

LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO BASEADOS EM SENSOR TERMO-RESISTIVO MANTIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

MILENA DE ALBUQUERQUE MOREIRA*, AMAURI OLIVEIRA*, CARLOS EDUARDO TRABUCO DÓREA*,
PÉRICLES REZENDE BARROS†, JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO†

* *Universidade Federal da Bahia - Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Aristides Novis, nº 2, Federação
Salvador, Bahia, Brasil*

† *Universidade Federal de Campina Grande - Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Aprígio Veloso, nº 282, Bodocongó
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

Emails: milena_ee@yahoo.com.br, amauri@ufba.br, cetdorea@ufba.br,
prbarros@dee.ufcg.edu.br, zesergio@dee.ufcg.edu.br

Abstract— The purpose of this work is to present the feedback linearization for a measurement system that uses thermoresistive sensor with constant temperature. In this measurement system, by means of a control scheme, the sensor is kept warm and the measure is proportional to the adjustment of the control signal used to keep constant the temperature. Thus, the linearization in the system allows the use of controllers based on linear models, preventing the reduction of performance due to the changes in the operation point. The linearization scheme is presented, together with the characterization of the resulting linear model. The parameters of the model are estimated from experimental data that illustrate the effectiveness of the proposed linearization method.

Keywords— thermoresistive sensors, feedback linearization, characterization, measurement systems

Resumo— A proposta deste trabalho é apresentar a linearização por realimentação para um sistema de medição que utiliza sensor termo-resistivo a temperatura constante. Neste sistema de medição, por meio de um esquema de controle, o sensor é mantido aquecido e a grandeza que se deseja medir é proporcional ao ajuste do sinal de controle utilizado para manter constante a temperatura. Assim, a linearização no sistema permite a utilização de controladores baseados em modelos lineares, evitando a redução de desempenho devido a mudanças no ponto de operação. O esquema de linearização é apresentado, juntamente com a caracterização do modelo linear resultante. Os parâmetros do modelo são estimados a partir de dados experimentais que ilustram a eficácia do método de linearização proposto.

Keywords— sensores termo-resistivos, linearização por realimentação, caracterização, sistemas de medição

1 Introdução

Os sensores do tipo termistor (*Thermally Sensitive Resistor* - Resistor com Sensibilidade Térmica) são utilizados em sistemas de medição que exploram a característica de variação da resistência elétrica em função de variações de temperatura do dispositivo. Nestes sistemas, a relação entre o sensor e a grandeza a ser medida é dada pela troca de energia térmica (Oliveira et al., 1996).

Os termistores são empregados não apenas na medição de temperatura (Pallas-Areny and Webster, 2001), mas também de outras grandezas físicas como velocidade de fluido (Doebelin, 2004) e radiação térmica (Deep et al., 1992).

É comum utilizar métodos de medição que trabalhem com o sensor aquecido, em que uma grandeza elétrica do sensor é mantida constante e a leitura da grandeza desejada é feita a partir da tensão elétrica ou da corrente que atravessa o dispositivo. Estes métodos seriam: tensão constante, corrente constante e temperatura constante (ou resistência constante) (Sarma, 1993).

Cada um destes métodos apresenta vantagens e desvantagens em comparação aos demais

(Sarma, 1993). Esta análise considera a relação entre o tipo de sensor utilizado e a grandeza a ser estimada (linearidade, sensibilidade e constante de tempo).

O método mais utilizado é o da temperatura constante (Lomas, 1986), no qual o sensor é aquecido, por efeito Joule, até uma temperatura de referência. A grandeza que se deseja medir (radiação, temperatura ou velocidade de fluido) provoca uma variação térmica do dispositivo e, para que o sensor seja mantido a temperatura constante, é necessário compensar a variação térmica através do sinal de excitação do sistema.

Para isto, pode ser usado um sistema de controle linear em malha fechada e, a partir do sinal de controle que mantém a temperatura do sensor constante, é possível determinar a grandeza desejada.

