

Foto: Henrique Vasconi



## Grades, monitoramento de água e estações de controle de irrigação com sensores Irrigas

Adonai Gimenez Calbo<sup>1</sup>

O “sistema gasoso de controle de irrigação” foi patenteado pela Embrapa (CALBO, 2000) e é usualmente denominado por sua marca registrada, Irrigas. A essência do sistema Irrigas são seus sensores porosos de diversos tipos acoplados a sistemas de distribuição de fluxo de ar e de medição de pressão (CALBO; SILVA, 2005). Adicionalmente, o Irrigas é um sensor do tensiômetro gasoso para monitoramento e controle do estado da água e manejo de irrigação (CALBO; SILVA, 2006; HIDROSENSE, 2006).

Neste trabalho o foco é na forma como sensores Irrigas, de preferência uniformes, e fazendo parte de grades, conjuntos paralelos de novos conjuntos mediais podem ser alimentados e lidos individualmente ou em conjunto. As aplicações podem ser variadas e incluem o monitoramento da tensão de água e de altura de coluna de água em bacias hidrográficas, o monitoramento do estado da água em grades de sensores estabelecidas no perfil do solo e para leituras unificadas de sensores em uma central com transdutor de pressão, que é usada para manejo de irrigação.

### Grade de sensores

Uma grade de sensores pode ser produzida empregando-se noções de “flowboard” (CALBO, 1989) e de tensiometria a gás com a qual se pode medir tensão da água e altura de coluna de água no perfil do solo fazendo uso de sensores Irrigas. Por exemplo, uma grade de 5 x 5

x 4, 100 sensores Irrigas com tensão crítica de sorção ( $T_s$ ) 40kPa aferidos ( $\pm 2$ kPa) poderia ser alimentada por um “flowboard”, que manteria os sensores pressurizados, forçando através deles a um fluxo dado - por exemplo 10 ml min<sup>-1</sup> medido à pressão ambiente.

Nesta grade, a pressão ( $p_i$ ), medida com relação a pressão barométrica, em cada sensor é uma medida da tensão de água ( $T_i$ ), no referido ponto (CALBO; SILVA, 2006), de acordo com a equação da tensiometria a gás:

$$T_i = T_s - p_i \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $T_i$  é a tensão da água no ponto  $i$ ,  $T_s$  é a tensão crítica de sorção do Irrigas  $i$  e  $p_i$  é a pressão de ar de “equilíbrio dinâmico” no referido sensor. A leitura da pressão gasosa ( $p_i$ ) é feita em transdutor pressão de diminuto volume morto. Caso o “offset” do transdutor de pressão seja ajustado conforme a equação 1, então se tem o denominado tensímetro Irrigas.

A conexão para a leitura de pressão, tipo tensímetro, é feita em tubo de escape de PVC ou silicone com diâmetro interno da ordem 1 mm. Neste tubo, é acoplada a agulha do transdutor de pressão tensímetro Irrigas. O procedimento de leitura envolve a conexão do tensímetro ao tubo, a abertura do registro, a leitura propriamente dita e o fechamento do registro. O sistema de acoplamento em tubo é durável e pouco propenso a vazamentos.

A grade de sensores com alimentação por

<sup>1</sup>Eng. Agrônomo, Dr., Pesquisador, Embrapa Instrumentação Agropecuária, C. P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, e-mail: [adonai@cnpdia.embrapa.br](mailto:adonai@cnpdia.embrapa.br)

“flowboard” possibilita não só o acompanhamento da tensão da água por longos períodos, como também a medição de pressões positivas de água, quando o lençol freático aflora. É um sistema interessante principalmente para aplicações de monitoramento ambiental em bacias.

A denominação “flowboard”, é atribuída a sistemas no qual gás comprimido sai de um regulador de pressão e alimenta um quadro com número suficiente de restrições (capilares). O “flowboard” clássico foi descrito por Claypool e Keefer (1942) e tem sido empregado para a mistura de gases, atmosferas controladas, e como acessório para medir respiração, evolução de etileno e de outros gases produzidos pelas plantas. A maior simplicidade do presente sistema, a conexão para o sensor Irrigas e um registro para a tomada de leitura de pressão são os aspectos diferenciais da adaptação aqui descrita. Nestes sistemas o uso de restrições (capilares) nos “flowboards” não causa dificuldades, porque o ar comprimido proveniente do regulador de pressão é parcialmente desumidificado e praticamente livre de impurezas:

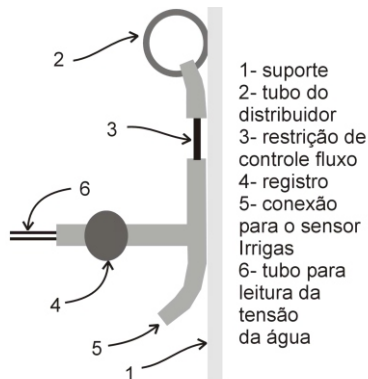


Fig. 1 - Esquema do tubo de distribuição de ar comprimido, ligado por uma restrição (capilar) de entrada a uma bifurcação, que de um lado é ligada ao sensor Irrigas e do outro ao tubo de leitura, através de um registro. A leitura da pressão é a medida da tensão da água de acordo com a equação 1.

