



INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO EM ETANOL NA SECAGEM CONVECTIVA DO MORANGO COM SECADOR COM BOMBA DE CALOR

Palavras-Chave: CINÉTICA DE SECAGEM, DESIDRATAÇÃO, QUALIDADE

Autores(as):

ANA FLÁVIA MALTAROLO FERREIRA, FEAGRI - UNICAMP

Prof. Dr. RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA (orientador), FEAGRI - UNICAMP

Ms. IVAN BAZO BERGAMIM (coorientador), FEAGRI - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A secagem é uma etapa crucial no processo de pós-colheita, sendo uma prática antiga. Reduzir a umidade dos produtos durante a secagem é essencial para preservar sua qualidade, aumentar a concentração de nutrientes, inibir o crescimento de microrganismos, garantir estabilidade em temperatura ambiente e facilitar o armazenamento e transporte (MUJUMDAR, 2015; AKTAS, 2017; CELESTINO, 2010).

O uso de ar quente na secagem é comum devido à simplicidade e baixo custo, mas pode prejudicar a qualidade físico-química e nutricional dos produtos (ROJAS, AUGUSTO, 2018; ANDO et al., 2019; WANG et al., 2019). Em contraste, a secagem com bomba de calor preserva as propriedades dos produtos, desumidificando o ar e secando-os a baixas temperaturas, resultando em bom desempenho e eficiência energética (GEIGER, 1996). A questão energética é crítica na secagem, com foco na redução do consumo para preservar eficiência e qualidade dos produtos, além de proteger o meio ambiente (WANG et al., 2019).

Preservar as qualidades físicas e nutricionais dos produtos é crucial para atender às demandas dos consumidores (MINEA, 2016). Contudo, a secagem requer controle para evitar impactos nos compostos bioativos, cor, textura, encolhimento e ruptura do tecido, que podem afetar as propriedades nutricionais e sensoriais do produto final (RAMALLO, MASCHERONI, 2012; DINÇER, ZAMFIRESCU, 2016). Importante desenvolver e aprimorar novas tecnologias e técnicas combinadas para melhorar a qualidade dos processos de secagem e produtos obtidos (WANG et al., 2019; ROJAS, AUGUSTO, CÁRCEL, 2020).

O pré-tratamento com etanol mostra-se efetivo ao modificar a estrutura dos produtos, alterando a espessura das paredes celulares e removendo o ar dos espaços intercelulares, resultando em mudanças na pressão de vapor. O efeito Marangoni, causado pela mistura de água com etanol, acelera a secagem por vaporização superficial da mistura (SILVA et al., 2021; ROJAS, AUGUSTO, 2018; WANG et al., 2019). Ainda existem lacunas na compreensão dos parâmetros de qualidade da secagem com imersão em etanol como pré-tratamento. É essencial investigar a influência do etanol em vários tipos de alimentos e sob diversas condições de secagem para aprimorar esse processo relevante para a indústria (CUNHA et al., 2019).

O morango, um pseudo fruto não climatérico da família Rosaceae, é rico em minerais, vitaminas e antioxidantes, incluindo ácido ascórbico e antocianinas que conferem sua pigmentação marcante. Apesar desses benefícios, é um produto altamente perecível (GIAMPIERI, 2012; SALTVEIT, 2019; LÓPEZ-ORTIZ, 2020; DA SILVA, 2007). Por essa razão, é um excelente objeto de estudo para avaliar o impacto da secagem na qualidade do produto.

Este estudo teve como objetivo investigar a influência do pré-tratamento com etanol no processo de secagem de morango, utilizando um secador com bomba de calor parcialmente fechado. Foi realizada

a avaliação da cinética de secagem em diferentes temperaturas e velocidades do ar no secador com bomba de calor, analisando a demanda de energia, eficiência e desempenho do equipamento. A eficiência do pré-tratamento em etanol, com diferentes tempos de imersão, foi avaliada em relação ao desempenho, consumo energético e qualidade do produto final. Por fim, pretende-se identificar as melhores configurações dos parâmetros operacionais do pré-tratamento e do equipamento, considerando as variáveis de desempenho do processo, consumo de energia e qualidade do produto final.

