

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS POR MEIO DE MÉTODO NÃO INVASIVO

Bruno Henrique Oliveira Mulina, brunomulina@gmail.com
Solidônio Rodrigues de Carvalho, srcarvalho@mecanica.ufu.br

Resumo. *Métodos invasivos são aqueles que provocam o rompimento das barreiras naturais, abrindo uma porta ou acesso para o meio interno no qual se deseja medir a temperatura. Já os métodos não invasivos são aqueles que envolvem empirismo, instrumentos científicos, medições indiretas e modelos matemáticos de forma que a temperatura possa ser estimada sem romper ou danificar qualquer barreira ou porta de acesso. No caso da temperatura, em muitos casos não é possível sua medição direta no ponto de interesse. Para esses casos, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia juntamente com um sistema eletrônico embarcado que permita a determinação interna da temperatura por métodos não invasivos, sem necessidade do conhecimento prévio do meio a ser medido.*

Palavras chave: Instrumentação não invasiva, temperatura, instrumentação térmica, modelagem térmica, sistemas embarcados.

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. Para obtenção direta da temperatura podem ser utilizados diversos modelos de elementos sensores, como citados por (Mulina, 2011). Existem casos onde a temperatura de interesse é interna, e não é possível a inserção do sensor no ponto de interesse. Nesses casos deve-se desenvolver um método não invasivo para que a mesma seja monitorada.

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.

Na indústria, a temperatura é 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.

Tanto na indústria como a área médica, é comum apresentar um parecer sobre as condições internas baseado na temperatura externa, levando a falsos resultados, uma vez que a temperatura externa depende também das condições ambientais. Dessa forma, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas para determinação da temperatura interna corretamente, e de forma rápida.

Existem na literatura diversas formas de medir a temperatura de forma não invasiva, tais como: refração, termografia acústica, laser induzido, comprimento de onda, entre outros. Alguns equipamentos já são desenvolvidos com sensores internos instalados. No entanto, mesmo em casos onde envolve equipamentos de alto custo, não existe a preocupação na instalação de sensores por meio dos fabricantes. Com o objetivo de permitir mensurar as temperaturas internas e externas de um processo no ponto onde o mesmo está instalado, independente das condições ambientais, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema eletrônico capaz de operar sem fontes de energia externa e com a transmissão dos dados adquiridos em tempo real por meio de uma rede sem fio.

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. 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 um sistema de aquisição 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 responsável por obter as variáveis necessárias para a técnica, e um sistema eletrônico embarcado capaz de medir os parâmetros e aplicar os modelos matemáticos para determinação da temperatura, e enviar

as informações a um dispositivo de apresentação por meios sem fio, e software para análise gráfica e armazenamento dos dados pra futuros testes.

2.1. MODELAGEM MATEMATICA E SENSORES TÉRMICOS

O desenvolvimento dos modelos térmicos a serem usados no trabalho proposto deve calcular a temperatura interna de processos, em tempo real, sem a necessidade do conhecimento prévio do meio. A modelagem dos sensores em regime permanente foi baseada por Kitamura (2010), onde a temperatura de uma fonte de calor é obtida medindo-se as diferenças de temperatura provocada por dois fluxos de calor, quando submetidos às resistências térmicas diferentes. Considerando que o fluxo de calor pode ser medido pela diferença de temperatura em uma resistência térmica conhecida, o modelo térmico para determinação da temperatura interna do processo em regime permanente é dado pela Eq. (1).

$$T_{interna} = \frac{T_2 - T_4 * \left(\frac{(T_2 - T_1) * R_2}{T_4 - T_3} * \frac{R_2}{R_1} \right)}{1 - \left(\frac{(T_2 - T_1) * R_2}{T_4 - T_3} * \frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (1)$$

