

Algoritmo Computacional para Monitoramento Interno da Temperatura em Materiais via um Sistema de Termometria por Ultrassom

Patrícia C. Andrade¹, Sílvia L. Vieira²

¹ Escola de Eng. Elétrica e de Computação – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia – Goiás – Brasil

² Instituto de Física – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia – Goiás – Brasil
patcapatricia@gmail.com, slvieira@ufg.br

Abstract. *The purpose of this study is to develop and to apply a computational algorithm to estimate internal temperature distribution of heated materials by Ultrasound Thermometry System (TUS). A thermocouple temperature measurement system was used to verify and validate of TUS. The comparison of the temperature measurements derived from the ultrasonic thermometry with thermocouple temperature system showed an agreement of 96%. The temperature differences between both techniques were lower than 0.70°C.*

Resumo. *O objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar um algoritmo computacional para monitoramento interno do gradiente de temperatura em metais via um sistema de Termometria por Ultrassom (TUS), usando-se de equipamentos de baixo custo. Um sistema de termopares foi usado como validação do sistema de TUS. O índice de correção cruzada do método de TUS para o sistema de termopares foi de 96%. Medidas referentes à diferença de temperatura entre essas duas técnicas foram inferiores a 0,70°C.*

1. Introdução

Medir a temperatura de corpos é de fundamental interesse nas engenharias quanto nas ciências básicas, pois as características internas de um material estão intimamente ligadas à temperatura deste. Na indústria, por exemplo, o gradiente de temperatura durante o processo de fabricação de materiais influencia diretamente na produtividade e na qualidade final do produto [Ihara; Takahashi, 2009].

Os principais meios utilizados para monitoramento da temperatura são por meio de termopares, sensores térmicos guiados por fibras ópticas, radiação por infravermelho, ressonância magnética, fotoacústica e ultrassom. A motivação deste estudo se constitui nas vantagens da termometria por ultrassom, pois esta se destaca das demais. O ultrassom possui elevada sensibilidade, podendo monitorar a temperatura de materiais espessos, é também uma técnica não invasiva, não destrutiva e não ionizante, tem a possibilidade de se tornar uma técnica portátil, com custo menor se comparado com as técnicas não invasivas aqui citadas [Ihara *et al.*, 2013], [Takahashi; Ihara, 2008]. Vários métodos específicos de termometria por ultrassom têm sido propostos [Lewis; Staruch; Chopra, 2015]. Neste trabalho foi usado o método de detecção do tempo de trânsito (*time-of-flight*) [Jia *et al.*, 2016].

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma rotina computacional de processamento de sinais ultrassônicos para quantificar a temperatura interna de materiais e uma sub-rotina para realizar a comunicação em tempo real com um osciloscópio e com um sistema de termometria por termopares. Neste estudo é obtido uma correlação linear de 96% entre a técnica de Termometria por Ultrassom de pulso/eco (TUS) com a técnica de Termometria por Termopares (TTP).

Este estudo foi estruturado nas próximas seções da seguinte forma: Na Seção 2 foi descrito os materiais e métodos empregados no monitoramento térmico por ultrassom pulso/eco. Na Seção 3 foram apresentados os resultados da termometria por ultrassom, bem como a análise e discussão dos mesmos. Na Seção 4, foi apresentada a conclusão do estudo e as perspectivas futuras. Na Seção 5, estão os agradecimentos dos autores. E na Seção 6 estão as referências teóricas utilizadas.

2. Materiais e Métodos

2.1. Modelo de difusividade térmica

Para investigar a distribuição de temperatura no bloco de alumínio, considerou-se o problema de condução de calor unidimensional com difusividade térmica constante. Além disso, assumiu-se que não há qualquer fonte de calor no bloco. Dessa forma, a equação de condução de calor é dada por

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

em que T é a temperatura, x a posição, t o tempo e α é a difusividade térmica.

