

DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA PROTEÍNA TEXTURIZADA DE SOJA POR MEIO DE UM PROBLEMA INVERSO

RUBENS GEDRAITE¹, RAFAEL YURI MEDEIROS BARBOSA² e ALESSANDRO ALVES SANTANA³

¹Dr. Prof. Ass. FEQ, UFU, Uberlândia-MG, rgedraite@ufu.br;

²Mestrando em Engenharia Química, FEQ, UFU, Uberlândia-MG, rafayuri@ufu.br;

³Dr. Prof. Ass. FAMAT, UFU, Uberlândia-MG, alessandro.santana@ufu.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Neste trabalho é estudada a determinação da difusividade térmica da proteína texturizada de soja (PTS) como uma função linear da temperatura a partir de resultados experimentais de temperatura obtidos do processo de esterilização da PTS acondicionada em embalagens metálicas de geometria cilíndrica em autoclave estacionária. A metodologia de determinação do valor da difusividade térmica da PTS consistiu em identificar os valores dos coeficientes linear e angular que definem a difusividade através da minimização da diferença entre os resultados experimentais de temperatura e a resposta do modelo matemático de difusão de calor. Os resultados obtidos demonstram que o modelo de difusão de calor usado é capaz de descrever com precisão o comportamento da temperatura da PTS submetida ao processo de esterilização. Também foi observado que a difusividade térmica identificada no processo gera uma distribuição de temperatura que possui em média 0,4 °C de diferença em relação aos valores experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Proteína texturizada de soja, difusividade térmica, problema inverso.

DETERMINATION OF TEXTURED SOY PROTEIN THERMAL DIFFUSIVITY THROUGH AN INVERSE PROBLEM

ABSTRACT: In this work, the determination of the thermal diffusivity of textured soy protein (TSP) as a linear function of temperature is studied, based on experimental temperature results obtained from the sterilization process of TSP stored in metallic packages of cylindrical geometry in a stationary autoclave. The methodology for determining the TSP thermal diffusivity value consisted of identifying the values of the linear and angular coefficients that define the diffusivity by minimizing the difference between the experimental temperature results and the response of the mathematical model of heat diffusion. The results obtained demonstrate that the heat diffusion model used can accurately describe the temperature behavior of TPS submitted to the sterilization process. It was also observed that the thermal diffusivity identified in the process generates a temperature distribution that has an average difference of 0.4 °C in relation to the experimental values.

KEYWORDS: textured soy protein, thermal diffusivity, inverse problem.

INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da indústria de alimentos é o aumento da vida de prateleira dos produtos alimentícios fabricados. Esta meta só pode ser alcançada através do emprego de técnicas de preservação que tendam a inibir as transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas que normalmente ocorrem nos mesmos.

Segundo Larousse e Brown (1997), a previsão da temperatura do produto a partir da temperatura do meio de aquecimento/resfriamento é a abordagem preferida na prática de esterilização de alimentos, contudo, ela requer o conhecimento de um modelo matemático que possa descrever com precisão a distribuição de temperaturas em regime transiente para o produto alimentício. A vantagem desta abordagem é que ela dispensa a instalação de unidades de teste para se medir a temperatura do produto,

podendo modelar e controlar tanto o processo contínuo como o por bateladas. Dentre as desvantagens, pode-se citar, com especial destaque, o fato de ser necessário se conhecer o modo de transferência de calor, bem como as propriedades térmicas e físicas relevantes para cada produto e para cada tipo e geometria de embalagem.

O principal objetivo desse trabalho consiste na identificação da difusividade térmica associada ao processo de esterilização de proteína texturizada de soja como função linear da temperatura utilizando resultados experimentais de temperatura do vapor da autoclave e da temperatura no centro geométrico da embalagem. Um problema de otimização foi formulado e a minimização da diferença entre a temperatura experimental e a temperatura do modelo de difusão de calor forneceu os parâmetros que definem a difusividade térmica da PTS. Esta abordagem é tipicamente utilizada em problemas inversos (Mariani; Lima e Coelho, 2008).

