

Técnica de alisamento por Splines Cúbicas aplicada para suavização dos efeitos dos problemas térmicos inversos com convecção e radiação

Letícia Hiromi Kubo

Juliana de Oliveira

Departamento de Ciências Biológicas, FCLA, UNESP

19806-900, Assis, SP

E-mail: leticiahk@yahoo.com.br

juliana@assis.unesp.br

RESUMO

Sistemas térmicos estudam o comportamento da transferência de calor ao longo do tempo através da diferença de temperatura, respeitando a Primeira Lei da Termodinâmica “A quantidade de energia acumulada deve ser igual a quantidade de energia perdida”[1]. Tais sistemas são amplamente estudados pelas indústrias para o desenvolvimento de equipamentos, como trocadores de calor, evaporadores, aquecedores radiantes, entre outros, com a finalidade de analisar e extrair parâmetros dos processos de transferência de calor sendo os mais estudados condução, convecção e radiação. Uma das áreas que tem sido impulsionada pelas pesquisas industriais que envolvem sistemas térmicos é a de problemas inversos, que estão relacionados com a determinação de causas através da observação de efeitos, porém são intrinsecamente mal condicionados, significando que o processo será extremamente sensível a erros experimentais e numéricos a ponto de comprometer completamente os resultados obtidos.

Desta forma, este projeto tem por objetivo a análise da aplicação da técnica de alisamento por Splines Cúbicas em problemas térmicos inversos a fim de suavizar os efeitos causados pela instabilidade dos problemas inversos na reconstrução da temperatura de um sistema térmico.

A modelagem matemática realizada neste trabalho considera o acúmulo térmico (energia armazenada), a convecção (transferência de calor entre a sonda e o meio) e a radiação (energia emitida pelo meio), Equação (1):

$$\underbrace{MC \frac{dT_{ind}}{dt}}_{\text{Acúmulo Térmico}} - \underbrace{hA(T_{proc} - T_{ind})}_{\text{Convecção}} - \underbrace{\varepsilon\sigma A(T_{\infty}^4 - T_{ind}^4)}_{\text{Radiação}} = 0 \quad (1)$$

sendo M (kg) massa do encapsulamento, C (J/kgK) calor específico, A (m²) área, h (W/m²K) coeficiente de convecção, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ emissividade, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴) constante de Stefan-Boltzmann. A metodologia aplicada consiste em considerar dois sensores térmicos inseridos em um sistema reagente. O primeiro sensor fornece a temperatura real do processo (temperatura de referência), T_{proc} , e o segundo sensor é protegido e fornece a temperatura do escoamento (indicada), T_{ind} , de forma atrasada e atenuada. Portanto, é possível reconstruir a temperatura do processo, T_{rec} , a partir da temperatura indicada pelo sensor, Equação (2):

$$T_{proci} = T_{rec,i} = \frac{\tau}{\Delta t} (T_{ind,i} - T_{ind,i-1}) + T_{ind,i} - \gamma_i (T_{\infty} - T_{ind,i}) \quad (2)$$

sendo $\tau = MC/hA$ (s) constante de tempo da sonda, $\gamma \cong (4\varepsilon\sigma/h)[(T_{\infty} + T_{ind})/2]^3$ coeficiente de radiação e i é o passo no tempo.

Entretanto os problemas inversos apesar de eficientes são intrinsecamente mal condicionados, tornando a reconstrução da temperatura pela Equação (2) inviável, pois pequenos erros de medida, como ruídos, são amplificados corrompendo os resultados. Para solucionar esse problema, são aplicadas técnicas de regularização de sinal [2]. Este projeto implementou o alisamento por Splines Cúbicas como método de regularização de sinal, Equação (3):

$$L = \lambda \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{rec,i} - T_{reg,i}}{T_{rec,i}} \right)^2 + (1 - \lambda) \int_{t_0}^{t_n} (T''_{reg}(t))^2 dt \quad (3)$$

onde T_{reg} é a temperatura já alisada após aplicação do método e $0 \leq \lambda \leq 1$ é o parâmetro que controla a suavidade do alisamento. O algoritmo proposto foi desenvolvido baseado em [3], [4] e [5], e implementado no Matlab[®].

Vários testes numéricos foram realizados, e com a finalidade de validar a eficiência do algoritmo testes experimentais foram realizados com sinais de temperatura cedidos pela autora Juliana de Oliveira e adquiridos durante o seu doutorado realizado de 2002 a 2006, no Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (Netef – EESC – USP – São Carlos). Os resultados de um dos experimentos realizados com ar comprimido são apresentados na Figura 1. Para este experimento os parâmetros de entrada são: $dt = 0,0625s$, $\tau = 1,69009s$, $\gamma_{min} = 0,0048$, $\gamma_{max} = 0,0078$ e $\lambda = 0,4$, a imagem exibe as temperaturas T_{proc} , T_{ind} (obtidas experimentalmente) e T_{reg} (obtida pelo alisamento por Splines Cúbicas), sendo possível observar como a T_{reg} se ajusta a T_{proc} .

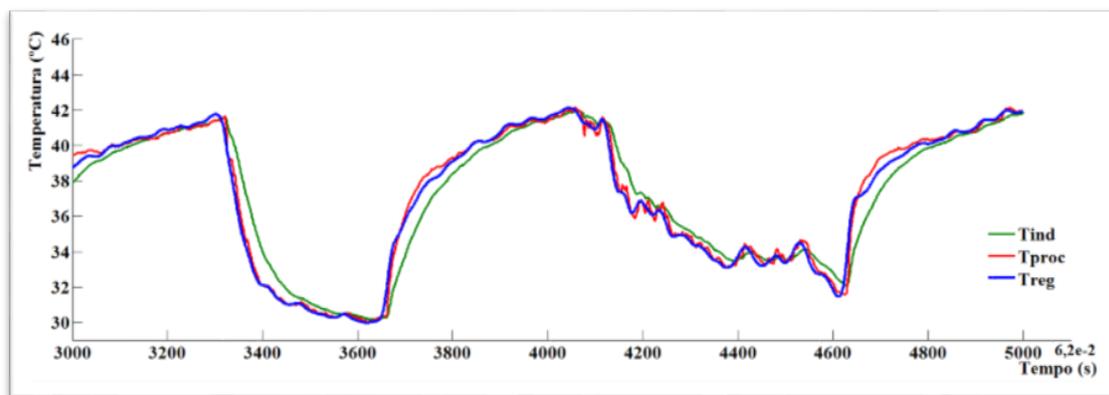


Figura 1. Resultado experimental com ar comprimido

Assim sendo, conclui-se que o alisamento por Splines Cúbicas como método de regularização de sinal é eficiente mesmo com o sistema térmico sofrendo influência da convecção e da radiação e de ruídos embutidos no sinal da temperatura durante a aquisição de dados.

Palavras-chave: *problema inverso, splines cúbicas, regularização, convecção e radiação*

Referências

- [1] Y. A. Çengel, “Transferência de calor e massa”, São Paulo: McGraw-Hill, 3ª Ed., p.11, 2009.
- [2] M. Jakubowska, “Signal Processing in Electrochemistry”. *Electroanalysis*, Vol. 23, p. 553 – 572, 2011.
- [3] D. S. G. Pollock, “Smoothing with cubic splines”, Queen Mary and Westfield College, The University of London, 1993.
- [4] C. H. Reinsch, “Smoothing by spline function”. *Numerische Mathematik*, Vol. 10, p.177-183, 1967.
- [5] H. L. Weinert, “A fast compact algorithm for cubic spline smoothing”, *Computational Statistics and Data Analysis*, Vol.53, p.932-940, 2009.