A distribuição de temperatura pode ser estimada através da resolução da (1) por meio de condições de contorno bem definidas. No entanto, em processos de aquecimento reais a condição de contorno nem sempre é mantida estável. Normalmente, tal condição de contorno não é simples de ser prevista e até mesmo de ser medida. Portanto, determinar a distribuição de temperatura a partir da (1) torna-se uma tarefa difícil. Para solucionar este problema é proposto aqui um método capaz de avaliar a distribuição de temperatura interna de materiais. Ele consiste em se realizar medições empregando ultrassom pulso/eco e uma análise inversa acoplada com um cálculo unidimensional de diferenças finitas.

2.2. Modelagem do sistema

Uma das maneiras de resolver uma equação diferencial parcial é por meio de um método numérico. Neste estudo foi utilizado do Método das Diferenças Finitas (MDF), por ser método de cálculo de problemas de valor de fronteira, conhecido por sua simplicidade e facilidade de implementação computacional. Dessa forma a (1) pôde ser escrita na forma:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + k(T_{i+1}^n + T_{i-1}^n - 2T_i^n) \quad (i = 2, \dots, N - 1), \quad (2)$$

o coeficiente $k = \alpha \Delta t / \Delta x^2$, é o critério de estabilidade de Von Neumann. Em que i e n são índices correspondentes às coordenadas espaciais e temporais, respectivamente. N o número total de pontos espaciais da rede. T_i^n a temperatura de cada ponto i na rede no

instante n . τ o intervalo de tempo, Δx intervalo espacial na rede. O índice $i = 1$ aplica-se a superfície aquecida e $i = N$ a superfície oposta.

A forma de se resolver a (2) é por recorrência, a condição inicial é dada por T_i^1 para todo i , primeiro calcula-se T_i^{n+1} , para $i = 2, \dots, N-1$, e assim sucessivamente. As condições de contorno são dadas pelos valores de T_N^n (termopar) nos extremos do intervalo e pelo tempo de trânsito da onda ultrassônica no material amostrado. A temperatura T_i^{n+1} (zona aquecida) é desconhecida, a menos que sejam dadas as condições de contorno do problema.

O princípio de medição de temperatura por ultrassom baseia-se na dependência da temperatura com a velocidade de propagação das ondas de ultrassom através do meio, logo uma solução viável é estimar a temperatura T_i^{n+1} é empregando a técnica de ultrassom pulso/eco. Para isso, acopla-se o tempo de trânsito da onda ultrassônica no material ao cálculo das diferenças finitas. Escrevendo o tempo de trânsito (t_L), na forma numérica obtém-se:

$$t_L = \Delta x \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_N} \right) + 2\Delta x \sum_{i=2}^{N-1} \frac{1}{v_i} \quad (3)$$

Se a dependência da velocidade do ultrassom no meio for linear com a temperatura, na forma $v(T) = aT + b$ [m/s], para o alumínio [Fujii; Kawashima 1995]. Fazendo-se as devidas correções nos valores e nas unidades das constantes a e b , têm-se:

$$\frac{1}{v(T)} = \xi T + \beta \quad [\text{s/m}], \quad (4)$$

em que ξ e β são constantes obtidas experimentalmente, cujas unidades correspondentes são dadas em $\text{s/m}^\circ\text{C}$ e s/m , respectivamente. Das (2), (3) e (4), a temperatura da superfície aquecida, no intervalo de tempo $n+1$, T_i^{n+1} , obtém-se

$$T_1^{n+1} = \frac{t_L^{n+1} - t_L^n}{\xi \Delta x} + T_1^n + T_N^n - T_N^{n+1} + 2 \sum_{i=2}^{N-1} (T_i^n - T_i^{n+1}), \quad (5)$$

em que t_L^n e t_L^{n+1} são os tempos de trânsito médios nos passos temporais n e $n+1$, respectivamente.

