

# MONITORAMENTO DE TEMPERATURA INTERNA EM MATERIAIS POR TERMOMETRIA ULTRASSÔNICA

Patrícia C. Andrade<sup>1</sup>, Sílvio L. Vieira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/UFG, Goiânia, Brasil

<sup>2</sup> Instituto de Física/UFG, Goiânia, Brasil

## Resumo

Medir a temperatura interna e/ou o gradiente de temperatura em materiais é de fundamental interesse, tanto nas engenharias quanto nas ciências básicas, pois o comportamento da distribuição da temperatura está intimamente relacionado com as propriedades do material. O objetivo desse estudo foi desenvolver um sistema de termometria por ultrassom para monitoramento interno de gradiente de temperatura em materiais submetidos a uma fonte de calor. A comparação das medições de temperatura derivadas de ambos os métodos apresentou concordância maior que 96%, com diferenças inferiores a 0,70°C. Portanto, conclui-se que a metodologia apresentada mostrou-se relevante dentro do contexto laboratorial para estimativa de temperatura interna de materiais aquecidos.

**Palavras-chave:** Termometria; Monitoramento de Temperatura; Ultrassom; Termopares; Processamento de sinais.

## Abstract

*Measuring internal temperature and/or temperature gradient in materials is of fundamental interest in both engineering and basic sciences because the temperature is closely related to the properties of the material. The purpose of this study was to develop an ultrasound thermometry system for internal temperature gradient monitoring of materials subjected to a heat source. Jointly, was developed a computational algorithm responsible for estimating the internal temperature distribution of materials. The comparison of the temperature measurements derived from both methods showed agreement greater than 96%, with differences lower than 0.70°C. The methodology presented was relevant within the laboratory context to estimate the internal temperature of heated materials.*

**Keywords:** Thermometry; Monitoring Temperature; Ultrasound; Thermocouples; Signal Processing.

## 1. Introdução

Medir a temperatura de corpos é de fundamental interesse nas engenharias e 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<sup>1</sup>. Por outro lado, o monitoramento térmico na medicina é de extrema importância durante o tratamento de doenças empregando procedimentos de hipertermia. Essas técnicas consistem em aplicar uma quantidade específica de calor, elevando assim a temperatura corporal local a patamares capazes de provocar morte celular.

Durante esses procedimentos, é necessário ter controle da temperatura ao longo do processo de aquecimento da região afetada, para que se garanta segurança e eficácia no tratamento da doença. Dessa forma, assegura-se que somente as células anormais sejam afetadas, sem grandes danos as células saudáveis<sup>2</sup>.

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. O ultrassom possui elevada sensibilidade, podendo monitorar a

temperatura de materiais espessos. É uma técnica não invasiva, não destrutiva e não ionizante, e com a possibilidade de se tornar uma técnica portátil, com custo menor, se comparado com as técnicas não invasivas. Essas qualidades motivaram esse estudo da termometria baseado em ultrassom, pois nesses aspectos, ela se destaca das demais técnicas. Vários métodos específicos de termometria por ultrassom têm sido propostos<sup>3</sup>. Neste trabalho foi usado o método de detecção do tempo de trânsito (*time-of-flight*)<sup>4</sup>.

O objetivo deste trabalho é quantificar a temperatura interna de materiais submetidos à uma fonte de calor usando um sistema de termometria por ultrassom (TUS). A investigação do comportamento da velocidade do som vs temperatura foram realizadas em um bloco de alumínio e em um objeto simulador de tecido biológico (*phantom*), com o objetivo de obtenção da curva de calibração do sistema. O sistema de termometria ultrassônica é testado para um bloco de alumínio.

## 2. Materiais e Métodos

O princípio do método de termometria por ultrassom (TUS) baseia-se na dependência da velocidade do som no meio com a temperatura, a qual afeta o tempo de trânsito da onda ultrassônica. No modelo, aqui proposto, a distribuição de

temperatura pode ser estimada através da resolução da equação de condução de calor, por meio de condições de contorno bem definidas. O método consiste em se realizar medições empregando ultrassom pulso/eco e uma análise inversa acoplada com um cálculo unidimensional de diferenças finitas. Dessa forma, uma das duas condições de contorno é obtida a partir do tempo de trânsito da onda ultrassônica. Enquanto a outra pode ser obtida por qualquer dispositivo termométrico de leitura superficial, tal como, termopar, posicionado fora da região aquecida. A validação do método de termometria por ultrassom foi realizada empregando um bloco de alumínio como amostra de teste. Um sistema de termometria por termopares (TTC) foi empregado como técnica padrão, e tomando-o como referência.

