

Otimização e simulação computacional do tratamento térmico da polpa de manga armazenada em recipientes obtidos por revolução de áreas planas

Helymarckson Batista de Azevedo¹, Paula Isabella de Oliveira Rocha², Jair Stefanini Pereira de Ataíde³, Vera Solange de Oliveira Farias³, Célia Maria Rufino Franco³, Aluízio Freire da Silva Júnior³

¹ Aluno do curso de Licenciatura em Física, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – Cuité/PB – Brasil

² Aluno do curso de graduação em Engenharia de Civil- CTRN, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – Campina Grande/PB – Brasil.

³ Professor(a) Doutor(a) da Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – Cuité/PB – Brasil

Resumo

A indústria alimentícia, preocupada com a qualidade dos produtos e a segurança do consumidor, utiliza várias técnicas de conservação de alimentos que buscam aumentar o tempo de prateleira. Neste sentido, tem-se a necessidade de realizar estudos para verificar a eficácia de alguns métodos. O objetivo deste trabalho é apresentar uma solução numérica da equação da difusão do calor, bidimensional em coordenadas generalizadas, considerando a condição de contorno do primeiro tipo, relativo à transferência de calor durante um tratamento térmico alimentar. A metodologia desenvolvida foi aplicada na descrição da penetração de calor em polpa de manga rosa (*mangifera indica L.*) contida num recipiente com geometria arbitrária, envolvendo a determinação de parâmetros termofísicos relacionados ao produto. O sólido pode ser gerado pela revolução de áreas planas, explorando a simetria dos corpos, o que reduz o problema para o caso bidimensional e diminui significativamente o esforço computacional em comparação com o método tridimensional. Os resultados obtidos mostraram que os valores encontrados para a difusividade são da ordem de $10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e comprovam que esta propriedade é variável com a temperatura.

Palavras-chave: Tratamento térmico, difusividade térmica, manga rosa, geometria arbitrária.

1. Introdução

Os avanços tecnológicos permitiram um aprimoramento cada vez maior das técnicas de conservação de alimentos, assegurando um tempo de prateleira maior e seguro para os consumidores. Produtos que apresentam alto teor de água, como frutas e grãos estão mais susceptíveis a estragarem rapidamente, sendo necessário aplicar tratamentos adequados para aumentar sua validade (ATAÍDE, 2014). Entre estas técnicas, estão as que utilizam o calor (tratamentos térmicos) para inibir o desenvolvimento de micro-organismos e agentes patogênicos que possam danificar a qualidade de certos alimentos e bebidas.

No entanto, para que um tratamento térmico seja aplicado, é necessário conhecer as propriedades termofísicas do produto, para que o processo não seja ineficaz ou altere completamente as características sensoriais do mesmo. As propriedades termofísicas mais conhecidas são a densidade, o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade. Esta última é de extrema importância, pois ela descreve a rapidez com que uma grandeza é difundida no material.

As propriedades termofísicas devem ser determinadas para cada material, pois com estes valores conhecidos, é possível estabelecer condições ótimas ao processo, prever o tempo que o processo deve durar, entre outras coisas.

Na literatura existem modelos empíricos, experimentais e outros, que permitem a determinação de propriedades como a condutividade térmica e a difusividade térmica, para processos que envolvam transferência de calor. A difusividade térmica mede a capacidade que um material tem de conduzir energia térmica em relação à capacidade de armazená-la (INCROPERA e DEWITT, 2008). Alguns trabalhos que tratam da determinação da difusividade térmica de produtos pastosos são reportados na literatura (SARRIA et al., 2004; ATAÍDE, 2014; MOHAMED, 2015; ARAÚJO, 2016; ABBASNEZHAD et al., 2016). Em todos estes estudos, o modelo difusivo foi utilizado. Este modelo é baseado na equação da difusão e possibilita descrever processos de transferência de calor ou massa.

Para descrever o processo de tratamento térmico, usando modelos de difusão, além das propriedades termofísicas já mencionadas, devem ser definidas as dimensões e a geometria do recipiente que contém o alimento a ser aquecido. Se a geometria do recipiente usado para acondicionar o produto possuir uma geometria regular e a difusividade térmica for considerada constante, uma solução analítica da equação de difusão pode ser usada. No caso da geometria ser complexa e/ou a difusividade térmica for tratada como função da temperatura local, um sistema de coordenadas curvilíneas generalizadas ou ajustadas ao contorno (Boundary-fitted), deve ser utilizado (SILVA 2007; SILVA et al. 2009; FARIAS et al. 2012; FARIAS et al. 2016; SILVA et al. 2017).