De modo a atender o modelo matemático desenvolvido, os sensores térmicos foram construídos conforme Fig. 1b, com termopares tipo T, representados como T1, T2, T3 e T4, soldados em folhas de aço inoxidável AISI 304 de dimensões 10mm x 10mm. A geometria do sensor foi escolhida de forma a permitir uma aproximação unidimensional do modelo matemático. Isolantes térmicos foram posicionados entre as duas folhas de aço que formam cada sensor térmico (K1 e K3), e na parte superior do sensor (Ki). A escolha do aço foi motivada pela facilidade de soldagem dos termopares no mesmo e conhecimento de suas propriedades térmicas. Durante o trabalho outros materiais e configurações deverão ser testados. A Fig. 1a apresenta a aparência real dos sensores. A escolha de não utilizar a temperatura ambiente no modelo permite reduzir a influência do ambiente no modelo, como ocorrido com (Gunga et al, 2008).

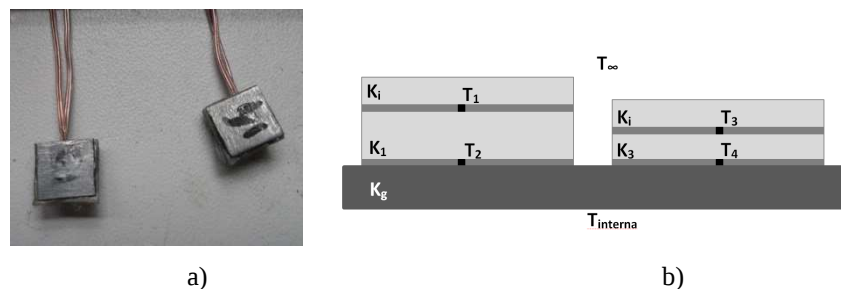


Figura 1 – Sensores térmicos. a) Protótipo dos sensores. b) Estrutura dos sensores.

A modelagem do sensor térmico em regime transiente se torna um pouco mais complexa, uma vez que dependerá também da difusividade térmica dos materiais que compõem o sensor, estando em andamento seu estudo e desenvolvimento.

2.2. SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO

Juntamente com o desenvolvimento dos modelos térmico, um sistema eletrônico que permita a aquisição das temperaturas e o cálculo da temperatura interna baseado do modelo térmico está sendo desenvolvido. O sistema eletrônico, como apresentado na Fig. 2, será composto por quatro partes: sistema de aquisição, microprocessador, transmissão dos dados sem fio e análise gráfica.

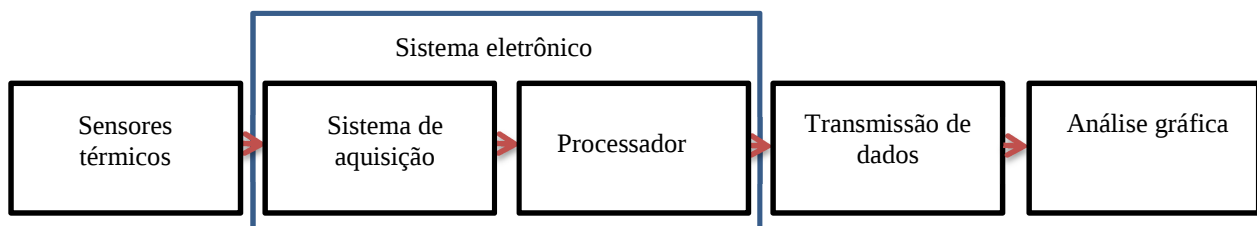


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de medição proposto

O sistema de aquisição será responsável pelo tratamento, filtragem e amplificação dos sinais elétricos fornecidos pelos termopares presentes nos sensores térmicos, e medição de uma termoresistência Pt-100, necessária para medição

da temperatura do circuito e definição da temperatura de junta fria do termopares, sendo o principal componente eletrônico será o amplificador de instrumentação INA333, desenvolvido pela Texas Instruments. Depois de tratadas as variáveis analógicas, um conversor analógico-digital, será responsável pela conversão dos sinais elétricos analógicos em valores numéricos a serem repassados ao microcontrolador.

