

MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS NA MODELAGEM DE DADOS DE SECAGEM

Iara Maria Souza Medeiros
Damilson Ferreira dos Santos

Resumo: A secagem solar de frutas é uma tecnologia sustentável e renovável que tem como maior finalidade uma melhor conservação das frutas, reduzindo seu peso e facilitando o transporte para outras regiões (PARK, MORENO e BROD, 2001). O presente trabalho tem como objetivo principal estudar, por meio de processo de secagem do futo da goiaba, o ajuste dos modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais. Foram utilizados cinco modelos semi-empíricos, Dois termos (1980), Henderson & Pabis (2006), Logarítmico (2001), Page (1977) e o do Midilli (2006), para a representação dos dados experimentais, adotando-se como critérios de seleção o erro, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM). De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que os modelos de Midilli (2006) e o de Dois termos (1980) foram os que mais se adequam ao comportamento da curva de secagem dos dados experimentais para o secador de isopor. Para o secador de madeira, não foi verificado uma boa correlação dos modelos com os dados experimentais.

Palavras-chave: Curvas de secagem. Goiaba. Modelagem matemática.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de frutas do mundo. Possui uma notável biodiversidade com uma das mais ricas floras do planeta, sendo a goiabeira (*Psidium guajava* L.) um dos destaques de sua produção.

Por apresentar um intenso metabolismo, aumentando sua respiração e produção de etileno durante o amadurecimento (ALI e LAZAN, 2001; QUEIROZ et al., 2010), limitando seu período de comercialização. Técnicas de conservação são necessárias para aumentar a vida útil desse futo.

A fruta é consumida, principalmente, industrializada na produção de guatchup (catchup de goiaba), apresentando menos calorias e um alto valor nutricional em relação ao tomate. Tem origem na América tropical, mas seu consumo interno ainda é pequeno, mesmo a goiabada consistindo em um dos doces mais admirados pelos brasileiros (SEBRAE, 2016). A mesma é encontrada desde o México até São Paulo e é frequentemente cultivada, por ser uma fruta considerada agradável.

A fruta é uma baga, que consiste em um pericarpo e uma polpa com numerosas pequenas sementes (Escrig et al., 2001). Possui quantidade regular de ácidos, açúcares e pectinas. Seus principais constituintes são taninos, flavonóides, óleos essenciais, álcoois sesquiterpenóides e ácidos triterpenóides.

A secagem de produtos agrícolas é amplamente utilizada no mundo, para controle e manutenção de qualidade, sendo a operação unitária mais empregada na conservação de alimentos (RIBAS et al., 2000), reduzindo o teor de água, simultaneamente, a redução do volume.

Por conseguinte, o presente trabalho tem como objetivo geral, testar a aplicabilidade de cinco modelos matemáticos semiempíricos, para uma predição da melhor curva experimental de secagem da goiaba.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem matemática (Tabela 1) de Dois termos et al. (1980), Henderson & Pabis et al. (2006), Logarítmico et al. (2001), Page (1977) e o do Midilli (2006) foram ajustados aos dados experimentais de secagem da goiaba com o auxílio do software Scilab-6.0.2 que permite a criação de escriptes que automatizam o cálculo dos parâmetros, usando o algoritmo de otimização, do modelo quase-newton para plotagem dos dados.

Tabela 1 - Modelos matemáticos de regressão não linear, utilizados para prever o fenômeno de secagem da goiaba

Nome do modelo	Equação do modelo	Referências
Midilli	$MR = \alpha \exp(-k(t^n) + bt)$	Sacilik and Elicin (2006)
Dois Termos	$MR = \alpha \exp(-kt) + (1 - \alpha) \exp(-k_1 \alpha t)$	Sharaf-Elden et al. (1980)
Henderson & Pabis	$MR = \alpha \exp(-kt)$	Akpınar et al. (2006)
Logarítmico	$MR = \alpha \exp(-kt) + c$	Yaldiz et al. (2001)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Agrawal and Singh (1977)

Para melhor determinação dos modelos matemáticos, foram utilizados como parâmetros o coeficiente de determinação (R^2), o erro e o desvio quadrático médio (DQM), tendo em cada tipo de curva a representação dos processos que melhor se ajustaram aos dados experimentais.

