

METODOLOGIA NUMÉRICA/EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

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

Resumo. A temperatura é o principal parâmetro mensurado na indústria, um ótimo indicativo do estado de operação de equipamentos. Desse modo, o estudo da variação da temperatura ao longo do tempo permite identificar a necessidade de manutenção de equipamentos industriais. No entanto, a grande maioria dos motores elétricos, mancais e bombas hidráulicas não possuem sensores térmicos em sua parte interna. Logo, é comum na indústria que as condições de funcionamento sejam definidas com base em temperaturas medidas na parte externa, como por exemplo, na superfície ou carcaça de máquinas. Sabe-se, no entanto, que a temperatura externa depende fortemente da fonte de calor interna e de efeitos convectivos e radiativos do meio, o que pode acarretar em incertezas no processo de medição. Com o objetivo de determinar a temperatura interna de equipamentos industriais, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma técnica numérica-experimental e de métodos não invasivos para chegar aos objetivos propostos. A técnica é baseada em um modelo térmico transiente unidimensional e problemas inversos em transferência de calor, de modo a estimar as propriedades térmicas da carcaça do equipamento e determinar a temperatura interna do mesmo. Além disso, faz uso de dados experimentais envolvendo a temperatura e o fluxo de calor monitorados em regiões acessíveis, na superfície externa do equipamento. Os resultados obtidos até o presente momento demonstram que se trata de uma técnica promissora

Palavras chave: Temperatura, propriedades térmicas, problemas inversos.

1. INTRODUÇÃO

A temperatura é um parâmetro mensurável aplicado largamente para determinar as condições de um processo. Na indústria, permite controlar o processo produtivo, e a qualidade final do produto. Avaliando o funcionamento a temperatura em equipamento, como motores elétricos e transformadores, ou mancais, é possível avaliar o desempenho, condições de trabalho e sua vida útil. Na medicina, pode ser a diferença entre um tratamento bem sucedido ou a piora no estado de saúde do paciente.

Quando a temperatura de interesse está localizada em uma região inacessível, diversas técnicas podem ser aplicadas de modo a estimar seu valor. Ultrassom, radiometria, termografia infravermelho são algumas das técnicas aplicadas para determinação indireta da temperatura. Alguns sensores permitem determinar a temperatura conhecendo as condições na superfície acessível, como o *Zero Heat Flux* ou o *Double Sensor*. Um detalhe em comum à estas técnicas é que funcionam bem apenas em regime permanente. Quando se deseja conhecer o processo ao longo de um regime transiente, é necessária a aplicação da modelagem térmica do processo em questão.

Porém a solução correta deste modelo térmico depende fortemente das propriedades térmicas das partes que compõem o motor ou a célula combustível, propriedades estas, por vezes, desconhecidas. Nesse sentido, faz-se necessário o uso de técnicas eficientes para a determinação das propriedades térmicas dos materiais envolvidos. Tais técnicas em muitos casos determinam apenas uma das propriedades térmicas, sendo necessárias diferentes configurações experimentais para determinação completa das propriedades térmicas do sistema. Borges (2008) propõe uma técnica numérica/experimental não destrutiva para determinação simultânea da condutividade e difusividade térmica de materiais, fazendo uso de dados experimentais, modelagem térmica e técnicas de problemas inversos e métodos de otimização para alcançar os objetivos propostos.

Assim sendo, este trabalho propõe a validação sintética da técnica para determinação da temperatura interna juntamente com as propriedades térmicas, proposta por Mulina (2014), para duas amostras de condutividades e difusividades térmicas diferentes, a partir de parâmetros medidos na superfície acessível.