O microprocessador será responsável por calcular as temperaturas fornecidas pelos termopares e pela termoresistência, baseado nos valores fornecidos pelo conversor analógico-digital e nas curvas de conversão. De posse das temperaturas, o microprocessador deverá aplicar os modelos térmicos desenvolvidos, de modo a calcular as temperaturas internas do processo. O microcontrolador escolhido foi o RX62N, desenvolvido pela Renesas Eletrônica, que agrega funções de microcontrolador e DSP (*digital signal processor*), permitindo a realização do grande volume de cálculos necessários ao trabalho.

Para a transmissão dos dados sem fio foi escolhida a tecnologia ZigBee, com a utilização de módulos desenvolvidos por terceiros. A tecnologia ZigBee foi desenvolvida para ambientes industriais, agregando robustez e baixo consumo energético. A utilização de módulos comerciais no desenvolvimento do trabalho foi motivada pela dificuldade no desenvolvimento das placas de circuito impresso, além de já serem certificadas pelos órgãos responsáveis. As informações obtidas pelo sistema eletrônico serão enviadas a tablets ou computadores, onde um software com interface amigável permitirá que sejam apresentadas por meio de gráficos, e possibilitando também serem armazenadas para estudos futuros.

3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO SISTEMA ELETRÔNICO

Sendo um sistema embarcado, é de interesse o conhecimento do comportamento dos componentes que compoem o sistema frente à variação na temperatura ambiente. Um estudo preliminar com esse objetivo mostrou o amplificador de instrumentação sendo o componente mais crítico frente às diferenças de temperatura. Baseado no modelo do amplificador, a Eq. (2) mostra seus principais parâmetros.

$$V_o(T) - Ref(T) = \Delta V_{in} * G(T) + V_{io}(T) * G(T) \quad (2)$$

Uma vez que os parâmetros tensão de saída $V_o(T)$, tensão de referência $Ref(T)$ e a tensão de entrada do amplificador ΔV_{in} foram possíveis de medição com o uso do sistema de aquisição *Agilent 34970a* e o software *Agilent Benchlink Data Logger*, foi possível calcular os valores médios da tensão de deslocamento $V_{io}(T)$ e o ganho do amplificador $G(T)$. Sendo $V_o - Ref = Y$, $\Delta V_{in} = X$, $G(T) = a$ e $V_{io}(T) * G(T) = b$, a Eq. (2) pode ser reescrita conforme Eq. (3).

$$Y = a(T) * X + b(T) \quad (3)$$

Os experimentos foram conduzidos estabelecendo uma tensão de entrada fixa, variando a temperatura externa ao circuito eletrônico. Foi possível observar, como mostra a Fig. 3, que $G(T)$ e o $V_{io}(T) * G(T)$ possuem comportamento que não permite determinar uma correlação entre as variáveis e a temperatura, sendo necessário o uso de técnicas de correção dinâmica no modelo do amplificador.