Silva et al. (2011) realizaram um estudo numérico para estimar a difusividade térmica (constante ou variável) dos gêneros alimentícios (purê de tomate e creme custard) colocados em latas durante a sua pasteurização. Os dados experimentais da temperatura no centro geométrico da lata foram comparados com os resultados obtidos por simulações da penetração de calor. Para obter os dados simulados a equação de difusão foi resolvida numericamente usando o método de volumes finitos, com formulação totalmente implícita para condição de contorno do primeiro tipo. Segundo a pesquisa, os melhores resultados foram obtidos supondo uma expressão para difusividade térmica, crescente com a temperatura local.

Silva et al. (2009) propuseram uma solução numérica da equação de difusão para sólidos obtidos pela revolução de superfícies planas arbitrárias com o intuito de descrever a transferência de calor ou o transporte de massa. Para isso, discretizaram a equação de difusão escrita em coordenadas generalizadas, utilizando o método dos volumes finitos com formulação totalmente implícita, empregando a condição de contorno do primeiro tipo. A solução proposta pelos pesquisadores explora a simetria dos corpos, o que reduz o problema para o caso bidimensional e diminui significativamente o esforço computacional.

Silva et al. (2017) propôs um modelo para determinar a difusividade térmica em função da temperatura local para produtos pastosos armazenados em recipientes metálicos com geometria arbitrária obtidos pela revolução de áreas planas. O produto pasteurizado foi o mamão e análises físico-químicas e microbiológicas foram realizadas antes e depois da exposição ao calor. Os resultados mostraram que a difusividade térmica é uma propriedade representada por uma função crescente com a temperatura local. Quanto às análises microbiológicas, os resultados mostraram que houve uma redução significativa dos micro-organismos após a pasteurização.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico e experimental do processo de transferência de calor durante um tratamento térmico aplicado a polpa da manga (*magnífica indica L.*) acondicionada em um recipiente de geometria arbitrária. O recipiente utilizado para acondicionar a manga foi o mesmo que Silva et al. 2017 usou para pasteurizar o mamão. A equação da difusão em coordenadas generalizadas bidimensionais foi utilizada para descrição do processo. A partir dos dados experimentais, expressões para a difusividade térmica foram investigadas usando o *software* Diffusion RE desenvolvido por Silva et al. (2007). A função que apresentou os melhores parâmetros estatísticos foi utilizada para simular o processo de tratamento térmico nos recipientes apresentados.

2. Materiais e Métodos

2.1 Modelagem Matemática

O recipiente utilizado para acondicionar do produto submetido ao tratamento térmico possui o formato oval, conforme ilustra a Figura 1.

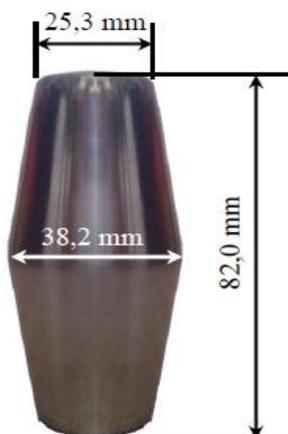


Figura 1: Recipiente onde foi acomodada a polpa para ser pasteurizada
Fonte: Ataíde (2014)

A escolha por coordenadas generalizadas se dá pelo fato de o recipiente ter geometria arbitrária, sendo formado pela junção de dois copos pequenos. A simetria possibilita que o processo seja analisado (sem perda na precisão dos resultados) apenas na área geratriz do sólido, diminuindo o esforço computacional. A parte superior do sólido é gerada por revolução de um ângulo θ da área geratriz e em relação ao eixo y ou ao eixo transformado η , e a parte inferior do sólido obtida por uma translação do sólido obtido por revolução em relação ao eixo x ou eixo transformado ξ . Desta forma, a equação da difusão pode ser utilizada apenas em sua forma bidimensional em coordenadas generalizadas (ξ, η) , como é mostrada a seguir:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\alpha_{11} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \alpha_{12} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) J \Gamma^{\Phi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\alpha_{21} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \alpha_{22} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) J \Gamma^{\Phi} \right], \quad (1)$$

onde Φ é a variável dependente de interesse, Γ^{Φ} e λ são coeficientes de transporte, τ é o tempo, J é o jacobiano da transformação de coordenadas cartesianas (x,y) para coordenadas generalizadas (ξ,η) e os parâmetros α são tensores métricos.

