

## Novo Instrumento Automático para Medida de Pressão Intracelular em Vegetais

### INTRODUÇÃO

Pressão de turgescência é uma variável fisiológica de importância fundamental pois sendo componente do potencial de água, ela indica o conteúdo de água na planta, desde que está relacionada com o volume de água nas células. A técnica de sonda de pressão foi originalmente introduzida por Zimmermann et al. (1969) para medir turgescência (pressão intracelular) e relações de água em plantas vegetais. O instrumento consistia de um capilar com diâmetro na ponta entre 100 e 200 micrômetros, a qual era inserida em algas de células gigantes. A outra extremidade do capilar era adaptada a uma câmara de pressão sendo que ambos eram preenchidos com óleo de silicone de baixa viscosidade não miscível em água. O volume, e conseqüentemente a pressão do meio, era alterado através de uma membrana que se movia por meio de um eixo. Assim o princípio de medida era o de balancear a turgescência da célula em oposição à pressão do óleo. Após o balanceamento a pressão do óleo na câmara era medida com um transdutor de pressão. Este instrumento não era adequado para medir turgescência em células com volumes menores devido à alta compressibilidade do óleo e do próprio volume do sistema câmara e capilar ser muito grande. Uma segunda versão desenvolvida por Steudle e Zimmermann (1971) apresentou uma redução significativa do volume do sistema permitindo medir taxa de transferência de água e condutividade hidráulica de células com volumes na ordem de microlitros. Entretanto, para medidas em células de plantas superiores, era necessário que o volume da câmara e do capilar fossem mais ainda reduzidos. Hüsken et al. (1978) desenvolveram mais uma versão da sonda a qual além de apresentar o volume da câmara mais reduzido, possuía um volume de óleo na sonda várias ordens de magnitude menor em relação à anterior. Nesta terceira versão era necessário medir a posição do menisco no óleo do capilar, que era usada como referência. Este procedimento exigia um microscópio para ajuste da posição do menisco. Para evitar vibrações que poderiam provocar vazamentos na célula perfurada foi usada uma câmara de pressão com volume variado por um sistema de êmbolo, controlado manualmente, ou automaticamente por um motor. A posição do menisco era detectada na forma automática através da medida da resistência elétrica de um fio de prata inserido no capilar. As dificuldades em se realizar estas medidas de forma automática motivaram o desenvolvimento de novos mecanismos. Em geral, medidas em período de tempo relativamente curtos eram realizadas de forma manual, mas algumas medidas requeriam

algumas horas para atingir a estabilidade o que tornava óbvia a necessidade de um procedimento automático (Zimmermann, 1989). As principais mudanças feitas no instrumento foram relacionadas à detecção do menisco no capilar de forma a se obter um sinal apropriado para acionar o motor acoplado ao êmbolo da câmara de pressão. Cosgrove e Durachko (1986) usaram uma câmara de vídeo acoplada a um microscópio para observar a posição do menisco. Um processador e analisador de vídeo juntamente com um circuito analógico e digital indicavam a posição do menisco, enviando um sinal digital para uma placa de interface no computador. O computador acionava uma placa

de controle para o motor ser acionado, e realizava leituras da pressão na câmara. Büchner et



Foto: Gilmar Victorino

### Autores

Victor Bertucci Neto  
Engenheiro Eletricista, MSc  
Embrapa Instrumentação  
Agropecuária, C.P. 741,  
CEP 13560-970,  
São Carlos, SP  
victor@cnpdia.embrapa.br

José Dalton Cruz Pessoa  
Físico, Dr.  
Embrapa Instrumentação  
Agropecuária, C.P. 741,  
CEP 13560-970,  
São Carlos, SP  
dalton@cnpdia.embrapa.br

Paulo Estevão Cruvinel  
Engenheiro Eletricista, Dr.  
Embrapa Instrumentação  
Agropecuária, C.P. 741,  
CEP 13560-970,  
São Carlos, SP  
cruvinel@cnpdia.embrapa.br