Para utilizar uma estratégia de controle baseada em modelo de processo, é necessário definir o modelo do sensor antes de executar o projeto do controlador. Alguns trabalhos já foram desenvolvidos com o objetivo de caracterização (Deep et al., 1996) (Deep et al., 1999) (Ou-Yang et al., 1998) ou identificação (Lima et al., 1994) de

sensores termo-resistivos utilizando sinais elétricos.

Em (Palma et al., 2003) foi proposto um modelo de primeira ordem para sensores termo-resistivos, utilizando controlador *PI* para um sistema de medição a temperatura constante. Entretanto, como o sistema possui característica não-linear, o desempenho do controlador linear projetado diminui à medida que os sinais se afastam do ponto de operação utilizado no projeto.

Como solução, este trabalho apresenta uma proposta original para linearização do modelo de sensores termo-resistivos por realimentação.

Além de possibilitar um melhor desempenho do sistema em diversos pontos de operação, a linearização proposta contribuirá também na compensação da variação da temperatura do meio, pois, conhecidas as temperaturas do sensor e do meio, pode-se gerar uma variável independente da diferença destas duas temperaturas dividindo a potência elétrica do sensor (ou grandeza equivalente e proporcional) por esta diferença de temperatura.

Este texto está dividido em cinco outras seções, nas quais se apresentam: a plataforma desenvolvida para os ensaios experimentais (seção 2), o modelo desenvolvido para o sensor e linearização proposta (seção 3), a metodologia para estimação dos parâmetros do modelo (seção 4), os resultados experimentais (seção 5) e as conclusões do trabalho (seção 6).

2 Plataforma experimental

O sensor termo-resistivo usado neste trabalho é do tipo *NTC* (*Negative Temperature Coefficient* - Coeficiente Negativo de Temperatura), cuja característica principal é a diminuição da resistência elétrica do sensor com o aumento da temperatura. A equação que relaciona resistência (R_s) e temperatura (T_s) de sensores *NTC* é dada por (Dally et al., 1984):

$$R_s(T_s(t)) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T_s(t)} - \frac{B}{T_0}\right) \quad (1)$$

sendo B o índice de sensibilidade do material do sensor, e R_0 e T_0 a resistência e a temperatura de referência, respectivamente.

O circuito eletrônico utilizado é composto por um amplificador inversor, com o sensor termo-resistivo na malha de realimentação (Figura 1).

Para este circuito, sabe-se que:

$$I_s(t) = \frac{V_{in}(t)}{R_{in}} \quad , \quad (2)$$

$$V_s(t) = I_s(t)R_s(T_s(t)) \quad (3)$$

Sendo o valor de R_{in} conhecido, e os valores de $V_s(t)$ e $V_{in}(t)$ medidos, a resistência do sensor $R_s(T_s(t))$ pode ser estimada com o auxílio da

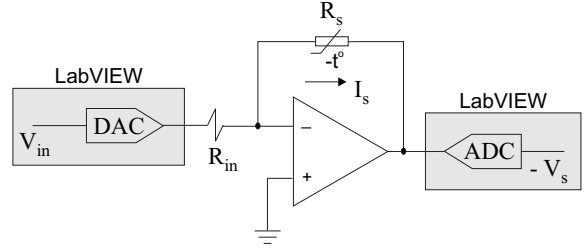


Figura 1: Sistema não realimentado

equação (3). Assim, da relação entre resistência e temperatura de sensores *NTC* (1), pode-se estimar a temperatura do sensor, $T_s(t)$, como:

$$T_s(t) = \frac{B}{\ln(R_s(T_s(t))/A)} \quad , \quad (4)$$

sendo $A = R_0 \exp(-B/T_0)$.

Os conversores digital/analógico (*DAC*) e analógico/digital (*ADC*) indicados na Figura 1 fazem parte do sistema de aquisição de dados desenvolvido na plataforma de instrumentação virtual *LabVIEW* (National Instruments, 2007).

3 Modelagem e linearização do sensor

Considerando o sistema de medição baseado em sensor termo-resistivo mantido a temperatura constante, é necessário utilizar um sistema (circuito ou sistema com controlador) para o controle desta temperatura.