MATERIAL E MÉTODOS

Para o caso da proteína texturizada de soja acondicionada em embalagem metálica cilíndrica, por ser um alimento sólido, o mecanismo de transferência de calor adotado foi o mecanismo condutivo, cujo modelo físico é expresso pela equação do calor (Equação 1).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\alpha \cdot \nabla T) \quad (1)$$

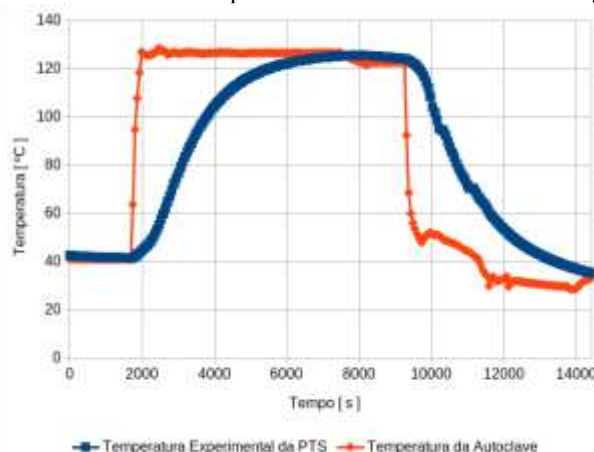
em que T é a temperatura da PTS e α é a difusividade térmica da PTS, definidas pela Equação 2. Os valores dos parâmetros a serem identificados são α_0 e α_1 .

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T \quad (2)$$

Como a difusividade térmica da PTS é função da temperatura, a Equação 1 é uma equação diferencial parcial não linear e, portanto, faz-se necessário o uso de uma metodologia de resolução adequada. Para este trabalho utilizou-se um método de reconstrução de alta ordem em coordenadas cilíndricas para resolução espacial da equação adaptado da metodologia apresentada por Ollivier-Gooch e van Altena (2002), para resolução da parte transiente da equação, utilizou-se o método de Spiteri e Ruuth (2002) que é um método da família Runge-Kutta explícito de quatro passos e de terceira ordem, que apresenta como principal vantagem uma região de estabilidade duas vezes maior que outros métodos de custo computacional semelhante.

Os valores experimentais da temperatura foram obtidos por um sensor de temperatura do tipo *Data Trace*TM colocado no centro geométrico de uma embalagem com proteína texturizada de soja que foi submetida a um processo de esterilização em uma autoclave estacionária vertical com tempo de amostragem de um minuto. Os valores medidos da temperatura da autoclave e da temperatura da proteína texturizada de soja no centro geométrico da embalagem estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1. Valores medidos da temperatura da autoclave e da embalagem com PTS



Os parâmetros que definem a difusividade térmica da PTS são determinados a partir de um problema de otimização definido pela Equação 3.

$$\min: F[\alpha] = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m |T_i^R - T_i| \quad (3)$$

sendo que F é a função objetivo a ser minimizada, m é a quantidade de pontos experimentais utilizados no processo de obtenção da difusividade térmica da PTS, T_i^R é a i -ésima temperatura experimental e T_i é a i -ésima temperatura fornecida pelo modelo, lembrando que ambas as temperaturas, experimental e do modelo, são referentes à PTS no centro geométrico da embalagem que foi submetida ao processo de esterilização.

O processo de minimização da Equação 3, nesse trabalho, foi realizado através do algoritmo da evolução diferencial, utilizando a variação *DE/rand-to-best/1/Bin*, que significa o uso do algoritmo da evolução diferencial, utilizando no esquema de mutação números aleatórios e o uso do melhor indivíduo da população corrente, com uma diferença de vetores e esquema de cruzamento binário (Yang, 2014).