Adonai Gimenez Calbo  
Engenheiro Agrônomo, Dr.  
Embrapa Hortaliças

al. (1987) adaptaram um arranjo linear de sensores óticos para determinar a posição do menisco, obtendo assim um sinal digital proporcional ao movimento. Desta forma a técnica de sonda de pressão tem sido usada de forma extensiva para a medida de turgescência e possibilitando aplicações diversas como medidas de fluxo de soluto em adição a água em células e tecidos isolados, na caracterização de transporte de água e propriedades mecânicas de paredes de células vegetais (Steudle, 1993). Outra aplicação da técnica está relacionada à medida da pressão no xilema da planta, auxiliando no desenvolvimento e validação de teorias e modelos de relações de água nas plantas (Wei et al., 1999a, 1999b). Calbo e Pessoa (1999) apresentaram uma nova categoria de sonda de pressão baseada na compensação térmica em contraoposição à pressão aplicada na ponta do capilar. Desta forma não é necessário o uso de uma câmara de pressão e do sistema de êmbolo acionado por motor. Além destas vantagens ela se mostrou menos suscetível à embolia que freqüentemente ocorre no capilar quando na presença de pressões negativas.

O que deve ser destacado nesta breve revisão da literatura é que em nenhum dos casos citados houve uma avaliação sobre a sonda de pressão como instrumento de medida em si, ou seja, quais os limites de medida, erro de medida, além do comportamento estático e dinâmico de medida. Baseado nisto Bertucci-Neto et al. (1998) apresentaram um modelo dinâmico para a sonda de pressão com compensação térmica, de forma que os parâmetros físicos são correlacionados diretamente com o desempenho do instrumento.

Neste trabalho será mostrado como o modelo do instrumento é utilizado de forma a auxiliar no projeto de uma sonda de pressão automática, além dos resultados práticos obtidos em experimentos de bancada para caracterização da sonda. A versão da sonda de pressão usada para o trabalho foi a de compensação térmica e a automação é baseada na teoria de Sistemas de Controle.

**MODELO DO SISTEMA**

A sonda de pressão proposta por Calbo e Pessoa (1999) é similar a um termômetro com dimensões reduzidas. Um capilar com diâmetro interno de 50 micrômetros é preenchido com óleo e o corpo do capilar é envolto por uma resistência elétrica. Conforme indicado na Figura 1, o conjunto capilar e resistência ficam em contacto com água resfriada e apenas a ponta do capilar fica exposta ao ambiente, com o menisco visível através de um microscópio. Quando a célula vegetal é rompida com a ponta do capilar a pressão interna faz com que o menisco se mova em sentido contrário ao da aplicação. Regulando-se a tensão contínua na resistência do aquecedor, regula-se também a posição do menisco, ou seja, faz-se com que o menisco retorne à posição original. O valor da potência aplicada na resistência é proporcional à pressão. Desta forma, o procedimento de medida na forma manual necessita apenas de uma prévia calibragem entre potência elétrica e pressão.

No caso de um procedimento automático de medida é necessário que haja uma referência inicial da posição do menisco e que continuamente esta posição se mantenha mesmo com a pressão variando na ponta do capilar. Ou seja, a fonte de alimentação deve suprir a resistência elétrica sempre que a pressão variar. Registrando-se o valor da potência aplicada tem-se o valor da pressão pelo

tempo. Isto sugere uma abordagem de Sistemas de Controle para o projeto devido à característica de malha fechada com realimentação negativa. Como pode ser observado a seguir o equacionamento do sistema é simples de forma a que se possa chegar a um modelo bastante fiel à realidade.

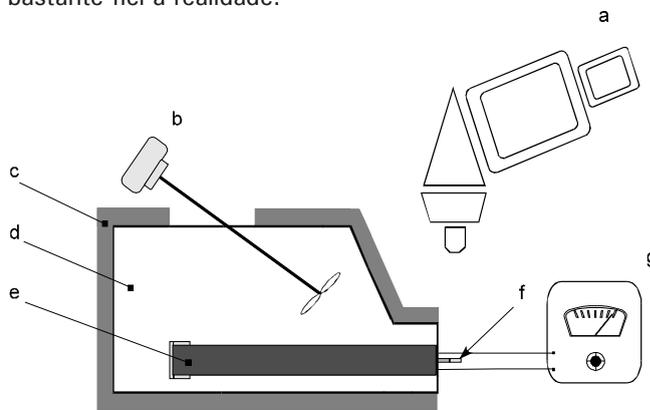


Figura 1. Representação da sonda de pressão para medidas manuais. a) microscópio. b) agitador. c) isolamento térmico. d) câmara com água. e) resistência elétrica. f) capilar preenchido com óleo. g) fonte de alimentação CC.