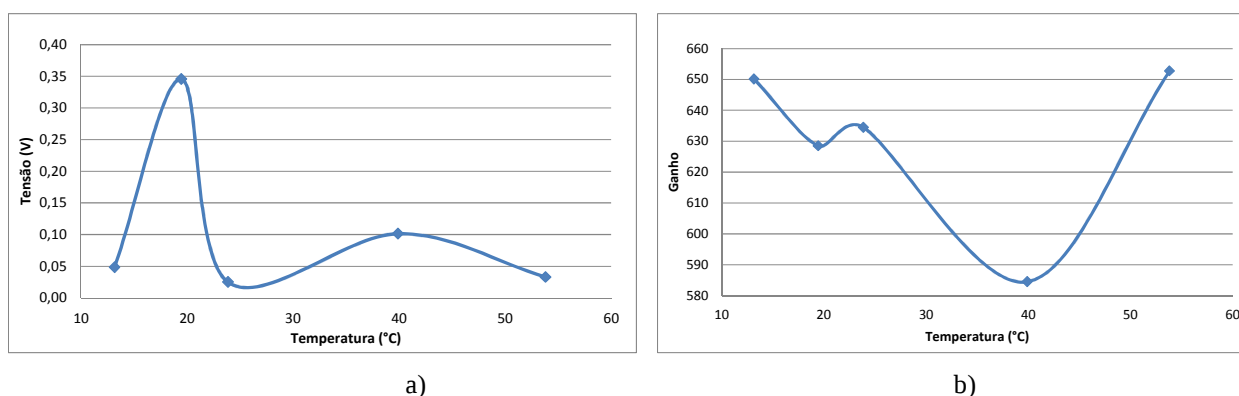


Figura 3 – Comportamento dos termos do modelo do amplificador em diferentes temperaturas:
a) $V_{io}(T) * G(T)$ e b) $G(T)$

Com o objetivo de reduzir a influência da temperatura externa no circuito eletrônico é comum a utilização de aquecedores, de modo a garantir a temperatura constante no componente, sendo a calibração do sistema realizada nessa temperatura. A aplicação desta técnica do sistema proposto reduziria a vida útil do sistema, uma vez que é alimentado por baterias. Existem componentes eletrônicos que realizam a correção do termo $V_{io}(T) * G(T)$. Esta correção é feita

lendo a tensão de saída do amplificador quando submetido a uma tensão de entrada nula, e subtraindo da saída quando é inserido o sinal de interesse. A correção destes parâmetros neste trabalho será realizada matematicamente pelo microprocessador, de forma numérica. A determinação dos valores corretos dos termos $V_{io}(T) * G(T)$ e $G(T)$ será feita realizando aplicando ao amplificador tensões de entrada ΔV_{in} conhecida, medida pelo microprocessador, e lidas as tensões de saída $V_o(T)$ e de referência $Ref(T)$. Baseado no modelo da Eq. (3), o microprocessador será capaz de calcular o modelo real do amplificador, permitindo definir de forma correta as tensões fornecidas pelos termopares, independente da temperatura ambiente. A escolha da correção numérica no modelo do amplificador ser numérica reduz a quantidade de componentes no circuito eletrônico, reduzindo também o efeito térmico no próprio processo de correção do modelo.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o estágio inicial no desenvolvimento de uma metodologia para determinação da temperatura interna em processos industriais, por meios não invasivos, e um sistema eletrônico para aquisição dos parâmetros necessários ao modelo térmico desenvolvido.

O modelo térmico para regime permanente foi desenvolvido simulado em diversas condições, se mostrando eficaz. Já para o regime permanente, o modelo está sendo desenvolvido para início dos testes. Os sensores térmicos propostos se mostraram confiáveis nos testes em bancada quando submetido a regime permanente. As temperaturas obtidas pelos termopares presentes foram enviadas a um computador, onde o modelo térmico calculava as temperaturas internas de forma correta. Mais testes serão realizados com diversos materiais para identificar e corrigir possíveis falhas.

Para o sistema eletrônico desenvolvido forma realizados testes de funcionamento e o estudo do comportamento dos componentes eletrônicos em diferentes temperaturas. Essa etapa se mostrou importante já que foi identificada a variação nas respostas, sendo necessário o desenvolvimento de uma técnica para redução dos erros, aumentando a acurácia do sistema de aquisição. Vale ressaltar que o sistema eletrônico será embarcado, alimentado por baterias, tendo a transmissão das informações obtidas por meio sem fio.

Finalizando os testes em cada parte do sistema, o mesmo será submetido a testes em condições reais de trabalho, para que seja possível a aplicação prática em ambiente industrial, possibilitando melhor controle e monitoramento de processos que utilizem a temperatura como parâmetro de estudo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem imensamente os órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

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.

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.

HUAL, Y.; MELNIK, R.V.N.; THOGERSEN, P.B. Computational analysis of temperature rise phenomena in electric induction motors, Applied Thermal Engineering, vol. 23, n. 7, p. 779-795, mai. 2003.

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.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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