Se a estratégia de controle utilizada necessita de informações sobre o modelo de processo, é preciso definir primeiramente o modelo do sensor a ser controlado para, em seguida, projetar o controlador.

A metodologia mais comum para o controle de um sistema não linear é projetar um controlador baseado em um modelo linearizado em torno de um ponto de operação. Porém, quando o sistema se afasta do ponto de operação utilizado no projeto do controlador linear, o desempenho deste controlador é reduzido.

Para evitar esta perda de desempenho, propõe-se a linearização por realimentação do sistema. Este método utiliza a medição da saída do sistema para gerar uma nova entrada que, por sua vez, resulta em uma relação entrada-saída linear. Um controlador linear pode então ser projetado para este sistema linearizado.

3.1 Modelo do sensor

A utilização da 1ª Lei da Termodinâmica para modelar um sensor termo-resistivo *NTC* resulta em (Doebelin, 2004):

$$\alpha SH + P_s(t) = G_{th}[T_s(t) - T_a(t)] + C_{th} \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (5)$$

sendo α o coeficiente de transmissividade-absorvidade; S a área da superfície; H a radiação incidente no sensor; $P_s(t)$ a potência térmica; G_{th} a condutância térmica entre o sensor e o meio; $T_a(t)$ a temperatura ambiente; e C_{th} a capacidade térmica.

Considerando a radiação incidente nula ($H = 0$) e a temperatura ambiente constante, a equação (5) pode ser reescrita como:

$$P_s(t) = G_{th}T_{\Delta}(t) + C_{th}\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} \quad (6)$$

em que $T_{\Delta}(t) = T_s(t) - T_a$.

A potência elétrica fornecida ao sensor é a entrada do modelo (6), sendo resultante do produto da corrente que o atravessa, $I_s(t)$, pela diferença de potencial no dispositivo, $V_s(t)$. Logo,

$$V_s(t)I_s(t) = G_{th}T_{\Delta}(t) + C_{th}\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} \quad (7)$$

Na implementação de um sistema de medição deste tipo, não é possível o acionamento com o sinal de potência do sensor, mas apenas com sinais de tensão ou corrente. No sistema proposto, o sinal de comando utilizado é a tensão elétrica $V_{in}(t)$, conforme a Figura 1.

Substituindo os valores de $I_s(t)$ e $V_s(t)$ das equações (2) e (3) em (7), obtém-se

$$R_s(T_s(t))\frac{V_{in}^2(t)}{R_{in}^2} = G_{th}T_{\Delta}(t) + C_{th}\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} \quad (8)$$

Assim, observa-se que este sistema apresenta uma característica de não-linearidade de entrada.

3.2 Linearização por realimentação

Propõe-se a linearização por realimentação como método para linearizar o sistema com o sensor. A representação do sistema realimentado é mostrada na Figura 2:

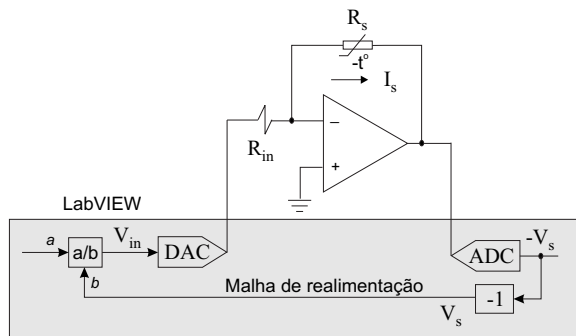


Figura 2: Sistema realimentado

A partir da Figura 2, tem-se que

$$I_s(t) = \frac{V_{in}(t)}{R_{in}} \quad , \quad (9)$$

$$V_{in}(t) = \frac{a(t)}{b(t)} = \frac{a(t)}{V_s(t)} \quad (10)$$

De (9) e (10),

$$a(t) = I_s(t)V_s(t)R_{in} = P_s(t)R_{in} \quad (11)$$

Substituindo em (7), obtém-se

$$\frac{a(t)}{R_{in}} = G_{th}T_{\Delta}(t) + C_{th}\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} \quad (12)$$