A Equação 1 é conhecida como equação da difusão no domínio arbitrário e foi resolvida numericamente usando o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita.

As expressões para os parâmetros α e o Jacobiano J para o sólido de revolução podem ser encontradas em Silva (2007) e Ataíde (2014). Para resolver numericamente a Equação (1), as seguintes hipóteses são assumidas: o produto é considerado homogêneo e isotrópico; a distribuição de temperatura no produto é inicialmente uniforme e permanece simétrica em relação ao eixo de revolução; a temperatura do meio de aquecimento deve permanecer constante; não deve haver nenhuma mudança de fase no produto durante o processo; o único mecanismo de transporte de calor no interior do produto é de condução; a condição de contorno é do primeiro tipo; a difusividade térmica é variável com a temperatura local; o volume do produto não é afetado pelo processo de difusão.

O sólido em que a polpa da manga foi acondicionada apresenta simetria radial e axial. Para diminuir o esforço computacional, basta tomar como área geratriz o contorno de um quarto do recipiente. Com este contorno foi possível gerar a malha discretizada apresentada na Figura 2, que foi utilizada na solução numérica (ATAÍDE 2014; SILVA et al. 2017).

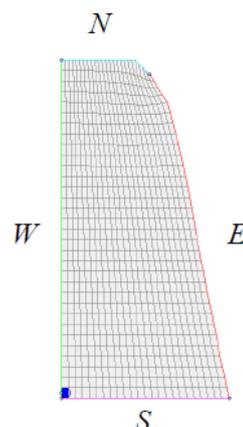


Figura 2: Malha refinada do copo superior 32x24.

Fonte: Ataíde (2014)

Conforme pode ser observado na Figura 2, há um destaque para o ponto localizado no centro geométrico do objeto, que é o de maior interesse da análise. Este interesse se deve ao fato de que essa região é a mais desfavorável, isto é, a que mais demora a entrar em equilíbrio térmico com o meio de aquecimento.

Os detalhes para solução numérica estão mostrados em Ataíde (2014), onde o processo foi aplicado à pasteurização de polpas de mamão e caju.

2.2 Metodologia Experimental

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Alimentos, do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. O produto submetido ao tratamento térmico foi à polpa da manga rosa (*Mangifera indica L.*), como mencionado anteriormente. Os frutos foram comprados na feira livre de Picuí-PB, escolhidos dentre aqueles que apresentavam polpa firme e sem manchas. Após a assepsia, os frutos foram descascados, cortados e postos em um Multiprocessador (Modelo Cadence Efficace Plus – 600W), sem adição de água, para a obtenção da polpa. Em seguida, produto foi acondicionado em recipientes plásticos e deixado sobre a bancada para entrar em equilíbrio térmico com o ambiente antes de ser submetido ao processo de tratamento térmico.

O recipiente em que a polpa foi armazenada para ser aquecida (ver Figura 3) foi construído através da junção de dois copos de inox idênticos com diâmetro central de 38,2 milímetros, diâmetro da área da base de 25,3 milímetros e altura 82,0 milímetros. Um dos copos continha furos na sua base por onde foram colocados os cabos do termopar digital utilizado no experimento para registrar as temperaturas no centro geométrico e na borda do recipiente.



Figura 3. Recipiente pronto para ser submetida ao processo *térmico*.

Após o recipiente ser preenchido com a polpa de manga e ser lacrado utilizando fita adesiva para isolamento de equipamentos elétricos, foi submetido a uma espécie de banho-maria dentro de um pasteurizador da marca Etiel PP – 30 L, desenvolvido pela fábrica da Etiel localizada na cidade de Gramado – RS. O pasteurizador é mostrado na Figura 4.



Figura 4. Pasteurizador utilizado para o banho-maria

O procedimento de pasteurização foi realizado quatro vezes (quatro repetições do mesmo experimento) e o controle de temperatura da água durante todo o processo foi realizado manualmente, com o auxílio de um termômetro de espeto, modelo WT – 1, com uma capacidade de leitura de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Um aquecedor elétrico foi utilizado para controlar a temperatura da água. Desta forma, o recipiente era mergulhado no banho-maria por um tempo de mais ou menos 35 minutos. A temperatura foi mantida entre $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $68\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que caracteriza uma pasteurização conhecida por baixa pasteurização, que não altera as propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos.

