

DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E DA TEMPERATURA INTERNA EM EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Bruno Henrique Oliveira Mulina, Lab. de Transferência de Calor e Massa - LTCM, brunomulina@gmail.com
Solidonio R. de Carvalho, Lab. de Transferência de Calor e Massa - LTCM, srcarvalho@mecanica.ufu.br
Valerio Luiz Borges, Lab. de Transferência de Calor e Massa - LTCM, vlborges@mecanica.ufu.br

Resumo. *Com o objetivo de determinar a temperatura interna de processos industriais, este trabalho prevê o desenvolvimento de uma técnica que permita o cálculo da temperatura interna em processos industriais por métodos não intrusivos. A técnica propõe que a determinação da temperatura interna deve ser realizada com base em informações obtidas da superfície externa do processo, sem o conhecimento prévio das propriedades térmicas. Dessa forma, a técnica também deverá determinar as propriedades térmicas, in situ, de posse de informações fornecidas pela superfície externa.*

Palavras chave: *Temperatura interna, determinação de propriedades térmicas, instrumentação industrial*

1. INTRODUÇÃO

A temperatura é o principal parâmetro mensurado na indústria e na medicina, sendo um ótimo indicativo com relação às condições do estado de saúde de um paciente ou de operação de um processo, sendo possível sua aquisição feita de forma direta, podendo ser utilizados diversos modelos de elementos sensores, como citados por (Mulina, 2011). Em casos onde a temperatura de interesse é interna, e não é possível a inserção do sensor no ponto de interesse, deve-se desenvolver um método não invasivo para que a mesma seja monitorada.

Na indústria, Jenoptik (2014) descreve a temperatura sendo utilizada como parâmetro de manutenção de equipamentos. Motores e mancais operando de forma irregular sofrem com temperaturas elevadas, reduzindo a vida útil de seus componentes. O desempenho de motores elétricos e sua vida útil podem ser monitorados por meio da variação de temperatura, como apresentado por Cui *et al.* (2012) e Bonnett (2001) e Y. Huai *et al.*, (2003), comprovaram que o controle da temperatura possibilita ajustar o motor para que o mesmo opere sempre com eficiência ideal. Matzan (2007) estudou a importância do monitoramento térmico de mancais em pleno funcionamento, mostrando que o aumento da temperatura aumenta o desgaste dos lubrificantes e batentes. O autor frisa que a termografia é pouco confiável devido à influência do meio. Um transformador com elevada eficiência gera menor quantidade de calor (Copper Alliance (2013)). Caso a temperatura se eleve, o rendimento do transformador reduz, sendo maior sua dissipação de energia e, consequentemente, maior será o sistema de refrigeração da máquina. O mesmo fenômeno ocorre em células combustíveis, onde Begot e Kauffmann (2008) utilizaram métodos inversos e medição da temperatura na superfície para prever a temperatura em células combustíveis. Tal estudo proporcionou o monitoramento da temperatura, maior rendimento das células estudadas e aumento da vida útil.

A temperatura do corpo humano é o resultado do balanço do calor gerado pelo processo metabólico e a perda para o meio. Temperaturas elevadas representam irregularidades na saúde do paciente, devendo ser identificadas e tratadas imediatamente, sob o risco de lesões, principalmente na região cerebral. Essa preocupação também está presente em determinadas profissões, como bombeiros. Wishart *et al.* (2010) descrevem a aplicação da temperatura corpórea, obtida por meio da termografia, como indicador para determinar o estado de saúde, podendo indicar anomalias como o câncer.

Existem na literatura diversas formas de medir a temperatura de forma não invasiva, tais como: refração, termografia acústica, laser induzido, entre outros. Alguns equipamentos já são desenvolvidos com sensores internos instalados. No entanto, mesmo em casos onde o custo dos equipamentos é elevado, não existe a preocupação na instalação de sensores por meio dos fabricantes. Com o objetivo de permitir mensurar as temperaturas internas de um processo no ponto onde o mesmo está instalado, independente das condições ambientais, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma técnica para determinação da temperatura interna de processos, simultaneamente com as propriedades térmicas do meio, baseado nas informações obtidas *in situ* na superfície externa.

2. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento de métodos para determinação da temperatura interna por meios não invasivos é de grande importância na área médica, sendo motivo de grande número de trabalhos, devido às limitações do emprego de técnicas invasivas. Porém na área industrial, um grande número de processos são controlados baseados na medição da temperatura externa e no empirismo dos operadores. Dessa forma o desenvolvimento de uma técnica que permita obter a temperatura interna de processos industriais de forma rápida, simples e precisa permitirá um melhor controle dos

processos. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma técnica para determinação de temperaturas internas de equipamentos industriais de forma não invasiva, incluindo a concepção dos sensores térmicos responsáveis por obter as variáveis necessárias. Uma vez que não é comum o conhecimento preciso das propriedades térmicas dos materiais utilizados nos equipamentos, a técnica também determina, de forma simultânea, a condutividade e a difusividade térmica do sistema instrumentado.

2.1. MODELAGEM TÉRMICA E DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

A Fig. 2.1 apresenta um modelo teórico equivalente ao problema a ser solucionado para determinação da temperatura interna, onde ϕ_e é o fluxo de calor perdido por processos de convecção e radiação, ϕ_i é o fluxo de calor interno, fornecido por processos como atrito e combustão, e T_i a temperatura interna à parede.

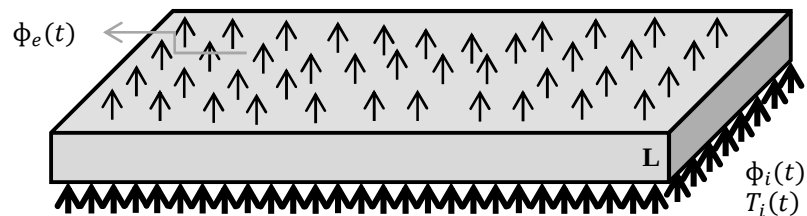


Figura 2.1 – Modelo térmico equivalente transiente

A técnica desenvolvida tem por objetivo a instrumentação de mancais e fornos. Sendo que as medições ocorrerão nas paredes destes, onde a razão geométrica área/espessura é de grandes proporções, é possível que os modelos térmicos aplicados ao problema sejam unidimensionais. Sendo assim o modelo térmico baseia-se na equação de difusão térmica unidimensional, submetida às condições de contorno interna e externa definidas pelos fluxos de calor ϕ_e e ϕ_i . Para o cálculo das temperaturas, deve-se também conhecer as propriedades térmicas do meio, nem sempre conhecido.

2.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Existem diversas técnicas para determinação das propriedades térmicas, sendo desenvolvidas para aplicação experimental, necessitando de uma amostra do material e determinadas condições. Por isso, é necessário o desenvolvimento de uma técnica que não dependa destas condições, ou que sua influência fossem minimizada. Considerando um sistema como mostrado na Fig. 2.2a, onde fluxo de calor e temperatura serão medidos em dois pontos diferentes da superfície do sistema. Como dito anteriormente, é possível definir dois modelos térmicos unidimensionais para os dois sensores. Cada sensor será composto por um transdutor de fluxo de calor, um termopar e uma cobertura, como mostra a Fig. 2.2b. sendo cada sensor diferenciado pela espessura da cobertura em cada um deles.

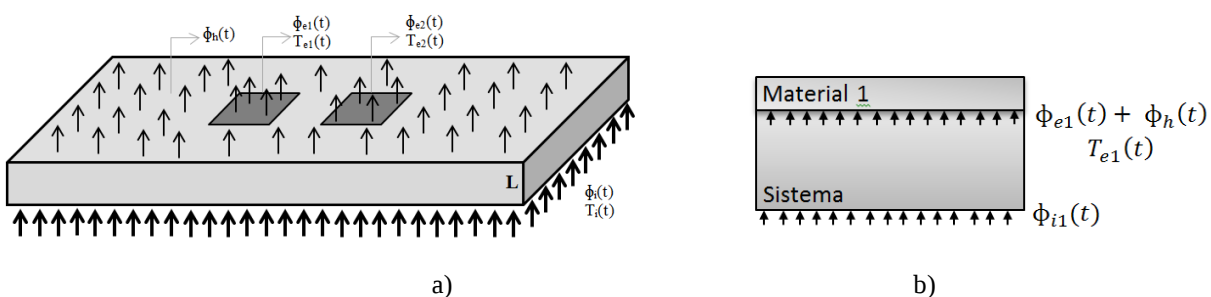


Figura 2.2 – Modelo térmico equivalente para determinação das propriedades térmicas. a) Posicionamento dos sensores. b) Detalhe na construção dos sensores.

