



Análise da utilização de diferentes modelos de secadores solares na secagem de frutas e hortaliças e modelagem matemática do processo de secagem solar de abacaxi: um estudo comparativo

Analysis of the use of different models of solar dryers in drying fruits and vegetables and mathematical modeling of the pineapple solar drying process: a comparative study

Julia Souza Santos¹, Camila Nicola Boeri Di Domenico²

RESUMO

A secagem solar como forma de conservação de alimentos é uma das técnicas mais antigas utilizadas, pois o homem se viu na necessidade de proteger seus alimentos da deterioração expondo-os ao sol. Na cultura atual, a alternativa para esses problemas é a utilização de secadores solares, que são equipamentos simples e de baixo custo tecnológico, pois os secadores convencionais exigem maior custo devido à necessidade de energia elétrica. Neste sentido, esta pesquisa se propõe a explicar o comportamento de diferentes frutas e hortaliças após serem secas em diferentes secadores solares e realizar a modelagem matemática dos dados de secagem solar de abacaxi, com dados experimentais obtidos de estudos prévios publicados em fontes científicas confiáveis. Os modelos matemáticos desempenham um papel importante porque ajudam a descrever o processo de secagem se comportará sob diferentes condições ambientais e de projeto, foram avaliados os modelos de Henderson e Pabis e o Wang e Sing, sendo analisados através do coeficiente de determinação, erro médio relativo e estimado, com o modelo de Wang e Sing apresentando R^2 de 0,9977 e o modelo de Henderson e Pabis R^2 de 0,9161, selecionando assim o modelo que melhor representa o processo de secagem solar do abacaxi.

PALAVRAS-CHAVE: Frutas; Energia Solar; Simulação.

ABSTRACT

Solar drying as a form of food preservation is one of the oldest techniques used, as man found it necessary to protect his food from deterioration by exposing it to the sun. In current culture, the alternative to these problems is the use of solar dryers, which are simple equipment with low technological cost, as conventional dryers require higher costs due to the need for electrical energy. In this sense, this research aims to explain the behavior of different fruits and vegetables after being dried in different solar dryers and carry out mathematical modeling of pineapple solar drying data, with experimental data obtained from previous studies published in reliable scientific sources. Mathematical models play an important role because they help to describe how the drying process will behave under different environmental and design conditions. The Henderson and Pabis and Wang and Sing models were evaluated, being analyzed through the coefficient of determination, mean relative error and estimated, with the Wang and Sing model presenting an R^2 of 0.9977 and the Henderson and Pabis model R^2 of 0.9161, thus selecting the model that best represents the pineapple solar drying process.

KEYWORDS: Fruits; Solar energy; Simulation.

¹ Bolsista do(a) Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil, E-mail: juliasantos.2019@alunos.utf.edu.br. ID Lattes: 9539208660038382.

² Docente no Departamento Acadêmico de Física, Estatística e Matemática. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: camiladomenico@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7124531112711495.



INTRODUÇÃO

A energia solar é gerada a partir da radiação emitida pelo sol e transformada em fonte de energia, ela vem sendo usada desde a antiguidade e está presente em sua evolução. A utilização da energia solar se faz presente a partir do momento em que o homem se viu na necessidade de proteger seu único alimento de se deteriorar, já que estavam em contato diário com parasitas, a opção a ser seguida era a secagem de alimentos expondo-os em direção ao sol. Na civilização atual, a alternativa a estes problemas é a utilização de secadores solares, que são equipamentos simples e de baixo custo tecnológico (SALEH; BADRAN, 2009) já que os secadores convencionais demandam mais custos pela sua necessidade de energia elétrica.

Neste sentido, este trabalho se propõe a responder como diferentes frutas e hortaliças se comportam após serem secas em diferentes secadores solares e analisar diferentes modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem de dados experimentais da secagem solar do abacaxi. Segundo Benali e Amazouz (2006) os alimentos são termossensíveis, então quando expostos ao calor elevado podem ser danificados, fazendo com que as características deles na secagem seja diferente para cada tipo de alimento. Utilizar o alimento em sua totalidade significa mais do que economia: significa usar os recursos disponíveis sem desperdício, reciclar, respeitar a natureza e alimentar-se bem (PASSOS, 2012).

Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência de diferentes modelos de secadores solar e com isso descobrir quais frutas ou hortaliças se encaixaram melhor nesse método e por meio da modelagem matemática, otimizar o processo de secagem solar e descrever quantitativamente as mudanças de massa e teor de umidade do abacaxi durante o processo de secagem solar. A importância desta pesquisa é dada pela ajuda à população local contribuindo com a economia, já que gera um subproduto com menos perecibilidade e maior possibilidade de venda.

METODOLOGIA

Como critérios de escolha dos referenciais, foram utilizados nesta revisão trabalhos de conclusão de curso, artigos de congressos e artigos publicados em periódicos indexados. Esta busca de artigos para a revisão de literatura aconteceu no decorrer de três meses. No primeiro mês, realizou-se a verificação do referencial teórico; no segundo mês, a revisão da literatura; no terceiro mês, a elaboração de tabelas e a compilação de material. A pesquisa foi realizada de modo que ela permanecesse qualitativa, sendo uma revisão de literatura comparativa, a escolha por esse método foi para que pudesse ser baseada em dados já existentes em pesquisas bibliográficas, considerando os aspectos relevantes levantados pelos seus respectivos autores, e poder ser feita a comparação de material para obtenção de um resultado

Os dados experimentais foram retirados do artigo de Gomes (2015) e comparados com modelos matemáticos citados no artigo de Silva (2022) e Machado (2020), os testes foram feitos no período da primavera e verão de 2014 na Paraíba apresentando cinco testes onde apenas o primeiro foi escolhido para essa observação já que atingiu a menor umidade em 1200 minutos.



Para a análise dos dados de secagem solar do abacaxi, foram utilizados os modelos matemáticos semiempíricos de secagem de Wang e Sing (1978), descrito pela Eq (1) e Henderson e Pabis (1961), mostrado na Eq (2):

$$RU = 1 + a \times t + b \times t^2 \quad (1)$$

$$RU = a \times e^{-k \times t} \quad (2)$$

em que RU é a razão de umidade, adimensional; t é o tempo de secagem, h; k é constante de secagem, h⁻¹; a, b são coeficientes dos modelos.

Os valores de RU e t, utilizados nos ajustes, foram obtidos no próprio artigo através dos dados experimentais.

O ajuste dos modelos foi feito a partir de regressão não linear utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt com o auxílio do software Statistica 7 (2004) e as análises estatísticas que foram utilizadas para validar e classificar os melhores modelos foram feitas baseadas no artigo de Gomes (2015), através do coeficiente de determinação (R²) para avaliar o desempenho dos modelos na representação do comportamento da secagem do abacaxi, a magnitude do erro médio relativo (P), Eq (3) e do erro médio estimado (SE), apresentado na Eq (4).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (3)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (4)$$

onde, Y é valor observado experimentalmente; \hat{Y} é o valor calculado pelo modelo; n o número de observações experimentais, e GLR os graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a filtragem dos autores e dos temas, sendo eles em sua maioria com testes feitos em frutas com a utilização de um secador solar. Com base nos dados coletados dos artigos analisados, pode-se perceber a semelhança entre algumas frutas, frutos, hortaliças e legumes, principalmente por sua umidade, duas comparações foram feitas conforme destacado a seguir.

Analisando-se os estudos envolvendo o abacaxi, tanto o citado por Gomes (2015) quanto o citado por Dantas (2019), e o morango, citado por Basílio (2016), por conta das suas semelhanças na alta umidade inicial, são frutas com alta concentração de água. Fazendo uma média entre os dois artigos do abacaxi, tem-se uma umidade inicial média de $\pm 85,8\%$ e utilizando a umidade inicial média do morango, também levando em conta que não se tem a mesma informação de 4 horas para todos os tipos de secadores, pode-se notar a maior eficiência do secador solar de isopor de Dantas (2019), mesmo com o secador híbrido solar-elétrico de Basílio (2016) reduzindo 75,37% em 7 horas, já que em 4 horas o secador de madeira de Dantas (2019) e o sistema de secagem de baixo custo de Gomes (2015) diminuíram cerca de 6% enquanto o secador solar de isopor de Dantas (2019) diminuiu cerca 41% em 70% do tempo total, 4 horas. A eficiência do secador híbrido solar-elétrico de Basílio (2016) se dá justamente por conta dessa hibridade, que gera maior



controle de temperatura pela utilização da energia elétrica e maior custo, já o secador solar de isopor de Dantas (2019) é por conta do seu melhor isolamento térmico em relação aos outros materiais utilizados e com a variação de temperatura menor, na faixa de 40°C a 60°C.

