

Otimização e simulação do processo de secagem de cascas de maracujá através de ferramentas empíricas e analíticas**Optimization and simulation of the drying process of passion fruits with empirical and analytical tools**

DOI:10.34117/bjdv6n10-015

Recebimento dos originais: 08/09/2020

Aceitação para publicação: 02/10/2020

Amélia Ruth Nascimento Lima

Mestranda de Ciências Naturais e Biotecnologia

Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: ameliaruth.lima@gmail.com

Êmyle Myrelle Alves dos Santos

Graduanda de Matemática

Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: emylepicui@gmail.com

Maria Tereza Lucena Pereira

Mestranda em Ciências Naturais e Biotecnologia

Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: mariateresa-lucena@hotmail.com

Aluizio Freire da Silva Júnior

Doutor em Engenharia de Processos

Instituição: Professor Adjunto nível IV, Centro de Educação e Saúde - CES, UFCG, Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: aluiziofsj.ces@gmail.com

Thamires Mabel Queiroz de Oliveira

Mestre em Ciências Naturais e Biotecnologia pela UFCG

Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: tham.iresmabel@hotmail.com

Vera Solange de Oliveira Farias

Doutora em Engenharia de Processos

Instituição: Professora Titular, Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: vera.solange6@gmail.com

Célia Maria Rufino Franco

Doutora em Engenharia de Processos

Instituição: Professora Adjunto nível III Universidade Federal De Campina Grande -UFCG,
campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: celiarufino@.ufcg.edu.br

Jair Stefanini Pereira de Ataíde

Doutor em Engenharia de Processos

Instituição: Professor Adjunto nível III Universidade Federal De Campina Grande -UFCG,
campus Cuité-PB

Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000

E-mail: jair.stefanini@professor.ufcg.edu.br

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de fornecer uma descrição detalhada do processo de secagem de cascas de maracujá através de modelos difusivos e empíricos. Para isso, foi utilizado o *software* desenvolvido no projeto PIBIC/CNPq-UFCG (2016-2017) para aplicar a solução analítica da equação de difusão (geometria de uma parede infinita) admitindo as condições de contorno de primeiro e terceiro tipo. Além disso, foi utilizado o programa LAB fit para a obtenção das cinéticas de secagem através do ajuste de modelos empíricos aos dados experimentais e, conseqüentemente, para a obtenção dos parâmetros de ajuste de cada modelo juntamente com os correspondentes indicadores estatísticos (qui-quadrado e coeficiente de determinação). As análises foram realizadas por meio de secagens de cascas de maracujá com espessura de aproximadamente 9 milímetros, em uma estufa de circulação e renovação de ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, até obtenção do teor de umidade de equilíbrio. Através dos dados obtidos observou-se que a solução analítica da equação de difusão admitindo a condição de contorno de terceiro tipo, descreveu bem as cinéticas de secagem das cascas de maracujá, entretanto, os modelos empíricos, em especial o Modelo de Page, se ajustaram com mais eficácia aos dados experimentais.

Palavras Chave: Secagem de produtos biológicos, Equação de difusão, Modelos empíricos, Solução Analítica.

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of providing a detailed description of the drying process of passion fruit peels through diffusive and empirical models. For this, the *software* developed in the PIBIC/CNPq-UFCG project (2016-2017) was used to apply the analytical solution of the diffusion equation (geometry of an infinite slab) admitting the boundary conditions of the first and third kind. In addition, the LAB fit software was used to obtain the drying kinetics by adjusting the empirical models to the experimental data and, consequently, to obtain the adjustment parameters of each model together with the corresponding statistical indicators (chi-square and determination coefficient). The analyzes were performed by drying of passion fruit peels with a thickness of approximately 9 millimeters, in a circulation and air renewal oven, at temperatures of 50, 60 and 70 °C, until the equilibrium moisture content was obtained. Through the obtained data it was observed that the analytical solution of the diffusion equation admitting the boundary condition of the third kind described well the drying kinetics of the passion fruit peels, however, the empirical models, especially the Page Model, adjusted more effectively to experimental data.

Keywords: Drying of biological products, Diffusion equation, Empirical models, Analytical Solution.

1 INTRODUÇÃO

A secagem de produtos biológicos, além de proporcionar certa estabilidade, derivada da diminuição do teor de umidade dos produtos, também possibilita o estudo do tempo de desidratação, bem como, o consumo de energia durante o processo, favorecendo a otimização das condições operacionais, com objetivo de maximizar o aproveitamento energético, reduzir os prejuízos econômicos e evitar as perdas das características nutricionais do alimento, resultando em um produto final de qualidade (SILVA; DUARTE; BARROZO, 2017).

