

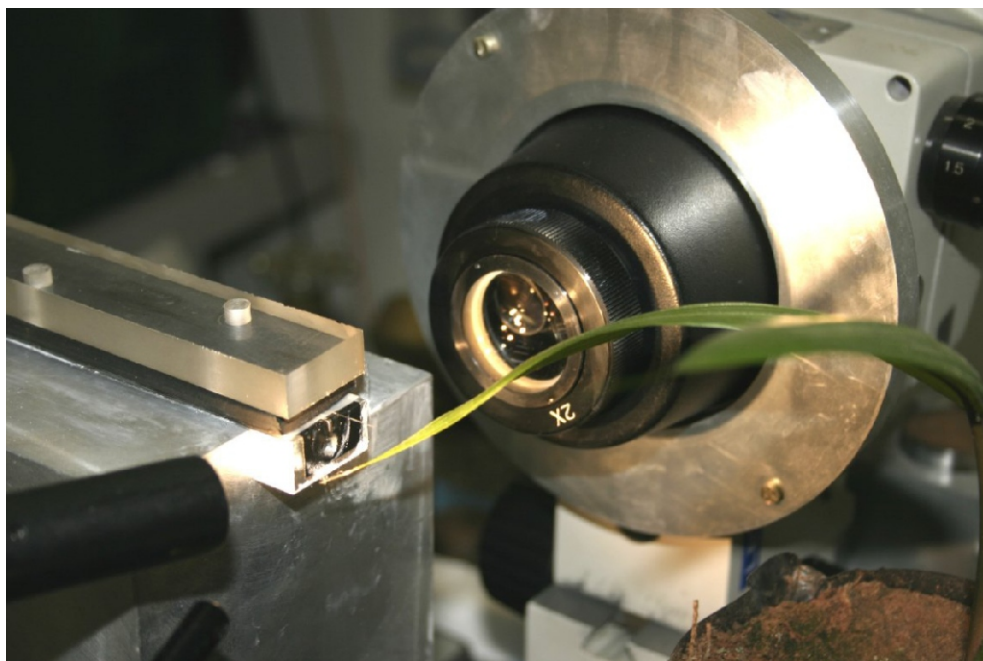
# Documentos

ISSN 1518-7179

Novembro, 2008

38

## Reconstrução de sinal de medida em sistema de medida de pressão em células vegetais



ISSN 1518-7179

Novembro, 2008

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Instrumentação Agropecuária  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

## **Documentos 38**

### **Reconstrução de sinal de medida em sistema de medida de pressão em células vegetais**

Victor Bertucci-Neto  
Paulo Estevão Cruvinel

Embrapa Instrumentação Agropecuária  
São Carlos, SP  
2008

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Instrumentação Agropecuária**

Rua XV de Novembro, 1452  
Caixa Postal 741  
CEP 13560-970 - São Carlos-SP  
Fone: (16) 2107 2800  
Fax: (16) 2107 2902  
<http://www.cnpdia.embrapa.br>  
E-mail: [sac@cnpdia.embrapa.br](mailto:sac@cnpdia.embrapa.br)

**Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso  
Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,  
Dr. João de Mendonça Naime,  
Dr. Washington Luiz de Barros Melo  
Valéria de Fátima Cardoso  
Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto  
Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso  
Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane  
Foto da capa: Marcelo Eduardo Alves  
Editoração eletrônica: Manoela Campos

**1ª edição**

1ª impressão (2008): tiragem 300

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.  
Embrapa Instrumentação Agropecuária**

---

B552r Bertucci-Neto, Victor  
Reconstrução de sinal de medida em sistema de medida de pressão em células  
vegetais. / Victor Bertucci-Neto, Paulo Estevão Cruvinel. -- São Carlos: Embrapa  
Instrumentação Agropecuária, 2008.  
14 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos,  
ISSN 1518-7179; 38).

1. Fisiologia vegetal. 2. Sonda termoelástica. 3. Medidas de parâmetros.  
4. Pressão. 5. Célula vegetal. I. Cruvinel, Paulo Estevão. II. Título. III. Série.