Na Figura 2, $a(t)$ é uma variável virtual equivalente ao produto da potência elétrica do sensor por R_{in} . Na realidade, a potência elétrica do sensor é gerada por $I_s(t)$ obtida de $a(t)$. Para distinguir da potência elétrica real do sensor, definimos, a partir deste ponto, a nova variável de entrada $P_x(t)$ como

$$P_x(t) = \frac{a(t)}{R_{in}} \quad (13)$$

Assim,

$$P_x(t) = G_{th}T_{\Delta}(t) + C_{th}\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} \quad (14)$$

A partir desta equação, observa-se que o sistema realimentado é linear em relação à nova entrada $P_x(t)$.

Aplicando a transformada de Laplace à equação (14), a função de transferência de $P_x(t)$ para $T_{\Delta}(t)$, para o modelo linearizado do sensor, caracteriza um sistema de 1ª ordem:

$$\frac{T_{\Delta}(s)}{P_x(s)} = \frac{1/G_{th}}{\frac{C_{th}}{G_{th}}s + 1} \quad (15)$$

4 Estimação dos parâmetros do modelo

Para o projeto de um controlador linear baseado em modelo de processo, após a caracterização da função de transferência do sistema, é necessário estimar os parâmetros desta função (15): ganho estático ($1/G_{th}$) e constante de tempo (C_{th}/G_{th}).

Foram realizados testes experimentais para a estimação do ganho estático e da constante de tempo do sistema, sob condições que contemplavam diferentes pontos de operação. Para cada condição de teste, o procedimento utilizado foi:

- Aplicação de um degrau de tensão na entrada, com amplitude conhecida, no intervalo de tempo $0 < t < 80 \text{ seg}$
- Monitoramento da temperatura ambiente
- Aquisição dos dados de saída do sistema

4.1 Estimação do ganho estático

Considerando que o sistema opera em regime permanente, o termo $\left(\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt}\right)$ na equação (14) é nulo. Assim, esta equação pode ser reescrita como:

$$\overline{P_x}(t) = G_{th}\overline{T_{\Delta}}(t) \quad (16)$$

sendo $\overline{P_x}$ e $\overline{T_{\Delta}}$ os valores de $P_x(t)$ e $T_{\Delta}(t)$ em regime permanente, respectivamente. Logo,

$$G_{th} = \frac{\overline{P_x}}{\overline{T_{\Delta}}} \quad (17)$$

De posse dos dados experimentais, e estimados os valores de $\overline{P_x}$ e $\overline{T_{\Delta}}$ para cada condição de teste, é possível obter a reta que melhor se ajusta a estes pontos pelo critério dos mínimos quadrados (Figura 3). O inverso do valor da inclinação desta reta define o ganho estático do sistema, $1/G_{th}$.

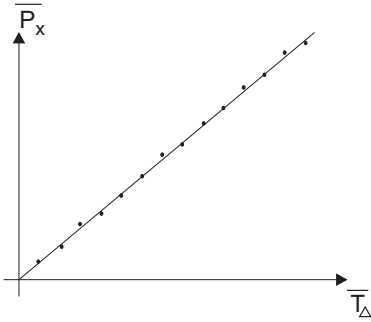


Figura 3: Gráfico de P_x x T_{Δ} em regime permanente

4.2 Estimação da constante de tempo

Considerando um degrau como sinal de entrada do sistema $\left(P_x(s) = K\frac{1}{s}\right)$, tem-se:

$$T_{\Delta}(s) = \left(K\frac{1}{s}\right) \left(\frac{1/G_{th}}{\frac{C_{th}}{G_{th}}s + 1}\right) \quad (18)$$

sendo K constante. Aplicando a transformada inversa de Laplace à equação (18):

$$T_{\Delta}(t) = \frac{K}{G_{th}}(1 - e^{-t/\tau}) \quad , \quad (19)$$

sendo τ a constante de tempo do sistema (C_{th}/G_{th}) .