A casca do maracujá, por ser um resíduo derivado de um fruto largamente comercializado, apresenta alto potencial econômico e nutritivo (rica em vitaminas, minerais e fitoquímicos). Entre suas potencialidades nutritivas, destaca-se seu alto teor de pectina, correspondendo de 10-20% da sua composição (LIEW; CHIN; YUSOF, 2014). De acordo com Liew et al. (2014), a pectina é um polissacarídeo complexo, composto principalmente de ácido galacturônico, e largamente utilizado em indústrias farmacêuticas, alimentícias e de cosméticos como agente espessante, geleificante e estabilizante. No entanto, para que suas cascas sejam utilizadas na incorporação de produtos como pães, biscoitos e farinhas, se faz necessário considerar sua alta perecibilidade, já que aproximadamente 80% do seu conteúdo é formado por água. Com isso, estratégias que promovam maior conservação, como a secagem, são importantes para obtenção de um produto final de qualidade (BEZERRA et al., 2015).

Diante dos inúmeros benefícios da utilização de resíduos de frutas, e da importância de otimizar os processos de secagem desses componentes, diversos estudos, envolvendo essa temática, vêm sendo desenvolvidos, como é o caso da pesquisa de Martins et al. (2019), que realizaram secagem de cascas de maçã nas temperaturas de 10, 30, 50 e 70°C com e sem a aplicação de ultrassom, e o estudo de Galaz et al. (2017) que avaliaram a cinética de secagem de cascas de romã nas temperaturas de 100, 110 e 120°C.

Frente ao exposto, considerando a necessidade de estudos que analisem a descrição detalhada de resíduos de frutas, a presente pesquisa visa fornecer uma descrição do processo de secagem de cascas de maracujá através de modelos difusivos e empíricos e, finalmente, analisar qual o modelo mais adequado para a descrição da secagem desse produto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Uma das ferramentas disponíveis para análise de projeto e operação de processos ou sistemas é a modelagem matemática e simulação. Essa pode ser útil para simular processos e experimentos

de sistemas ou fenômenos físicos, representando características observadas em sistemas reais, proporcionando avaliar formas de aperfeiçoar a operação (ADORNO et al., 2013).

O processo de secagem de produtos agrícolas, dependendo da técnica utilizada e dos seus parâmetros, pode demorar desde algumas horas até dias. E para a investigação e melhoria dessas técnicas são necessários testes para estabelecer qual o melhor tratamento a ser aplicado. Todavia, a simulação matemática dos processos de secagem permite a otimização desses procedimentos em tempo consideravelmente menor e de maneira mais econômica (DALPASQUALE; SPERANDIO, 2010).

Na literatura encontram-se alguns modelos empíricos que fazem uma correlação entre o teor de umidade médio e o tempo, com base nos dados experimentais, se apresentando como modelos que descrevem bem a cinética de secagem (SILVA, 2007).

Sendo assim, os modelos empíricos utilizados nesse trabalho encontram-se descritos na Tabela 1, a seguir, onde a e b são os parâmetros de ajuste, t é o tempo (em minutos) e X^* é o teor de umidade adimensional.

Tabela 1-Modelos empíricos

Modelo	Nome	Equação empírica	Referência
M1	Henderson e Pabis	$X^* = ae^{-bt}$	(DIAMANTE et al., 2010)
M2	Lewis	$X^* = e^{-at}$	(KALETA; GORNICK, 2010)
M3	Page	$X^* = e^{-at^b}$	(DIAMANTE et al., 2010)
M4	Peleg	$X^* = 1 - t/(a+bt)$	(MERCALI et al., 2010)
M5	Silva et alii	$X^* = e^{-at-b\sqrt{t}}$	(SILVA et al., 2012)
M6	Wang Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	(KALETA; GORNICK., 2010)

Apesar de descreverem de maneira satisfatória a curva de secagem para as condições experimentais, os modelos empíricos não fornecem indicação sobre o transporte de energia e água no interior do produto, característica esta, possibilitada pelos modelos difusivos, em que podem descrever de forma razoável o perfil da distribuição de água no interior de determinados produtos biológicos (CARLESSO et al., 2007).

Deste modo, a equação de difusão unidimensional, considerando a geometria de parede infinita, foi utilizada para descrever o processo de secagem das cascas de maracujá. Para isso, foram utilizadas soluções analíticas para a equação de difusão, admitindo as condições de contorno de primeiro e terceiro tipo. Para tal fim, foram admitidas as seguintes hipóteses:

- O produto é homogêneo e isotrópico;
- A distribuição do teor de água, no início do processo, é uniforme;
- O único mecanismo de transporte de água dentro do produto é a difusão líquida;

- O encolhimento é negligenciável;
- A difusividade efetiva de água e o coeficiente de transferência convectiva de massa permanecem constantes em todo o processo.