CDD 21 ED 571.2

---

© Embrapa 2008

## **Autores**

**Victor Bertucci-Neto**

Eng. Eletricista, Dr., Pesquisador,  
Embrapa Instrumentação Agropecuária,  
C.P. 741, CEP 13560-970,  
São Carlos (SP)  
victor@cnpdia.embrapa.br

**Paulo Estevão Cruvinel**

Eng. Eletricista, Dr., Pesquisador,  
Embrapa Instrumentação Agropecuária,  
C.P. 741, CEP 13560-970,  
São Carlos (SP)  
cruvinel@cnpdia.embrapa.br

# Apresentação

A água realiza diversos papéis, físico, estrutural, e metabólico em plantas superiores. Entretanto, a maior parte da água tomada pelas plantas através do solo é transpirada para a atmosfera. As plantas reciclam mais da metade do volume de chuva anual na Terra. A força que direciona a água captada pelo solo para cima é dada pela diferença de potencial químico entre o solo e a atmosfera. No entanto, os mecanismos que ocorrem quando a água sobe a planta contra a gravidade ainda são objeto de discussão. Durante as últimas três décadas tem sido usada uma técnica de sonda de pressão para medir relações de água com plantas superiores. Esta técnica fornece acesso direto a muitos parâmetros biofísicos que controlam as respostas de curto e longo período em relação à água e à deficiência de sal no ambiente. Basicamente é usado um capilar preenchido com óleo e após a punção da célula vegetal o movimento do menisco no capilar é medido e controlado. Alguns esforços foram feitos para automatizar a medida. Não foi observado na literatura nenhum artigo sobre uma descrição mais detalhada sobre este instrumento. Seguindo este desenvolvimento, neste trabalho é apresentada uma nova técnica, denominada sonda termoelástica, baseada na compensação térmica da pressão. Com esta nova técnica podem ser medidos valores de pressão negativa abaixo daqueles obtidos com a sonda de pressão. A detecção da posição do menisco pode, entretanto, causar dificuldades na leitura da medida de pressão. Visando a redução do efeito do sinal ruidoso no desempenho da medida de pressão é também apresentado um método de reconstrução do sinal baseado em formatação de frequência de sinal. A técnica mostrou-se promissora na reconstrução de sinais em modelagens relativamente fiéis ao sistema.

Álvaro Macedo de Silva  
Chefe Geral

# Sumário

1. Introdução .....	9
2. Descrição da Sonda Termolástica .....	10
3. Reconstrução do sinal de medida .....	11
Conclusões .....	22
Referências .....	22

# Reconstrução de sinal de medida em sistema de medida de pressão em células vegetais

---

Victor Bertucci-Neto  
Paulo Estevão Cruvinel

## 1. Introdução

A água realiza diversos papéis, físico, estrutural, e metabólico em plantas superiores. Entretanto, a maior parte da água tomada pelas plantas através do solo é transpirada para a atmosfera. As plantas reciclam mais da metade do volume de chuva anual na Terra. A força que direciona a água captada pelo solo para cima é dada pela diferença de potencial químico entre o solo e a atmosfera. No entanto, os mecanismos que ocorrem quando a água sobe a planta contra a gravidade ainda são objetos de discussão (ZIMMERMANN et al., 2002).

O sistema de transporte que direciona a ascensão da seiva a partir do solo até às folhas é extraordinário e controverso. Como seus correspondentes animais, grandes plantas multicelulares necessitam suprir todas suas células com água e combustível. Para os animais a solução foi a evolução de um sistema vascular com uma bomba para circular plasma de sangue isotônico que previne a ruptura da célula devido à entrada de água por osmose. As plantas tomaram um caminho diferente para resolver o problema da regulação de osmose, enclausurando cada célula em um rígido esqueleto externo, a parede da célula. Mas esta rigidez trouxe a ausência de mobilidade para todo o organismo, incluindo os tecidos e células. Os tecidos das plantas eram muito rígidos para desenvolver um mecanismo de bombeamento para transporte à longa distância. Assim, qual a força responsável pela ascensão da água nas plantas? (TYRRE, 2003).