Assim como qualquer variante do algoritmo da evolução diferencial, a variante *DE/rand-to-best/1/Bin* é constituída de três etapas principais: mutação, cruzamento e seleção (Yang, 2014). Como critério de parada do algoritmo, utilizou-se o princípio de estagnação, ou seja, quando a variação nos parâmetros desejados fica abaixo de uma tolerância então o processo é interrompido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

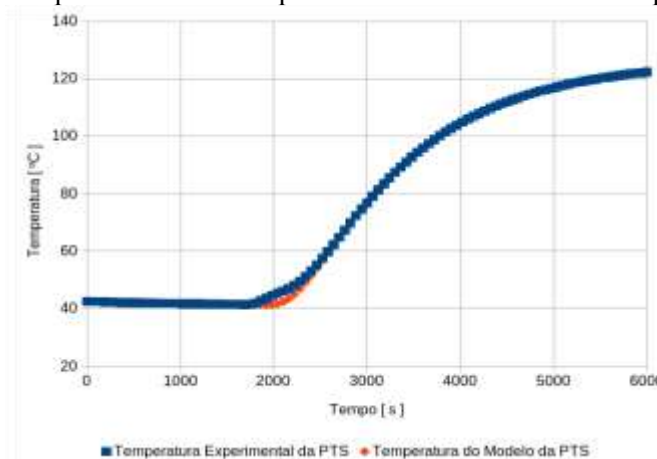
Para obtenção dos resultados, devido às condições simétricas, utilizou-se um domínio computacional equivalente a um quarto da embalagem com PTS submetida ao processo de esterilização, o domínio em coordenadas cilíndricas r e z é definido por $[0,0,03665] \times [0,0,0555] m^2$, para o processo de determinação da difusividade térmica da PTS foram utilizados apenas os valores da etapa de aquecimento que correspondem a aproximadamente 6.000 segundos. A malha utilizada é composta por 42 volumes de controle de forma triangular organizados de forma não estruturada e o espaçamento no tempo utilizado foi o mesmo do tempo de amostragem do sensor utilizado para a determinação das temperaturas experimentais, ou seja, $\Delta t = 60$ segundos. Toda a metodologia foi implementada em linguagem de programação C++ e utilizou-se uma resolução espacial de 4ª ordem. Como condição inicial adotou-se que toda a PTS contida na embalagem estava com a mesma temperatura e como condições de contorno, adotou-se que nas fronteiras externas (em contato com o vapor) a temperatura da fronteira é a mesma temperatura da autoclave e para as fronteiras interiores, adotou-se derivada nula devido à simetria do domínio.

A difusividade térmica da PTS obtida a partir da minimização da Equação 3 é apresentada na Equação 4.

$$\alpha(T) \left[\frac{m^2}{s} \right] = 2,50757 \cdot 10^{-7} - 6,62935 \cdot 10^{-10} \cdot T [^{\circ}C] \quad (4)$$

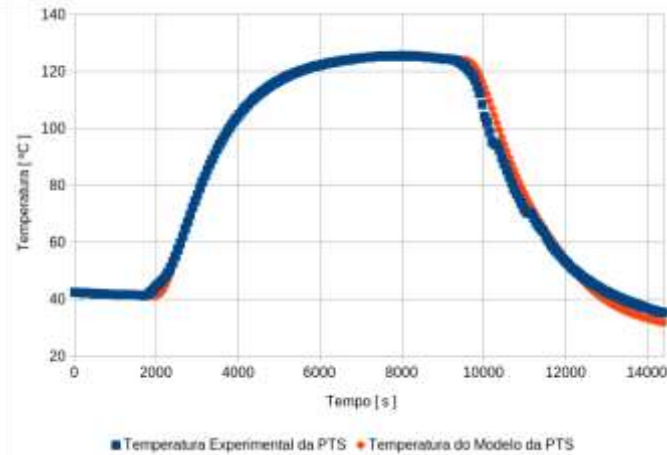
Para a difusividade térmica definida pela Equação 4, o valor da função objetivo foi de $F=0,4$ °C, ou seja, a diferença média entre a temperatura transiente experimental e temperatura do modelo foi de apenas 0,4 °C, valor este da ordem de grandeza da imprecisão da medida do sensor utilizado. Na Figura 2, é possível observar o gráfico comparativo entre a temperatura simulada com base no modelo e a temperatura experimental utilizada para determinação da difusividade térmica da PTS.

Figura 2: Temperatura da PTS experimental e simulada até o tempo de 6.000 s



Para a validação da difusividade térmica determinada, comparou-se os resultados experimentais de temperatura da PTS com os valores simulados com base no modelo, ao longo de todo o processo de esterilização, o que equivale a um tempo total de simulação de 14.400 segundos. Na Figura 3 é apresentado o gráfico comparativo entre a temperatura experimental e temperatura simulada utilizando a difusividade térmica definida pela Equação 4.