2.1 Obtenção da matéria-prima

A goiaba vermelha que passou pelos dois secadores, foi adquirida em um comércio local da cidade de Angicos, Rio Grande do Norte. Inicialmente, elas foram selecionadas manualmente, observando-se critérios de uniformidade, integridade física e estado de maturação ideal para o consumo. Por conseguinte, foram lavadas e cortadas, procurando-se manter um padrão de corte para cada secagem.

2.2 Construção dos secadores

O secador solar de isopor foi construído aproveitando uma estrutura utilizada na embalagem de um equipamento eletrônico. Se utilizou para a tampa, um vidro comum de cor âmbar fazendo a coleta da radiação solar. Suas telas de secagem também são constituídas de aço inoxidável e removíveis. A pesagem, para se acompanhar a perda de massa evaporada em função do tempo, é facilitada pela tampa ser removível. Em toda sua base interna continha uma parte espelhada em papel alumínio e suas paredes internas e externas pintadas na cor preta. As aberturas de entrada e saída para a circulação de ar, continham da mesma forma, telas protetoras.

Já o secador de madeira foi construído em forma de caixa, usou-se como tampa um vidro temperado que desempenha a função de coletor da radiação solar. As telas de secagem, bem como as calhas, foram confeccionadas em aço inoxidável, o que permite uma adequada higienização. Tanto as calhas como as telas são removíveis, para facilitar na pesagem a metodologia é a mesma aplicada ao secador de madeira. O mesmo possui entrada e saída de ar, para evitar que o ar aquecido no interior condense sobre as amostras. Essas aberturas são fechadas com telas para evitar a entrada de insetos. Na base interna foi colocado uma folha de EVA preta e suas laterais internas e externas pintadas na mesma cor. A cor escura contribui para o aumento da temperatura no equipamento.

2.3 Secagem solar

A secagem solar foi efetuada em horários de maior incidência solar. Amostras da goiaba vermelha foram colocadas em calhas removíveis, com o intuito de acompanhar a perda de massa das frutas e construir as curvas de secagem para cada uma delas. As calhas foram retiradas a cada 10 minutos e pesadas, em balança analítica (SHIMADZU, modelo AY220) com precisão de 0,0001, até a obtenção de peso constante.

As temperaturas do ar de secagem de ambos secadores solar, foram medidas a cada 10 minutos com o auxílio de termopares tipo K e multímetros digitais que transmitiam os dados para o computador (MINIPA, modelo ET-2587). O secador de isopor teve uma variação de temperatura um pouco menor em relação ao de madeira, variando de 40°C a 60°C. Já o secador solar de madeira variou sua temperatura de 40°C a 80,4°C.

3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 2 e 3 são constituídas de um resumo dos ajustes dos modelos matemáticos da secagem solar de isopor e madeira, adotados neste trabalho científico. Apresenta-se, nas referidas Tabelas, os parâmetros estatísticos, seus erros, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios quadráticos médios (DQM) referentes a cada modelo.

3.1 Secador solar de isopor

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos, erro, coeficiente de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) dos modelos de secagem da goiaba no secador solar de isopor

