



ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE DIFUSÃO UNIDIMENSIONAL PARA DESCREVER A SECAGEM CONVECTIVA DE CASCAS DE MELÃO

Ana Eloiza Paulino Medeiros¹, Vera Solange de Oliveira Farias²

RESUMO

A simulação computacional está se tornando cada vez mais comum. O emprego de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferência é uma ferramenta cada vez mais explorada por pesquisadores, tendo em vista a melhoria no processamento, redução de perdas e aumento da qualidade do produto final. Nessa perspectiva, o presente projeto teve como objetivo um estudo teórico-experimental para viabilizar a aplicação de soluções numéricas da equação de difusão para descrever a secagem de cascas de melão, considerando a geometria de uma parede infinita. O modelo incorporou o encolhimento do produto, variação na difusividade efetiva de massa com o teor de umidade local, empregando condição de contorno convectiva. Para atingir os objetivos delineados, foram realizados experimentos de secagem de cascas de melão em uma estufa de circulação forçada de ar para as temperaturas de 50, 60 e 70°C. Os dados coletados foram analisados a partir de um software disponível na literatura, o “Infinite Slab Numerical”. Neste código, a solução numérica da equação de difusão foi acoplada a um otimizador, visando à determinação dos parâmetros termofísicos do produto. Na análise do processo, cinco expressões para a difusividade efetiva de massa foram testadas. Para eleger a expressão que melhor descreveu a cinética de secagem das cascas do melão, foram considerados os parâmetros estatísticos R² e Qui-quadrado. Uma vez conhecida a expressão da difusividade efetiva de massa, foi possível simular os processos de secagem, mostrando que a modelagem e a geometria utilizadas para descrever o processo, empregando solução numérica, foram eficientes.

Palavras-chave: Modelos difusivos; Solução numérica; Simulação; *Cucumis melo* L.;

¹Aluna do Curso de Licenciatura em Física, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, UFCG, Cuité, PB, e-mail: ana.eloiza@estudante.ufcg.edu.br

²Professora Doutora, Orientadora, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, UFCG, Cuité, PB, e-mail: vera.solange6@gmail.com

NUMERICAL STUDY OF THE ONE-DIMENSIONAL DIFFUSION PROCESS TO DESCRIBE CONVECTIVE DRYING OF MELON PEELS

ABSTRACT

Computer simulation is becoming more and more common. The use of mathematical models that consider the characteristics of the transfer system is a tool increasingly explored by researchers, with a view to improving processing, reducing losses and increasing the quality of the final product. In this perspective, this project aimed at a theoretical-experimental study to enable the application of numerical solutions of the diffusion equation to describe the drying of melon skins, considering the geometry of an infinite wall. The model incorporated product shrinkage, variation in effective mass diffusivity with local moisture content, using convective boundary conditions. To achieve the outlined objectives, experiments were carried out to dry melon husks in a forced air circulation oven at temperatures of 50, 60 and 70°C. The collected data were analyzed using a software available in the literature, the "Infinite Slab Numerical". In this code, the numerical solution of the diffusion equation was coupled to an optimizer, aiming to determine the thermophysical parameters of the product. In the process analysis, five expressions for effective mass diffusivity were tested. To choose the expression that best described the drying kinetics of melon skins, the statistical parameters R² and Chi-square were considered. Once the expression of the effective mass diffusivity was known, it was possible to simulate the drying processes, showing that the modeling and geometry used to describe the process, using a numerical solution, were efficient.

Keywords: Donec finibus, Duis feugia, Quisque eget.

INTRODUÇÃO

Dentre as frutas altamente produzidas e exportadas no Brasil, o melão (*Cucumis melo L.*), que é um dos principais integrantes da família *Curcubitaceae*, merece um grande destaque. Sua popularidade está atrelada ao seu perfil nutricional e às suas características sensoriais, formadas por textura macia, aroma agradável e sabor adocicado, que fazem com que a fruta seja vastamente consumida em sua forma in natura, em saladas e em sucos, além de ser bastante utilizada pela indústria alimentícia na produção de sorvetes, polpas, iogurtes e geleias (MARYANTO; DARYONO, 2011; TUAN et al., 2019).

O Brasil é um país que possui um ambiente favorável para o cultivo de frutas. Várias frutas tropicais como tangerina, caqui, manga, goiaba, melancia, melão, são consideradas pelo povo brasileiro como nativas (BRITO, 2017). Segundo Silva & Tassara, (2005) a maioria das frutas cultivadas no Brasil foi introduzida pelos europeus durante a colonização.

O melão é uma planta cujo centro de origem é a África, porém, foi na Índia onde ocorreu sua dispersão. Hoje se encontra cultivares de melão em diversas regiões do mundo, desde o centro e leste da Ásia, sul e centro da América e também o centro e sul da África, graças à dispersão do fruto, pode-se encontrar em todos os mercados do mundo melão com diferentes cores, formato e aroma (DEULOFEU,1997).

Com aproximadamente 91% de água em sua composição, o melão apresentando ainda carboidratos, proteínas e fibras, sendo seu valor energético relativamente baixo, cerca de 29Kcal em 100g da porção. A fruta possui um sabor adocicado, geralmente é consumido in natura ou na forma de suco, por ser uma fruta refrescante (TACO, 2011).