Considera-se a variação do volume *V* (litro) devida à compressão ou expansão do óleo no capilar como (Bertucci-Neto et al., 1998a, 1998b, 1999)

$$\frac{dV}{V} = \alpha dT_f - k dP \tag{1}$$

Onde  $\alpha$  é o coeficiente da expansão térmica linear ( $1/^\circ\text{C}$ );  $k$  é a compressibilidade do óleo ( $1/\text{Nm}^{-2}$ );  $P$  é a pressão celular ( $\text{Nm}^{-2}$ );  $T_f$  é a temperatura do óleo ( $^\circ\text{C}$ ). O capilar pode ser modelado fisicamente como um termômetro de vidro com líquido. Considerando-se a lei de conservação de energia sobre um tempo infinitesimal (energia que entra menos energia que sai é igual energia armazenada) e assumindo que não há perdas, obtém-se (Doebelin, 1990, p. 105)

$$UA_w(T_h - T_f)dt = V_0 C dT_f \tag{2}$$

Onde  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor através da parede do capilar ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ );  $T_h$  é a temperatura do aquecedor;  $\rho$  é a densidade de massa do fluido no capilar;  $C$  é o calor específico do fluido ( $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ );  $V_0 = A \cdot l_0$  é o volume inicial na temperatura da câmara com água (litro);  $A$  é a área da seção do tubo capilar ( $\text{m}^2$ ); e  $l_0$  é o comprimento (metro) indicado pelo menisco na condição de referência. O deslocamento  $x$  (metro) da marca de referência pode ser expresso como

$$x = l_0 T_f \tag{3}$$

Derivando-se  $T_f$  em relação ao tempo  $t$  na Equação 3, substituindo na Equação 2 e rearranjando os termos obtém-se

$$\frac{dx}{dt} = K T_h \tag{4}$$

Onde

$$K = C/UA_w$$

é a constante de tempo (segundo), e

$$K \quad l_0$$

Na Equação 2 são consideradas suposições tais como  $U, A_w$ , e  $V_o$ , constantes, no sentido de evitar uma maior complexidade matemática. Desta forma as discrepâncias entre os sistemas nominal e real (chamadas de incertezas do sistema) podem ser tratadas pela imposição de limites mais rígidos de desempenho e estabilidade no projeto de Sistemas de Controle. As relações entre  $P$  versus  $E^2$ ,  $T_h$  versus  $E^2$ , além de  $P$  versus  $T_h$ , (onde  $E$  é a tensão da fonte de alimentação CC) foram obtidas experimentalmente. O comportamento é linear e portanto pode-se concluir que

$$T_h = K_1 \cdot E^2 \quad (5)$$

$$P = K_2 \cdot E^2 \quad (6)$$

E de forma conclusiva

$$T_h = K_3 \cdot P \quad (7)$$

Onde  $K_1, K_2$  e  $K_3=K_1/K_2$  são constantes. A planta nominal do sistema é representada pelas Equações 4, 5, and 7. A representação da planta  $G_p$  em função da frequência é obtida aplicando-se a Transformada de Laplace na Equação 4 resultando em

$$G_p(s) = \frac{K}{s+1} \quad (8)$$

Na Figura 2 é mostrada a representação do sistema proposto para automação na forma de diagrama de blocos. A saída do sistema é a posição do menisco no capilar. Esta posição é amostrada pela câmara de vídeo acoplada ao microscópio 30 vezes por segundo. Por esta razão foi incluído um bloco na realimentação equivalente a um amostrador (*sample and hold*). O sinal amostrado é enviado para o controlador que aciona a fonte de potência para aquecer o capilar. A entrada de pressão P(s) é considerada como um distúrbio no sistema pois quando é nula o sistema deve ser estável, ou seja, o menisco deve ficar sempre na posição considerada como a de referência.