Já a banana, a batata-doce e a beterraba, estão entre os alimentos mais importantes para a humanidade (Hymowitz, 1970), assim foi feita a análise do processo de secagem destes produtos. Foi feita uma média da umidade inicial das bananas citadas por Ricci (2012), Silva (2022) e Lima (2019), das batatas-doces de Rodrigues (2021) e Lima (2019) e a beterraba de Lima (2019), já que foram encontradas similaridades entre elas, obtendo-se $\pm 72,3\%$ para a banana e $\pm 69,75$ para a batata-doce e mantendo 86% para a beterraba. O método de secagem mais eficiente para a banana foi o secador solar de baixo custo de Lima (2019), que reduziu 55,5% em 12 horas, tendo sua eficiência reforçada pela análise da beterraba que reduziu cerca de 85% da sua umidade em 10 horas, enquanto o menos eficiente foi o secador solar feito de tábuas citado por Ricci (2012) que precisou de três vezes o tempo para reduzir 47,3%, já para a batata-doce, a maior eficiência ficou para o protótipo de secador solar com coletor solar de Rodrigues (2021) que reduzindo 69,75% em 5 horas enquanto o de baixo custo de Lima (2019) reduziu 56,65% no dobro de tempo. A maior eficiência do secador de baixo custo de Lima (2019) se dá por ser um secador construído de aço, que atua como bom condutor de calor, e ter um processo de secagem com exposição direta, e o do protótipo de secador com coletor solar de Rodrigues (2021) se dá por conta do seu comportamento de temperatura na câmara e do coletor em função da temperatura ambiente durante o dia.

Na modelagem, observando a etapa de ajustes dos modelos, que foi feita a partir de regressão não linear utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt com o auxílio do software Statistica 7 (2004), obteve-se os coeficientes de determinação, os erros médios relativos e o estimado mostrados na Tabela 1. É possível comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados de Gomes (2015), em que o autor utilizou o modelo de Page e o de Lewis, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 1 – Coeficiente de determinação R^2 , Erros médio relativo (P) e estimado (SE), para os modelos testados na secagem do abacaxi

Modelo	R^2 (%)	P (%)	SE (decimal)
Wang e Sing	99,77	1,11	0,00670
Henderson e Pabis	91,61	8,53	0,21

Fonte: Autoria Própria (2023).

Com base nos estudos de Mohapatra (2005), um bom ajuste de modelo deve apresentar o erro médio relativo (P) inferior a 10 %, com isso acabamos notando a maior efetividade do modelo Wang e Sing, mas em geral, as amostras tiveram um bom erro médio relativo (P) e estimado (SE).

As análises do coeficiente de determinação (R^2) da Tabela 1 e Tabela 2 atingiram valores relativamente bons, principalmente os modelos Wang e Sing e Page que ficaram muito próximos de 1 comparando os coeficientes encontrados no trabalho de Gomes (2015) e os encontrados na análise do modelo.



Tabela 2 – Coeficiente de determinação dos modelos usados por Gomes (2015)

Modelo	R ² (%)
Lewis	98,22
Page	99,65

Fonte: Autoria Própria (2023).

O modelo de Wang e Sing foi escolhido por conter apenas uma variável independente e a de Henderson e Pabis com duas variáveis e a presença de um exponencial. O primeiro modelo pôde explicar melhor os dados em uma análise de secagem de berinjela, fruto com alta umidade assim como o abacaxi, feita por Silva (2022), já o segundo foi escolhido por ser uma modificação da equação de Fick muito utilizada na engenharia de secagem de materiais sólidos em processos de secagem em estufas e secadores, o modelo de Wang e Sing foi o que mais apresentou o maior ajuste satisfatório, já o de Henderson e Pabis apresentou o coeficiente de determinação mais baixo e o erro médio estimado muito alto, fazendo com que o erro médio relativo fique acima do valor de referência.