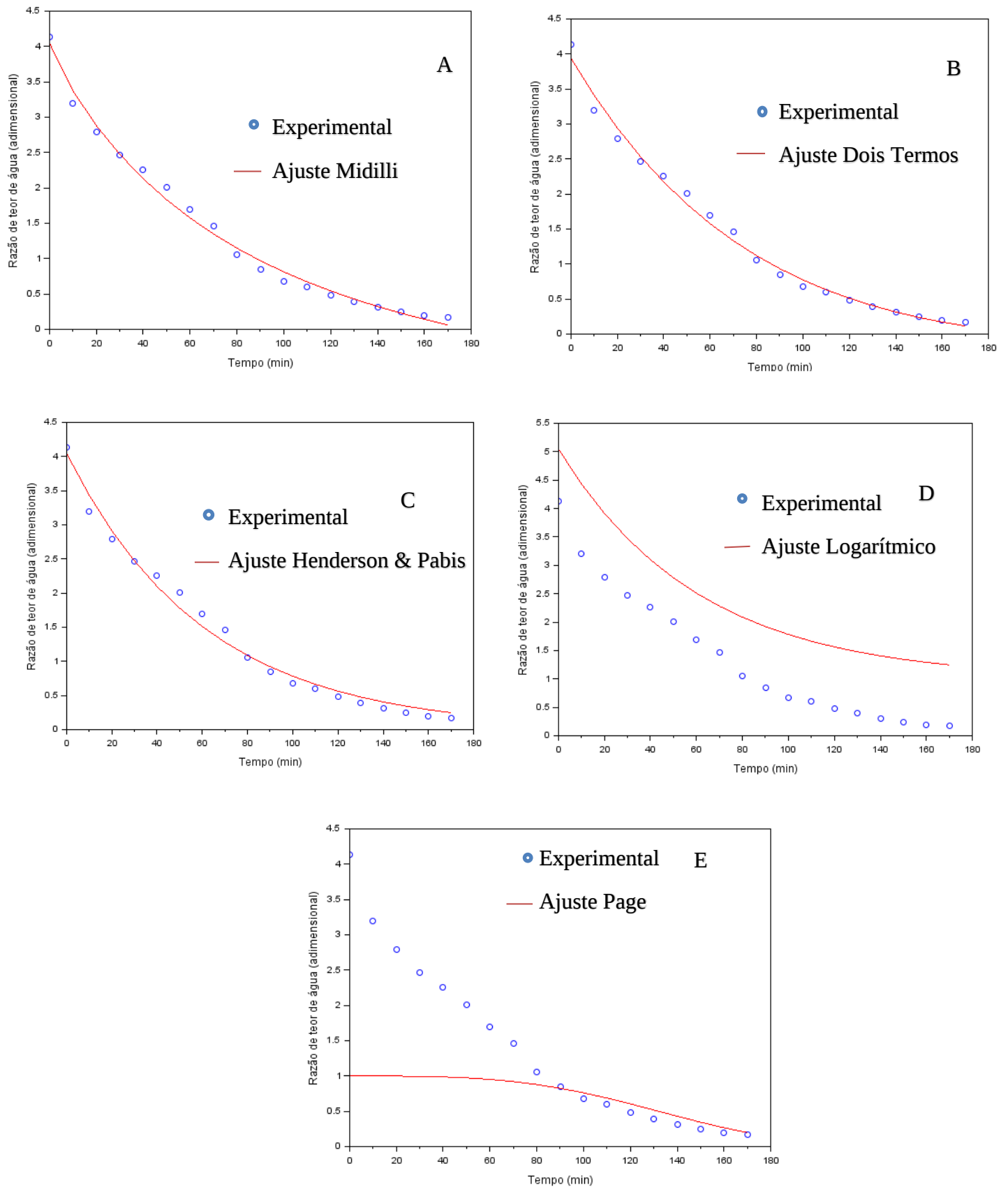
Modelo		a	a1	b	c	K	k1	n	Erro	$R^2(\%)$	DQM
Midilli Dois Termos Henderson & Pabis Logarítmico Page		4,05	-	-0,002	-	0,02	-	0,89	0,18	0,991	0,010
		22,2	-18,3	-	-	0,01	0,00	-	7	0,992	
		4,05	-	-	-	0,02	9	-	0,19	0,849	
		4,05	-	-	1	0,016	-	-	7	1,728	
		-	-	-	-	5,2D-08	-	3,36	0,29	0,370	
									2		
									0,29		
									2		
									1,31		
									8		

Fonte: Autoria própria (2021)

Com todos os modelos avaliados, conforme os resultados obtidos a partir dos erros, o modelo de Midilli (2006) seguido pelo modelo de Dois termos (1980), foram os que melhor representaram os dados experimentais do processo de secagem da fruta da goiaba, no secador solar de isopor. Essa predominância de ambas equações é justificável por apresentarem o maior número de parâmetros.

Na Figuras 1 está apresentada as curvas de secagem da goiaba com o ajuste pelos modelos de Midilli (2006) - (A), Dois Termos (1980) – (B), Henderson & Pabis (2006) – (C), Logarítmico (2001) – (D) e Page (1977) – (E), nesta ordem.

