



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária  
Ministério da Agricultura e do Abastecimento

Rua XV de Novembro, 1452 - Caixa Postal 741 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP  
Telefone: (16) 274 2477 - Fax: (16) 272 5958 - e-mail: [postmaster@cnpdia.embrapa.br](mailto:postmaster@cnpdia.embrapa.br)

ISSN 1413-8808

# PESQUISA EM ANDAMENTO

Nº 27, ago/98, p.1-5

## ABORDAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTO DE MEDIDA DE PRESSÃO INTRACELULAR

Victor Bertucci Neto<sup>1</sup>  
José Dalton Cruz Pessoa<sup>1</sup>  
Paulo Estevão Cruvinel<sup>1</sup>  
Adonai Gimenez Calbo<sup>2</sup>

A determinação da pressão intracelular de plantas (turgor) é de importância fundamental para os fisiologistas vegetais, porque auxilia no desenvolvimento de modelos, e na avaliação de como uma planta responderá a variações ambientais, tais como, ausência, ou excesso de água, insolação, e até mesmo vento. Hüsken et al. (1978) apresentaram uma técnica de medida que se mostrou como uma das mais promissoras dentre as que foram tentadas. Basicamente, consiste de um capilar preenchido com óleo, o qual após romper uma célula vegetal com a ponta, submete-se a uma pressão movimentando o menisco no capilar. A medida se baseia na compensação da pressão aplicada pela célula, através de um aparato hidráulico, ou seja, um pistão com movimento acionado por um motor. Por sua vez, a posição do menisco é determinada pela medida da resistência elétrica de um fio de prata dentro do capilar, resistência esta que variava de acordo com o contato longitudinal proporcionado pelo óleo no capilar. Os avanços nesta técnica se deram, basicamente, na determinação da posição do menisco, tendo sido usado, para tal, aparatos óticos como CCD (Charge Coupled Device) e arranjos lineares com fotodiodos e fibra ótica. Recentemente, Pessoa e Calbo (1997) propuseram um sistema de compensação da posição do menisco no capilar baseado na expansão e compressão térmicas do fluido. A idéia é a de obter o valor da pressão aplicada na ponta do capilar, através do controle térmico da posição do menisco. Esta inovação diminui custos devido à exclusão de todo aparato eletro-hidráulico usado para este fim. Entretanto, não há na literatura nenhuma citação a respeito de uma metodologia para reproduzir este sistema de controle de posição. Devido a esta lacuna, propomos neste trabalho um modelo baseado na Teoria de Sistemas de Controle, no qual se pode a partir de parâmetros experimentais, obter as condições necessárias para controlar a posição do menisco, e obter a pressão intracelular. Consideramos o capilar preenchido de óleo como um termômetro para obter a seguinte equação:

<sup>1</sup> Embrapa Instrumentação Agropecuária, Cx. Postal 741, 13560-970, São Carlos-SP

<sup>2</sup> Embrapa Hortaliças, Cx. Postal 218, 70359-970, Brasília-DF

PA/27, CNPDIA, ago/98, p.2

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = K \cdot T_h \quad (1)$$

Onde  $\tau$  é a constante de tempo em segundos do termômetro, e  $K = \alpha l_0$ . Sendo:  
 $\alpha$  o coeficiente linear de expansão térmica (1/°C);  
 $T_h$  a temperatura do aquecedor (°C);  
 $l_0$  o comprimento (metro) do cilindro definido pelo menisco no capilar quando a temperatura do fluido estiver a zero °C.

O deslocamento  $x$  (metros) da marca de referência pode ser expresso por ( $T_f$  é a temperatura do óleo em °C):

$$x = \alpha l_0 T_f \quad (2)$$

As relações entre  $P$  versus  $E^2$ , e  $T_h$  versus  $E^2$ ,  $P$  versus  $T_h$ , (onde  $E$  é o valor da tensão de alimentação em corrente contínua que alimenta a resistência de aquecimento e  $P$  é a pressão desconhecida em  $\text{Nm}^{-2}$ ) foram obtidas experimentalmente, apresentando comportamentos lineares, sendo representadas como:

$$T_h = K_1 \cdot E^2 \quad (3)$$

$$P = K_2 \cdot E^2 \quad (4)$$

e conclusivamente:

$$T_h = K_3 \cdot P \quad (5)$$

Onde  $K_1$ ,  $K_2$ , e  $K_3 = K_1/K_2$  são constantes. Assim a planta do sistema nominal pode ser representada pelas equações 1, 3, e 5. A próxima etapa é a inclusão de um controlador em malha direta com a planta do sistema e realimentar a malha com um sinal que indique a posição do menisco em relação à origem. Como indicado na figura 1, o diagrama em blocos mostra a planta do sistema  $G(s)$ , circundado por uma linha tracejada, o bloco de realimentação negativa  $H(s)$  e o bloco do controlador  $G_c(s)$ . Esta esquematização é usualmente chamada de "problema do regulador", sendo a referência a origem  $l_0$ . O controlador considerado foi o PID (Proporcional + Integral + Diferencial). A simulação da dinâmica do sistema deve mostrar os compromissos entre desempenho e estabilidade. A planta do sistema é linear de primeira ordem. Para se evitar a relação quadrática entre a potência entregue pela fonte de alimentação da resistência de aquecimento e a pressão e temperatura, representadas pelas equações 3, 4, e 5, deve-se usar como parâmetro de conversão a própria potência, em vez da tensão elétrica. Considerando que o sistema será controlado através de um computador, que deverá processar a imagem obtida, indicando a posição do menisco, além de processar o algoritmo do controlador PID, haverá um atraso de tempo na malha da realimentação. Este atraso é representado através do bloco de realimentação  $H(s)$ . Dependendo do atraso de tempo neste bloco haverá degradação tanto no desempenho, como na estabilidade do sistema. Melhor será o desempenho, quanto menor for o tempo em que o menisco retornar à origem, em contraposição à pressão a ser medida  $P$ . Como há

PA/27, CNPDIA, ago/98, p.3

também interesse em registrar a dinâmica da pressão, o sistema ótico na realimentação deve responder em tempo apropriado, no sentido de reduzir tempos de atraso devido à aquisição de imagens e cálculos computacionais da posição do menisco.

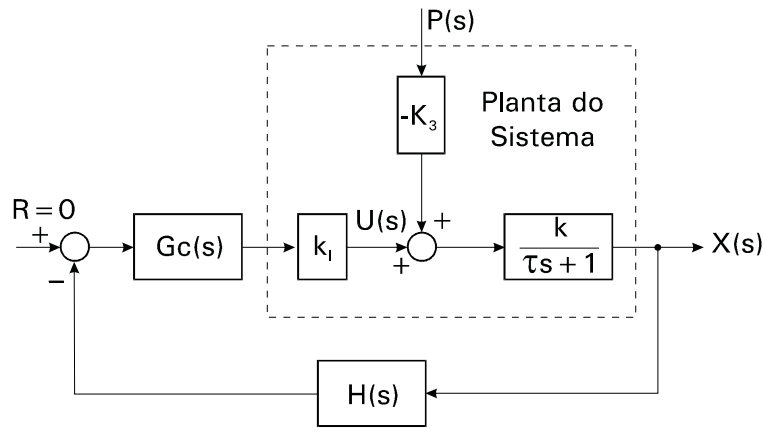


Figura 1: diagrama em blocos do sistema realimentado

Se considerarmos a Figura 1, com entrada de regulação nula, ou seja,  $R = 0$ , a saída em relação à entrada  $P$  será:

$$X(s) = \frac{-K_3}{1 + K_1 G_c(s) G_p(s) H(s)} P(s) \quad (6)$$

Enquanto que a saída da variável de controle  $U(s)$  ( em graus centígrados) em relação à pressão aplicada na entrada será:

$$U(s) = \frac{K_1 K_3 H(s)}{1 + K_1 G_c G_p H(s)} P(s) \quad (7)$$

Onde:

$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$  , é a função de transferência da planta controlada

$G_c(s)$  , é a função de transferência do controlador PID

$H(s)$  , é a função de transferência que representa atraso de transporte na realimentação

Os seguintes coeficientes foram obtidos experimentalmente:

$$\alpha = 0,72 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$l_0 = 10^{-1} \text{ m} \Rightarrow K = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}/^\circ\text{C}$$

$$\tau = 1 \text{ s}$$

$$K_1 = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/V^2$$

$$K_2 = 10^4 \text{ N}/m^2V^2$$

$$K_3 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Cm}^2 / \text{N}$$

PA/27, CNPDIA, ago/98, p.4

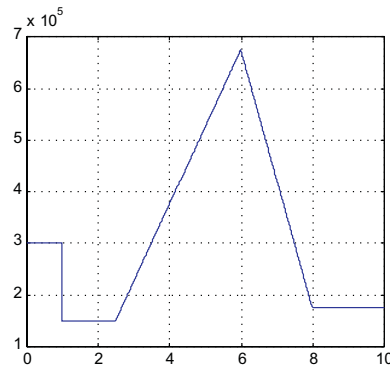


Figura 3. Gráfico da Pressão (N/m<sup>2</sup>) em função do tempo, utilizada para análise de desempenho do sistema