Como a temperatura em qualquer ponto é definida pela sobreposição dos efeitos da temperatura inicial e das influências das condições aplicadas às faces, descrito como método das Imagens, é possível determinar a influência de cada efeito de forma independente. Construindo um modelo unidimensional para cada sensor, e subtraindo as influências de cada condição de contorno, e aplicando as funções de Green (Beck *et al.* (1992)), temos o Modelo Diferença, apresentado na Eq. 2.1, onde $\phi_{ed}(t) = \phi_{e1}(t) - \phi_{e2}(t)$, $\phi_{id}(t) = \phi_{i1}(t) - \phi_{i2}(t)$ e $T_{ed}(t) = T_{e1}(t) - T_{e2}(t)$. Este modelo térmica unidimensional dependerá unicamente das diferenças entre as medições de temperatura e fluxo de calor realizadas pelos sensores, e um fluxo interno ϕ_{id} não conhecido.

$$T_{ed}(x = L, t) = \frac{\alpha}{Lk} \left(\int_{\tau=0}^t \phi_{id}(\tau) d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta_m^2 \alpha t} \cos(\beta_m x) \int_{\tau=0}^t e^{-\beta_m^2 \alpha \tau} \phi_{id}(\tau) d\tau \right) + \frac{\alpha}{Lk} \left(\int_{\tau=0}^t \phi_{ed}(\tau) d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta_m^2 \alpha t} \cos(\beta_m x) (-1)^m \int_{\tau=0}^t e^{-\beta_m^2 \alpha \tau} \phi_{ed}(\tau) d\tau \right) \quad (2.1)$$

Considerando que o sistema térmico pode ser tratado como um sistema dinâmico $H(f)$, como descrito por Borges, (2008) do tipo entrada/saída, definido pela relação entre o sinal de entrada $X(f)$, obtido por meio da transformada de Fourier do fluxo de calor $\phi_{ed}(t)$, e o sinal de saída $Y(f)$, obtido pela transformada da temperatura $T_{ed}(t)$, é possível calcular a difusividade térmica, uma vez que está relacionada exclusivamente ao atraso na fase de $H(f)$.

Para determinação da difusividade térmica inicialmente é definido que $\phi_{id}(t)$ possui valores entre zero e maior valor medido do fluxo de calor $\phi_{ed}(t)$, e constante no tempo. Escolhido um valor de $\phi_{id}(t)$ dentro dessa faixa, e considerando a condutividade térmica unitária *a priori*, o modelo dinâmico teórico é obtido na relação $\phi_{ed}(t)$ e T_{cd} , onde T_{cd} é a temperatura externa obtida por meio da solução do modelo térmico da Eq. (2.1). A difusividade térmica pode ser determinada minimizando a diferença entre o valor da fase dos modelos térmicos obtidos experimentalmente e o calculado por meio de métodos diretos, e aplicando a técnica de otimização por Seção Áurea com Aproximação Polinomial (Vanderplaats, 1986). O procedimento de determinação da difusividade térmica é repetido para outros valores do fluxo interno $\phi_{id}(t)$, dentro da faixa citada anteriormente, gerando um conjunto de pares $(\phi_{id}; \alpha)$, como mostrado na Fig. 2.3. Interpolando os valores da α e $\phi_{id}(t)$, sendo a difusividade térmica entrada do polinômio e o fluxo sendo a saída, o valor de α está localizado em um dos pontos de inflexão do polinômio encontrado.

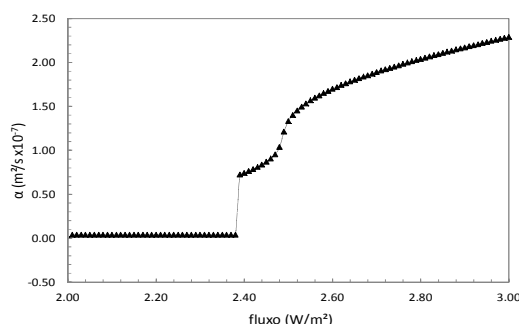


Figura 5.7 – Difusividade térmica obtida para diferentes valores de fluxo $\phi_{id}(t)$

Encontrada a difusividade térmica, o termo $\phi_{id}(t)$ é calculado com base no polinômio interpolador. Uma vez conhecida a difusividade e $\phi_{id}(t)$, a condutividade térmica pode ser determinada minimizando a diferença entre as temperaturas T_{ed} , obtida do Modelo Diferença, e T_{cd} , calculada por meio da Eq. (2.1), ambas no domínio do tempo, também pelo método da Seção Áurea. Encontrada as propriedades térmicas do sistema, é determinado o fluxo de calor interno real, com base com nas medições externas. A temperatura interna é calculada diretamente por meio do modelo térmico da Eq. (2.1).