É uma fruta que se adapta ao clima mais quente, com temperaturas entre 25 e 35°C. Existe uma variedade de espécies de melão, no Brasil são cultivados os híbridos e os frutos tradicionais de duas variedades: *Cucumis melo var. inodorus* (tipo Amarelo) e *Cucumis melo var. cantalupensis* (tipo Cantaloupe). Os melões mais conhecidos e apreciados no Brasil são os do tipo amarelo, a região nordeste se destaca no cultivo, sendo a maior produtora nacional (SEBRAE, 2016). O *Cucumis melo var. inodorus* e o *Cucumis melo var. cantalupensis*, correspondem aos melões

inodoros e aos aromáticos, sendo os aromáticos mais doces que os inodoros, porém com um tempo menor de conservação (MENEZES, 2000).

Segundo Silva et al. (2011), O Brasil é um grande produtor de frutas mundial, estando em terceiro lugar, ficando atrás da China e da Índia. Conforme dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) o Rio Grande do Norte fechou 2014, como o maior produtor de melão do Brasil, com a produção de 232.575 toneladas. Todos esses bons resultados na economia faz com que o agronegócio tenha uma grande e importante participação no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (Matos et al. 2008).

Vale ressaltar que o melão é um dos frutos que apresenta maior índice e resíduos, perdendo assim mais da metade da fruta, as sementes e cascas apresentam um significativo potencial nutritivo. Assim, os resíduos, ou seja, a parte dos alimentos que são descartadas nas indústrias de alimentos e no consumo doméstico possuem altos valores nutricionais, e em alguns casos são mais nutritivos que as partes nobres dos alimentos, sendo assim, o seu reaproveitamento traz vários benefícios como redução do desperdício, enriquecimento nutricional das refeições, elaboração de novas receitas, entre outros. Contudo, para a sua utilização, muitas vezes é necessária a aplicação de alguma técnica de conservação como a secagem (STORCK et al., 2013).

Desse modo pode-se notar a importância de estudar o processo de secagem na casca do melão, já que geralmente a mesma é jogada fora e com a secagem poderia aproveitar-se melhor essa parte do fruto e evitar o seu desperdício. De acordo com Melo et al. (2013), a secagem é um processo usado na preservação de alimentos, que diminui a atividade de água para reações de deterioração, aumenta a estabilidade e reduz o volume. Segundo Park e Bin (2002) a remoção de água de um alimento implicará na inibição do desenvolvimento microbiano, além da prevenção contra reações bioquímicas responsáveis pela deterioração do produto.

Contudo, para a utilização da casca do melão na elaboração de subprodutos, é importante considerar que esta matéria-prima possui alta perecibilidade, já que cerca de 92,1% do seu conteúdo é composto por água (MORAIS et al., 2017). Logo, técnicas que promovem uma maior conservação apresentam relevância no tocante à obtenção de produtos com qualidade e maior tempo de vida útil.

Na agroindústria esse é um processo bastante interessante e viável, já que possui um baixo custo, principalmente em regiões quentes, pois realizam a secagem

natural, por meio do sol. De acordo com Celestino (2010) a secagem aumenta a vida útil do produto, facilita o transporte e reduz a perda.

A técnica de desidratação mais utilizada nas frutas é a secagem por ar quente, que consiste em expor o produto a uma corrente de ar quente. Durante processo ocorre a transferência de calor e massa, entre o ambiente e o produto. Os fatores que governam a velocidade desses fenômenos de transferência determinam a taxa de secagem (ARGANDONA, 2005). Durante a secagem ocorrem dois processos simultâneos: a transferência de calor, que é a energia necessária para vaporizar os fluidos do produto, e a transferência de massa, que é o vapor retirado na superfície do produto (MORAES, 2000).

Neste trabalho o software computacional utilizado é o “Infinite Slab Numerical”. Adquirindo as cinéticas de secagem, através de modelos difusivos, considerando a geometria das cascas como parede infinita.

Perante ao exposto, a presente pesquisa pauta-se em determinar condições ótimas de secagem de casca de melão, por meio de processos difusivos. O estudo da secagem, em diversas situações, usa a teoria da difusão para descrever o transporte de matéria em um meio (Silva et al., 2012b). Assim, a utilização de modelos matemáticos eficazes pode ser útil para promover a otimização e controle do processo, bem como, para reduzir custos energéticos (AGBEDE et al., 2020). O método utilizado na discretização da equação de difusão foi o volume infinito com uma formulação totalmente implícita. A razão para essa escolha é que a solução é incondicionalmente estável para qualquer intervalo de tempo.

MATERIAIS E MÉTODOS (OU METODOLOGIA)

O seguinte trabalho foi desenvolvido seguindo os prazos que foram estabelecidos para o mesmo. Primeiramente foram realizadas pesquisas sobre a secagem em frutas, como aconteciam as trocas de calor e sua influência na massa e espessura do produto. Além de pesquisas sobre o melão propriamente dito. Esta pesquisa foi realizada em livros, artigos científicos, teses de doutorado, dissertações, entre outros. Para tornar este trabalho mais proveitoso.

MODELAGEM MATEMÁTICA

Como é conhecido, o estudo da secagem, em diversas situações, usa a teoria da difusão para descrever o transporte de matéria em um meio (Silva et al., 2012b). Como resultado, o modelo matemático apropriado para descrever o fenômeno envolve a resolução da equação de difusão. Para lajes infinitas, a equação de difusão unidimensional, em coordenadas cartesianas, pode ser expressa como está escrita como (Luikov, 1968; Crank, 1992):

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

Onde M é o teor de umidade em base seca (kg água kg⁻¹ matéria seca); D é a difusividade de massa efetiva (m² · s⁻¹); t é o (s) tempo (s) e x é a coordenada cartesiana da posição (m) dentro da laje infinita com origem no centro.