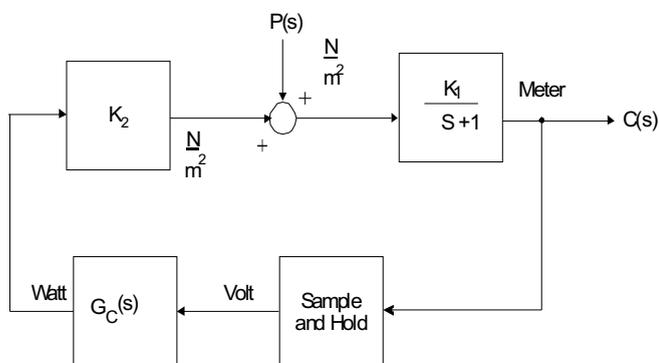


Figura 2. Representação em digrama de blocos do sistema em malha fechada

A função de transferência digital entre a saída (posição do menisco em relação à origem) e a Pressão de entrada é dada por (Bertucci-Neto et al., 2000, 2001a, 2001c)

$$X(z) = \frac{G_p P(z)}{1 - K_2 G_p G_c(z)} \quad (9)$$

Onde

$$G_p P(z) = G_p(s) P(s)$$

$$G_p G_c(z) = G_p(s) G_c(s) G_{ho}(s)$$

é a transformada z

$G_{ho}(s)$  é a função de transferência do amostrador de 1ª ordem.

O bloco  $G_c$  que representa o controlador deve apresentar uma função de transferência que garanta estabilidade e desempenho ao sistema. Estes são compromissos totalmente relacionados, ou seja, se há necessidade de que o sistema responda de forma rápida haverá, em geral, uma diminuição na margem de estabilidade. Uma lei de controle bastante usada é a do Controlador PID, que neste caso aplica ganhos pré-ajustados  $K_P, K_I, K_D$ , (que são os ganhos proporcional, integral e diferencial, respectivamente) ao sinal da posição do menisco. A função de transferência em função da frequência do controlador PID é dada por

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (10)$$

Para efetuar simulações de resposta dinâmica do sistema foram considerados os seguintes coeficientes obtidos experimentalmente:

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

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

$$1 \text{ s}$$

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

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

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

Os valores de  $K_P=12 \cdot 10^7$ , e  $K_D=6 \cdot 10^4$ , foram mantidos constantes e o ganho integral  $K_I$  foi variado de forma a produzir uma resposta mais lenta ( $K_I S=15.5 \cdot 10^6$ ), e uma resposta dinâmica mais rápida ( $K_I F=12.5 \cdot 10^8$ ). Isto se justifica pois enquanto  $K_I S$  deixa o erro de resposta menos preciso, o sistema se mantém mais estável. Já o uso de  $K_I F$  implica em um sistema que rapidamente atinge o valor desejado, mas que também implica em menor estabilidade do sistema, podendo produzir oscilações. Na figura 3 pode se ver a variação da posição do menisco em função do tempo quando é aplicado um degrau constante de  $500 \text{ KN/m}^2$ . O comportamento devido a  $K_I F$ , faz com que o tempo de resposta dentro da faixa de 1% de erro dependa 0,3 segundos, e com  $K_I S$  este tempo fique em 1,37 segundos. Portanto, a escolha deste parâmetro mostra o comprometimento existente em relação ao erro e a dinâmica da medida.

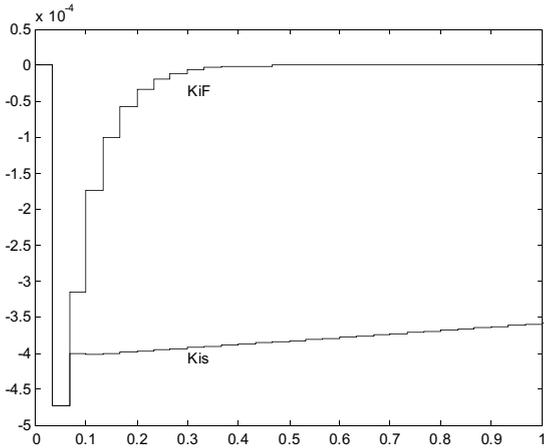


Figura 3: Variação da posição do menisco devido a um degrau de pressão  $P = 500\text{KN/m}^2$  com Kis, e KIF.