2. ESTUDO DE CASO: EXPERIMENTOS SIMULADOS COM AMOSTRAS DE PVC E AÇO

A Fig. 2.1 apresenta um esquema do modelo térmico a ser estudado. Trata-se de um modelo teórico, equivalente ao problema a ser solucionado para determinação da temperatura interna. ϕ_e representa o fluxo de calor dissipado na carcaça do equipamento por convecção e/ou radiação, ϕ_i o fluxo de calor interno, gerado pelo próprio equipamento, e T_i a variável de interesse, ou seja, a temperatura interna

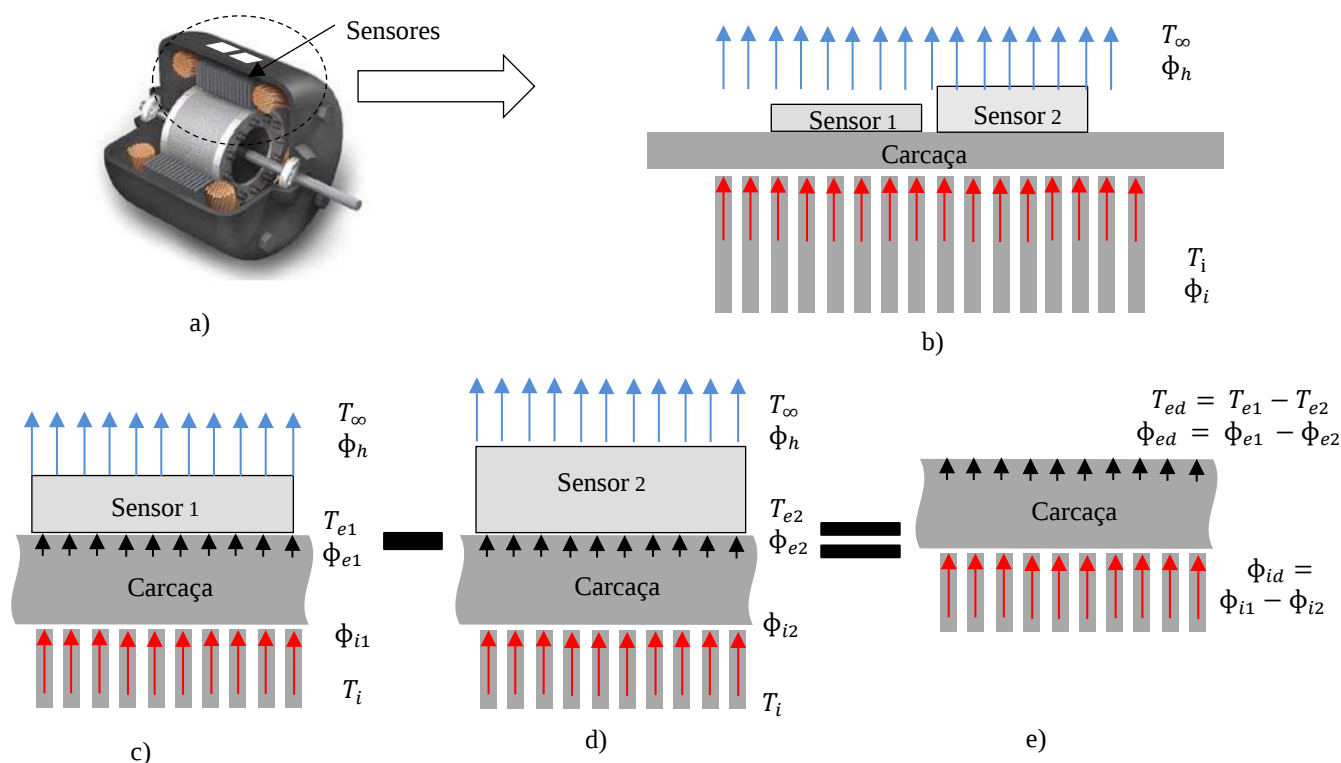


Figura 2.1 – Problema térmico: a) problema instrumentado; b) Problema térmico geral: fluxo de calor imposto na superfície interna, e dissipação de calor e sensores posicionados na face externa; c) Problema térmico 1; d) Problema térmico 2; e) Problema térmico "diferença"

Com intuito de validar a técnica, foram produzidos dois experimentos simulados. O primeiro consistiu em analisar o desempenho em uma carcaça com baixa condutividade térmica de policloreto de polivinila (PVC). No segundo, optou-se por avaliar o desempenho em uma carcaça com condutividade térmica superior, no caso, de aço AISI 304. A escolha de tais materiais foi baseada na vasta literatura científica que reporta suas propriedades térmicas.