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 e sem fonte térmica no interior do 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  $\alpha$  é a difusividade térmica. Em processos de aquecimento reais a condição de contorno nem sempre é mantida estável, 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<sup>5,6</sup>. Neste estudo foi utilizado do Método das Diferenças Finitas (MDF), por ser um método de cálculo de problemas de valor de fronteira, conhecido por sua simplicidade e facilidade de implementação computacional. Dessa forma a equação (1) pôde ser escrita na forma:

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

sendo  $i = 2, \dots, N-1$  e 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  $n$ .  $\Delta t$  o intervalo de tempo,  $\Delta x$  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 equação (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  $T_1^{n+1}$  (zona aquecida) é desconhecida, a menos que sejam dadas as condições de contorno do problema. Uma solução viável é estimar a temperatura  $T_i^{n+1}$  é empregando a técnica de ultrassom pulso/eco, assim, 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:

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

sendo a dependência da velocidade do ultrassom no meio linear com a temperatura, na forma  $v(T) = aT + b$  [m/s], conforme é mostrado na Seção 3. 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  $\xi$  e  $\beta$  são constantes obtidas experimentalmente. Das expressões (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 equação (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. O arranjo experimental foi composto por um transdutor ultrassônico de contato (V110-RM, Panametrics, MA, USA) de 5,0 MHz. O transdutor foi acoplado à superfície de um bloco de alumínio de 45,00 mm de comprimento, 25,00 mm de largura e 31,00 mm de espessura com incerteza de  $\pm 0,05$  mm. 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 a Figura 1.

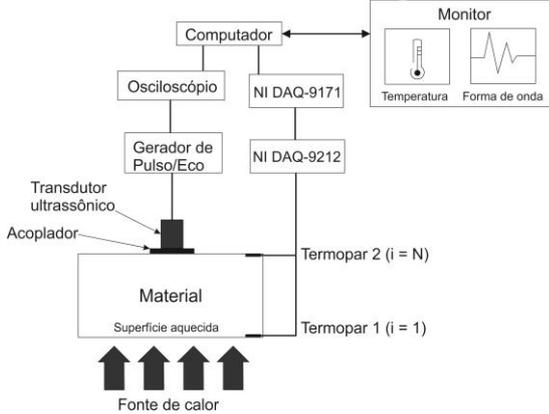


Figura 1. Diagrama esquemático da montagem experimental utilizada.

Medições foram realizadas durante o regime de aquecimento do material com o osciloscópio na base de tempo de 5 ns. 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 1. 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.

### 3. Resultados

#### 3.1. Caracterização das amostras

A Figura 2 apresenta os dados da velocidade em função da temperatura, obtidos por meio de um ajuste linear para a caracterização do bloco de alumínio. Por meio de uma regressão linear obteve-se uma correlação de 99,68% dos dados experimentais com o ajuste linear. A equação da reta da é dada por  $v(T) = -1,04T + 6410,00$  (m/s). O valor de  $\xi$  foi de  $2,655 [10^{-10} \text{ (s/(cm}^{\circ}\text{C))}]$ . A Figura 3 apresenta o ajuste linear da velocidade em função da temperatura no *phantom* de gelatina, a equação da reta ajustada obtida foi  $v(T) = 1,24T + 1505,00$  (m/s), com uma correlação de 99,54% dos pontos experimentais com a reta do ajuste linear. E  $\xi$  foi de  $-5,165 \times 10^{-9} \text{ (s/(cm}^{\circ}\text{C))}$ .

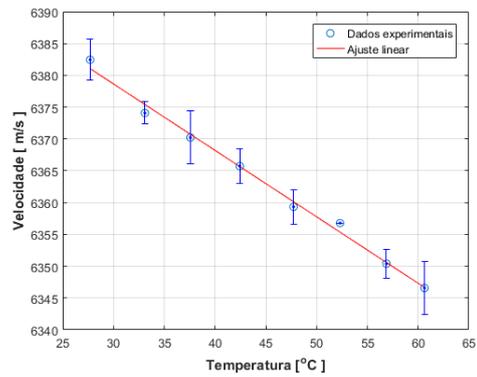


Figura 2. Curva de calibração do alumínio.

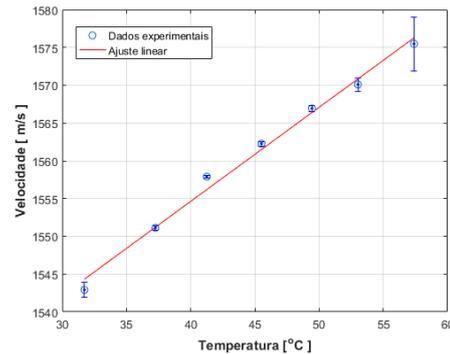


Figura 3. Curva de calibração do phantom de gelatina.

#### 3.1. Termometria por ultrassom

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 4. 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.