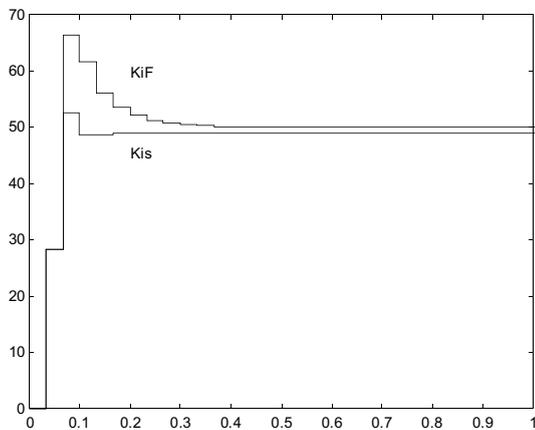


Figura 4. Sinal de potência elétrica equivalente à variação do menisco, conforme indicado na Figura 3.

**RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Em resumo, se a pressão na ponta do capilar varia, a posição do menisco também deve variar. Por outro lado, se a temperatura que envolve o capilar varia com a mesma dinâmica da pressão, o capilar deverá se manter na posição original. Quando medimos o esforço desempenhado pela temperatura para manter o menisco na mesma posição (através da medida da potência elétrica dissipada pela resistência), estaremos medindo a pressão aplicada. Portanto, o sistema necessita de uma malha de realimentação negativa, de forma a comparar a posição do menisco atual com a original, e enviar este sinal para um controlador de temperatura. Se a medida da posição do menisco é feita em tempo real, o controlador pode responder rapidamente em relação à dinâmica da pressão aplicada. Entretanto, a característica microscópica do sistema exige uma câmara de vídeo acoplada a um microscópio, fazendo com que a posição do menisco seja amostrada 30 vezes por segundo, que é a frequência de varredura de uma imagem de vídeo. Esta taxa de amostragem de cerca de 33 milésimos de segundo obviamente piora o desempenho e a estabilidade do sistema. Além disto é necessário um circuito ou software que indique a posição do menisco em relação à origem considerada, o que certamente aumentará o tempo de amostragem. Uma das saídas encontradas foi a

de usar um circuito que escolhe uma linha de vídeo que contenha a informação da posição do menisco (circuito separador de linha de vídeo) e que calcule através de um circuito contador quanto ele está distante da referência. Na figura 5 temos o diagrama esquemático da montagem usada, representando o que foi descrito.

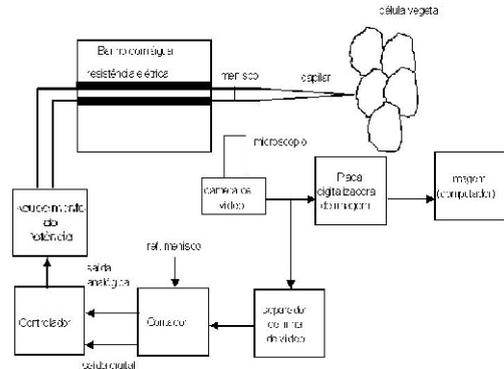


Figura 5. Representação esquemática do sistema com detecção da posição do menisco por meio de separador de linha de vídeo.

A vantagem em se detectar o menisco através do sinal da linha de vídeo está na rapidez da resposta, evitando-se assim o processamento da imagem de forma digital. A desvantagem está na instabilidade do circuito eletrônico devido à ruídos no sinal de vídeo, ou mesmo ruídos na imagem do capilar, podendo haver respostas dúbias quanto à posição do menisco. Na Figura 6 observa-se uma típica imagem do capilar e menisco, enquanto na Figura 7 vê-se o sinal correspondente à posição do menisco após ser processado pelo circuito eletrônico. Quando o nível de ruído no sinal da linha de vídeo (Canal 2) é excessivo, a tendência é a de aparecer mais de um pulso que indique a posição do menisco. Uma tentativa de minimizar essa resposta foi através do uso de uma Rede Neural Artificial do tipo Retropropagação conforme apresentado por Bertucci-Neto et al. (2001b).