A partir dos dados experimentais de $\overline{P_x}$ e $\overline{T_{\Delta}}$ é possível obter a curva que melhor se ajusta a estes pontos pelo critério dos mínimos quadrados.

5 Resultados experimentais

Com o objetivo de validar o sistema não realimentado e calcular o valor de G_{th} , foram realizados ensaios na plataforma experimental. A análise dos resultados indica que:

- O parâmetro G_{th} mantém a característica da linearidade em pontos de operação distintos no sistema não realimentado (Figura 4).

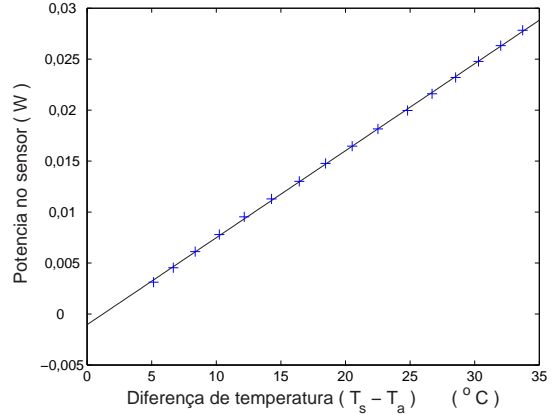


Figura 4: Gráfico de P_s x T_{Δ} em regime permanente para o sistema não realimentado (a linha contínua corresponde à reta ajustada, e os pontos “+” correspondem aos dados experimentais)

O valor encontrado para G_{th} utilizando os dados da Figura 4 é de $0,8535 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$. Logo, o ganho estático calculado para o sistema não realimentado é $1/G_{th} \approx 1171,7 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

- Para um termistor *NTC*, a constante de tempo varia de maneira inversa à amplitude do sinal de excitação do sistema não realimentado, ou seja, quanto maior o sinal de excitação, menor esta constante de tempo (Tabela 1).

Tabela 1: Constante de tempo para diferentes sinais de comando aplicados ao sistema não realimentado

Sinal de comando (V_{in}) (V)	Constante de tempo aparente (seg)
2	13,05
2,5	12,17
3	10,97
3,5	10,19
4	9,596
4,5	9,151
5	8,603
5,5	8,229
6	7,756
6,5	7,478
7	7,164
7,5	6,887
8	6,672
8,5	6,477
9	6,308
9,5	6,198

Sabendo que, para pontos de operação distintos, o sistema não realimentado apresenta va-

lores diferentes na relação $T_{\Delta}(t)/P_s(t)$, a constante de tempo encontrada é dita constante de tempo aparente, pois não corresponde à constante de tempo real (intrínseca) do sensor.

Em seguida, os ensaios foram executados para o sistema linearizado por realimentação, sendo que os resultados na estimação indicam que:

- O parâmetro G_{th} mantém a característica da linearidade em pontos de operação distintos neste sistema (Figura 5).

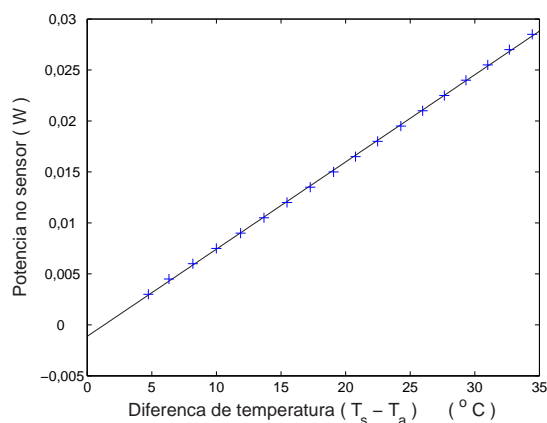


Figura 5: Gráfico de $P_x \times T_{\Delta}$ em regime permanente para o sistema linearizado por realimentação (a linha contínua corresponde à reta ajustada, e os pontos “+” correspondem aos dados experimentais)

O valor encontrado para G_{th} utilizando os dados da Figura 5 é de $0,8555 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$. Logo, o ganho estático calculado para o sistema linearizado por realimentação é $1/G_{th} \approx 1168,8 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, que é um valor próximo do calculado para o sistema não realimentado.