Para os experimentos simulados, resolveu-se o problema direto considerando os modelos unidimensionais apresentados nas Figs. 2.1c e 2.1d, que se diferem, basicamente, pela espessura dos sensores fixados à parede externa da carcaça e, consequentemente, fluxo de calor imposto na parede interna ($\phi_{i1} \neq \phi_{i2}$) constantes. As demais condições de contorno e iniciais são similares. A aproximação do modelo térmico real tridimensional em dois modelos unidimensionais é confirmada experimentalmente por Mulina (2014).

No primeiro experimento foram atribuídos valores para ϕ_{i1} e ϕ_{i2} referentes ao fluxo de calor na parte interna de uma carcaça de PVC. No segundo experimento, considerou-se uma carcaça metálica de aço AISI 304 e novos valores para ϕ_{i1} e ϕ_{i2} . A Tab. 2.1 apresenta as propriedades térmicas da carcaça e demais condições adotadas nos experimentos simulados. No processo de cálculo, desprezou-se a resistência térmica de contato entre a amostra e sensores e foram feitos ajustes com relação à convecção térmica, tempo de duração de cada experimento, passo de tempo, por se tratarem de carcaças com propriedades térmicas bastante distintas. Ressalta-se que para o cálculo das propriedades térmicas da carcaça, principalmente da difusividade térmica, os sensores não podem estar em equilíbrio térmico com a carcaça. A sensibilidade da técnica está diretamente relacionada às variações no fluxo de calor e temperaturas monitoradas na parede externa da carcaça, imediatamente após a instalação dos sensores. Conhecidas as propriedades térmicas, a temperatura interna da carcaça pode ser estimada em regime transiente ou permanente.

Tabela 2.1 – Parâmetros aplicados aos experimentos simulados

Sensores	
Material	Cobre
Difusividade térmica [m^2/s] * 10^6	117
Condutividade térmica [W/mK]	401
Espessura do sensor 1 [mm]	5
Espessura do sensor 2 [mm]	10
Amostras	

Material		PVC	Aço
Difusividade térmica [m^2/s] * 10^7		1,24	39,5
Condutividade térmica [W/mK]		0,16	14,9
Espessura (e) [mm]		0,025	0,01
Dados experimentais			
Fluxo de calor	ϕ_{i1} [W/m^2]	150	2000
	ϕ_{i2} [W/m^2]	200	2500
Coeficiente de convecção (h)		30	20
Intervalo de aquisição [s]		1	1
Duração do experimento [s]		10000	500
Numero de pontos		10000	500
Temperatura média [°C]		25	25

As Figs. 2.2 e 2.3 apresentam os resultados para o ‘Modelo Diferença’, ou seja, as diferenças entre as temperaturas e fluxos de calor medidos na face externa da carcaça (θ_{ed} e ϕ_{ed}) conforme os experimentos simulados para o PVC e para aço AISI 304.

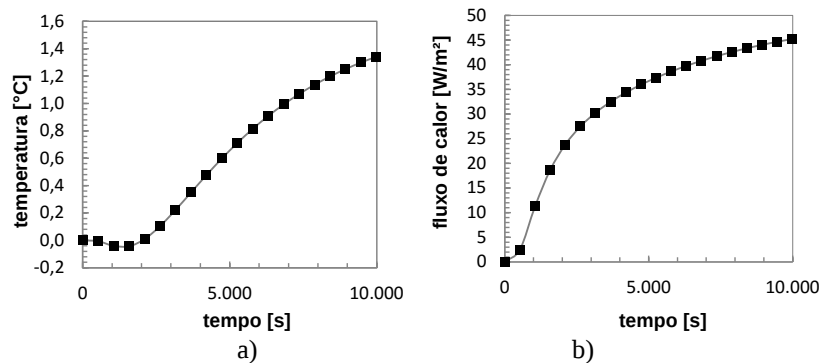


Figura 2.2 – Diferenças entre os sinais aplicados ao PVC. a) Temperatura $\theta_{ed}(t)$. b) Fluxo de calor externo $\phi_{ed}(t)$.