A equação de difusão unidimensional para uma parede infinita pode ser escrita da seguinte forma (Luikov, 1968; Crank, 1992):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Em que:

Φ representa o teor de umidade em base seca (bs);

D é a difusividade efetiva de massa (m^2s^{-1});

x é a coordenada cartesiana da posição (m).

A primeira solução analítica da equação de difusão utilizada para o estudo das cinéticas de secagens de cascas maracujá foi à solução obtida considerando a condição de contorno do primeiro tipo para uma parede infinita de espessura L , que é expressa como (SILVA, 2009):

$$\frac{\bar{\Phi} - \Phi_{eq}}{\Phi_i - \Phi_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{L^2} \Gamma^{\Phi} t \right] \quad (2)$$

no qual $\bar{\Phi}$ representa o valor médio para Φ ; Φ_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio da amostra; Φ_i é o teor de umidade inicial; e $\Gamma^{\Phi} = D$ (Difusividade efetiva de massa).

No que diz respeito à solução analítica para a equação de difusão, considerando a condição de contorno do terceiro tipo, essa pode ser expressa a partir da igualdade para o fluxo difusivo e o fluxo convectivo da parede infinita:

$$-D \frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x/2} = h(\Phi(x,t)|_{L_x/2} - \Phi_{eq}) \quad (3)$$

Na Equação (3) h é o coeficiente de transferência convectiva de massa (ms^{-1}), $\Phi(x,t)$ é o valor de Φ na posição x no instante t e L_x é a espessura da parede infinita.

Atendendo as hipóteses supracitadas, a Equação (1) pode ser analiticamente resolvida. Para uma parede infinita com um valor inicial uniforme Φ_0 para Φ , e considerando a condição de contorno definida pela Equação (3), a solução analítica $\Phi(x,t)$ é dada por (Luikov, 1968; Crank, 1992):

$$\Phi(x,t) = \Phi_{eq} + (\Phi_0 - \Phi_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{L_x/2}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} Dt\right) \quad (4)$$

Em que a origem do eixo x está localizada no ponto central da parede.

Na Equação (4), o coeficiente A_n é dado por:

$$A_n = \frac{4 \sin \mu_n}{2\mu_n + \sin(2\mu_n)} \quad (5)$$

Note que, na solução descrita $\Phi(x,t)$ trata-se do teor de umidade em base seca num ponto da parede infinita x num instante de tempo t . Mas, para o nosso estudo vamos considerar o teor de umidade médio, num instante t de tempo, que é expresso da seguinte forma:

$$\Phi(t) = \Phi_{eq} + (\Phi_0 - \Phi_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{\left(\frac{L_x}{2}\right)^2} Dt\right) \quad (6)$$

onde o parâmetro B_n é dado por:

$$B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2(Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (7)$$

e μ_n são as raízes da equação transcendental:

$$\cot \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (8)$$

Nas Equações (7) e (8), Bi é o número de Biot, dado por:

$$Bi = \frac{hL_x/2}{D} \quad (9)$$

2.2 SOFTWARE PARA AJUSTES E DETERMINAÇÃO DO PROCESSO

O *software Analytical*, desenvolvido no projeto do PIBIC/CNPq-UFCG (2016-2017), foi utilizado para descrever as cinéticas de secagem das cascas de maracujá (negligenciando o encolhimento) considerando a geometria de uma parede infinita. Esse *software* possui um otimizador acoplado às soluções analíticas que tem como objetivo determinar os parâmetros do processo (difusividade e coeficiente de transferência convectiva de massa).

O referido otimizador foi desenvolvido a partir de um método inverso, no qual são atribuídos valores iniciais aos parâmetros do processo e estes são corrigidos a fim de minimizar uma função objetivo. A função utilizada é o qui-quadrado (TAYLOR, 1997).

2.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos desta pesquisa foram realizados nos laboratórios do Centro de Educação e Saúde (CES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Cuité-PB. Os maracujás utilizados nos experimentos foram adquiridos na feira livre do município de Cuité-PB, seguindo os critérios para a seleção, tais como, a ausência de danos mecânicos e grau de maturação adequado.