Nenhum tópico em fisiologia de planta tem uma história mais longa, ou mais volumosa, do que a elevação antigravitacional de água em plantas superiores. Este fenômeno tem desafiado cientistas durante séculos. Mas, apesar disto, não há nenhuma conclusão exata. A literatura e os livros textos de botânica publicados nas últimas quatro décadas dão uma impressão superficial de que o problema da sucção de água está resolvido. A convicção é que a água seja sugada através do conduto do xilema por gradientes de tensão produzidos pela perda de água evaporada. Esta hipótese é chamada de Teoria de Coesão-Tensão e foi introduzida entre 1894 e 1895 (ZIMMERMANN et al., 2004).

Há cerca de três décadas, foi introduzida uma técnica de medida direta de pressão de turgescência em plantas, chamada de sonda de pressão celular, a qual tem sido padrão na área de Fisiologia Vegetal. Posteriormente, esta técnica foi usada, com algumas adaptações, para medida direta da sucção que ocorre no xilema da planta, sendo comparada com a técnica existente até então, a de medida indireta com a bomba de pressão de Scholander-Hammel (BALLING e ZIMMERMANN, 1990). Foi mostrado que as pressões de sucção medidas diretamente no xilema de uma planta que transpira, intacta, eram, menores do que aquelas medidas feitas indiretamente com a bomba. Mais que isto, foi observado que o efeito da transpiração na planta não se relacionava com o valor da pressão no xilema. Estes resultados levaram à conclusão de que os mecanismos de ascensão de água em plantas considerados pela Teoria da Coesão-Tensão não eram corretos, ou pelo menos, não eram os mecanismos dominantes.

Por sua vez, Steudle (2001, 2002) mostrou que medidas diretas cuidadosamente feitas com a sonda de pressão, comparativas às medidas feitas com a bomba de pressão, são equivalentes, ou seja, estão de acordo com a teoria vigente, ao menos na faixa de pressão de sucção até cerca de 1 MPa, sendo este o valor máximo obtido pela sonda de pressão

antes de ocorrer cavitações no capilar. Estas discussões fazem parte de um acalorado debate público e têm servido principalmente para aprimorar as investigações sobre o transporte de água em plantas, no que se refere à capacidade das plantas de manter altas tensões no xilema durante longos períodos, além de recarregar os vasos onde ocorreram cavitações (STEUDLE, 2002).

Calbo e Pessoa (1999) apresentaram uma nova técnica de medida de pressão celular, chamada de sonda termoelástica, sendo usado como compensação da medida de pressão a temperatura, em vez da compressão mecânica então usada na sonda de pressão. Com esta nova técnica foi possível obter, de forma manual, medidas de sucção acima de 1 MPa. Por sua vez, Bertucci-Neto (2005) e Bertucci-Neto et al. (2006) desenvolveram um sistema automático de medida para a sonda termoelástica. Um dos problemas verificados no processo de automação foi o de excessivo ruído devido à detecção do menisco no capilar.

Desta forma, apresenta-se neste trabalho uma contribuição para o aprimoramento de medidas de parâmetros fundamentais para a área de Fisiologia Vegetal com o estudo de uma técnica para reconstrução do sinal de medida, baseada no ajuste da frequência (*frequency shaping*) visando a diminuição do ruído que ocorre no sistema de detecção do menisco.

## 2. Descrição da Sonda Termolástica

Na Figura 1 vê-se o diagrama em blocos proposto para a Sonda Termoelástica. A idéia é manter a posição do menisco,  $Y(s)$ , em metros, sempre na origem  $R_{ef}$  considerada. Quando houver um sinal de pressão  $P(s)$  agindo como distúrbio, o sistema deve compensar este sinal através da variação do sinal de saída do controlador  $G_c(s)$ , em watt. A potência elétrica aplicada no aquecedor do capilar resulta em calor, devendo variar a posição do menisco para que este retorne à origem considerada. O bloco  $H(s)$  representa o sensor de posição do menisco, cuja saída é realimentada para o controlador.