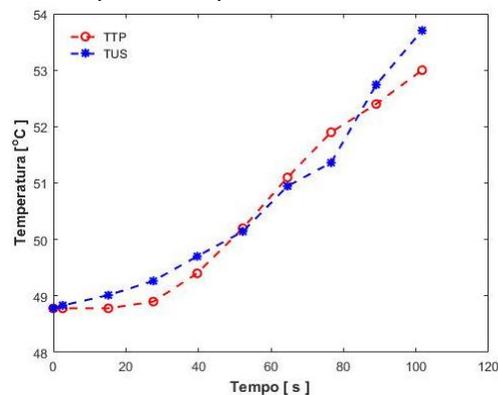
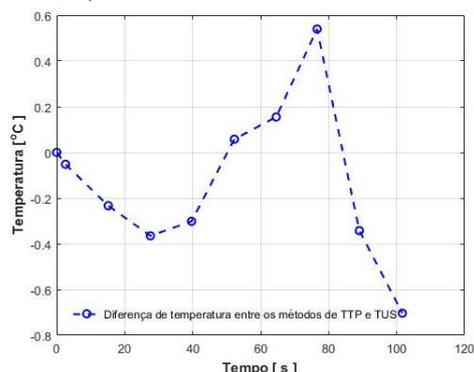


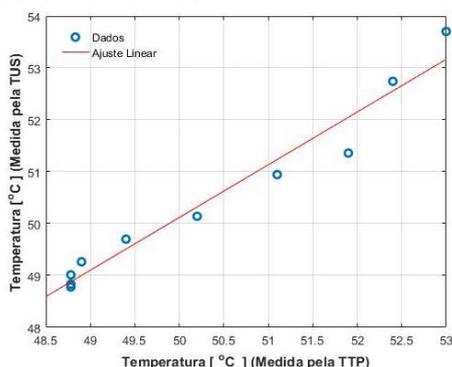
Figura 4. Temperatura do bloco na superfície aquecida, obtida pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares.

A diferença de temperatura entre as duas técnicas é ilustrada na Figura 5. Observa-se que todas as medidas referentes à diferença de temperatura entre essas duas técnicas foram inferiores a  $0,70^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5.** 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<sup>1,5,6,7</sup>. 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 6, foi encontrada uma correlação de aproximadamente 96%, entre as técnicas termométricas.



**Figura 6.** 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.

#### 4. Discussão

O método de termometria por ultrassom (TUS) aqui discutido foi eficaz para a quantificação da temperatura de forma não invasiva e sem contato direto com a fonte de calor para materiais que apresentem linearidade entre a velocidade ultrassônica e a temperatura no meio. Logo este

mesmo trabalho pode ser realizado em materiais simuladores de tecidos biológicos, que como mostrado aqui possui 99,54% de coerência dos dados experimentais com o ajuste linear, para a faixa de temperatura estudada, que é suficiente para aplicações médicas para tratamentos como a hipertermia.

#### 5. Conclusões

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.

Devido a limitações técnicas da instrumentação empregada, não foi possível aplicar o método de termometria por ultrassom para quantificar a temperatura de objetos simuladores de tecido biológico. Em estudos posteriores pretende-se adequar essa metodologia utilizando-se um instrumento com maior taxa de aquisição.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à 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.

#### Referências

- Ihara, I. e Takahashi, M. A novel ultrasonic thermometry for monitoring temperature profiles in materials. 2009.
- Rieke, V., & Butts Pauly, K. MR thermometry. Journal of magnetic resonance imaging 2008; 27(2), 376-390.
- Lewis, M. A., Staruch, R. M., & Chopra, R. Thermometry and ablation monitoring with ultrasound. International Journal of Hyperthermia 2015; 31(2), 163-181.
- Jia, R., Xiong, Q., Wang, L., Wang, K., Shen, X., Liang, S., & Shi, X. Study of ultrasonic thermometry based on ultrasonic time-of-flight measurement. AIP Advances 2016; 6(3), 035006.
- Ihara, I., Tomomatsu, T., Takahashi, M., Kosugi, A., Matsuya, I., & Yamada, H. Ultrasonic Thermometry for Temperature Profiling of Heated Materials. Advancement in Sensing Technology 2013; 211-236.
- Takahashi, M., & Ihara, I. Ultrasonic monitoring of internal temperature distribution in a heated material. Japanese Journal of Applied Physics 2008; 47(5S), 3894.
- Ueno, S., Hashimoto, M., Fukukita, H., & Yano, T. Ultrasound thermometry in hyperthermia. In *Ultrasonics Symposium, 1990. Proceedings., IEEE 1990*, 1645-1652.

#### Contato:

Sílvio Leão Vieira  
Av. Esperança, s/nº, Campus Samambaia, 74.690-900, Goiânia, Goiás, Brasil  
E-mail: silvieira@ufg.br