	60,47	0,1136
0,001285	0,000125	60,45	0,1132
0,001414	0,000138	60,45	0,1132
0,001542	0,000266	64,01	0,1884
0,001671	0,000395	66,5	0,2521
0,001799	0,000523	68,35	0,3066
0,001928	0,000652	69,77	0,3539

Na Tabela 1, podemos observar que a variação da vazão não causa um impacto significativo nos parâmetros de saída adotados. Isso ocorre porque foi utilizada uma taxa de variação dos parâmetros de entrada bastante conservadora, ou seja, os valores adotados nos parâmetros de entrada são muito próximos entre si, resultando em valores de saída também próximos. Por outro lado, na Tabela 2, pode-se perceber que há um impacto significativo tanto na temperatura quanto na vazão quando os parâmetros de entrada são aumentados. No entanto, quando os valores adotados na entrada são diminuídos, o impacto se torna menos relevante.

4. CONCLUSÕES

Os resultados indicam que pequenas variações nas variáveis de entrada têm pouco impacto nas condições de saída, enquanto mudanças mais amplas produzem variações significativas. Esses achados são cruciais para otimizar o design e a operação de secadores solares, visando eficiência energética e qualidade do produto. Conclui-se que o domínio das variáveis psicrométricas e a utilização de fontes de energia renováveis, como a solar, são fundamentais para aprimorar a técnica de secagem de alimentos, tornando-a mais sustentável e eficaz.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de Iniciação Científica à autora Jeice Dias do Nascimento. Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro concedido através da CHAMADA 13/2023 - PARTICIPAÇÃO COLETIVA EM EVENTOS DE CARÁTER TÉCNICOCIENTÍFICO NO PAÍS.

6. REFERÊNCIAS

- Bani Hani, E.H., Alhuyi Nazari, M., Assad, M.E.H. et al. Solar dryers as a promising drying technology: a comprehensive review. *J Therm Anal Calorim* 147, 12285–12300 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11501-6>.
- Chauhan, Y. B., Rathod, P. P. A comprehensive review of the solar dryer, *International Journal of Ambient Energy*, 41:3, 348-367, 2020, DOI: 10.1080/01430750.2018.1456960
- Malakar, S., Arora, V.K., Nema, P.K. et al. Recent trends and applications of evacuated tube solar collector in food processing and air heating: a review. *Environ Sci Pollut Res* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25078-y>.
- Moran, Michael J.; Shapiro, Howard N. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*, 8ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Grupo GEN, 2018. E-book. ISBN 9788521634904. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634904/>. Acesso em: 28 jan. 2024.
- Moreira, José Roberto Simões; Neto, Alberto Hernandez. *Fundamentos e Aplicações da Psicrometria*. 2. ed. São Paulo, SP: Ed. Blucher, 2019. ISBN 9788521218395.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.