A entrada de referência ( $Ref$ ) é considerada como a posição inicial do menisco no capilar. O bloco  $G_c(s)$  é referente ao controlador do sistema e o bloco aproximado por um sistema de primeira ordem  $K/(s+1)$  é o que descreve o modelo do sistema com capilar e óleo, considerando-se  $K = l_0 \alpha$  a constante que retorna a variação de grau centígrado para metro ( $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica e  $l_0$  o comprimento do capilar). Os ganhos lineares  $K_1$  e  $K_3$ , relacionam as conversões entre potência elétrica (Watt) e grau centígrado ( $^{\circ}C$ ), e pressão ( $N/m^2$ ) também em grau centígrado, respectivamente. A entrada de pressão (na ponta do capilar) é considerada como uma entrada de distúrbio do sistema. Portanto, conhecendo a variação da potência aplicada para que o menisco retorne à origem, também se conhece a pressão aplicada na extremidade do capilar.

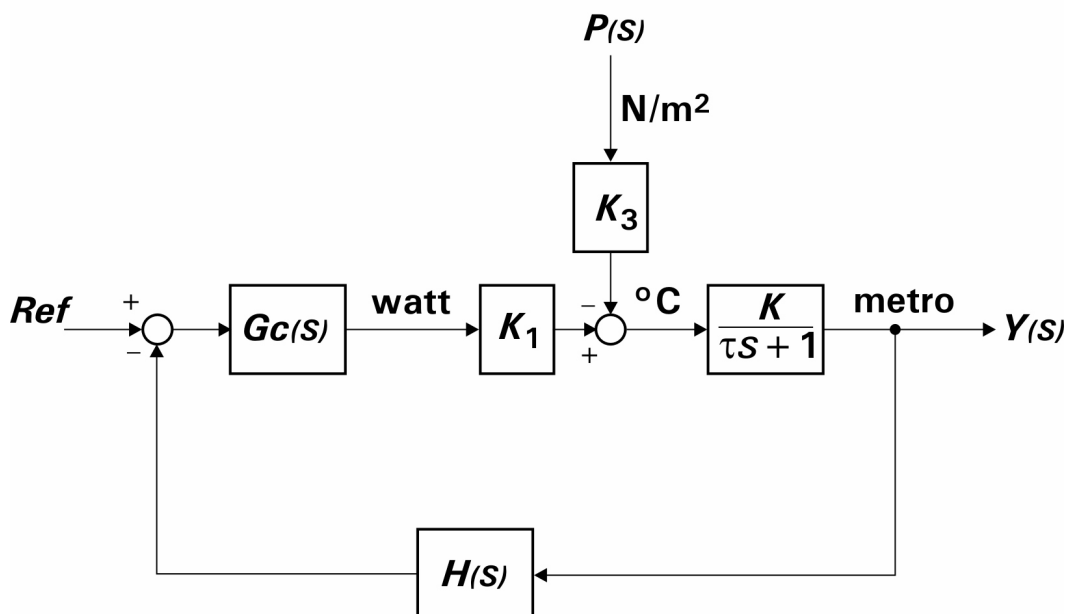


Fig. 1. Diagrama em blocos do sistema em malha fechada.



O modelo proposto do sistema dado pela entrada de pressão, mais capilar, e entrada de calor, pode ser descrito pela seguinte equação de estado:

$$\dot{T}_f(t) = \frac{1}{T_f} K_3 P(t) + w(t) \quad (1)$$

$$y(t) = K T_f(t) + v(t) \quad (2)$$

Sendo  $T_f$  a temperatura do fluido,  $P(t)$  a pressão aplicada na ponta do capilar,  $w(t)$  o ruído associado à entrada de pressão considerada como distúrbio do sistema, e  $v(t)$  um ruído de medida.