A solução da equação de difusão requer a necessidade de se estabelecer hipóteses na descrição do processo físico. Neste trabalho, as premissas para resolver a Equação (1) são: (1) a difusão é o único mecanismo de transporte dentro da laje; (2) a espessura E varia durante a secagem, mas a forma do sólido permanece constante durante o período considerado; (3) a difusividade de massa efetiva varia durante a secagem; (4) o coeficiente de transferência de massa convectiva permanece constante durante a secagem; (4) a distribuição inicial da umidade é uniforme; (4) a laje infinita é considerada homogênea e isotrópica; (5) a origem do eixo x localiza-se no ponto central da laje, explorando, assim, a condição de simetria do corpo; (6) durante o processo não há mudança de fase da água.

O método utilizado na discretização da equação de difusão foi o volume infinito com uma formulação totalmente implícita. A razão para essa escolha é que a solução é incondicionalmente estável para qualquer intervalo de tempo.

Solução Numérica para a condição de contorno de terceiro tipo

O primeiro passo para resolver numericamente a Equação (1) foi a discretização do domínio contínuo em subdomínios, chamados de volumes de controle (CV). A Figura 1a mostra uma laje infinita com espessura E (m) e a malha obtida com a discretização.

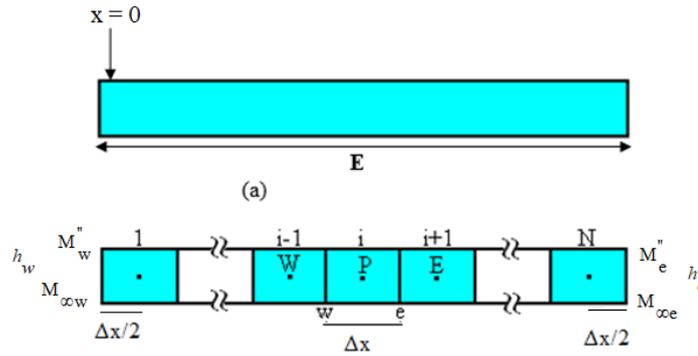


Figura 1- Malha representando os volumes de controle

Na malha construída existem N volumes de controle, dividido em três tipos distintos: os volumes de controle interno (P), os quais possuem volumes de controle vizinhos a oeste (W) e a leste (E); o volume de controle externo a leste, o qual possui volume de controle vizinho a oeste e está em contato com o meio externo a leste (E); e finalmente o primeiro volume de controle que possui vizinho a leste e fluxo zero a oeste (W), devido à simetria. Estes tipos de volumes de controle podem ser vistos na Figura 1b. As letras minúsculas "w" e "e" referem-se às interfaces do volume de controle "P" para oeste e leste, respectivamente.

Integrando a Equação (1), de forma discretizada, sobre o espaço e o tempo (de t até t +) obtemos o seguinte resultado:

$$\frac{M_P - M_P^0}{\Delta t} \Delta x = \left(D_e \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e - D_w \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w \right) \quad (2)$$

Em que sobrescrito "0" significa "horário anterior t" e sua ausência significa "horário atual t +".

VOLUMES DE CONTROLE INTERNO

Estes volumes de controle não têm contato com meio externo e possuem dois volumes de controle vizinhos, um a oeste e outro a leste (Figura 1). Para estes volumes de controle, as derivadas parciais podem ser aproximadas do seguinte modo:

$$\frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e \cong \frac{M_E - M_P}{\Delta x} \quad \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w \cong \frac{M_P - M_W}{\Delta x} \quad (3)$$

Assim, para um volume de controle interno, a equação discretizada pode ser escrita como:

$$A_w M_w + A_p M_p + A_e M_E = B \quad (4)$$

Onde os coeficientes são dados por:

$$A_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{D_e}{\Delta x} + \frac{D_w}{\Delta x} \quad A_w = -\frac{D_w}{\Delta x} \quad A_e = -\frac{D_e}{\Delta x} \quad e \quad B = \frac{\Delta x}{\Delta t} M_p^0 \quad (5)$$

VOLUMES DE CONTROLE L

Para o primeiro volume de controle, a borda oeste é o ponto denotado por w, que está na posição $x = 0$. Devido à simetria, a condição de contorno utilizada foi a do segundo tipo, com fluxo zero. Assim, o terceiro termo na Equação (2) é zero e a seguinte equação algébrica foi obtida:

$$A_p M_p + A_e M_E = B \quad (6)$$

Onde os coeficientes A_p e A_e são dados por:

$$A_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{D_e}{\Delta x} \quad A_e = -\frac{D_e}{\Delta x} \quad B = \frac{\Delta x}{\Delta t} M_p^0 \quad (7)$$

VOLUMES DE CONTROLE N

Este subdomínio possui um volume de controle vizinho a oeste, e está em contato com o meio a leste. Portanto, as derivadas da Equação (2) foram aproximadas por:

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_e \cong \frac{M_e - M_p}{\Delta x/2} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_w \cong \frac{M_p - M_w}{\Delta x} \quad (8)$$

Onde M_e é o valor de M no limite leste. Para este volume de controle, a condição de contorno do terceiro tipo é expressa por:

$$-D \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_e \cong h_e (M_e - M_{\infty e}) \quad (9)$$

Onde ele é o coeficiente de transferência de massa convectiva no limite leste, e $M_{\infty e}$ é o teor de umidade de equilíbrio. Combinando as Equações (8a) e (9) para expressar M_e , e substituindo M_e na Equação (8a), esta nova equação e também a Equação (8b) podem ser usadas para reescrever a Equação (2). A seguinte equação algébrica é obtida:

$$A_w M_w + A_p M_p = B \quad (10)$$

No qual

$$A_w = -\frac{D_w}{\Delta x}; A_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{D_w}{\Delta x} + \frac{D_e}{\frac{D_e}{h_e} + \frac{\Delta x}{2}}; B = \frac{\Delta x}{\Delta t} M_p^0 + \frac{D_e}{\frac{D_e}{h_e} + \frac{\Delta x}{2}} M_{\infty e} \quad (11)$$

Na Equação (11c), é o teor de umidade no volume de controle P no início da etapa de tempo. O valor médio de M em qualquer instante, denotado por, foi calculado pela média aritmética dos teores de umidade obtidos para os volumes de controle, uma vez que a malha estabelecida é uniforme.