- Ao utilizar o sistema pontos de operação distintos, a constante de tempo não sofre variações significativas no sistema linearizado por realimentação (Tabela 2).

Comparando os resultados obtidos para as constante de tempo nos dois sistemas apresentados, verifica-se que a proposta de linearização do sistema é alcançada. Assim, é possível projetar um controlador baseado em modelo de processo que atue, sem redução de desempenho, em qualquer ponto de operação do sistema.

6 Conclusões e Comentários Finais

O presente trabalho é mais uma contribuição na caracterização de sensores termo-resistivos utilizando sinais elétricos, apresentando como vantagem a utilização da potência elétrica de forma mais direta.

Desta forma, o modelo desenvolvido pode ser aplicado a sensores de corpo nu (sem substrato ou encapsulamento) que apresentam uma

Tabela 2: Constante de tempo para diferentes sinais de comando aplicados ao sistema linearizado por realimentação

Sinal de comando ($P_x R_{in}$) (W Ω)	Constante de tempo (seg)
3	12,34
4,5	11,95
6	12,25
7,5	12,55
9	13,06
10,5	12,83
12	12,8
13,5	13,3
15	12,79
16,5	12,87
18	13
19,5	12,87
21	12,95
22,5	12,86
24	12,91
25,5	12,9
27	13,3
28,5	13,06

equação diferencial característica de primeira ordem (Doebelin, 2004), como também a sensores com característica de ordem superior.

Como continuação deste trabalho, propõe-se a utilização de um controlador *PI IMC* (*Internal Model Control*), aplicado ao sistema linearizado por realimentação, para medição de velocidade de fluidos através do método do sensor a temperatura constante.

Alguns resultados preliminares já foram obtidos. Porém, é necessário aplicar outras condições de teste para validação destes dados.

Referências

- Dally, J. W., Riley, W. F. and McConnel, K. G. (1984). *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley & Sons.
- Deep, G. S., Freire, R. C. S., Lobo, P. C., Rocha Neto, J. S. and Lima, A. M. N. (1992). Dynamic response of thermoresistive sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (6): 815–819.
- Deep, G. S., Oliveira, A., Freire, R. C. S., Rocha Neto, J. S. and França, M. B. M. (1999). Thermodynamic modeling analysis of an electrical substitution radiometer, *8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICES'99)*, pp. 1301–1304.
- Deep, G. S., Rocha Neto, J. S., Lima, A. M. N., Freire, R. C. S. and Lobo, P. C. (1996). Thermoresistive sensor response time employing

- electrical heating, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (01): 332–335.
- Doebelin, E. O. (2004). *Measurements Systems: Application and Design*, McGraw Hill.
- Lima, A. M. N., Deep, G. S., Rocha Neto, J. S., Freire, R. C. S. and Lobo, P. C. (1994). Identification of thermoresistive solar radiation sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* pp. 133–138.
- Lomas, C. G. (1986). *Fundamentals of hot wire anemometry*, Cambridge University Press.
- National Instruments (2007). < [http :
//zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5053](http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5053) >.
- Oliveira, A., Rocha Neto, J. S., Deep, G. S. and Freire, R. C. S. (1996). Thermoresistive sensor parameters from its static IxV characteristics, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 586–589.
- Ou-Yang, M., Sheen, C.-S. and Shie, J.-S. (1998). Parameter extraction of resistive thermal microsensors by AC electrical method, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (02): 403–408.
- Pallas-Areny, R. and Webster, J. G. (2001). *Sensors and Signal Conditioning*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Palma, L. S., Oliveira, A., da Costa, A. S., Jr., A. Q. A., de Almeida, C. V. R., Zurita, M. and Freire, R. C. S. (2003). Implementation of a feedback I²-controlled constant temperature environment temperature meter, *Sensors* pp. 498–503.
- Sarma, G. R. (1993). Analysis of a constant voltage anemometer circuit, *Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC)*, pp. 731–736.