### 3. Reconstrução do sinal de medida

A técnica usada para reconstrução do sinal ruidoso é derivada da chamada de *frequency shaping* (ANDERSON E MOORE, 1989). A idéia é manter o erro de saída nulo na presença de um distúrbio constante. Colocando um filtro proporcional mais integral na entrada de distúrbio tem-se um conseqüente aumento da planta do sistema. Por sua vez, este aumento do sistema será refletido no estimador de estado. Esta situação é mostrada na Figura 2 onde se vê o diagrama em blocos do sistema em malha fechada. O sistema possui uma referência constante,  $R_{eff}$ , uma entrada de pressão agindo como distúrbio,  $P(s)$ , e uma entrada de ruído de medida  $V(s)$ . A pressão agindo como distúrbio é convertida em temperatura, dada por  $T(s)$ , na entrada da planta, que por sua vez converte a variação em temperatura em posição, dada em metro, sendo somada com o ruído de medida  $V(s)$ . O estado do sistema é estimado através da entrada da planta dada pela temperatura do aquecedor que foi convertida pela potência elétrica aplicada. No estimador aparece o termo proporcional mais integral devido ao aumento da planta, dado por  $K_{pe} + K_{ie}/s$ , sendo  $K_{pe}$  o termo proporcional do estimador, e  $K_{ie}$  o termo integral. Este termo PI é subtraído na entrada do sistema que estima o estado  $X_e(s)$ . Na mesma entrada do estimador aparece o ganho  $K_1$  que relaciona a potência do aquecedor com a temperatura do aquecedor. A saída estimada,  $Y_e(s)$ , serve de entrada aos blocos que formam o controlador proporcional mais integral dados pelos ganhos  $K_p$ , e  $K_i$ , respectivamente. Assim, obtém-se uma estimativa  $T_e(s)$  do distúrbio  $T(s)$  integrando a saída do estimador,  $Y_e(s)$  e multiplicando por  $K_i$ .

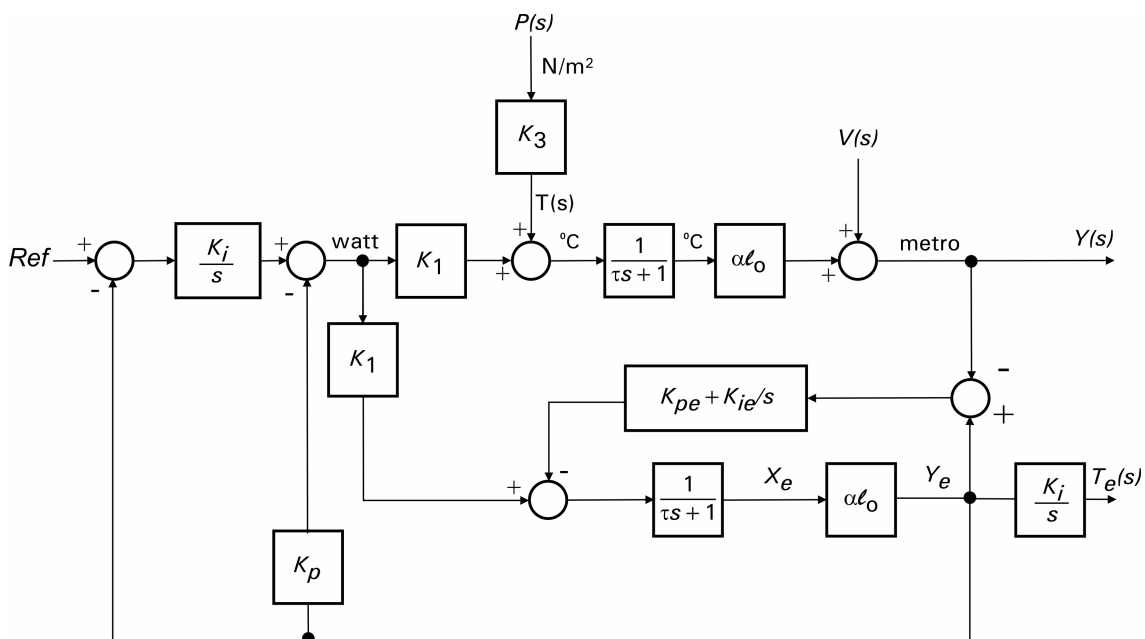
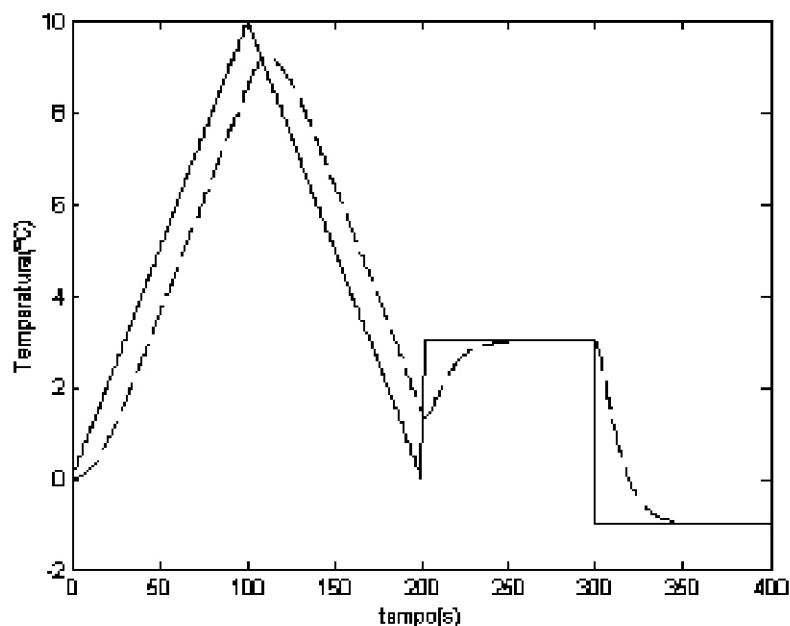