CONCLUSÃO

As diferentes frutas e hortaliças se comportam de formas particulares assim que são expostas a radiação que atinge os diferentes tipos de secadores, o modo que foi mais efetivo foi utilizando o secador solar de isopor de Dantas (2019) e o de baixo custo de Lima (2019), sendo o de isopor mais efetivo em relação ao tempo e sendo testado nas frutas com maior porcentagem de umidade inicial, respondendo então a hipótese do comportamento das frutas sendo secas por meio da energia solar e a alteração do tempo de exposição ao calor para cada espécie.

Os resultados desta análise foram satisfatórios, já que foi possível ver a eficiência de diferentes modelos de secadores solar. A modelagem matemática dos dados de secagem solar de abacaxi é uma ferramenta valiosa para a indústria alimentícia, permitindo a previsão e otimização do processo de secagem. A aplicação de diferentes modelos matemáticos permite selecionar aquele que melhor descreve o comportamento do abacaxi durante o processo de secagem solar. Assim, com base nas modelagens realizadas percebe-se que o modelo de Wang e Sing apresenta resultados mais satisfatórios com base nas análises de coeficiente de determinação e erro médio.

O modelo de Wang e Sing apresentou coeficiente de determinação de 0,9977 e erro médio de 1,11% sendo bem satisfatório visto que os valores de referência são 1 e 10%, mesmo com o coeficiente menos, não tão preciso o modelo de Henderson e Pabis se manteve dentro do aceitável de 0,9161 e erro de 8,53% ainda sim permanecendo dentro dos parâmetros. É possível afirmar que a modelagem matemática contribui para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis de conservação de alimentos e mostra dados promissores para futuros trabalhos, com posterior aplicação na elaboração e/ou preparo de produtos alimentícios.

Desse modo, concluiu-se que a eficiência da secagem depende muito do modo com que o secador solar foi construído. A maioria dos secadores solares que foram abordados na análise foram feitos a partir de materiais reciclados utilizando apenas informações de transferência de calor e isolamento térmico.



Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BASÍLIO, Emiliana Pereira; CHARBEL, Andrea Lúcia Teixeira; FERREIRA, André Guimarães. Avaliação da secagem de morangos em estufa e em secador híbrido solar-elétrico. **Revista Acadêmica Conecta FASF**, v. 1, n. 1, 2016.
- BENALI, M.; AMAZOUZ, M. Drying of vegetable starch solutions on inert particles: Quality and energy aspects. **Journal of Food Engineering**, v. 74, n. 4, p. 484–489, jun. 2006.
- DANTAS, Alessandra Raquel et al. Construção e utilização de secadores solares para avaliação de desempenho na desidratação de frutas tropicais. 2019.
- GOMES, Ítalo de Andrade et al. Desenvolvimento experimental de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético. 2015
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.
- HYMOWITZ, T. On the Domestication of the Soybean. **Economic Botany**, v. 24, n. 4, p. 408–421, 1970.
- LIMA, Rodrigo Azevedo de. Estudo de um secador solar de baixo custo para desidratação de alimentos. 2019. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MACHADO, Henrique G, Di Domenico, Camila N. B et al. Modelagem matemática dos dados de secagem solar da jabuticaba, **XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, 2020
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering, London**, v.66, n.4, p.513-18, 2005.
- PASSOS, B. D. C. **Aproveitamento Integral dos Alimentos**. Disponível em: <<https://nutricionistasjc.wordpress.com/2012/04/16/aproveitamento-integral-dos-alimentos-2/>>. Acesso em: 23 maio. 2023.
- RICCI, Mayara Rohenkohl; DE FREITAS BATTISTI, Juliane; SCHMIDT, Carla Adriana Pizzarro. 12-Secador solar: Processo de desidratação de frutas com diferentes tratamentos osmóticos. **Cadernos de agroecologia**, v. 7, n. 1, 2012.
- RODRIGUES, Jocielys Jovelino et al. Análise cinética de secagem solar em amostras de batata doce / Kinetics of sweet potatoes samples in a solar dryer. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 43122–43130, 29 abr. 2021.
- SALEH, A.; BADRAN, I. Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer. **Renewable Energy**, v. 34, n. 10, p. 2239–2245, out. 2009.
- SILVA, Michel Barros. Avaliação de um secador solar em diferentes condições climáticas e meteorológicas. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 1, p. e15411124405, 4 jan. 2022.
- STATSOFT, Inc. (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. **www.statsoft.com**
- WANG, C.Y.; SING, R.P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **ASAE Paper**, p. 78-6505, 1978.