Inicialmente o algoritmo do programa realizava a leitura da temperatura inicial do material, via termopar, T_i^1 , em busca da condição inicial. Para a resolução do MDF proposto, a cada passo temporal foi necessário entrar com a primeira condição de contorno do problema, T_N^{n+1} , assim foi possível calcular o termos T_i^{n+1} ($i = 2, \dots, N-1$). Em seguida, a segunda condição de contorno foi processada por meio do tempo de eco do sinal ultrassônico, adquirido pelo osciloscópio, e então computado conforme a (5). Assim, ao executar o número de passos temporais inicialmente ordenados, o programa finaliza a última aquisição de dados. Na sequência, interrompe o processo de estimativa da temperatura. Por fim, o computador armazena os dados processados. A Figura 1 mostra o fluxograma da análise inversa para determinar a distribuição da temperatura.

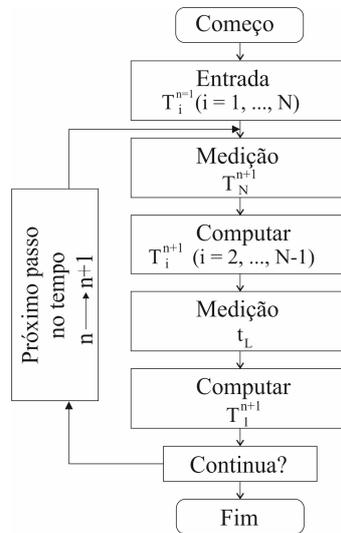


Figura 1. Fluxograma da análise inversa para determinar a distribuição da temperatura.

A esquematização do MDF unidimensional por meio do escalonamento de grade, usado para determinação da temperatura do material conforme análise inversa é ilustrada na Figura 2.

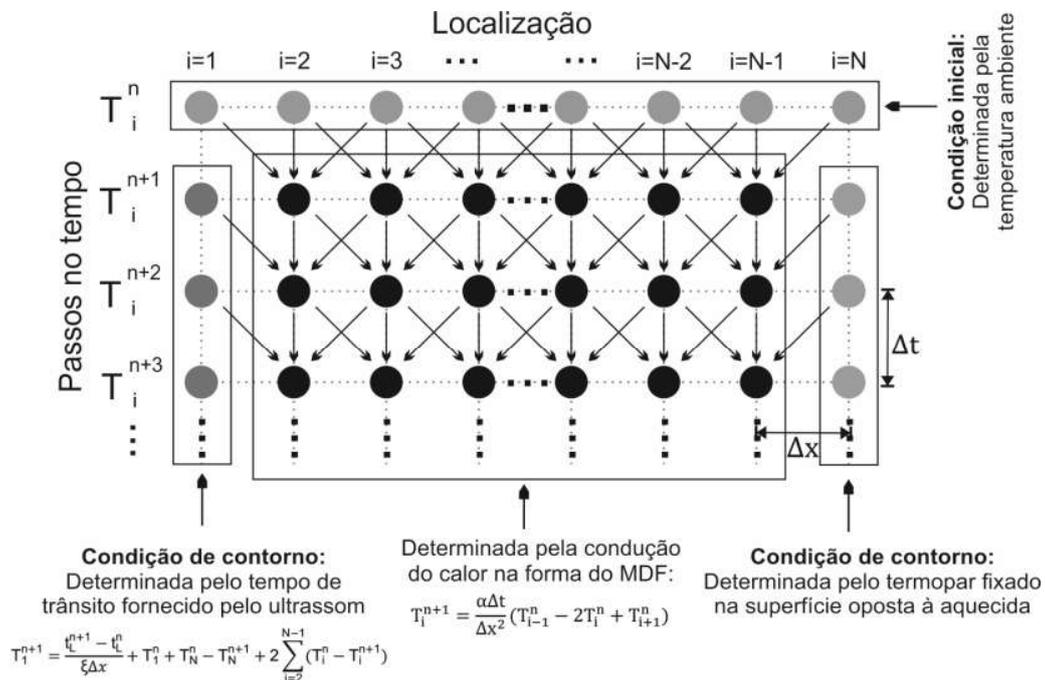


Figura 2. Modelo de esquemático de grades escalonadas para o método de diferenças finitas.