DESENVOLVIMENTO

A pesquisa foi realizada com o auxílio do Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA) do Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Cuité-PB. Os experimentos de secagem foram feitos em uma estufa de circulação forçada de ar. Onde, foi feita a secagem de melões para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, e a partir dos dados experimentais obtidos, utilizamos a modelagem numérica para descrever a cinética dos dados obtidos no laboratório. Para realizar os experimentos foram utilizados melões adquiridos na feira livre de Cuité-PB.

O procedimento de secagem foi iniciado com a lavagem dos melões, que seriam utilizados, em água corrente. Em seguida, os mesmos foram cortados em formato quadrado 40x40 mm, em espessura de, aproximadamente, 5 mm. Logo após, os quadrados foram colocados em três cestos de alumínio, onde foram marcados com códigos, para facilitar a identificação e a pesagem. As pesagens, com as temperaturas de 50, 60 e 70°C, foram feitas em uma balança digital que já estava no laboratório, da marca RADWAG, modelo PS 360/C/1, com uma resolução

0,001g e capacidade de 360g. além da massa, também foram feitas secagens para avaliar a espessura do produto.

Logo após serem cortados e colocados nos cestos, os melões foram para dentro da estufa de circulação forçada de ar, regulada em uma das duas seguintes temperaturas, 50, 60 e 70°C. Os intervalos de tempos iniciais para o procedimento foram de, 2, 5, 10, 20, 30, 60, 120, aumentado gradativamente. A cada término do intervalo de tempo as amostras eram retiradas e pesadas. Esse processo foi repetido até que a massa constante fosse atingida. Por fim, quando as amostras para massa atingem o equilíbrio, a estufa é ajustada para 105°C, já que a temperatura em que ocorre a ebulição é menor que essa, portanto, dessa forma, garante-se a retirada de forma total da água presente no produto. Após a estufa ser ajustada, as amostras são colocadas novamente dentro da estufa e permanecem dentro dela por um período de 24 horas, para que possa ser determinada a massa seca.

Para a secagem da espessura não foi preciso colocar as amostras a 105°C durante 24 horas. Assim que os melões paravam de variar o valor da espessura, as amostras eram retiradas.

Ao final do experimento e com todos os dados obtidos, foram construídas novas tabelas para cada cesto separadamente, tanto os de massa quanto os de espessura, depois foi calculada a média da espessura (se tivessem mais de uma amostra), e a média da razão de umidade, conseguida com os dados da massa.

Secagem para as temperaturas de 50, 60 e 70°C

Depois que foram cortados, os quadrados foram colocados em três cestos de alumínio, onde foram marcados com códigos, para facilitar a identificação e a pesagem. Cada cesto recebeu seis quadrados de melão.

Na Figura 2, a seguir apresentam-se os cestos juntamente com os quadrados de melões utilizados no processo de secagem para observar o decréscimo da massa, antes dos mesmos entrarem na estufa.

Antes do início do experimento, os cestos utilizados foram pesados e o valor da massa dos mesmos foi utilizada para obter o valor da massa inicial e da massa final em cada um dos cestos durante o procedimento.

Além da secagem para a observação da massa, foi realizada também uma secagem para observar o decréscimo de sua espessura, especificamente. Os

melões utilizados na secagem de espessura também foram cortados em quadrados de 40x40 mm, com espessura de 5 mm. Assim como as de massa, as amostras de espessura também foram feitas em triplicata. Cada cesto recebeu um quadrado de melão, e no final do experimento também foi feita uma tabela com a média das três amostras. A Figura 2 mostra as amostras antes de serem secas, e a tabela 05 mostra o decréscimo do valor da espessura.



Figura 2 - Cestos com os quadrados de melão utilizados na secagem.

Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como nas primeiras secagens antes do início do experimento, os cestos utilizados foram pesados e esses pesos serviram para obter o valor da massa inicial e da massa final em cada um dos cestos durante o procedimento. Cada cesto também recebeu seis quadrados de melão.

Além da secagem para a observação da massa, foi realizada também uma secagem para observar o decréscimo de sua espessura, porém essa secagem não foi feita em triplicata, ela utilizou apenas um cesto com um quadrado de melão dentro. Os melões utilizados na secagem também foram cortados em quadrados de 40x40 mm, com espessura de 5 mm.

Foi utilizado o Software Lab Fit para gerar os gráficos da espessura em função do teor de umidade. Esses gráficos forneceram as expressões que foram utilizadas para descrever as cinéticas de secagens no Infinite Slab Numerical, para as temperaturas de 50, 60 e 70°C.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos foram simulados com uma malha unidimensional de 100 volumes de controle e com 1000 passos no tempo (steps de tempo) para as devidas

temperaturas já definidas 50, 60 e 70°C. Ao todo foram realizadas 15 simulações, sendo 5 simulações para cada temperatura, sendo considerada a espessura do melão variando para cada temperatura.