Nesta montagem, os dados são transmitidos instantaneamente do termômetro para um computador utilizando-se um cabo RS – 232 e foram armazenados com um intervalo de tempo de 1 (um) segundo. Tal procedimento se deu simultaneamente com a pasteurização.

Nos experimentos, o aquecimento do produto ocorreu entre as temperaturas de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $66\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os dados experimentais estão no estado transiente do processo de aquecimento e a difusividade térmica aparente deve ser relacionada à temperatura local, do interior da polpa de manga.

Nesta experiência, considerou-se um tratamento térmico no qual o centro geométrico estivesse em equilíbrio térmico com toda a amostra.

3. Resultados

A obtenção dos valores ótimos para a difusividade térmica da polpa da manga foram obtidos por otimização computacional através do *Software* Diffusion RE (SILVA, 2007). Este *software* é baseado no método inverso e apresenta interface gráfica com o usuário. É necessário carregar a malha, os dados experimentais e as condições iniciais e de contorno para que o programa simule a cinética de aquecimento e adeque os valores das constantes propostos inicialmente para a função escolhida.

O *software* é baseado na minimização de uma função para determinar o valor ótimo para a difusividade térmica (α). Esta função é o qui-quadrado (χ^2), que é expresso em função

da diferença entre os valores experimentais e simulados. Quanto menor o valor de χ^2 , melhor é o resultado da otimização. O coeficiente de determinação (R^2) também é calculado.

No processo de determinação da difusividade, o programa sugere uma lista com vinte funções para o usuário testar, na busca da melhor função que se adequa ao processo.

Foram investigadas 11 expressões para a difusividade térmica como função da temperatura local. Os resultados para os quatro experimentos (denotados de E1, E2, E3 e E4) mostraram que a melhor função para descrever a cinética de penetração do calor, que corresponde ao menor χ^2 e o maior R^2 , é dada por:

$$\alpha(T) = b \cosh(aT^2), \quad (2)$$

onde T denota a temperatura.

Os coeficientes a e b foram obtidos e estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Melhores funções encontradas para a descrição do aquecimento da polpa da manga e os seus respectivos indicadores estatísticos.

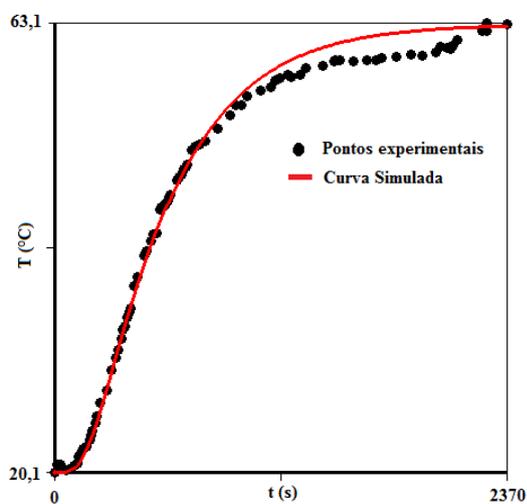
Experimento	Função para a difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$)	χ^2	R^2
E1	$1,2091 \times 10^{-7} \cosh(3,8255 \times 10^{-11} T^2)$	141,3565	0,997402
E2	$1,3059 \times 10^{-7} \cosh(4,4859 \times 10^{-5} T^2)$	13,9110	0,999490
E3	$1,3602 \times 10^{-7} \cosh(4,1370 \times 10^{-5} T^2)$	38,0782	0,998798
E4	$1,3522 \times 10^{-7} \cosh(3,8326 \times 10^{-11} T^2)$	9,36668	0,999614

Utilizando a expressão dada pela Equação 2 para a difusividade térmica, foi possível descrever a cinética de transferência de calor e a distribuição de temperatura no interior do recipiente para vários instantes.