Figura 1 - Secagem da goiaba no secador solar de isopor (SSIG)



É notório que as curvas geradas a partir da Figura 1 (A, B e C) aproximam-se bem dos pontos experimentais. Entretanto, a curva obtida por intermédio da equação de Midilli (2002) (Figura 1 –A), foi a que melhor se ajustou aos dados. Isso pode ser constatado tanto visualmente como por meio do valor do erro mais baixo, pelo alto valor do coeficiente de determinação (R^2) e do baixo valor do desvio quadrático médio que o modelo auferiu. Isso pode ser explicado devido aos parâmetros destas equações sofrerem uma elevada tendência quando há aumento da temperatura do ar de secagem (Barros et. al. 2020). As curvas geradas pela correlação dos modelos de Dois Termos (1980) – (Figura 1 B), Henderson & Pabis (2006) – (Figura 1 C), apesar de apresentarem erros e Desvios Quadrados Médios (DQM) um pouco maiores, estas poderiam ser consideradas ainda como boa validação pois não diferem de maneira tão acentuada quando comparados com o modelo de Midilli (2006).

A partir da análise das últimas três figuras apresentados e dos dados fornecidos pela Tabela 1 o modelo de Henderson & Pabis (2006) se destaca. Apresentando melhor coeficiente de determinação (R^2), menor desvio quadrático médio (DQM) e menor erro, superando assim os modelos de Logarítmico (2001) e Page (1977). Contudo, apenas um parâmetro de análise estatística (R^2) não é suficiente para validar os dados experimentais. Faz-se necessário a combinação com outro parâmetro para que possa ser considerado como válido o tratamento matemático empregado. Para isso, deve sempre ser considerado o maior valor de R^2 e o menor Desvio Quadrado Médio (Barros et.al. 2020).

3.2 Secador solar de madeira

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos, erro, coeficiente de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) dos modelos de secagem da goiaba no secador solar de madeira

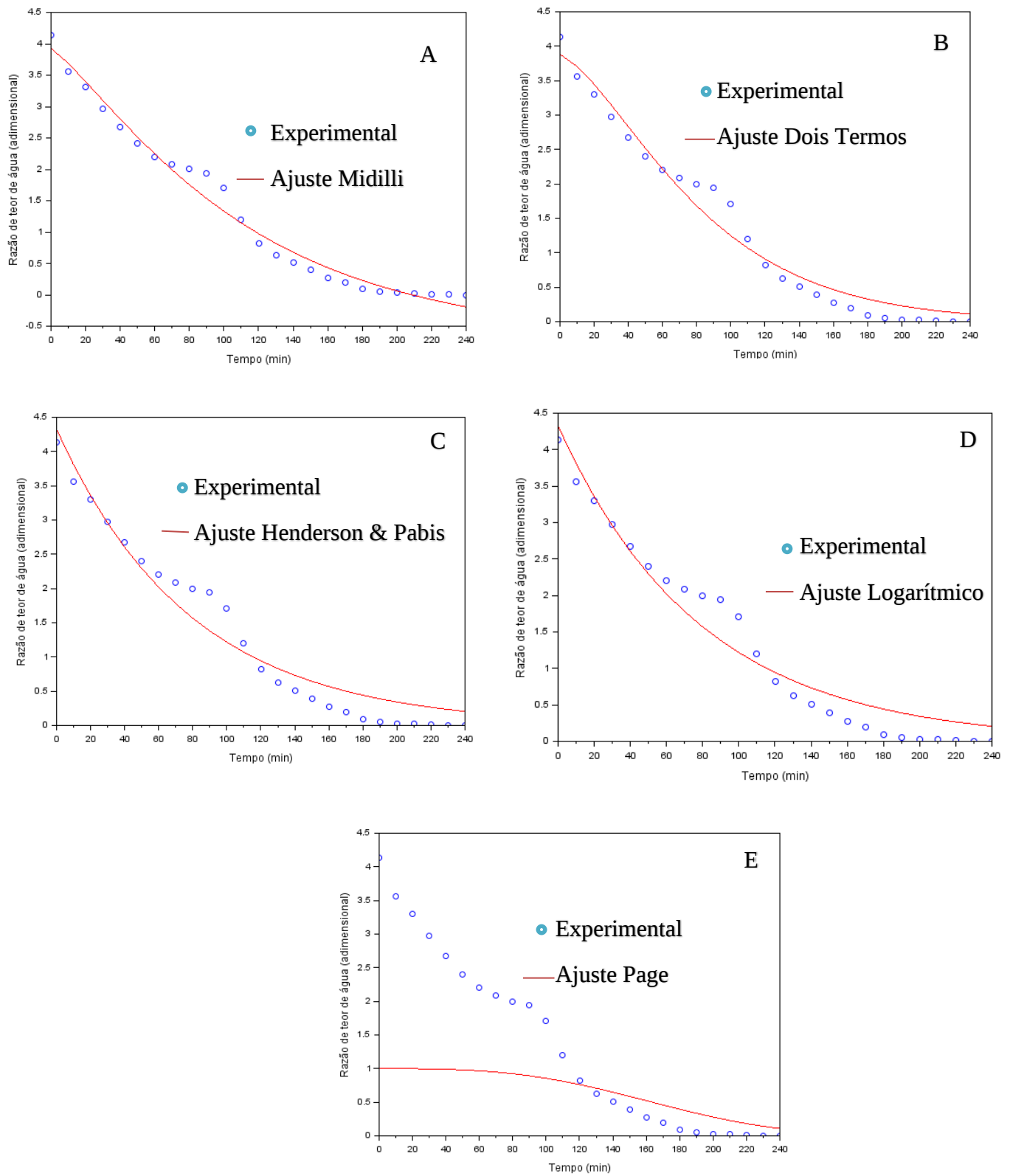
Modelo	a	a1	B	c	K	k1	n	Erro	$R^2(\%)$	DQM
Midilli	1,241	-	0,003	-	0,419	-	0	0,152	0,696	0,006
Dois Termos	-11,9	12,66	-	-	0,019	0,017	-	0,144	0,798	0,006
Henderson & Pabis	0,972	-	-	-	0,008	-	-	0,369	0,685	0,015
Logarítmico	0,971	-	-	0,001	0,008	-	-	0,369	0,685	0,015
Page	-	-	-	-	1D-06	-	3,039	36,93	0,323	1,477