A seguir apresentam-se a tabela com as expressões utilizadas:

Tabela 1 - Expressões que foram utilizadas para descrever as cinéticas de secagem

Temperatura (C°)	Expressão para espessura (m)
50	$(5,991 \cdot X^2 + 0,6715) \cdot 10^{-3}$
60	$(4,705 \cdot X^2 + 0,6002) \cdot 10^{-3}$
70	$(4,397 \cdot X^2 + 0,8814) \cdot 10^{-3}$

Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados das otimizações com os dados estão destacados a seguir, onde são mostrados os valores de a e b sendo o parâmetro de ajuste que aparece na função do software *Infinity Slab Numerical*, bem como os valores ótimos para os indicadores estatístico (X^2) e (R^2) e do coeficiente convectivo (h), gerados a partir do referido programa, estão organizadas em ordem decrescente do coeficiente de determinação (R^2), juntamente com o menor valor para o qui-quadrado (X^2).

Como foi destacado na metodologia, a modelagem matemática proposta considera a variação da difusividade efetiva de massa e da espessura do produto.

Assim, visando incluir o encolhimento das cascas de melão na determinação dos parâmetros do processo, foi necessário determinar uma expressão que descrevesse de forma satisfatória a relação entre a espessura e o valor médio da razão de umidade.

Tabela 2 - Funções usadas na otimização

Identificação das funções (F)	Função para difusividade ($m^2 \text{ min}^{-1}$)
F1 (a)	$b \cdot \exp(a \cdot x)$
F2 (b)	$b \cdot \exp(a \cdot x^2)$
F3 (c)	$b \cdot \cosh(a \cdot x)$
F4 (d)	$b \cdot \cosh(a \cdot x^2)$
F5 (e)	b

Fonte: Autoria própria (2021).

Nas Tabelas 3, 4 e 5 estão expressos os resultados referentes aos parâmetros utilizados para determinar o melhor ajuste dos dados experimentais.

Tabela 3 - Resultados dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem do melão com a temperatura de 50°C.

T (°C)	F	a	b	h (ms ⁻¹)	χ ²	R ²
50	F1	5,2170	1,2524X10 ⁻¹⁰	7,1797X10 ⁻⁶	5,41756X10 ⁻³	0,9988718
	F2	6,5529	2,9204X10 ⁻¹⁰	4,5315X10 ⁻⁶	3,84546X10 ⁻³	0,9992173
	F3	5,6643	1,9815X10 ⁻¹⁰	6,4562X10 ⁻⁶	3,27071X10 ⁻³	0,9993241
	F4	8,0824	3,7572X10 ⁻¹⁰	4,1611X10 ⁻⁶	4,93189X10 ⁻³	0,9990051
	F5	0,0000	1,4384X10 ⁻⁴	2,4099X10 ⁻⁶	0,15664X10	0,9740126

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 4 - Resultados dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem do melão com a temperatura de 60°C.

T (°C)	F	a	b	h (ms ⁻¹)	χ ²	R ²
60	F1	4,5056	1,6111X10 ⁻¹⁰	8,6846X10 ⁻⁶	7,20834X10 ⁻³	0,9984253
	F2	5,3559	3,4747X10 ⁻¹⁰	5,6431X10 ⁻⁶	2,23489X10 ⁻³	0,9995197
	F3	5,0032	2,4540X10 ⁻¹⁰	7,8253X10 ⁻⁶	4,10999X10 ⁻³	0,9991074
	F4	6,6235	4,4871X10 ⁻¹⁰	5,0454X10 ⁻⁶	2,37792X10 ⁻³	0,9994921
	F5	0,0000	9,8219X10 ⁻¹⁰	3,4609X10 ⁻⁵	0,14798	0,9729763

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 5 - Resultados dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem do melão com a temperatura de 70°C.

T (°C)	F	a	b	h (ms ⁻¹)	χ ²	R ²
70	F1	3,7863	3,6712X10 ⁻¹⁰	8,0935X10 ⁻⁶	5,75479X10 ⁻³	0,9986327
	F2	4,6923	7,3835X10 ⁻¹⁰	5,8259X10 ⁻⁶	1,45432X10 ⁻³	0,9996582
	F3	4,2429	5,6399X10 ⁻¹⁰	7,6896X10 ⁻⁶	3,03551X10 ⁻³	0,9992845
	F4	5,9102	9,7527X10 ⁻¹⁰	5,4050X10 ⁻⁶	1,12092X10 ⁻³	0,9997382
	F5	0,0000	1,2902X10 ⁻⁹	3,0114X10 ⁻⁶	9,87978X10	0,9797510

Fonte: Autoria própria (2021).

A seguir apresenta-se o gráfico referente a simulação feita pelo Infinite Slab Numerical para a temperatura de 50°C

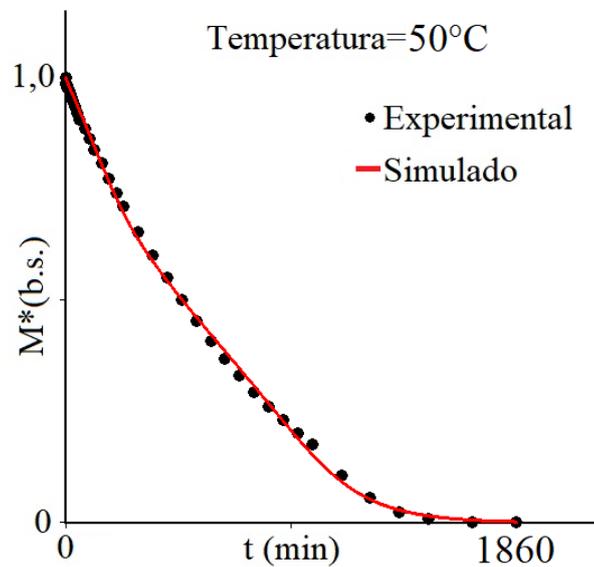


Figura 3 - Simulação da curva para o modelo numérico pelo software Infinite Slab Numerical para a temperatura de 50°C com a Função F4.