O arranjo experimental foi composto por um transdutor ultrassônico de contato (V110-RM, Panametrics, MA, USA) de 5,0 MHz, emissor/receptor de ondas longitudinais e diâmetro de 12,7 mm. O transdutor foi acoplado à superfície de um bloco de alumínio de $(4,50 \pm 0,05)$ cm de comprimento, $(2,5 \pm 0,05)$ cm de largura e

($3,1 \pm 0,05$) cm de espessura, mediante gel acoplador a base de água. O transdutor foi conectado a um gerador ultrassônico (5072PR, Olympus, PA, USA). Os sinais provenientes desse instrumento foram visualizados e adquiridos por um osciloscópio (TDS2024C, Tektronix, OR, USA). Conforme esquematizado no diagrama de blocos da Figura 3.

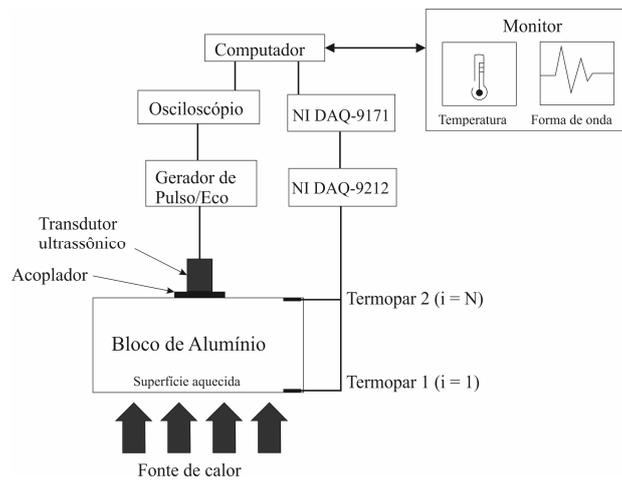


Figura 3. Diagrama esquemático da montagem experimental utilizada.

Medições foram realizadas durante o regime de aquecimento do material com o osciloscópio na base de tempo de 5 ns. O processamento do sinal ultrassônico foi realizado empregando uma rotina desenvolvida em ambiente que tinha a finalidade de comunicar com o osciloscópio e em seguida processar os sinais. Durante todo o processo de medição os dados adquiridos puderam ser visualizados em tempo real para análise. Um sistema de medição de temperatura por termopares (National Instruments, TX, EUA) foi utilizado para verificar e validar a distribuição de temperatura obtida pelo método de termometria por ultrassom. O sistema de medida por termopares encontra-se ilustrado na forma de diagrama de blocos na Figura 3. Em que, o “Termopar 1” foi fixado na extremidade da superfície aquecida e foi usado como método validador da técnica de TUS, enquanto o “Termopar 2” foi posicionado na superfície oposta. Este último forneceu uma das condições de contorno do estudo.

O método de aquecimento em que o alumínio teve uma de suas faces aquecida diretamente por meio de uma pirocerâmica emissora de raios infravermelhos de 500 W, por um agitador magnético com aquecimento (NT 103, Novatecnica, SP, Brasil). Opostamente à face aquecida foi posicionado o transdutor de ultrassom como ilustrado no esquema da Figura 4.

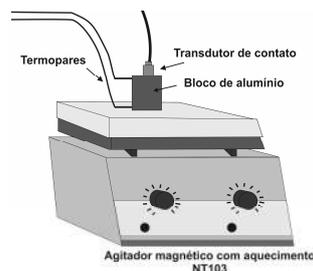


Figura 4. Modelo experimental para aquecimento do alumínio.

3. Resultados

Neste estudo, um dos principais resultados alcançados foi o desenvolvimento do algoritmo responsável em realizar a comunicação e a coleta de dados em tempo real. No desenvolvimento da metodologia foi empregado um osciloscópio convencional, ajustado para trabalhar como sistema de aquisição de dados. Esse instrumento foi capaz de capturar sinais, provenientes do sistema de ultrassom pulso/eco, com alta resolução temporal.

O método de termometria por ultrassom mostrou que a temperatura na superfície aquecida do bloco de alumínio variou de $48,78^{\circ}\text{C}$ até $53,70^{\circ}\text{C}$, conforme ilustrado na Figura 5. Enquanto o sistema de termometria por termopares (TTP) quantificou uma variação de $48,78^{\circ}\text{C}$ até $53,00^{\circ}\text{C}$, para a mesma superfície aquecida.