A secagem convectiva foi realizada em uma estufa de circulação e renovação de ar. Inicialmente as amostras foram lavadas em água corrente e em seguida fatiadas de modo que as espessuras das cascas fossem consideravelmente menores que as duas outras dimensões, para que a geometria de uma parede infinita pudesse ser aplicada. Antes de iniciar o processo de secagem, as amostras tiveram seu teor de umidade determinado. Posteriormente, as cascas foram dispostas em cestos de arame galvanizado de massa conhecida (em triplicada), tiveram suas massas iniciais determinadas, e em seguida foram colocadas na estufa para serem secas nas temperaturas de 50, 60 e 70°C. Este procedimento se repetiu até que a massa constante fosse atingida. Finalmente, após as amostras atingirem a massa constante, essas foram submetidas à secagem em estufa previamente estabilizada a 105°C, onde permaneceram durante 24 horas para a remoção total da água e consequente obtenção da matéria seca.

Após a obtenção dos dados experimentais, foi calculada a razão de umidade (\bar{X}^*) através da seguinte equação:

$$\bar{X}^* = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (10)$$

onde X_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio, $\bar{X}(t)$ o teor de umidade médio no tempo t e X_i o teor de umidade no início do processo (tempo zero).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MODELOS EMPÍRICOS

Após a realização dos experimentos, foram obtidos os valores adimensionais do teor de umidade de acordo com a Equação 10. Em seguida, através da utilização do *software* LAB fit desenvolvido por Silva e Silva (2009), foi possível determinar os parâmetros de ajuste dos dados experimentais, com base na utilização dos modelos empíricos descritos na Tabela 1. Os parâmetros obtidos para cada um dos modelos e temperaturas utilizadas na pesquisa encontram-se na Tabela 2, apresentando o ajuste dos dados experimentais para cada uma das equações estudadas, bem como, informações relacionadas ao coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2), possibilitando a identificação do modelo que mais se ajustou aos dados estudados.

A Tabela 2, a seguir, apresenta detalhadamente os parâmetros de ajuste obtidos a partir da secagem de cascas de maracujá nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela 2 - Resultados para a cinética de secagem descrita por modelos empíricos

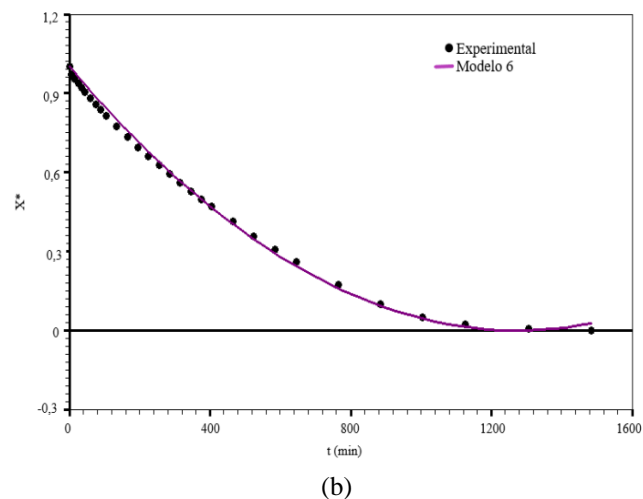
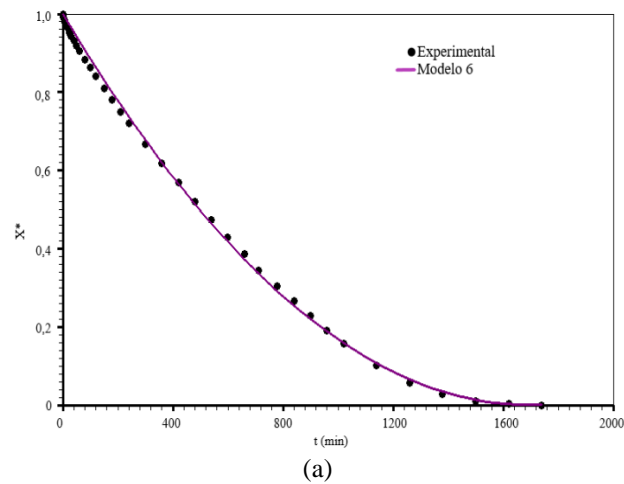
T (°C)	Modelo	A	b	R ²	χ ²
50	1	1,0068×10 ⁻²	1,5826×10 ⁻³	0,9899683	5,63807×10 ⁻²
	2	1,5681×10 ⁻³	-	0,9903753	5,70383×10 ⁻²
	3	4,7985×10 ⁻⁴	1,1836	0,9947638	3,11095×10 ⁻²
	4	7,0101×10 ²	5,4316×10 ⁻¹	0,9975522	1,23174×10 ⁻²
	5	1,7733×10 ⁻³	-4,823×10 ⁻¹	0,9911746	4,82691×10 ⁻²
	6	-1,1803×10 ⁻³	3,4834×10 ⁻⁷	0,9993468	7,52098×10 ⁻³
60	1	1,0043	2,0464×10 ⁻³	0,991135	3,48559×10 ⁻²
	2	2,0333×10 ⁻³	-	0,9914397	3,50158×10 ⁻²
	3	8,9069×10 ⁻⁴	1,1365	0,994524	2,15802×10 ⁻²
	4	5,0171×10 ²	6,0054×10 ⁻¹	0,9959437	1,35576×10 ⁻²
	5	2,2538×10 ⁻³	-4,2706×10 ⁻³	0,991684	3,08061×10 ⁻²
	6	-1,5729×10 ⁻³	6,1735×10 ⁻⁷	0,9989639	1,06391×10 ⁻²
70	1	1,0110	2,8168×10 ⁻³	0,9924967	3,19437×10 ⁻²
	2	2,7744×10 ⁻³	-	0,9931242	3,28595×10 ⁻²
	3	1,2091×10 ⁻³	1,1429	0,9954414	1,86735×10 ⁻²
	4	3,5194×10 ²	6,4756×10 ⁻¹	0,9938156	2,1715×10 ⁻²
	5	3,1196×10 ⁻²	-5,9388×10 ³	0,9931811	2,73298×10 ⁻²
	6	-2,0777×10 ⁻³	1,0533×10 ⁻⁶	0,9982737	1,30328×10 ⁻²