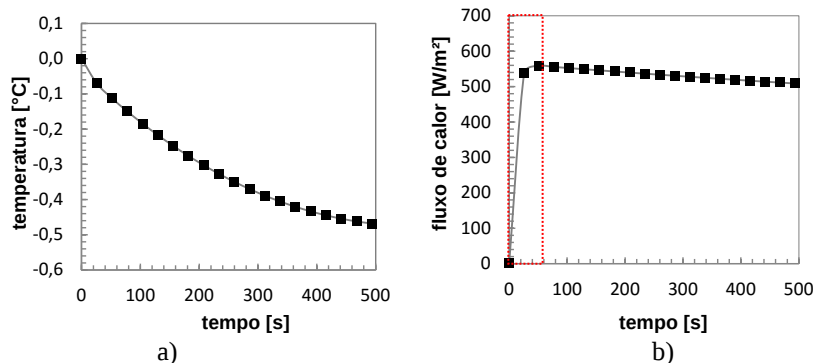


Figura 2.3 – Diferenças entre os sinais aplicados ao aço. a) Temperatura $\theta_{ed}(t)$. b) Fluxo de calor externo $\phi_{ed}(t)$.

No caso do experimento envolvendo o aço AISI 304, nota-se que o fluxo de calor externo, $\phi_{ed}(t)$, tende rapidamente ao regime permanente. Portanto, para a estimativa da difusividade na carcaça metálica, considerou-se apenas os 50 segundos iniciais de experimento, intervalo de tempo no qual houve maior variação no aporte de calor.

3. RESULTADOS

3.1. Estimativa das propriedades térmicas

A técnica proposta por Mulina (2014) consiste em estimar de forma simultânea a difusividade térmica da carcaça (α) e o fluxo de calor interno $\phi_{id}(t)$ imposto ao modelo diferença. Logo em seguida, estima-se a condutividade térmica (k). Conhecidas as propriedades, é calculada a temperatura interna da carcaça.

Para determinação da difusividade térmica é aplicada o modelos de Impedância Generalizada definida pela relação entre os sinais de saída e de entrada, representados respectivamente pelos sinais de temperatura e de fluxos de calor aplicados ao problema térmico no domínio da frequência. Adotando diferentes valores para fluxo de calor interno ϕ_{id} , é observada uma variação nas fases obtidas para a Impedância Generalizada. Aplicando-se o método de otimização por

Seção Áurea com Aproximação Polinomial cúbica (Vanderplaats, 1986), podem ser estimados valores de α que minimizam a função E_ϕ , representada pelo erro quadrático entre as fases experimentais e as obtidas numericamente. A Fig. 3.1 apresenta os resultados obtidos. Nela é possível identificar os valores ótimos de ϕ_{id} e α que resultam no mínimo valor global da função E_ϕ .

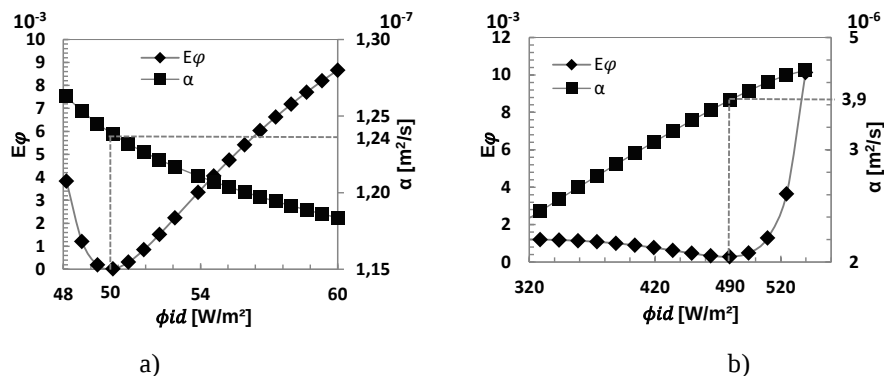


Figura 3.1 - Valores ótimos de ϕ_{id} e α que resultam no mínimo valor global da função E_ϕ . a) PVC. b) Aço.