Fonte: Autoria própria (2021)

Com todos os modelos avaliados, conforme os resultados obtidos a partir dos dados experimentais calculados, o modelo de Dois Termos (1980) seguido pelo modelo de Midilli (2006), foram os que melhor representaram os dados experimentais do processo de secagem da fruta da goiaba no secador solar de madeira. Essa predominância de ambas equações é justificável por apresentarem o maior número de parâmetros.

Na Figuras 2 estão apresentadas as curvas de secagem da goiaba com o ajuste pelos modelos de Midilli (2006) – (A) e Dois Termos (1980) – (B), Henderson & Pabis (2006) – (C), Logarítmico (2001) – (D) e Page (1977) – (E), nesta seguinte ordem.

Figura 2 - Secagem da goiaba no secador solar de madeira (SSMG)



Fonte: Autoria própria (2021)

É perceptível que as curvas apresentadas na Figura 2 (A e B) aproximam-se bem dos pontos experimentais. Contudo, a curva obtida por intermédio da equação de Dois Termos (1980), foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais apesar do comportamento dos dados modelados ficarem muito distante dos dados reais obtidos. Contudo, quando comparadas as análises estatísticas, vê-se que, mesmo com a distorção das curvas, os valores obtidos sugerem que houve uma correlação entre eles. Isso pode ser comprovado tanto visualmente como por meio da geração dos valores do erro, pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) e dos baixos valores do desvio quadrático médio que o modelo auferiu. Sendo explicado devido aos parâmetros destas equações sofrerem uma elevada tendência quando há aumento da temperatura do ar de secagem (Barros et al. 2020).