Ao analisar os indicadores estatísticos contidos na Tabela 2, pode-se concluir que o modelo que melhor descreveu as cinéticas de secagem nas temperaturas de 50 e 60°C foi o modelo de Wang

Singh (M6). E aqueles que apresentam piores ajustes foram os modelos de Henderson & Pabis (M1) e Lewis (M2). As simulações da cinética de secagem, para as temperaturas de 50 e 60°C, utilizando o modelo 6 podem ser observadas na Figura 1.

A Figura 1 permite uma observação visual do modelo 6 como o modelo que melhor descreveu a cinética de secagem de cascas de maracujá nas temperaturas de 50 e 60°C.

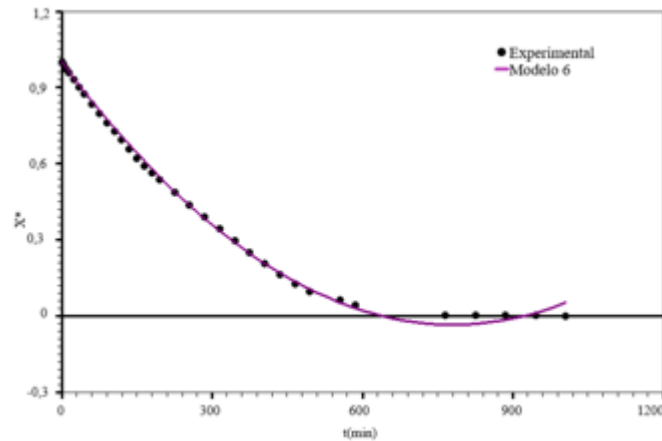
Figura 1 - Simulações da cinética de secagem usando o modelo de Wang Singh para as temperaturas: (a) 50°C; (b) 60°C.



É importante pontuar que apesar de apresentar os melhores indicadores estatísticos, o modelo de Wang Singh (M6) não pode ser considerado para descrever a cinética de secagem de cascas de maracujá na temperatura de 70°C, pois como mostra a Figura 2, nos minutos finais da simulação houve a predição de valores negativos para o teor de umidade, o que não faz sentido partindo do ponto de vista físico.

A Figura 2, a seguir, permite uma observação visual do modelo 6, que apresentou valores negativos para o teor de umidade no final da descrição da cinética de secagem de cascas de maracujá para temperatura de 70°C.

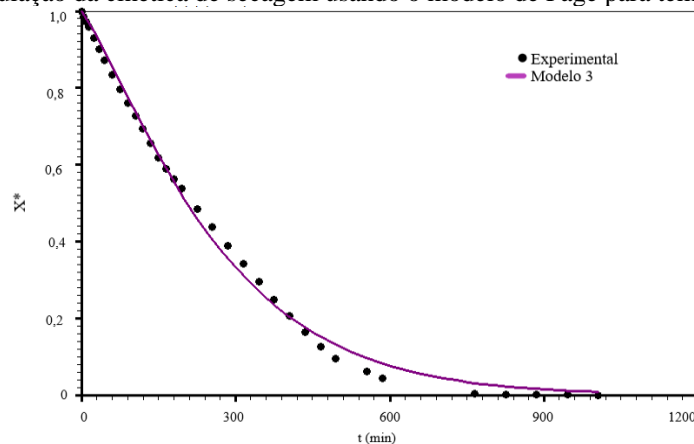
Figura 2 - Simulação da cinética de secagem usando o modelo de Wang Singh para temperatura de 70°C.