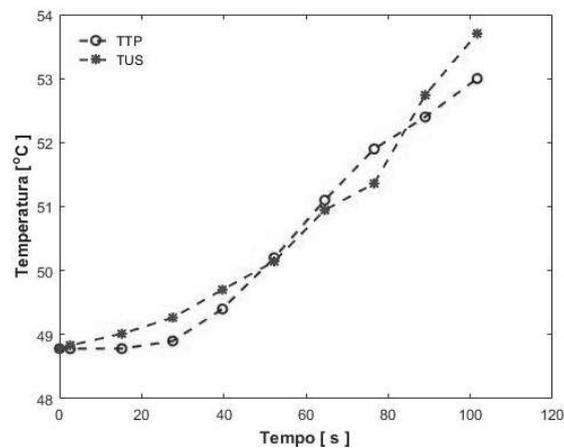


Figura 5. Temperatura do bloco na superfície aquecida, obtida pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares.

A diferença de temperatura entre as duas técnicas é ilustrada na Figura 6. Observa-se que todas as medidas referentes à diferença de temperatura entre essas duas técnicas foram inferiores a $0,70^{\circ}\text{C}$.

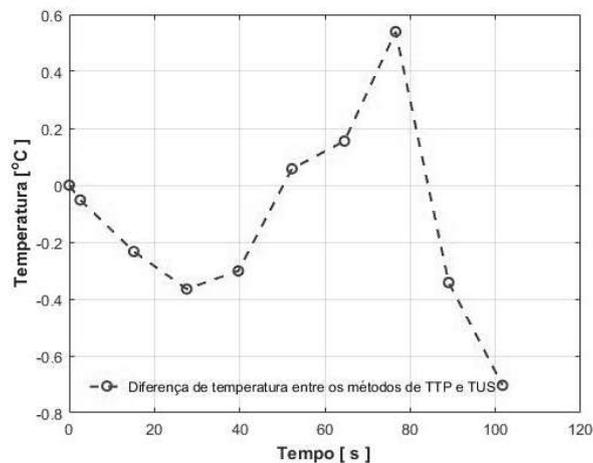


Figura 6. Diferença de temperatura medida pelo sistema de termopares e o de termometria por ultrassom.

O valor médio da diferença de temperatura obtida pelas duas técnicas foi de $-0,12^{\circ}\text{C}$. Esse valor indica que a temperatura estimada pela TUS foi superior, na maioria dos casos, a aquelas obtidas empregando a TTP. Essas flutuações de temperatura registradas entre as técnicas se justificam pelo fato do tempo de resposta do sistema de termometria por ultrassom ser menor do que a resposta fornecida pelo sistema de termopares, conforme descrito na literatura [Ihara e Takahashi, 2009], [Ihara e colab., 2013], [Takahashi e Ihara, 2008], [Ueno e colab., 1990].

O valor medido entre as temperaturas $T_1^2 - T_1^1$ refere-se à variação de temperatura inicial medida pelo método de TTP e TUS, após o primeiro passo temporal. A temperatura, T_1^1 , é a condição inicial obtida pelo termopar. A variação média de temperatura entre cada medida na superfície aquecida do bloco de alumínio foi de $0,42^{\circ}\text{C}$. Enquanto, o menor valor obtido foi de $0,18^{\circ}\text{C}$.

O sistema de termometria por termopares foi empregado como técnica padrão, e tomando-o como referência, foi realizada a correlação dos dados obtidos com essa técnica e a de termometria por ultrassom. Para isso, empregou-se o método dos mínimos quadrados como ferramenta de análise, por meio de regressão linear para a obtenção do coeficiente de determinação da curva. A partir do ajuste linear mostrado na Figura 7, foi encontrado o coeficiente de determinação foi de 0,9603. Esse resultado indica correlação de aproximadamente 96%, entre as técnicas termométricas.