Fonte: Infinite Slab Numerical (2021).

A seguir apresenta-se o gráfico referente a simulação feita pelo Infinite Slab Numerical para a temperatura de 60°C

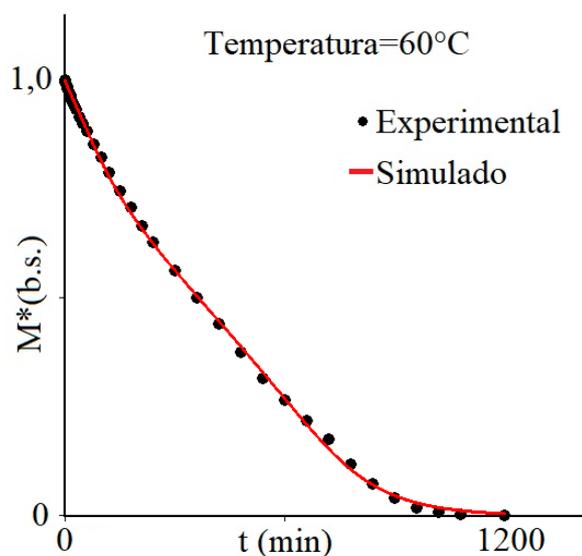


Figura 4 - Simulação da curva para o modelo numérico pelo software Infinite Slab Numerical para a temperatura de 60°C com a Função F4.

Fonte: Infinite Slab Numerical (2021).

A seguir apresenta-se o gráfico referente a simulação feita pelo Infinite Slab Numerical para a temperatura de 70°C

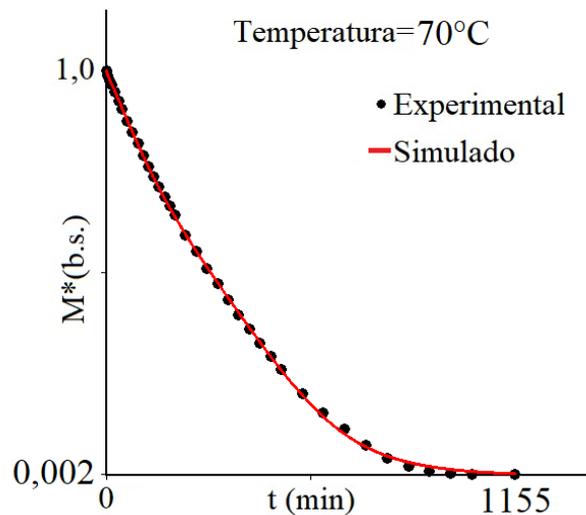


Figura 5 - Simulação da curva para o modelo numérico pelo software Infinite Slab Numerical para a temperatura 70°C com a Função F4.

Fonte: Infinite Slab Numerical (2021).

No Infinite Slab Numerical, foram gerados gráficos de contorno que mostram, através do código de cores, a distribuição da umidade no interior do produto ao simular as condições experimentais.

Na Figura 6 podem ser visualizados os gráficos de contorno para as cascas de melão submetidas à secagem a 50°C, em quatro instantes distintos do processo de secagem (93min; 232,5min ;651min ;930min).

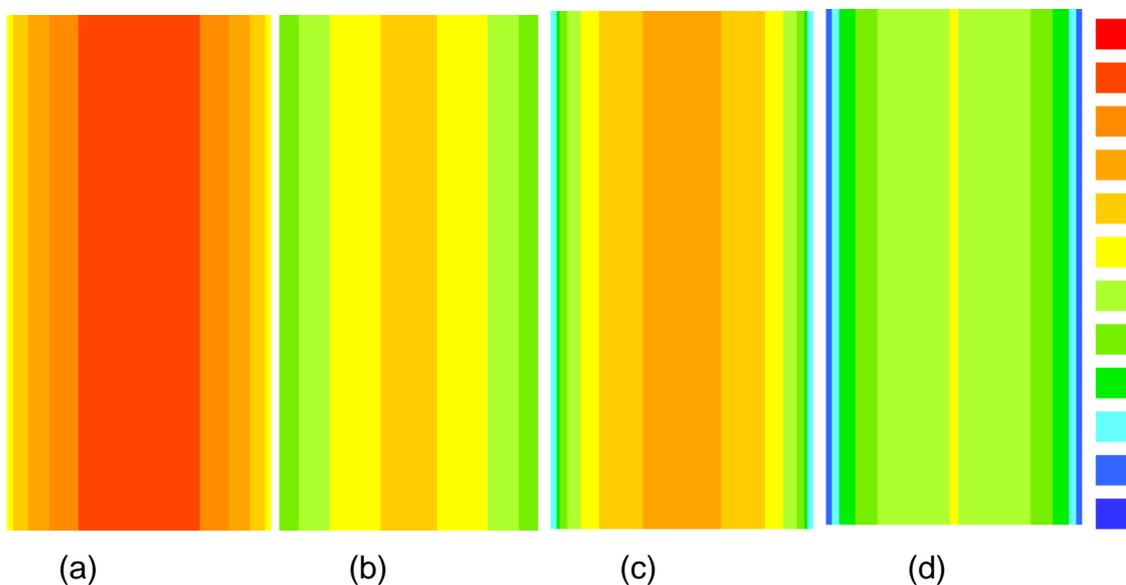


Figura 6 – Gráficos de contorno, mostrando a distribuição de umidade dentro dos produtos para $T = 50^{\circ}\text{C}$ para os instantes: (a) 93min; (b) 232,5min; (c) 651min; (d) 930min.