Com isso, analisando novamente os indicadores estatísticos contidos na Tabela 2, pode-se concluir que o modelo que melhor descreveu a cinética de secagem na temperatura de 70°C foi o modelo de Page (M3). Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Medeiros e colaboradores (2020), que ao estudarem a cinética de secagem de sementes de melão em camada fina, observaram que a equação com melhor ajuste foi a de Page. De igual modo, Duarte e colaboradores (2020), ao avaliarem o comportamento da secagem em leito fixo de berinjelas, também obtiveram o modelo de Page como o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Sendo assim, na Figura 3 pode-se visualizar a descrição feita pelo *software* LAB Fit da cinética de secagem utilizando o modelo de Page (M3) para a temperatura de 70°C.

Figura 3 - Simulação da cinética de secagem usando o modelo de Page para temperatura de 70°C.



3.2 MODELOS DIFUSIVOS

Com a obtenção dos dados experimentais foi utilizado o *software Analytical* desenvolvido no projeto PIBIC/CNPq-UFCG (2016-2017), para a realização das otimizações considerando as condições de contorno do primeiro e terceiro tipo e a geometria de uma parede infinita, para a análise dos efeitos da condição de contorno sobre os parâmetros de secagem. No final de cada otimização foram observados os parâmetros de ajuste (qui-quadrado e coeficiente de determinação), os valores do número de Biot, a difusividade efetiva de água e o coeficiente de transferência convectiva de massa. Vale salientar que para esta análise foram considerados apenas os dados experimentais das secagens a 60 e 70 °C.

A Tabela 3, abaixo, contém os resultados das otimizações realizadas no *software Analytical*.

Tabela 3 - Parâmetros obtidos por meio das otimizações

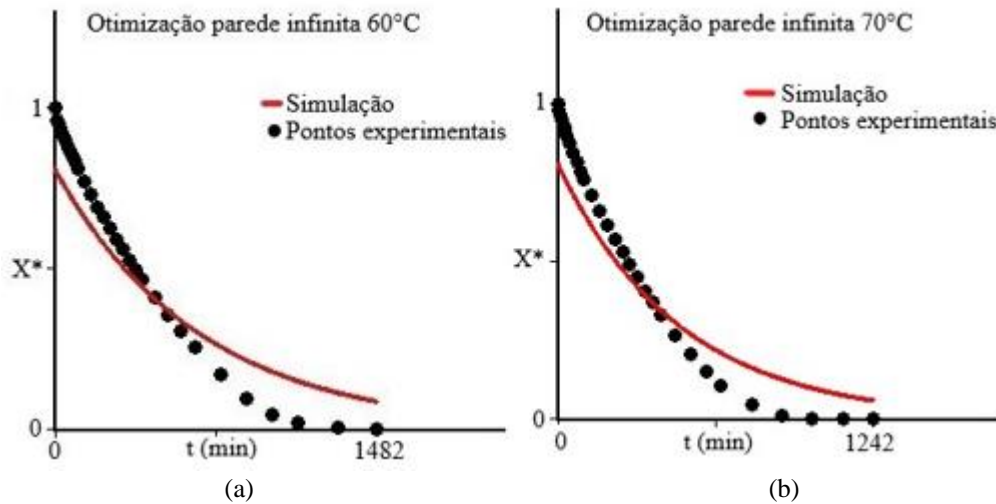
Condição de contorno	Temperatura (°C)	Parâmetros e indicadores estatísticos	Valores obtidos
Primeiro tipo	60	D	$2,012 \times 10^{-10}$
		R ²	0,8156
		χ^2	$3,558 \times 10^{-1}$
	70	D	$2,374 \times 10^{-10}$
		R ²	0,8379
		χ^2	$3,554 \times 10^{-1}$
Terceiro tipo	60	D	$2,602 \times 10^{-7}$
		R ²	0,9878
		χ^2	$3,462 \times 10^{-2}$
		H	$1,515 \times 10^{-7}$
		Bi	$2,603 \times 10^{-3}$
	70	D	$2,792 \times 10^{-7}$
		R ²	0,9897
		χ^2	$3,273 \times 10^{-2}$
		H	$1,898 \times 10^{-7}$
		Bi	$2,792 \times 10^{-3}$

χ^2 qui-quadrado; R² coeficiente de determinação; D difusividade efetiva de água; h coeficiente de transferência convectiva de massa; Bi número de Biot.