Aplicados os valores ótimos de ϕ_{id} e α obtidos na etapa anterior no Modelo Diferença, agora no domínio do tempo, e novamente o método de otimização da Seção Áurea com Aproximação Polinomial Cúbica, estima-se a condutividade térmica k das amostras de PVC e aço. Como condições de contorno do Modelo Diferença, faz-se uso do fluxo de calor ϕ_{ed} medido experimentalmente na face $x=L$ do modelo diferença, e o fluxo de calor ϕ_{id} , em $x=0$, previamente estimado na etapa anterior, juntamente com a difusividade térmica.

A Tab. 3.1 apresenta os valores obtidos para as propriedades térmicas com o uso da técnica proposta e modelo diferença. Além disso, apresenta-se o erro absoluto entre os valores aplicados nos experimentos simulados e aqueles estimados.

Tabela 3.1 – Comparativo entre as propriedades térmicas experimentais e calculadas.

		Experimento	
		PVC	Aço
Difusividade térmica [m ² /s] * 10 ⁷	Aplicada	1,24	39,5
	Estimada	1,2336	39,47
	Erro (%)	0,535%	0,08%
Condutividade térmica [W/mK]	Aplicada	0,16	14,9
	Estimada	0,1736	15,9
	Erro (%)	8,5%	6,71%

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma técnica numérica/experimental para determinação das propriedades térmicas em equipamentos industriais. A partir da definição do problema térmico, concepção de problemas térmicos auxiliares (Modelo Diferença), dados experimentais e uso de técnicas de problemas inversos em transferência de calor, é possível estimar as variáveis de interesse a partir de dois experimentos simulados.

Por meio da análise dos resultados, constatou-se uma boa coerência entre os valores simulados e experimentais, o que confirmou a potencialidade e viabilidade de uso da técnica para materiais isolantes e metálicos.

Com base na literatura científica, é verificado que na grande maioria das técnicas disponíveis para mesma finalidade fazendo uso de amostras e experimentos controlados em laboratório para estimar de forma única ou simultânea as propriedades térmicas de materiais. A vantagem da presente técnica frente as demais é a possibilidade de seu uso em campo, diretamente no material a ser estudado.

Finalmente, considera-se que o presente trabalho deu apenas um passo frente ao grande desafio que é determinar de forma simultânea as propriedades térmicas e temperatura interna *in situ* de equipamentos industriais.

5. REFERÊNCIAS

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, MG.

Mulina, B. H. O. ; Carvalho, S. R.; Borges, V. L.. “Determinação Simultânea Das Propriedades Térmicas E Da Temperatura Em Equipamentos Industriais”. In: POSMEC 2014 - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia, MG. Anais do POSMEC 2014, 2014. v. 1. p. 1-4.

Vanderplaats, G. N. “Numerical Optimization Techniques For Engineering Design”. McGraww-Hill Inc. 1984.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, e ao Programa de Pós Graduação da Engenharia Mecânica pelo apoio institucional e financeiro.

7. ABSTRACT

The measurement and analysis of temperature in machinery and electric motors is an excellent tool for industrial maintenance. However, the majority of industrial equipment, such as: bearings and hydraulic pumps, do not have thermal sensors internally installed. Therefore, it is common to measure the temperature on accessible regions of the equipment, such as the external surface. However it is known that external temperature depends on the environment and the internal heat source, which may cause uncertainty in the measurement. In order to determine the internal temperature of industrial equipment, this work proposes the development of a numerical-experimental technique based on a non-invasive method. The technique is based on transient one-dimensional thermal model, inverse problems in heat transfer and experimental data to estimate thermal properties and determine internal temperature of industrial equipment. The proposed technique was evaluated with simulated experiments and comparisons with data from scientific literature. The results obtained demonstrated the feasibility and potential of the technique proposed in this work.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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