A partir da análise das últimas três figuras (C, D e E) apresentadas e dos dados fornecidos pela Tabela 3 os modelos de Henderson & Pabis (2006) e Logarítmico (2001) e o de Page (1977) se destacam de forma oposta em relação aos dados do secador de isopor por não apresentarem um isolamento térmico tão eficiente quando ao de isopor, por a perda de energia (oscilação) não se tem um controle permanente de temperatura, sendo solar. Os valores do coeficiente de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e o erro, sugerem que a correlação falhou. Contudo, apesar do Desvio quadrático médio ser extremamente baixo, apenas esse parâmetro de análise estatística não é suficiente para validar os dados experimentais. Faz-se necessário a combinação com outro parâmetro para que possa ser considerado como válido o tratamento matemático empregado. Para isso, deve sempre ser considerado o maior valor de R^2 para que se possa validá-lo (Barros et.al. 2020).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi feito um estudo experimental de modelagem matemática para avaliar o melhor desempenho de secagem da fruta da goiaba em um secador solar de isopor e em um secador solar de madeira. Dentre os aspectos observados com o presente estudo, torna-se possível concluir que os resultados experimentais para a melhor condição de planejamento, permite demonstrar que a estratégia de otimização computacional foi adequada para prever e descrever a melhoria do processo de secagem, levando sempre em consideração os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) e os valores mais baixos do Desvio Quadrado Médio (DQM). Logo, os modelos que melhor se aplicaram a este processo de secagem, utilizando o secador de isopor, foram os modelos de Midilli (2006) e o de Dois termos (1980). Para o secador de madeira, não foram observadas boas correlações com os modelos matemáticos devido a uma possível elevada variação da temperatura no processo de secagem o que afeta diretamente na taxa de evaporação das amostras.

É nótoria grande semelhança entre os resultados encontrados em ambos experimentos o que mostra que a secagem aconteceu mantendo-se o comportamento da curva experimental. Contudo, mesmo os dois processos apresentando a mesma quantidade de parâmetros, não foi possível ter o mesmo desempenho para os dois secadores pois os mesmos apresentam isolamentos térmicos diferentes, eficiência de secagem diferentes, sendo assim afetados pela temperatura diferentemente. A eficiência dos secadores solares dependem dos parâmetros dos secadores e das perdas térmicas para o ambiente. Em razão do secador de isopor, pode-se afirmar que quanto maior a energia voltada ao secador absorvida, maior sua eficiência térmica dentro do secador, em função do seu isolamento térmico.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL Y.C.; SINGH R.P. Thin layer drying studies on short grain rough rice. **ASAE Paper No. 3531, ASAE, St. Joseph MI**, (1977).
- AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.99-104, 2003.
- AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Modeling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. **Journal of Food Engineering**, v.75, p.308–315, 2006.
- ALI, Z. M.; LAZAN, H. Guava. In: MITRA, S.K. **Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruits**. New York: CAB International, 2001. p.146-165.
- BARROS, E. R., ALCÂNTARA RIBEIRO, V. H., ALCÂNTARA SILVA, V.M., SOUSA MUNIZ, C. E., ALMEIDA SILVA, R., EDUARDO, R. S., LUIZ, M. R., RODRIGUES PÊ, P., JACINTO ALMEIDA, R. L., SANTOS, N. C., **Ajuste dos modelos matemáticos na cinética de secagem dos resíduos de uva cv. “Isabel”**, Research, Society and Development, v. 9, n. 10, e8249108644, 2020, DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8644>
- ESCRIG AJ, RINCON M, PULIDO R, SAURA-CALIXTO F. 2001. Guava fruit (P. guajava L.) as a new source of antioxidante dietary fi ber. **J Agric Food Chem**.v.49: 5489-5493, 2001.
- PARK, K.J.; MORENO, M.K.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra Bartlett. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.3, p.288-292, 2001.
- QUEIROZ, V. A. V.; BERBERT, P. A.; MOLINA, M. A. B.; GRAVINA, G. A.; QUEIROZ, L. R. Mecanismos de transferência de massa na desidratação osmótica de goiaba em soluções de sacarose, sucralose e açúcar invertido. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 715-725, 2010.
- RIBAS, A.I.; CÁNOVAS, G.V.B.; GARZA, S.G.; AÑÓ, V.G. **Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria**. Zaragoza (Espanha): Acribia, p. 292,2000.
- SACILIK K.; ELICIN A. K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. **Journal of Food Engineering**, v.73, p.281–289, 2006.
- SEBRAE. **O cultivo e o mercado da goiaba**. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/3ArSnaY>>. Acesso em: 5 out. 2021.
- SHARAF-ELDEN Y. I.; BLAISDELL J. L.; HAMDY M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v.5, p.1261–1265, 1980.
- YALDIZ O.; ERTEKIN C.; UZUN H. I. Mathematical modelling of thin layer solar drying of Sultana grapes. **Enregy**, v.26, p.457–465, 2001.