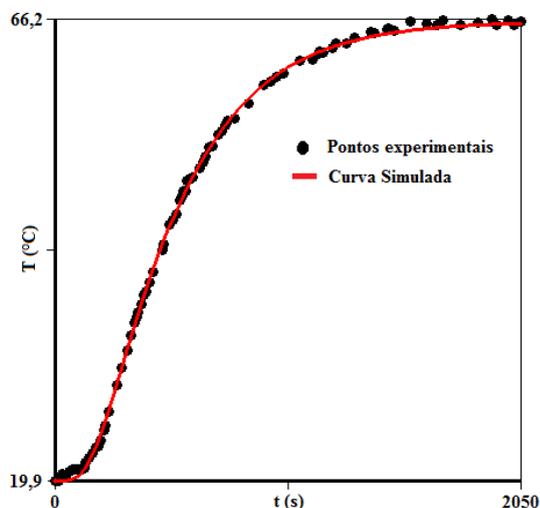
O programa disponibiliza gráficos da cinética de aquecimento do centro geométrico do recipiente durante o tratamento térmico. Os gráficos dos quatro experimentos disponibilizados pelo software estão mostrados na Figura 5, que mostram a superposição entre os pontos experimentais (pretos) e a simulação numérica da evolução da temperatura no centro do recipiente (em vermelho).

Os gráficos mostram que houve uma curva de aquecimento coerente com outros trabalhos presentes na literatura, como em Ataíde (2014) e Silva et al. (2017). Analisando as curvas de aquecimento, é possível perceber que o aquecimento do centro geométrico do recipiente sofre um fator de atraso no início do processo. Consequentemente, a temperatura de equilíbrio no centro é atingida com um tempo maior do que a da superfície. Devido a este fato, frequentemente o ponto central é escolhido para ter o estado transiente acompanhado durante o aquecimento.

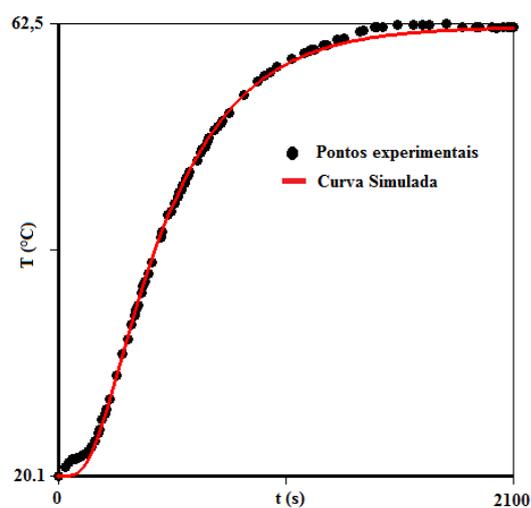
O Diffusion RE ainda disponibiliza gráficos de contorno, que mostram a evolução das isoterms durante o aquecimento da polpa dentro do sólido. Estes gráficos são apresentados na Figura 6. Os contornos mostram que houve um aquecimento gradual dentro do recipiente e que o ponto que mais demorou a atingir a temperatura de equilíbrio foi o centro geométrico.



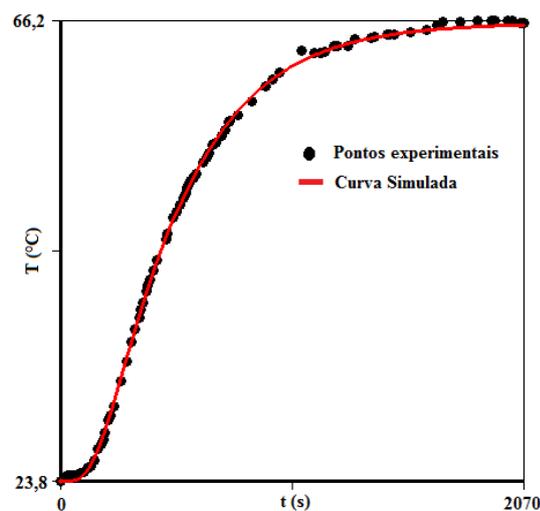
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5. Gráficos da cinética de aquecimento gerados pelo programa Diffusion RE:

(a) E1; (b) E2; (c) E3; (d) E4.

Os contornos das isotermas mostrados na Figura 6 correspondem ao quarto experimento.