Figura 3: Temperatura da PTS experimental e simulada até o tempo de 14.400 s



Conforme observado na Figura 3, o modelo matemático é capaz de descrever bem o comportamento da temperatura da PTS no centro da embalagem. Foi observado, também, a ocorrência de maiores desvios para um tempo superior a 9.000 segundos, que corresponde à etapa de resfriamento da autoclave. Uma possível explicação para os desvios apresentados pode estar relacionada ao fato de que o valor da difusividade térmica na etapa de resfriamento apresente valores de parâmetros distintos daqueles utilizados na etapa de aquecimento. Este fato pode estar relacionado às condições de contorno adotadas para o desenvolvimento do modelo matemático, as quais interferem diretamente no valor da difusividade térmica. Ademais, durante a etapa de resfriamento a autoclave é preenchida com água à temperatura ambiente, desde o fundo do vaso até o topo, onde está localizada a válvula de saída dela. As características de transferência de calor são significativamente diferentes e fortemente afetadas pela vazão de água de resfriamento. Este fato contribuiu para conduzir o comportamento da temperatura da autoclave a apresentar mais oscilações, as quais são refletidas na temperatura do modelo, visto que a temperatura da autoclave é utilizada como condição de contorno para as fronteiras em contato com a embalagem.

Cumpre destacar que a etapa de aquecimento da autoclave é a responsável por impor maior letalidade ao microrganismo alvo e que a temperatura simulada apresentou comportamento considerado coerente e com pouco desvio em relação aos valores experimentais. Os desvios apresentados na etapa de resfriamento podem ser considerados aceitáveis para fins de cálculo da letalidade correspondente.

CONCLUSÃO

Como observado por meio da comparação dos resultados obtidos na simulação, o valor calculado da difusividade térmica da PTS – como uma função linear da temperatura do produto – apresentou boa aderência aos resultados experimentais.

Foi possível constatar, também, que o modelo matemático de difusão de calor proposto neste trabalho representou de maneira adequada e coerente o comportamento experimental da temperatura do produto no centro da embalagem estudada, possuindo boa capacidade preditiva para fins de determinação do valor da difusividade térmica do produto.

Por envolver a saúde humana, o processo de esterilização deve ser preciso, pois um processamento térmico subdimensionado acarretaria a possibilidade de atividade microbológica indesejada no produto quando estocado, causando riscos à saúde humana. De outro lado, um processamento térmico sobredimensionado poderia acarretar o comprometimento de propriedades nutricionais e organolépticas da PTS.

Por não estarem amplamente disponíveis na literatura os valores da propriedade de transporte de calor de difusividade térmica de alimentos, estes precisam ser obtidos experimentalmente, sendo que existe a possibilidade de os ensaios experimentais convencionais não fornecerem a precisão exigida para tratamento térmico de um alimento destinado a consumo humano, o que faz com que seja necessário o uso de fatores de segurança que podem ocasionar o sobreprocessamento do alimento. Nesse cenário, a metodologia apresentada apresenta-se como boa alternativa para a determinação da difusividade térmica para casos em que seja exigida boa precisão dessa propriedade.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão de bolsa de pesquisa ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

- Larousse, J.; Brown, B. *Food Canning Technology*, New York: Wiley-VCH. 1997.
- Mariani, V. C.; Lima, A. G. B. de; Coelho, L. S. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. *Journal of Food Engineering*, Volume 85, Issue 4, 2008, Pages 569-579, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.018>
- Ollivier-Gooch, C.; van Altena, M. A high-order-accurate unstructured mesh finite-volume scheme for the advection–diffusion equation. *Journal of Computational Physics* 181, 2002, 729–752. <https://doi.org/10.1006/jcph.2002.7159>.
- Spiteri, R. J.; Ruuth, S. J. 2002. A new class of optimal high-order strong-stability-preserving time discretization methods. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 40, 469–491. <https://doi.org/10.1137/S0036142901389025>.
- Yang, X .S. *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier. 2014. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01368-0>.