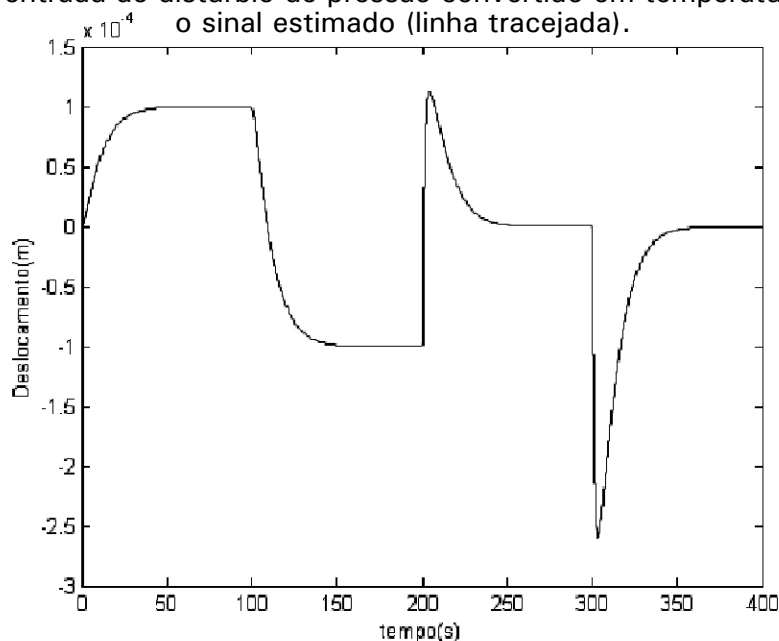
Fig. 2. Diagrama em blocos do sistema com estimador PI e controlador PI.

O sistema mostrado na Figura 2 foi simulado com os seguintes valores:  $\beta = 7,2 \times 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $l_o = 0,1 \text{ m}$ ;  $K_1 = 1 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ;  $K_3 = 4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{N}$ ;  $\tau = 1 \text{ segundo}$ ;  $K_{pe} = 5000 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ;  $K_{ie} = 2000 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ;  $K_p = 1000 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ;  $K_{ie} = 2000 \text{ }^\circ\text{C/m}$ .