METODOLOGIA:

No início da execução do projeto, foi realizada uma adaptação no secador com bomba de calor com configuração aberta, desenvolvido por Bergamim (2021), em um secador com configuração parcialmente fechada. Essa configuração viabiliza a recirculação parcial do ar, o que possibilita a recuperação de parte da energia demandada no processo. Além disso, oferece um controle mais preciso da temperatura e umidade relativa do ar utilizado (KIANG e JON, 2015). Após a montagem e limpeza do secador, foram realizados testes preliminares para verificar o funcionamento dos componentes e orientar a pesquisadora responsável. Os testes incluíram a preparação das amostras, acompanhamento do processo de secagem, manuseio do material, métodos de análise das propriedades, determinação da umidade inicial e procedimentos de segurança.



Figura 1: Secador com bomba de calor com configuração parcialmente fechada, depois da adaptação.

Com base na literatura, nas características do produto e na metodologia de Superfície de Resposta (RSM), foi desenvolvido o planejamento experimental com as variáveis independentes: velocidade do ar, temperatura do ar e tempo de imersão em etanol. A velocidade do ar variou de 2,3 a 3,7 m/s, ajustada na saída do secador através da rotação do ventilador (36,6 a 60,2 Hz). A temperatura do ar de secagem foi definida entre 30 e 50 °C para uma abordagem mais suave em comparação com outros estudos que utilizaram faixas de temperatura mais altas (Doymaz, 2008; Akpinar e Bicer, 2006). A quantidade de experimentos foi definida utilizando o planejamento central composto rotacional (DCCR) com dois fatores, seguindo os conceitos de Neto, Scarminio e Bruns (2010). Esses experimentos foram complementados com os utilizados no planejamento fatorial. Para evitar possíveis distorções estatísticas nos resultados, os ensaios foram realizados de maneira aleatória, com a ordem de execução dos experimentos sendo sorteada.

Os morangos foram adquiridos de um mesmo fornecedor, sempre frescos e de qualidade. Após classificação, foram higienizados e cortados em fatias de 2,0 a 4,0 mm manualmente. Foram usados quatro tempos de imersão: 5 minutos, 20 minutos, 30 minutos e controle (sem imersão). As amostras foram imersas em etanol (99,5% v/v) para garantir a total submersão das fatias de morango. As amostras foram colocadas em momentos diferentes, de modo que todas fossem retiradas simultaneamente após 30 minutos de imersão. Após a imersão, as amostras foram colocadas em recipientes forrados com papel absorvente para remover o excesso de etanol. Após a imersão em etanol, as amostras foram medidas em relação à espessura, atividade de água e cor antes da secagem. Em seguida, foram colocadas em bandejas de secagem previamente pesadas, e a massa de cada bandeja com as amostras foi medida para determinar a massa inicial de cada amostra.

Após a pesagem, as bandejas foram colocadas no secador, durante o processo de secagem, as medições de perda de massa foram feitas a cada 10 minutos na primeira hora, a cada 20 minutos na segunda hora e a cada 30 minutos nas horas seguintes. Além disso, foram coletados dados de temperatura e umidade do ar em várias posições do secador, bem como a pressão do fluido refrigerante no evaporador e no condensador. Após a secagem, as amostras foram avaliadas novamente em relação à espessura, atividade de água e cor. Em seguida, foram armazenadas em sacos plásticos identificados em um refrigerador para posterior análise.

Durante o processo de secagem, a análise da Taxa de Secagem (DR) foi realizada, permitindo retratar o comportamento do decréscimo da umidade do produto ao longo do tempo. A cinética da

secagem foi avaliada utilizando o Modelo da Segunda Lei de Fick, que considera a difusão simplificada em uma placa plana infinita (infinite slab) para uma única dimensão z. O modelo de Page foi usado para avaliar a cinética da secagem. Trata-se de um modelo semi-empírico comumente aplicado ao período de taxa decrescente de secagem (PAGE, 1949).