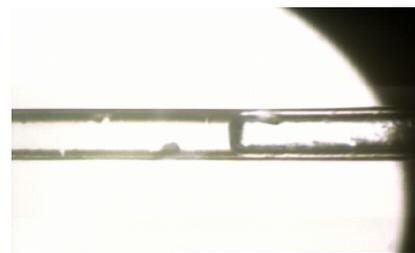


Figura 6. Imagem digitalizada do capilar com o menisco centralizado

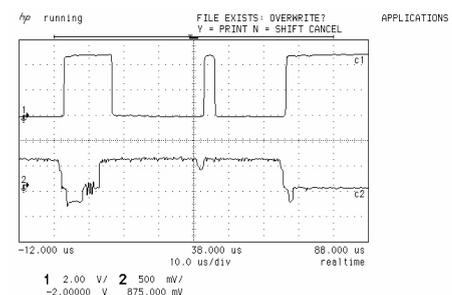


Figura 7. Canal 2 (C2) do osciloscópio mostrando o sinal de uma linha de vídeo selecionada da imagem da fig.(2) , e no canal 1 (C1), o sinal digitalizado.

A outra saída encontrada foi a de usar uma placa de vídeo acoplada ao computador, além de um programa de processamento de imagem. Desta maneira, apesar de ser mais dispendiosa, há mais flexibilidade no tratamento da imagem possibilitando poucas falhas na detecção. Portanto, após o tratamento da imagem, haverá na saída da placa de vídeo um sinal elétrico proporcional à posição do menisco. Este sinal pode ser usado para um controlador analógico, ou seja, um circuito eletrônico, que comandará a fonte de alimentação do aquecedor. Além desta opção, pode ser usada mais uma placa no computador, de interface Entrada/Saída, de forma que se realize o controle por programação. Assim, a configuração final do sistema dispõe de uma placa de digitalizadora de vídeo, uma placa multifunção Entrada/Saída digital e analógica, ambas conectadas a um computador pessoal, um programa de processamento de imagens IMAQ Vision for Labview, e uma plataforma de programação Labview 6i, sendo todos estes componentes fabricados pela National Instruments. O controlador programado no Labview foi o PID. Na Figura 8 observa-se o resultado da ação do controlador PID (escala 100 vezes maior), o valor da tensão da Fonte CC, e a posição do menisco em pixel (escala 100 vezes menor). Forma aplicados três degraus de pressão sucessivos, sendo Degrau 1 menor que Degrau 2, ambos positivos, e Degrau 3 negativo. Observa-se a forte tendência oscilatória do sistema, o que se deve ao ajuste dos parâmetros do controlador PID não serem otimizados. Mesmo assim percebe-se a envoltória exponencial da oscilação com tendência estabilizadora. Ampliando-se o valor da posição em pixel do menisco sem pressão externa aplicada obtém-se o que é mostrado na Figura 9. Observa-se que mesmo em repouso há uma oscilação na posição do menisco, variando entre mais 5 e menos 5 pixels. Portanto devem ser feitas mais investigações a respeito deste distúrbio para confirmar se ele ocorre devido a pequenas vibrações, variação de temperatura externa, ou mesmo se é devido ao próprio sistema de controle.

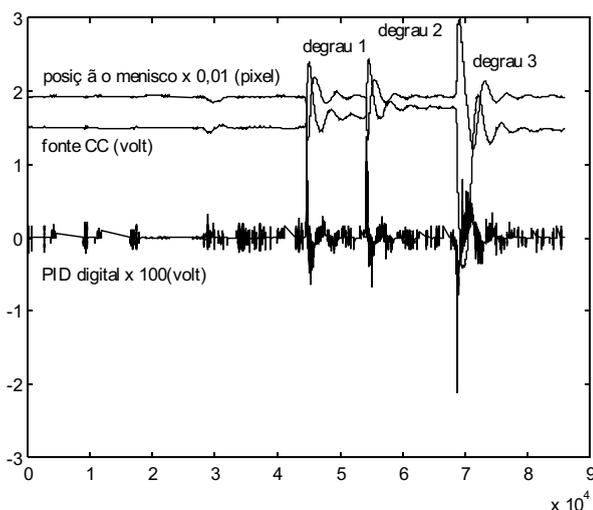


Figura 8. Resposta do sistema em repouso, e com degraus sucessivos 1, 2, e 3.