Fonte: Infinite Slab Numerical (2021).

Ao analisar a Figura 6 é possível identificar que as extremidades do produto, apresentam uma perda de umidade mais rápida, em comparação à porção central por estarem em um contato maior com o ar de secagem.

Na Figura 7, podem ser visualizados os gráficos de contorno para as cascas de melão submetidos à secagem a 60°C , em quatro instantes distintos do processo de secagem (60min, 150min, 360min, 540min).

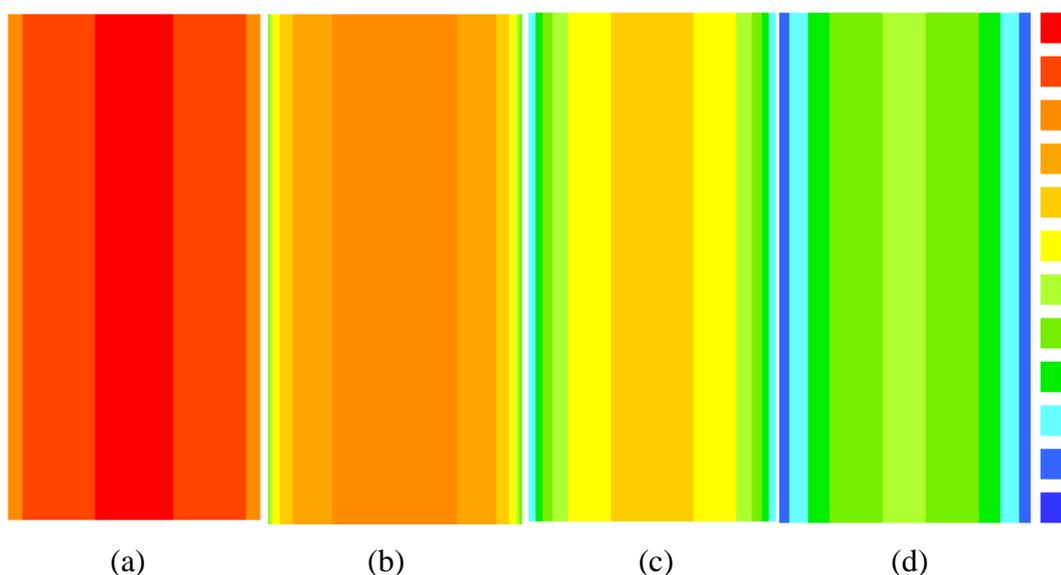


Figura 7 – Gráficos de contorno, mostrando a distribuição de umidade dentro dos produtos para $T = 60^{\circ}\text{C}$ para os instantes: (a) 60min; (b) 150min; (c) 360min; (d) 540min.

Fonte: Infinite Slab Numerical (2021).

Ao observar o instante (d), percebe-se que extremidades do produto há um teor de umidade bastante reduzido, enquanto que a porção central se encaminha rumo ao mesmo teor.

Na figura 8 estão expressos os resultados referentes ao experimento de 70°C , para os instantes de 57,75min; 150min; 346,5min; 462min.

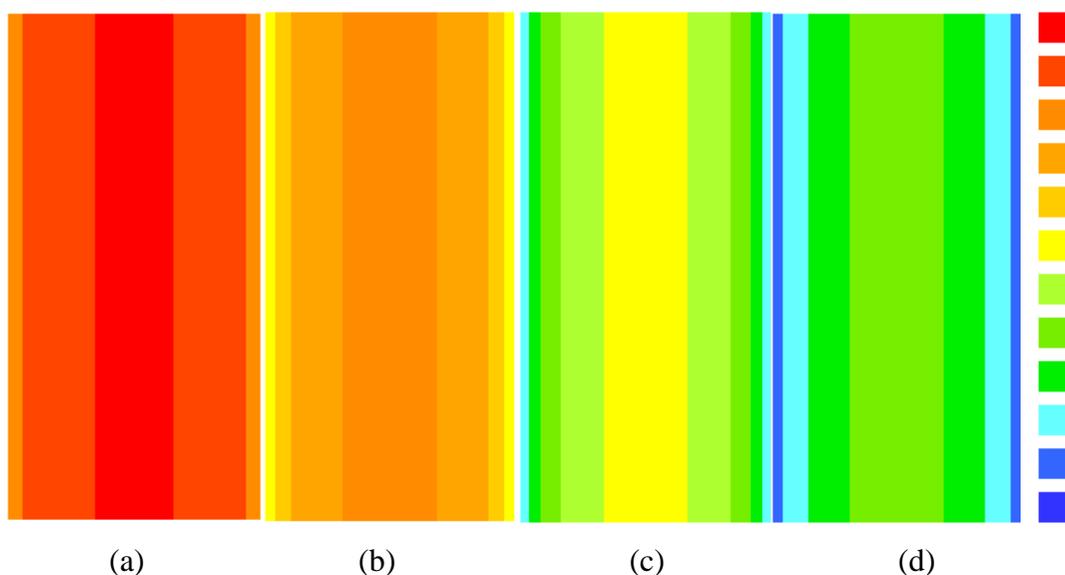


Figura 8 – Gráficos de contorno, mostrando a distribuição de umidade dentro dos produtos para $T = 70^{\circ}\text{C}$, para os instantes: (a) 57,75min ; (b) 150min; (c) 346,5min; (d) 462min.