Para analisar o morango após a secagem convectiva, medimos o teor de carotenoides e antocianinas seguindo uma metodologia modificada de Sims e Gamon (2002). A medição das antocianinas foi feita em solução ácida (1% HCl) devido à sua instabilidade em soluções neutras e básicas. Utilizamos um espectrofotômetro para determinar os valores de absorbância em diferentes comprimentos de onda (470, 537, 647 e 663 nm). As medições foram realizadas em triplicata para cada amostra dos ensaios e uma triplicata para o produto in natura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Foram apresentados os resultados parciais e uma discussão preliminar de parte do planejamento experimental. Não foi realizada a análise de diferenças estatisticamente significativas entre os ensaios, incluindo a análise estatística do DCCR, devido à necessidade de concluir e tratar todos os ensaios para uma avaliação global dos resultados.

Durante o pré-tratamento de imersão em etanol (99,5% v/v) para a secagem das amostras de morango, observou-se uma transferência de antocianinas, responsáveis pela cor avermelhada, para o etanol. Isso resultou em amostras de morango com coloração esbranquiçada após a imersão. A transferência de antocianinas aumentou proporcionalmente com o tempo de imersão, sendo mais perceptível nas amostras imersas por 20 a 30 minutos e imperceptível nas amostras imersas por apenas 5 minutos.



Figura 2: Amostra de 5 min antes da imersão.



Figura 3: Amostra de 20 min antes da imersão



Figura 4: Amostra de 30 min antes da imersão.



Figura 5: Amostra de 5 min após a imersão.



Figura 6: Amostra de 20 min após a imersão.



Figura 7: Amostra de 30 min após a imersão.

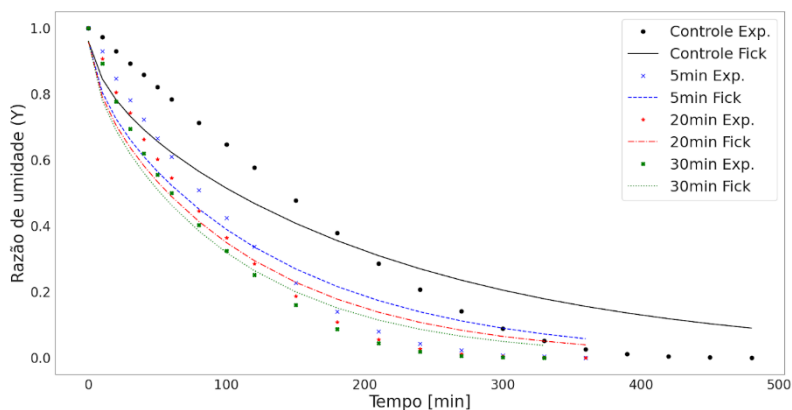


Figura 8: Razão de umidade de acordo com o Modelo da Segunda Lei de Fick no experimento 9-I.

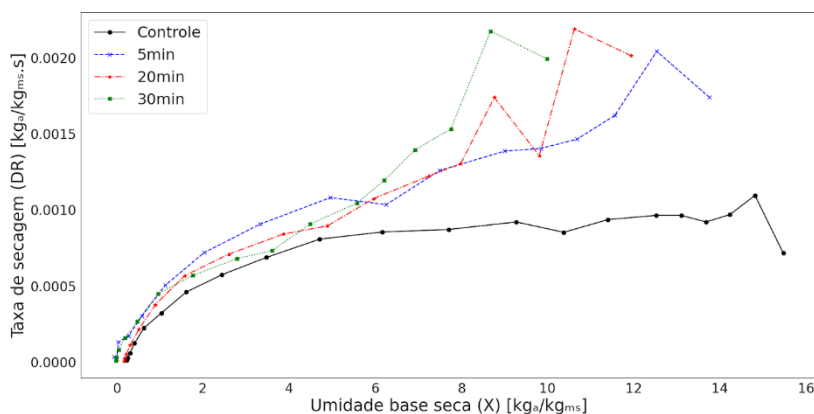


Figura 9: Taxa de secagem (DR) do experimento 9-I.