Ao analisar os dados da Tabela 3, considerando o modelo com a condição de contorno de primeiro tipo, foi observado que o aumento da difusividade efetiva de massa foi diretamente influenciado pela elevação da temperatura para as amostras submetidas a 70°C (Figura 4). Observou-se também que os melhores valores para o R² e χ^2 foram encontrados nas amostras secas a 70°C (considerando a condição de contorno de primeiro tipo) apresentando valores de aproximadamente 0,8379 e $3,554 \times 10^{-1}$, respectivamente. No entanto, devido os baixos valores obtidos para R², pode-se concluir que a condição de contorno do primeiro tipo não é a mais adequada para descrever a secagem desse produto.

A Figura 4 apresenta a simulação através da solução analítica para a condição de contorno de primeiro tipo.

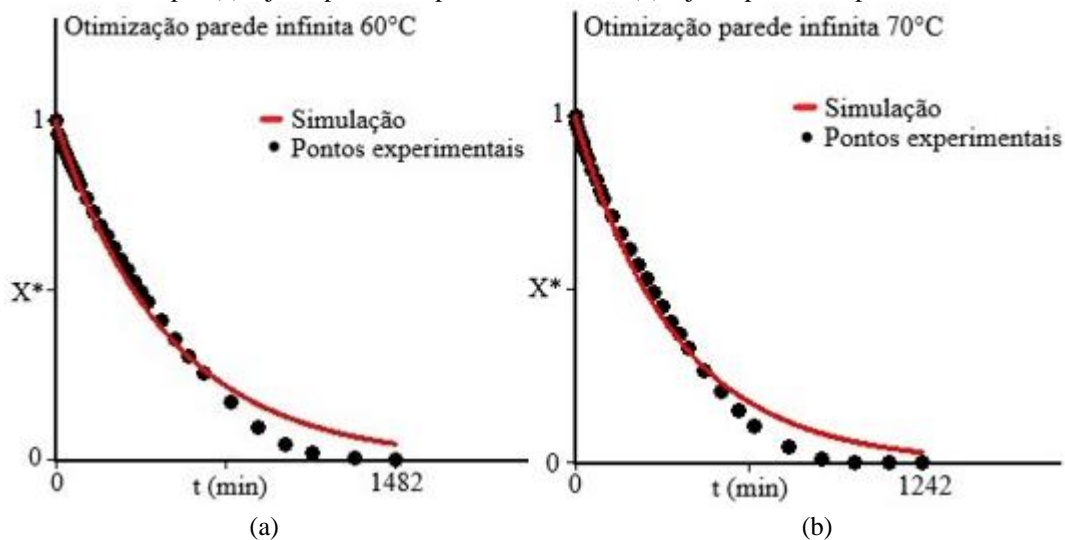
Figura 4 - Gráficos da cinética de secagem de cascas de maracujá através da solução analítica considerando a condição de contorno de primeiro tipo: (a) Ajuste para a temperatura de 60°C; (b) Ajuste para a temperatura de 70°C.



Ainda na Tabela 3, é possível observar que a elevação da temperatura influenciou diretamente o aumento do número de Biot e da difusividade, ou seja, as amostras submetidas a 70°C apresentaram uma menor resistência para a saída de água, implicando na redução do tempo de secagem, como se pode observar na Figura 5.

A Figura 5 apresenta os gráficos da cinética de secagem das cascas de maracujá considerando a condição de contorno do terceiro tipo.

Figura 5 - Gráficos da cinética de secagem de cascas de maracujá através da solução analítica considerando a condição de contorno de terceiro tipo: (a) Ajuste para a temperatura de 60°C; (b) Ajuste para a temperatura de 70°C.



Após análise dos gráficos contidos na Figura 5, observou-se que o melhor foi aquele obtido para as amostras secas a 70°C, apresentando melhores valores para o R^2 e χ^2 (0,9897 e $3,273 \times 10^{-2}$, respectivamente).

É importante destacar que os valores apresentados na Tabela 3 para o número de Biot foram relativamente baixos, demonstrando uma grande resistência na superfície do produto resultando em uma distribuição uniforme do teor de umidade no mesmo. Entretanto, os baixos valores para o número de Biot também podem estar relacionados ao modelo matemático utilizado, visto que ele desconsidera a variação da difusividade durante o processo de secagem e o encolhimento do produto, se apresentando como fatores importantes para a descrição desse processo. Sendo assim, uma modelagem matemática mais complexa pode fazer-se necessária.

Além disso, notou-se (nas otimizações realizadas para as temperaturas em estudo) que houve uma proximidade nos valores dos parâmetros da difusividade (D) e do coeficiente de transferência convectiva de massa (h), representando novamente uma distribuição uniforme do teor de umidade no interior do produto.