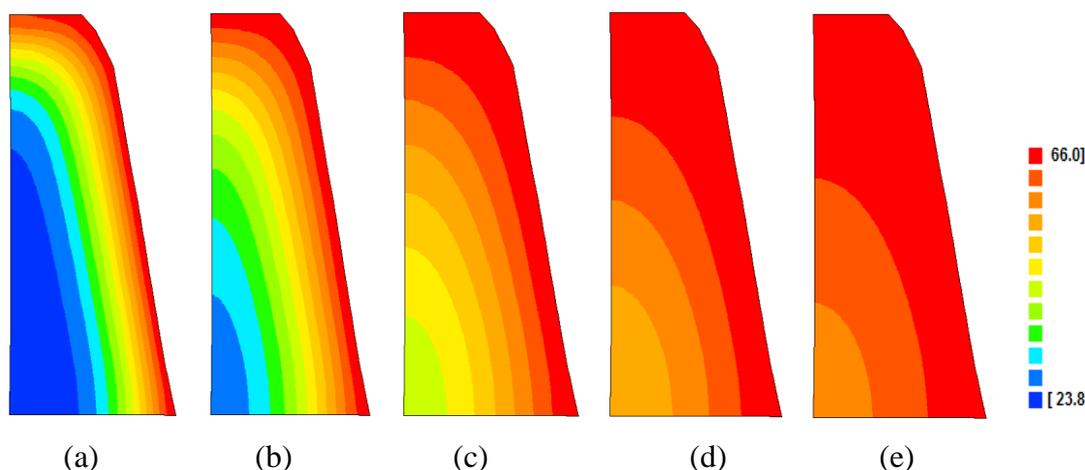


Figura 6. Simulação dos contornos da distribuição de temperaturas (isotermas) durante o aquecimento da polpa da manga nos instantes: (a) 100 segundos; (b) 200 segundos; (c) 400 segundo; (d) 600 segundos; (e) 750 segundos.

3.1. Discussão dos resultados obtidos

Nos processos de aquecimento e resfriamento, é de fundamental importância o conhecimento dos parâmetros termofísicos dos produtos com o intuito de melhor descrever tal processo, definir o tempo, os custos destas operações e garantir a segurança alimentar (TRES et al. 2011; FARIAS et al. 2012; Silva et al. 2017). Na pasteurização, em particular, é preciso assegurar que a temperatura correta seja alcançada em todos os pontos do produto, inativando os agentes patogênicos. Nesta pesquisa, de posse dos parâmetros termofísicos, pode-se realizar simulações da penetração do calor nos pontos mais desfavoráveis, de modo a determinar o tempo necessário para inativar tais agentes naqueles pontos.

A difusividade térmica de um material é influenciada pela temperatura, umidade, massa específica e porosidade. Alguns trabalhos enfatizam a variação da difusividade térmica em consequência da variação da temperatura e da umidade do produto, durante o processamento (CARBONERA et al. 2003; TRES et al. 2011; FARIAS et al. 2012). Além disso, muitos produtos alimentícios não são homogêneos e a difusividade térmica pode variar de um local para outro dentro do mesmo produto. Apesar do que foi exposto, é comum encontrar na literatura diversos resultados que consideram constante a difusividade térmica aparente dos produtos pesquisados (CARBONERA et al. 2003; BETTA et al. 2009; UKRAINCZYK 2009).

Neste trabalho, o valor obtido quando se considerou constante a difusividade térmica aparente mostra que não há diferenças significativas quando comparados com os encontrados na literatura para frutas (CARBONERA et al. 2003; PLAZL et al. 2006; BETTA et al. 2009). No entanto, o modelo que considera difusividade térmica variável descreve o processo de forma mais real. É possível encontrar na literatura alguns autores que assumem a difusividade térmica aparente como uma função da temperatura local (TRES et al. 2003; FARIAS et al. 2012; ABAKAROV e NUÑEZ 2013; MOHAMED 2015; ARAÚJO 2016; SILVA et al. 2017).

4. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que o tratamento térmico foi eficaz, visto que se o produto for submetido a tratamentos térmicos com temperaturas entre 62 e 68 °C durante um tempo de 30 minutos, inativa os micro-organismos que possam danificar o alimento. O procedimento aplicado apresentou resultados coerentes e adequados. O valor para a difusividade foi da ordem de $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, o que está em concordância com outros trabalhos presentes na literatura. As soluções obtidas com o *software* empregado foram usadas para estimar o tempo e as condições adequadas do processo. Assim, torna-se desnecessário a realização de experimentos a cada vez que um recipiente de diferentes formas for utilizado para acondicionar o produto.