Fonte: InfiniteSlab Numerical (2021).

Ao fazer uma comparação entre a Figura 7 e a 8, é possível identificar que mesmo em tempos menores, a redução do teor de umidade para o experimento realizado a 70°C ocorreu de modo mais acelerado. Obviamente, tal resultado é consequência da maior temperatura do ar de secagem.

A comparação da simulação da cinética de secagem dos três experimentos, para as temperaturas de 50, 60 e 70°C podem ser visualizadas na Figura 9.

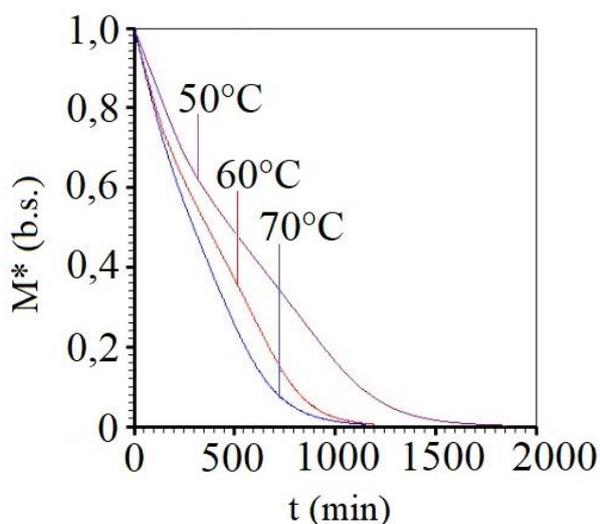


Figura 9 – Comparação da simulação da cinética de secagem

Fonte: Infinite Slab Numerical (2021).

CONCLUSÃO

Ao observar os resultados obtidos dos parâmetros de R^2 e X^2 , percebe-se que a função F3 descreve melhor a cinética de secagem para a temperatura de 50°C, porém comparando o gráfico da F3 com a F4 nota-se que o melhor resultado para a cinética de secagem é o da F4, pois os pontos estão mais alinhados a curva. A mesma situação repete-se para as temperaturas de 60°C e 70°C.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq – UFCG) foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) por dar suporte para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BRITO, Enieluce dos Santos et al. Avaliação da capacidade antioxidante de variedades de melão (*Cucumis melo* L.) comercializadas no Brasil e determinação do teor de glutathiona reduzida (GSH). 2017.

BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Eng. Agrícola. 1999, 122 p.

CELESTINO, Sonia Maria Costa. Princípios de secagem de alimentos. Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E), 2010.

CANO-CHAUCA, M.; RAMOS, A. M.; STRINGHETA, P. C; MARQUES, J. A.; SILVA, P.I. Curvas de Secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. Boletim do CEPPA, Curitiba, v.22, n.1, p. 121-132, 2004.

COSTA,N.D.(Ed.). Sistema de produção de melão. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010 .

DEULOFEU, C. Situación y perspectivas del melón en el mundo. In: VALLESPER, A. N., coord. Melones . Reus: Horticultura, 1997. Cap.2, p.21-24. (Compendios de Horticultura, 10).

DOS SANTOS MELO, Karla et al. Secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru: experimentação e ajustes de modelos matemáticos. Revista Caatinga, v. 26, n. 2, p. 9-17, 2013.

KEEY, R.B. Drying: Principles and practice. New York: Pergamon Press. 1972. 358p.

MATOS, M. A., NINAUT, E. S. & CAIADO, R. (2008), 'A influência do câmbio na formação de preços do agronegócio', Revista de Política Agrícola 17(4), 6–13.

MENEZES, J. B. et al. Características do melão para exportação. Melão: pós-colheita. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, p. 13-22, 2000.

MORAES, M. L. B. Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz. 2000. 50 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de Secagem de Pêra Bartlett (*Pyrus* sp.) em Fatias. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, set-dez. 2001.

PARK, K. J., BIN, A., BROD, F. P. R., PARK, T. H. K. B. (2001) Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering*, v.52, p. 293-298.

PARK, Kil Jin et al. *Conceitos de processo e equipamentos de secagem*. Campinas: Unicamp, 2007.

PORTELLA, José Antonio; EICHELBERGER, Luiz. *Secagem de grãos*. Embrapa Trigo-Livro técnico (INFOTECA-E), 2001.

SILVA, E. F. M. D. (2013). *Modelos empíricos e difusivos para a descrição da secagem de bananas*.

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.

SILVA, S.; TASSARA, H. *Frutas Brasil frutas*. São Paulo: Empresa das Artes, 321 p., 2005.

SILVA, J. S., LIMA, J. R. F., SANTOS, R. K. B., SANTOS, A. S. & ANDRADE, C. A. S.

(2011), 'Análise do comportamento dos preços de manga exportada do Brasil: Análise no domínio do tempo', *Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural - VI SOBER Nordeste*, Petrolina, Pernambuco.

Anais (CD-ROM) Pernambuco, SOBER, 2011. 18 p.

TACO - *Tabela brasileira de composição de alimentos* (2011). 4.ed. - Campinas, SP: NEPAUNICAMP, 104p.