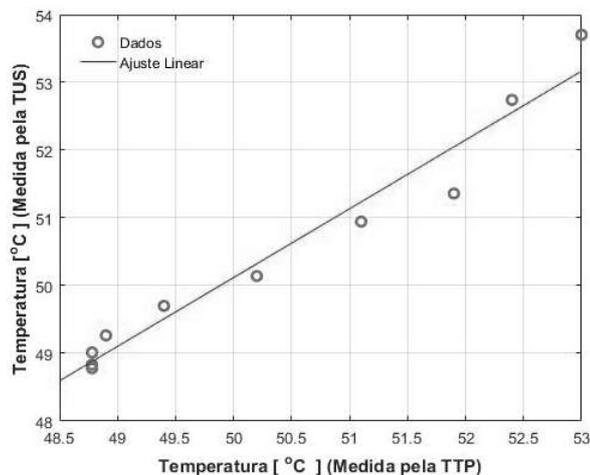


Figura 7. Curva de correlação entre as medidas realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares.

O coeficiente de determinação obtido mostra que o método de termometria por ultrassom empregando o osciloscópio como sistema de aquisição de dados, mostrou ser uma metodologia válida. Entre as duas técnicas, foram registradas diferenças de temperatura inferiores a 1°C , demonstrando que o osciloscópio tem potencial para ser empregado em medida de temperatura por ultrassom.

O método aqui discutido possibilitou a quantificação da temperatura de forma não invasiva e sem contato direto com a fonte de calor. Para isso foi necessário somente entrar com as condições de contorno obtidas pelo tempo de trânsito da onda acústica e da temperatura na região de contato do transdutor, “zona fria”, dada pelo termopar. Para se iniciar a rotina do programa foi também necessário entrar com uma condição

inicial do bloco, que é a temperatura inicial de todo o sistema quando em equilíbrio térmico.

4. Conclusão

A metodologia apresentada mostrou-se relevante, propiciando correlações próximas a 96% entre os perfis de temperatura dos sistemas de TUS e TTP. Uma desvantagem da técnica é a necessitar de um segundo sistema de medida de temperatura para fornecer uma das condições de contorno.

Em estudos futuros pretende-se utilizar a técnica de TUS utilizando-se de um osciloscópio com maior taxa de aquisição para regimes de aquecimento e resfriamento de metais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás – UFG pela infraestrutura. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), edital 05/2012, num. 10267001199 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), edital MCTI/CNPq 14/2014, num. 46229820140 pelo apoio financeiro e pela bolsa de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da EMC/UFG.

6. Referências

- Afaneh, A. e colab. (2011) "Ultrasonic Measurements of Temperature in Aqueous Solutions: Why and How". In: *Physics Research International*, p. e156396.
- Fujii, I. e Kawashima, K. (1995) "Digital Measurement of ultrasonic velocity". *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, v. 14, p. 203–209.
- Gilbert, J. C. e colab. (1985) "Real Time Ultrasonic Monitoring of Hepatic Cryosurgery". v. 22, n. 4, p. 319–330.
- Ihara, I. e colab. (2013) "Ultrasonic Thermometry for Temperature Profiling of Heated Materials." In: *Springer Berlin Heidelberg*, p. 211–236.
- Ihara, I. e Takahashi, M. (2009) "A novel ultrasonic thermometry for monitoring temperature profiles in materials".
- Jia, R. e colab. (2016) "Study of ultrasonic thermometry based on ultrasonic time-of-flight measurement", In: *Fluids J. Phys. Time-of-flight studies Phys. Today*, v. 6, n. 3, p. 035006.
- Lewis, M. A. e S., Robert M. e Chopra, R. (2015) "Thermometry and ablation monitoring with ultrasound". In: *International journal of hyperthermia*, v. 31, n. 2, p. 163–81.
- Takahashi, M. e Ihara, I. (2008) "Ultrasonic monitoring of internal temperature distribution in a heated material". In: *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 47, n. 5 PART 2, p. 3894–3898.
- Ueno, S. e colab. (1990) "Ultrasound thermometry in hyperthermia". In: *IEEE*, p. 1645–1652.