A Figura 3 mostra um sinal hipotético de distúrbio de pressão convertido em temperatura, comparado com o sinal estimado após simulação dos dados, enquanto a Figura 4 mostra o deslocamento do menisco referente ao mesmo sinal de distúrbio aplicado. Observa-se que o erro em regime permanente é nulo nas seqüências de degraus, havendo, entretanto, erro constante na ocorrência de rampas. O mesmo sistema foi simulado com os mesmos dados, porém com a inclusão de um ruído gaussiano com média nula e variância igual a  $1 \text{ }^\circ\text{C}^2$ . Também foi incluído um ruído gaussiano com média nula, e variância igual a  $10^{-5}$  metro, filtrado com função de transferência igual a  $0,4/(s + 0,4)$ . Na Figura 5 vê-se o sinal de distúrbio de pressão convertido em temperatura a exemplo da Figura 3, porém com ruído, sendo comparado com o sinal estimado, e com o sinal original de entrada sem ruído. Observa-se que é possível estimar o estado do sistema, porém com perda de desempenho. A Figura 6 compara o deslocamento do menisco devido ao distúrbio com ruído, mais o ruído de medida, com a resposta do sistema sem inclusão de ruído.



**Fig. 3.** Sinal de entrada de distúrbio de pressão convertido em temperatura (linha cheia), e o sinal estimado (linha tracejada).



**Fig. 4.** Excursão da posição do menisco devido ao sinal de distúrbio de pressão.

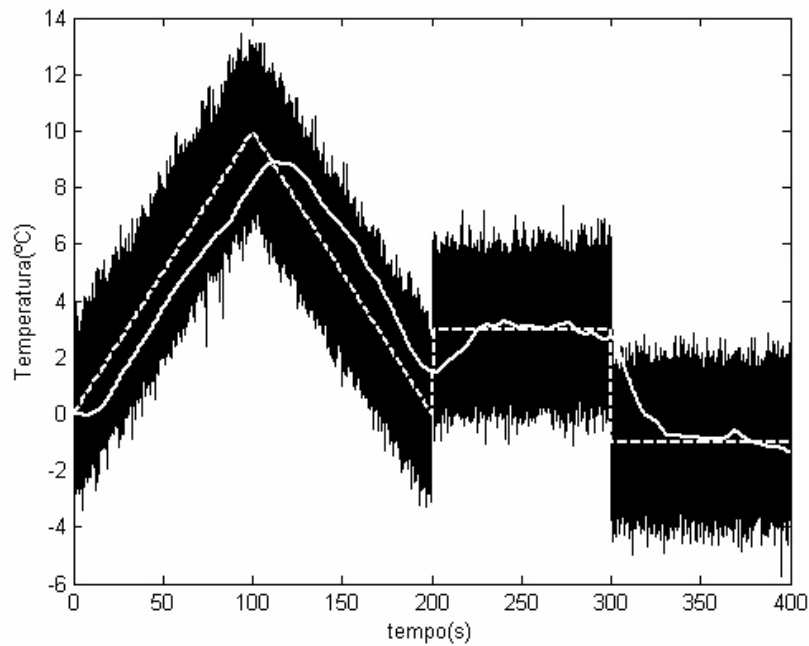


Fig. 5. Sinal de distúrbio de pressão convertido em temperatura (branco tracejado); mesmo sinal com ruído gaussiano com média nula e variância igual a  $1^{\circ}\text{C}^2$  (em preto); e sinal estimado (em branco contínuo).