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A técnica proposta neste trabalho considera que não haja variação nas propriedades térmicas na faixa de temperatura testada. Como a técnica proposta visa determinar as propriedades térmicas e estimar a temperatura em sistemas onde a razão geométrica área/espessura é muito grande, as amostras utilizadas apresentam dimensões que se adequem a tal proposta, possuindo área muito maior que sua espessura. Para demonstração da aplicação da técnica, foram determinadas as propriedades térmicas do policloreto de polivinila (PVC). Aplicando a técnica proposta, foram realizados 14 experimentos, tendo os valores encontrados mostrados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Valores determinados de α e k para cada experimento

nº experimento	α (m^2/s) $\times 10^7$	k (W/mK)
1	1,165	0,222
2	1,152	0,119
3	1,073	0,126
4	1,348	0,238
5	1,420	0,163
6	0,957	0,180
7	1,387	0,176
8	1,161	0,194
9	0,865	0,162
10	1,942	0,141
11	1,111	0,211
12	0,864	0,180
13	1,233	0,213
14	1,101	0,187

A Tab. 3.2 apresenta uma comparação entre os valores obtidos até o presente momento deste trabalho com valores encontrados na literatura (Borges, 2008).

Tabela 3.2 – Comparativo entre valores de α e k

	Presente Trabalho (a 30°C)	Borges (2008) (a 30°C)	Goodfellow (2007) (a 23°C)	IPT (2004) (a 26°C)	Efunda (2007)	Hattori (2005)
α (m ² /s) $\times 10^{-7}$	1.19 ($\pm$ 0.274)	1,157	1,143	-	-	1,2
k (W/mK)	0.18 ($\pm$ 0.035)	0,159	0,12 – 0,25	0,16	0,146 – 0,209	-

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho se mostraram satisfatórios com relação a outras técnicas existentes para determinação das propriedades térmicas, mostrando sua aplicação promissora. A vantagem da técnica proposta com relação a outras existentes é a não necessidade de condições controladas, ou de amostras do material a ser caracterizado, permitindo assim sua aplicação diretamente no local de interesse.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem imensamente os órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, e ao Programa de Pós Graduação da Engenharia Mecânica.

6. REFERÊNCIAS

- BÉGOT, S.; KAUFFMANN J.M. Estimation of internal fuel cell temperatures from surface temperature measurements. *Journal of Power Sources*, v. 178, n. 1, p. 316-322, mar. 2008.
- BONNETT, A.H. Operation temperature consideration and performance characteristics for IEEE 841 motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. vol. 37, n. 4, p.1120-1131, ago. 2001.
- BORGES, V. L.. Desenvolvimento do método de aquecimento plano parcial para a determinação simultânea de propriedades térmicas sem o uso de transdutores de fluxo de calor. 2008. 129 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Uberlândia.
- CUI, Y.; WU, G.; Gao, G.; Luo, Y.; Cao, K. Analysis and Calculation of Three-dimensional Temperature Field of Inverter-fed Traction Motor. *Journal of Modern Mathematics Frontier*, vol. 1, n. 1, p.1-5. 2012
- GUNGA, H.C.; SANDSUND, M.; REINERTSEN, R.E.; SATTLER, F.; KOCH, J. The “Double sensor” – A new non-invasive device to measure continuously core temperature in humans. In: XI Environmental Ergonomics, 2005, Proceedings from the 11th International Conference on Environmental Ergonomics, Ystad, Suécia, p. 286-289.
- HUAI, Y.; MELNIK, R.V.N.; THOGENSEN, P.B. Computational analysis of temperature rise phenomena in electric induction motors, *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, n. 7, p. 779-795, mai. 2003.
- JENOPTIK A. G.. Applications for non-radiometric infrared camera modules. Disponível em: <http://www.jenoptik.com/en_50397_applications>. Acessado em 10/09/2014
- KITAMURA, K.; ZHU, X.; CHEN, W.; NEMOTO, T. Development of a new method for the noninvasive measurement of deep body temperature without a heater. *Medical Engineering & Physics*, vol. 32, n. 1, p. 32: 1-6, jan. 2010.
- MATZAN, E. Detecting Premature Bearing Failure. *Machinery Lubrication Magazine*, mai. 2007. Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/1041/detecting-bearing-failure>>. Acesso em: 2 jan. 2012
- MULINA, B. H. O. Desenvolvimento de um sistema eletrônico para monitoramento térmico de fornos industriais. 2011. 91 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- COPPER ALLIANCE. Temperature Rise and Transformer Efficiency. Disponível em: <http://www.copper.org/environment/sustainable-energy/transformers/education/trans_efficiency.html>. Acesso em 10/02/2013.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.