As equações 6 e 7 foram usadas para analisar estabilidade e desempenho do sistema através de simulações computacionais. Foi considerado uma entrada de pressão conforme indicado na Figura 2, com degraus e rampas positivas e negativas. A Figura 3.a mostra a resposta da variável de controle  $U(s)$  em função do tempo, quando é aplicado um sinal de pressão na entrada igual ao da Figura 2. O resultado desta curva é diretamente correlacionado com a pressão de entrada. Já a Figura 3.b mostra a variação de posição do menisco (em metros) quando o sistema de controle age devido à pressão aplicada  $P(s)$ . Esta figura indica a faixa de variação que o menisco deve percorrer devido a  $P(s)$ . Os ganhos utilizados no controlador PID foram  $K_p = 2 \cdot 10^8$ ,  $K_i = 10^9$ , e  $K_d = 10^6$  (volt<sup>2</sup>.metro). Entretanto, os resultados obtidos na Figura 3 não levam em consideração o atraso de tempo devido a  $H(s)$ . Quando se mantém os valores de ganhos do PID e se considera um atraso de transporte acima de 0,04 segundos, o sistema se torna instável. Na Figura 4.a e 4.b estão sendo mostradas as respostas da variável de controle  $U(s)$  e saída  $X(s)$ , devido a  $P(s)$  conforme a Figura 2, considerando-se um tempo de atraso igual a 0,039 segundos. Percebe-se de forma bastante clara a perda em desempenho do sistema.

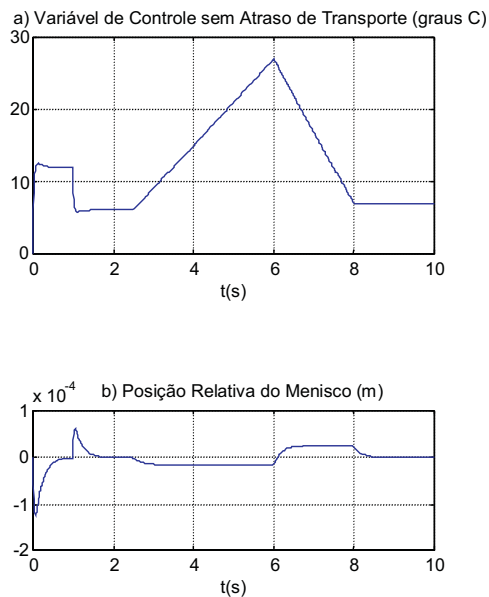


Figura 3. Respostas do sistema devido à  $P(s)$  conforme figura 2, sem a inclusão de atraso de transporte em  $H(s)$ : a) variável de controle  $U(s)$ ; b) posição relativa do menisco.

PA/27, CNPDIA, ago/98, p.5

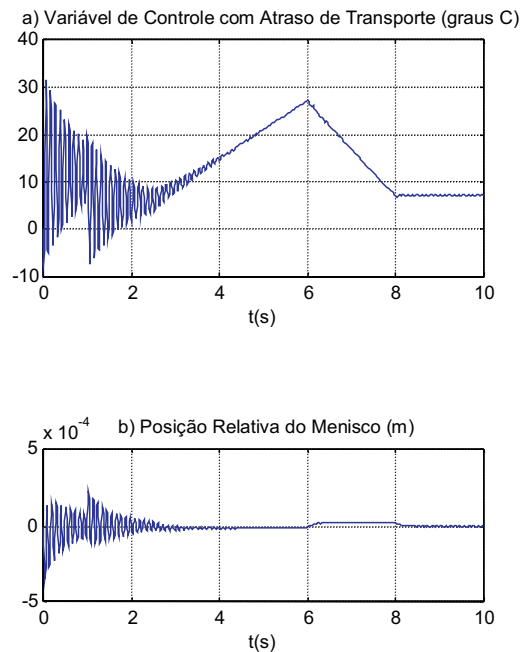


Figura 3. Repostas do sistema devido à P(s) conforme figura 2, com a inclusão de atraso de transporte em  $H(s)$ : a) variável de controle  $U(s)$ ; b) posição relativa do menisco.

Utilizando-se assim uma metodologia de sistemas de controle foi possível simular o sistema realimentado e analisar as melhores condições de funcionamento para o sistema real, ou seja, o ganho ótico necessário, o tempo máximo de processamento da imagem do menisco e os valores de ganhos do controlador PID.

#### Referência Bibliográfica

- BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J.D.C.; CRUVINEL, P. E.; CALBO, A.G., Dynamics in measuring of plant intracellular pressure: a control system approach. In: Congresso Brasileiro de Automação CBA, 12, set. 1998, Uberlândia, MG. **Anais...** Uberlândia: UFU, 1998. 4f. CD-ROM
- BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J.D.C.; CRUVINEL, P.E.; CALBO, A.G. **Automação de um sistema de medida de turgescência em plantas**. São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1997. 3p. (EMBRAPA-CNPDIA. Pesquisa em Andamento, 15).
- HÜSKEN, D.; STEUDLE, E.; ZIMMERMANN, U. Pressure probe technique for measuring water relations of cells in higher plants, **Plant Physiology**, v. 61, p.158-13, 1978
- PESSOA, J.D.C.; CALBO, A.G. Caracterização do comportamento compressivo-expansivo de amostras fluidas com volume da ordem de micro-micro litros. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1, 1996, São Carlos-SP. **Anais do I SIAGRO**. São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1997. p.411-415.