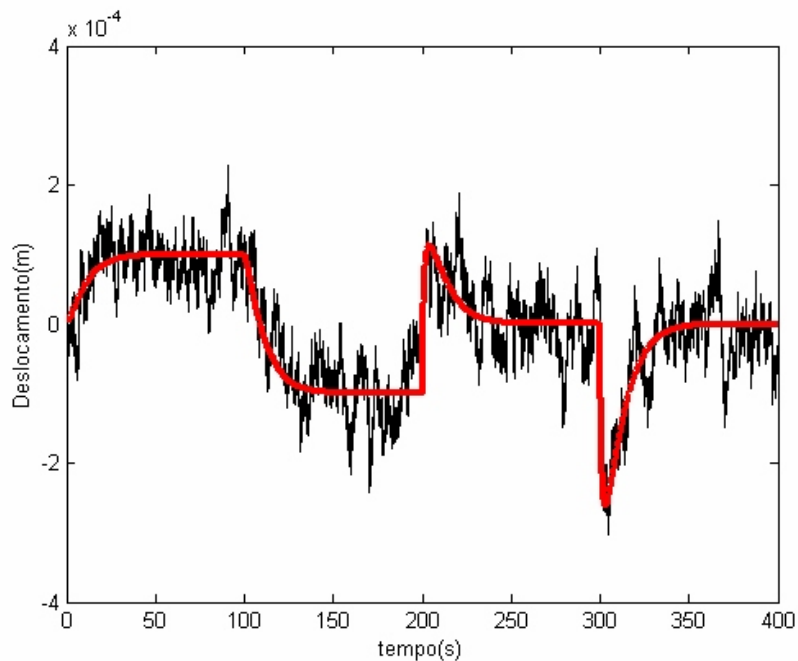


Fig. 6. Excursão da posição do menisco devido ao sinal de distúrbio de pressão, com ruído gaussiano e ruído de medida (em preto), comparado com a resposta sem ruído (em vermelho).

### Conclusão

Observa-se na Figura 3 que na ausência de ruído de medida o sinal do distúrbio de pressão, no caso, o que se quer obter, pode ser reconstruído com erro nulo em sinal constante, e erro constante em sinal de rampa. Quando se acrescenta o ruído de medida o desempenho de resposta diminui (Fig. 5), ou seja, existe uma pequena variação em sinais constantes (menor que 1%) e o erro para sinal tipo rampa deixa de ser constante. A técnica pode ser promissora para reconstrução do sinal no caso de haver uma modelagem relativamente fiel do sistema. Desta forma pode ser feita a otimização dos ganhos do controlador do sistema e do estimador PI, visando a que obtenha erros dentro de limites pré-estabelecidos.

## Referências

ANDERSON, B. D. O.; MOORE, J. B. **Optimal control: linear quadratic methods**. 1<sup>st</sup> ed. London: Englewood Cliffs; Prentice-Hall, Inc., 1989. 380 p.

BALLING, A.; ZIMMERMANN, U. Comparative measurements of the xylem pressure of *Nicotiana* plants by means of the pressure bomb and pressure probe. **Planta**, Berlin, v. 182, p. 325-338, 1990.

BERTUCCI-NETO, V. **Modelagem e automação em nova técnica de medida para relações de água e planta**. 2005. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J. D. C.; CRUVINEL, P. E.; CALBO, A. G. **Modelagem e automação de uma sonda termoelástica para medidas de parâmetros relativos a Fisiologia Vegetal**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2006. 27 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 14).

CALBO, A. G.; PESSOA, J. D. C. Thermoelastic pressure probe to test the cohesion theory. Liquid expandibility, compressibility and pressure measurements. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 11, p. 129-136, 1999.

STEUDLE, E. Transport of water in plants. **Environ. Control in Biology**, [S. l.], v. 40, p. 29-37, 2002.

STEUDLE, E. The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. **Annual Review Plant. Mol. Biol.** [S. l.], v. 52, p. 847-875, 2001.

TYRRE, M. T. The ascent of water. **Nature**, London, v. 423, p. 923, 2003.

ZIMMERMANN, U.; SCHNEIDER, H.; WEGNER, L. H.; HAASE, A. Water ascent in tall trees: does evolution of land plants rely on a highly metastable state? **New Physiologist**, [S. l.], v. 162, p. 575-615, 2004.

ZIMMERMANN, U.; SCHNEIDER, H.; WEGNER, L. H.; WAGNER, H.; SZIMTENINGS, M.; HAASE, A. What are the driving forces for water lifting in the xylem conduit? **Physiologia Plantarum**, [S. l.], v. 114, p. 327-335, 2002.



---

*Embrapa Instrumentação Agropecuária*

**Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