5. Referências

- ABAKAROV, A.; NUÑEZ, M.; Thermal food processing optimization: Algorithms and *software*. Journal of Food Engineering, v. 115, n. 4, p.428-442, 2013.
- ABBASNEZHAD, B.; HAMDAMI, N.; MONTEAU, J.Y.; VATANKHAH, H.; Numerical modeling of heat transfer and pasteurizing value during thermal processing of intact egg. Food Science & Nutrition, v.1, p.42-49, 2016.
- ARAÚJO, J.C.R. Transferência de calor durante o processamento térmico em polpa de fruta armazenada em recipientes de forma cilíndrica. Monografia (Graduação em licenciatura em Física), Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, PB. 2016.
- ATAÍDE, J.S.P. Transferência de calor durante o processo de pasteurização de polpas de frutas armazenadas em recipientes obtidos por revolução de áreas planas. Tese (Doutorado em engenharia de processos) Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB. 2014. 259 f.
- BETTA, G.; RINALDI, M.; BARBANTI, D.; MASSINI, R. A quick method for thermal diffusivity estimation: application to several foods. Journal of Food Engineering, v. 91 p. 34-41, 2009.
- CARBONERA, L.; CARCIOFI, B. M.; HUBER, E.; LAURINDO, J. B. Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. Brazilian Journal of Food Technology, v. 6, n. 2, p. 285 – 290, 2003.
- FARIAS, V.S.O. Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. 2011. 265 f.
- FARIAS, V.S.O.; SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; DELGADO, J.M.P.Q.; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B. Transient Diffusion in Arbitrary Shape Porous Bodies: Numerical Analysis Using Boundary-Fitted Coordinates. In: Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer in Porous Media, Chapter 4, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 85 – 119, 2012.
- FARIAS, V.S.O., SILVA, W.P., SILVA, C.M.D.P.S., SILVA JR., A.R., AIRES, J.E.F., ROCHA, V.P.T. (2016) Assessment of diffusion models to describe drying of roof tiles using generalized coordinates, Heat and Mass Transfer, 52(7): 1403-1416.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- MOHAMED, I. O.; Determination of Cold Spot Location for Conduction-Heated Canned Foods Using an Inverse Approach, International Journal of Food Processing Technology, v. 2, p.10-17. 2015.

PLAZL, I.; LAKNER, M.; KOLOINI, T. Modeling of temperature distributions in canned tomato based dip during industrial pasteurization. *Journal of Food Engineering*, v. 75, n. 3, p. 400 – 406, 2006.

SARRIA, Saul D. ; HONÓRIO, Sylvio L. Condutividade e difusividade térmica do figo (ficus carica l.) “roxo de valinhos”. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.24, n.1, p.185-194, jan./abr. 2004.

SILVA, W.P. Transporte Difusivo em Sólidos com forma arbitrária usando Coordenadas Generalizadas. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SILVA, W.P.; PRECKER, J.W.; SILVA, D.D.P.S.; SILVA, C.D.P.S.; LIMA, A.G.B. Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via the finite volume method and generalized coordinates, *International Journal of Heat Mass Transfer*, v. 52, n. 21 – 22, p. 4976-4985, 2009.

SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; LINS, M.A.A. Determination of expressions for the thermal diffusivity of canned foodstuffs by the inverse method and numerical simulations of heat penetration. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 46, n. 4, p. 811–818, 2011.

SILVA, W.P.; ATAÍDE, J.S.P.; OLIVEIRA, M.E. G.; SILVA, C.M.D.P.S.; NUNES, J.S. Heat transfer during pasteurization of fruits pulps stored in containers with arbitrary geometries obtained through revolution of flats areas. *Journal of Food Engineering*, p. 58-67, 2017

SILVA, W. P. *Software “2D Grid Generation”* (2008) Disponível em <<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/gg.htm>>, Acesso em: 21 de junho de 2016.

SILVA, W. P. *Software “Diffusion RE”* (2007) Disponível em <<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/diffusion.htm>>, Acesso em: 15 de março de 2016.

TRES, M.V.; BORGES, G.R.; CORAZZA, M.L.; ZAKRZEWSKI, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: Medidas experimentais e simulação numérica. *Perspectiva*, v. 35, n. 131, p. 43 – 56, 2011.

UKRAINCZYK, N. Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1 D heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 52, n. 25 – 26, p. 5675 – 5681, 2009.