Ensaio	Amostra	D_{eff} (m ² /s)	R ²	RMSE	Chi ²	g	j	R ²	RMSE	Chi ²
1-H	Controle	5,4916E-11	0,8893	0,1203	0,0151	0,0003	1,4704	0,9962	0,0224	0,0005
	5 min	8,0771E-11	0,9347	0,0892	0,0083	0,0021	1,2236	0,9953	0,0239	0,0006
	20 min	9,2197E-11	0,9632	0,0643	0,0043	0,0052	1,0741	0,9954	0,0227	0,0006
	30 min	9,9373E-11	0,9725	0,0538	0,0030	0,0083	1,0041	0,9941	0,0249	0,0007
3-F	Controle	1,1842E-10	0,8874	0,1206	0,0016	0,0010	1,4616	0,9956	0,0239	0,0007
	5 min	1,5001E-10	0,9344	0,8874	0,0084	0,0036	1,2646	0,9956	0,0230	0,0006
	20 min	1,3334E-10	0,9494	0,7482	0,0060	0,0062	1,1636	0,9949	0,0237	0,0007
6-E	Controle	1,1777E-10	0,8964	0,1196	0,0151	0,0008	1,4827	0,9980	0,0168	0,0003
	5 min	1,7140E-10	0,9367	0,0870	0,0081	0,0041	1,2901	0,9974	0,0177	0,0004
	20 min	2,3492E-10	0,9585	0,0678	0,0049	0,0079	1,1610	0,9980	0,0148	0,0003
	30 min	1,8840E-10	0,9715	0,0548	0,0032	0,0123	1,0827	0,9984	0,0129	0,0002
7-G	Controle	4,0085E-11	0,8947	0,1181	0,0147	0,0008	1,4356	0,9974	0,0184	0,0004
	5 min	1,1638E-10	0,9411	0,0831	0,0074	0,0043	1,2269	0,9947	0,0249	0,0007
	20 min	1,2506E-10	0,9631	0,0633	0,0043	0,0084	1,0958	0,9961	0,0207	0,0005
	30 min	1,2311E-10	0,9682	0,0580	0,0036	0,0099	1,0558	0,9956	0,0215	0,0005
9-I	Controle	6,3744E-11	0,8966	0,1187	0,0148	0,0006	1,4480	0,9964	0,0222	0,0005
	5 min	1,1100E-10	0,9401	0,0848	0,0076	0,0035	1,2143	0,9971	0,0187	0,0004
	20 min	1,2387E-10	0,9591	0,0683	0,0049	0,0063	1,1202	0,9970	0,0184	0,0004
	30 min	1,2695E-10	0,9688	0,0579	0,0036	0,0094	1,0556	0,9969	0,0182	0,0004

Tabela 1: Valores de difusividade efetiva (D_{eff}) e das constantes de Page (g; j) dos ensaios de secagem de morango.