Sendo assim, ao comparar os indicadores estatísticos das duas modelagens (para as duas condições de contorno), conclui-se que os melhores ajustes foram obtidos através da solução analítica da equação de difusão considerando a condição de contorno de terceiro tipo, apresentando valores ótimos para o R^2 e χ^2 .

4 CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se, com base nos parâmetros estatísticos qui-quadrado (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), juntamente com as análises gráficas, o modelo empírico que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo de Page.

Em relação, às otimizações realizadas pelo *software Analytical* utilizando a solução analítica para a geometria de uma parede infinita, observou-se que os melhores ajustes foram aqueles onde houve a aplicação da condição de contorno de terceiro tipo. Através dessa solução foi possível observar a influência da temperatura sobre os parâmetros do processo, bem como, valores do número de Biot, da difusividade efetiva de água e do coeficiente de transferência convectiva de massa.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à CAPES pela concessão de bolsas à segunda e terceira autoras, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ADORNO, W.T. Modelagem matemática aplicada á transferência de massa em alimentos. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n.16, p. 1465-1478, 2013.
- BEZERRA, C. V.; DA SILVA, L. H. M.; CORRÊA, D. F.; RODRIGUES, A. M. A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 85, p. 750-755, 2015.
- CARLESSO, V. O. et al. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 29, n.2, p. 28-37, 2007.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*. 2. ed. New York: Oxford University Press.1992
- DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante. *Engenharia Agrícola*, São Paulo, v.30, n.4, p.726-731, 2010.
- DIAMANTE, L. M. et al. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. *International journal of food science & technology*, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.
- DUARTE, M. M.; CAVALCANTI, M. E. R. M.; ARAÚJO, R. D. A.; ALMEIDA, R. D.; NÓBREGA, A. M. M. C.; MELO, R. B. D. F.; SOUZA., R. V.; DE SOUSA NUNES, L. Coeficiente de difusividade efetivo e modelagem matemática da secagem de berinjela. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 54117-54124, 2020.
- FERREIRA, M. F. P.; PENA, R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.12, n.1, p.15- 28, 2010.
- GALAZ, P.; VALDENEGRO, M.; RAMÍREZ, C.; NUÑEZ, H.; ALMONACID, S.; SIMPSON, R. Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contentes in pomegranate pell. *Journal of Food Engineering*. v. 2008, p. 19-27, 2017.
- KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. *International journal of food science & technology*, v.45, n. 5, p. 891-898, 2010.
- LIEW, S. Q.; CHIN, N. L.; YUSOF, Y. A. Extraction and Characterization of Pectin from Passion Fruit Peels. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. v. 2, p. 231-236, 2014.
- LUIKOV, A.V. *Analytical Heat Diffusion Theory*. 2. ed. Moscow: Academic Press. 1968
- MARTINS, M.P.; CORTÉS, E.J; EIM, V.; MULET,A; CÁRCEL, J.A. Stabilization of apple peel by drying. Influence of temperature and ultrasound application on drying kinetics and product quality. *Drying Technology*. v.37, p.559-568, 2019.
- MEDEIROS, R. A.; DE OLIVEIRA FARIAS, V. S.; DE OLIVEIRA, T. M. Q.; DA SILVA JUNIOR, A. F.; LIMA, A. R. N.; PEREIRA, M. T. L.; FRANCO, C. M. R.; DE ATAIDE, J. S. P. Comportamento da secagem de sementes de melão (*Cucumis Melo L.*) em camada fina usando modelos empíricos. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 64001-64009, 2020.

MERCALI, G. D. et al. Mass transfer Kinetics during osmotic dehydration of bananas (*musa sapientum*, shum.). *International journal of food science & technology*, Wiley Online Library, v. 45, n. 11, p. 2281-2289, 2010.

SILVA, N. C.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. Effects of dehydration methods on quality characteristics of yellow passion fruit co-products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 97, n. 14, p. 4750-4759, 2017.

SILVA, W. P. Discretizações em fenômenos de transporte computacional, Cursos 1 e 2 (2009) Apresentações em Powerpoint, online, disponível no endereço eletrônico: <<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm>>, data de acesso: 11/06/2020.

SILVA, W. P. et al. Empirical and diffusion models to describe water transport into chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 21 de set. de 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03183.x>>. Acesso em: 12 de jun. de 2020.

SILVA, W. P.; SILVA, C.A.M.D.P.S. LAB Fit curve fitting software, V.7.2.46. (2009); Online. Disponível em: <www.labfit.net>. Acesso em: jun. 2020.

SILVA, W.P. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

TYLOR, J. R. *An introduction to error analysis*. Sausalito, California: University Science Books, 1997.