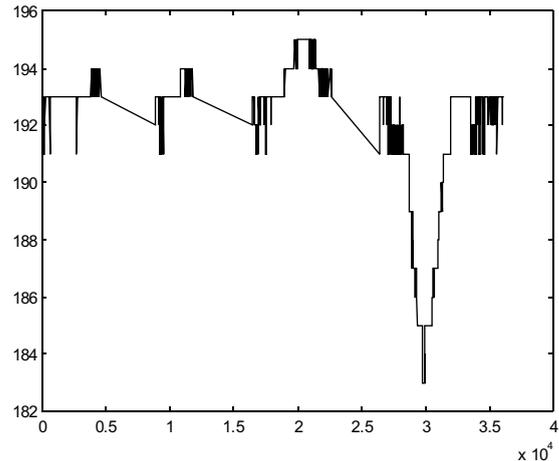


Figura 9. Posição do menisco em pixel sem pressão externa aplicada.

**CONCLUSÕES**

O trabalho mostrou que por meio do uso de ferramentas de simulação de sistemas dinâmicos é possível desenvolver um instrumento de medida de pressão intracelular, prevendo-se os erros envolvidos, no que diz respeito à dinâmica da pressão aplicada. Mostrou também que as variações de pressão em alta frequência, ou com duração próxima de 1/30 segundos, poderão ter resultados errôneos. Por sua vez, a aplicação de modelos claramente implica em conhecer as possibilidades de medida do instrumento, podendo-se obter respostas para questões como qual o comportamento do instrumento se variarmos as dimensões físicas do capilar, qual o ganho óptico necessário do microscópio, qual a potência necessária para o aquecedor, entre outras. Os resultados experimentais sugerem um maior aprofundamento no que diz respeito ao controlador do sistema. Provavelmente devem ser incluídas no projeto de automação entradas de distúrbio para que sejam verificados suas causas e como minimizar seus efeitos por meio de análise e síntese do Sistema de Controle. Finalmente, estes resultados apresentados além de serem uma contribuição para o Estado da Arte na área em questão podem servir como base para a reprodução do instrumento em várias condições de aplicação para pesquisas na Agricultura.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

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, 1998b. 3 p. (EMBRAPA-CNPDIA. Pesquisa em Andamento, 15).

BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J. D. C.; CRUVINEL, P. E.; CALBO, A. G. Control systems-based design of a plant intracellular pressure measurement instrument. In: WORLD MULTICONFERENCE ON: CIRCUITS, SYSTEMS, COMMUNICATIONS AND COMPUTERS (IEEE/WSES/IMACS)-CSCC, 3., 1999, Athens, Grécia. Csc'99: proceedings... [Athens]: World Scientific And Engineering Society, 1999. p. 6231-6236, ref.623. Editor Nikos E. Mastorakis. Dedicated to the father of fuzzy logic: L. Zadeh. 1 Cd-Rom.

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. 1998a, Uberlândia, MG. Anais... Uberlândia: UFU, 1998. 4f. CD-ROM

BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J. D. C.; CRUVINEL, P. E.; CALBO, A. G. Instrument for the measurement of vegetable plant intracellular pressure. In: HAMZA, M. H. Modelling, identification, and control. Anaheim: Acta Press, 2001. v. 1, p. 220-225. Proceedings of the IASTED International Conference, [held in] Innsbruck, Austria, February 19-22, 2001.

BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J. D. C.; CRUVINEL, P. E.; CALBO, A. G. Instrumento para medida de pressão intracelular em vegetais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FIOLOGIA VEGETAL, 8., 2001, Ilhéus. Fisiologia de plantas no novo milênio: desafios e perspectivas: anais. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal, 2001. Não-paginado, ref. 6-109. 1 CD-ROM.

BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J. D. C.; CRUVINEL, P. E.; CALBO, A. G. Novo instrumento para medida de pressão intracelular em vegetais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA-CONBEA, 29., 2000, Fortaleza. CONBEA 2000: construindo a engenharia agrícola do futuro. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 3 f. 1 CD-ROM.

BERTUCCI-NETO, V.; PESSOA, J. D. C.; CRUVINEL, P. E.; FERREIRA, E. J. Estudo para aplicação de redes neurais artificiais em um dispositivo detector de posição para medidor de pressão intracelular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAI, 5.; ESCOLA DE REDES NEURAI, 6., 2001, Rio de Janeiro. [Proceedings...] Rio de Janeiro: Conselho Nacional de Redes Neurais, 2001. 4 f. 1 CD-ROM.

BÜCHNER, K. H.; WEHNER, G.; VIRSIK, W.; ZIMMERMANN, N. U. Automatic turgor pressure recording in plant cells. Z. Naturforsch, Notes, v. 42, p. 1143-1145, 1987.

COSGROVE, D. J., DURACHKO, D. M. Automated pressure probe for measurement of water transport properties of higher plant cells. Review of Scientific Instruments, Rochester, v. 57, 2614-2619, 1986. DOEBELIN, E. O. Measurement systems. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1990.

HÜSKEN, D.; STEUDLE, E.; ZIMMERMANN, U. Pressure probe technique for measuring water relations of cells in higher plants. Plant Physiology, Minneapolis, v. 61, p.158-13, 1978.

PESSOA, J. D. C. AND CALBO, A. G., Thermoelastic pressure probe to test the cohesion theory, liquid expandability, compressibility and pressure measurements. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, Londrina, v. 11, n. 3, 129-136, 1999.

STEUDLE, E.; ZIMMERMANN, U. Hydraulische Leitfähigkeit von Valonia utricularis. Z. Naturforsch., v. 26, p. 1302-1311, 1971.

STEUDLE, E. Pressure probe techniques: basic principle and application to studies of water and solute relations at the cells, tissue, and organ level. In: SMITH, J. A. C.; GRIFFITH, H. (Ed.). Water deficits: plant responses from cell to community. [S.l.]: Bios Scientific Publishers, 1993. p. 6-36.

WEI, C.; MELVIN, T. T.; STEUDLE, E. Direct measurement of xylem pressure in leaves of intact maize plants. A test of the cohesion-tension theory taking hydraulic architecture into consideration, Plant Physiology, Minneapolis, 121, 1999a, 1191-1205.

WEI, C.; STEUDLE, E.; TYREE, T. Water ascent in plants: do ongoing controversies have a sound basis?, Trends in plant Science, Oxford, v. 4, n. 9, 372-375, Sep. 1999b,

ZIMMERMANN, U. Råde, H.; STEUDLE, E. Kontinuierlich Druckmessung in Pflanzenzellen, Naturwissenschaften, Belfast, v. 56, p. 634, 1969.

**Circular  
Técnica, 17**

Ministério da Agricultura,  
Pecuária e Abastecimento

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Instrumentação Agropecuária**  
Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741  
CEP 13560-970 - São Carlos-SP  
**Fone:** 16 274 2477  
**Fax:** 16 272 5958  
**E-mail:** sac@cnpdia.embrapa.br  
www.cnpdia.embrapa.br

**1a. edição**  
1a. impressão 2002: tiragem 300

**Comitê de  
Publicações**

**Presidente:** Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso  
**Secretária Executiva:** Janis Aparecida Baldovinnotti  
**Membros:** Dr. Odílio Benedito Garrido de Assis,  
Dr. João de Mendonça Naime,  
Dr. Rubens Bernardes Filho,  
Dr. Washington Luiz de Barros Melo  
**Membro Suplente:** Débora Marcondes B. P. Milori

**Expediente**

**Supervisor editorial:** Dr. Odílio B. Garrido de Assis  
**Revisão de texto:** Janis Aparecida Baldovinnotti  
**Tratamento das ilustrações:** Valentim Monzane  
**Editoração eletrônica:** Valentim Monzane