Ensaio	Amostra	Antocianinas (mg/100gsec)	\pm	σ	Carotenoides (mg/100gsec)	\pm	σ
1-H	Controle	11,2184	\pm	0,4167	0,5728	\pm	0,0175
	5 min	6,6186	\pm	1,4456	0,5728	\pm	6,1553
	20 min	4,4435	\pm	0,6224	0,8406	\pm	0,0667
	30 min	5,1834	\pm	0,2755	0,7385	\pm	0,0564
3-F	Controle	15,9142	\pm	0,3695	0,6735	\pm	0,0245
	5 min	10,2297	\pm	0,4093	0,7595	\pm	0,0486
	20 min	9,0905	\pm	0,4096	0,7303	\pm	0,0262
	30 min	4,1679	\pm	0,5305	0,6608	\pm	0,1990
6-E	Controle	12,0657	\pm	0,8596	0,5218	\pm	0,0311
	5 min	8,7921	\pm	0,7564	0,6422	\pm	0,0308
	20 min	11,0905	\pm	0,8024	0,6270	\pm	0,0229
	30 min	9,3250	\pm	0,2159	0,5581	\pm	0,0067
7-G	Controle	9,0376	\pm	0,4873	0,6305	\pm	0,0329
	5 min	9,9227	\pm	0,2928	0,5958	\pm	0,0347
	20 min	17,2173	\pm	0,2063	0,8529	\pm	0,0179
	30 min	5,8483	\pm	0,1208	0,7913	\pm	0,0189
9-I	Controle	12,8562	\pm	0,5861	1,1340	\pm	0,0720
	5 min	6,4336	\pm	0,9886	0,7773	\pm	0,0898
	20 min	6,9434	\pm	0,3202	0,6627	\pm	0,0099
	30 min	10,8031	\pm	3,1290	1,1134	\pm	0,2673

Tabela 2: Conteúdos de antocianinas e carotenoides de morangos secos.

CONCLUSÕES:

Com base nos resultados preliminares dos experimentos realizados até o momento, observou-se que a imersão em etanol influencia na diminuição do tempo de secagem com aumento nas taxas de secagem. No entanto, não foi possível estabelecer uma relação proporcional entre o tempo de imersão e o tempo de processo. Isso sugere que o tempo de imersão pode não ter influência direta na diminuição do tempo de secagem.

BIBLIOGRAFIA

- AKTAŞ, M. et al. Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 132, p. 327-338, 2017.
- ANDO, Yasumasa et al. Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment. **Lwt**, v. 100, p. 294-299, 2019.
- BERGAMIM, I. B. **Desempenho da secagem de morango em um secador com bomba de calor**. Dissertação de mestrado. 142 p. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola (Universidade Estadual de Campinas). 2021.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Embrapa Cerrados-documentos (infoteca-e), 2010.
- DINÇER, İ.; ZAMFIRESCU, C. **Drying Phenomena Theory and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
- DOYMAZ, I. Convective drying kinetics of strawberry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 5, p. 914-919, 2008.
- GEIGER, E. O. Statistical Methods For Fermentation Optimization. **Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design and Equipment: Second Edition**, p. 161–180, 1996.
- GIAMPIERI, F. et al. The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. **Nutrition**, v. 28, n. 1, pág. 9-19, 2012.
- KIANG, C. S.; JON, C. K. Heat Pump Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. p. 1101–1126.
- LÓPEZ-ORTIZ, A. et al. Understanding the drying kinetics of phenolic compounds in strawberries: An experimental and density functional theory study. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 60, n. December 2019, p. 102283, 2020.
- MINEA, V. Advances in Industrial Heat Pump Technologies and Applications. In: MINEA, V. (Ed.). **Advances in Heat Pump-Assisted Drying Technology**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. p. 1–116.
- MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. p. 3–29.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos-: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Bookman Editora, 2010.
- RAMALLO, L. A.; MASCHERONI, R. H. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 2, pág. 275-283, 2012.
- ROJAS, Meliza Lindsay; AUGUSTO, Pedro ED. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. **Journal of food engineering**, v. 233, p. 17-27, 2018.
- ROJAS, Meliza Lindsay; AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 61, p. 102328, 2020.
- SALTVEIT, M. E. Respiratory Metabolism. In: YAHIA, E. M.; CARRILLO LÓPEZ, A. (Eds.). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**. [s.l.] Woodhead, 2019. p. 73–92.
- SILVA, M. A.; BRAGA, A. M. P.; SANTOS, P. H. S. Enhancement of fruit drying: the ethanol effect. In: **18th International Drying Symposium, Xiamen**. 2012. p. 11-15.
- SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2–3, p. 337–354, 2002.
- WANG, Xule et al. Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion (*Allium fistulosum*). **Food Chemistry**, v. 295, p. 432-440, 2019.