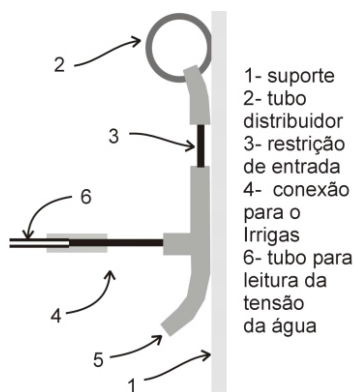


Fig. 2 - Esquema do tubo de distribuição de ar comprimido ligado por uma restrição (capilar) de entrada a uma bifurcação, acoplada de um lado ao sensor Irrigas e do outro ao tubo de leitura através da restrição de escape. A resistência da restrição de escape é igual ou maior que a de entrada. A leitura da pressão é a medida da tensão da água, de acordo com a equação 1.

(Fig. 1) podem ser substituídos por uma segunda restrição (Fig. 2), de resistência ao fluxo de ar maior ou igual à primeira. A vantagem desta substituição é diminuir o custo do sistema e proporcionar um sistema de leitura de pressão “aberto”. Esta simplificação é possível graças ao fato de pequenas diferenças de fluxo de ar através do sensor Irrigas não causarem substancial erro na leitura de pressão (CALBO; SILVA, 2006).

Nos dois “flowboards” considerados, é ideal que a pressão no tubo distribuidor seja ajustada em um valor da ordem de 4 vezes a tensão crítica de sorção do Irrigas (Ts). Isto, de acordo com a aplicação da equação de Poiseuille modificada para gases (MOORE, 1972), assegura um fluxo de gás estável através do capilar, e também através do Irrigas, com variação menor que 30%, mesmo quando a tensão da água no solo induza a conhecida pressurização do sistema Irrigas (CALBO; SILVA, 2005).

O fluxo de saída de ar no tubo “aberto” ou tubo de leitura é dependente da tensão da água no solo e na condição definida no parágrafo anterior corresponde a um fluxo de menos de 30% do fluxo de ar através da restrição de entrada, que pressuriza o sensor Irrigas respectivo. Este fluxo de ar, na restrição ligada ao tubo de leitura, diminui conforme o solo seca, em função da redução da pressão causada pelo maior escoamento de ar no respectivo sensor (Eq. 1).

Os sistemas com grade de sensores Irrigas possibilitam a leitura instantânea de cada ponto do perfil, no quadro de distribuição, porque os sensores já estão pressurizados e em equilíbrio com o estado da água no perfil do solo. Assim, é só fazer a leitura, seja no sistema da Fig. 1, seja no sistema da Fig. 2.

### Estações de controle de irrigação

Uma estação de controle de irrigação é um conjunto de sensores pontuais, Irrigas, tensiômetro, ou blocos de gesso, por exemplo, que são instalados em uma amostra representativa de um cultivo, sobre cuja irrigação se pretende controle ou simples monitoramento, no tempo. Isto é feito porque a cultura em interação com o solo, na evapotranspiração, gera, rapidamente, diferenças tridimensionais de tensão de água no solo a partir de uma situação inicial, ainda que relativamente homogênea, que costuma se seguir à irrigação. O que se quer em geral de uma estação de controle de irrigação, portanto, é uma medida de tendência central para a tensão da água no solo que seja valiosa para o manejo de irrigação

Caso os sensores de tensão de água da estação de controle de irrigação sejam todos independentes, então, no caso particular do Irrigas o tratamento a ser dispensado pode ser o já utilizado para a grade de sensores, ou em outras abordagens de estações de controle de irrigação consideradas por Calbo e Silva (2005). Por outro lado, caso os sensores estejam de alguma forma conectados entre si, por exemplo, em conexão paralela (HIDROSENSE, 2006) ou em conexão medial, como será descrito adiante, então a interferência da resposta de um sensor sobre o outro precisa ser considerada, para que se tenha idéia do significado da leitura que se faz na central, da estação de controle de irrigação.

No tratamento das estações de controle de irrigação, como no caso anterior considerar-se-á que os sensores Irrigas são todos similares, com tensão crítica de

Alternativamente, os registros no “flowboard”

sorção  $T_s = T_s$  e que na média o fluxo de ar forçado através destes sensores seja, por exemplo, da ordem de  $10 \text{ ml min}^{-1}$ .

**Sistema medial para leitura de tensão da água com sensores Irrigas**

Neste sistema o objetivo é que a central com transdutor de pressão faça uma média da tensão de água dos diferentes sensores que compõem a estação de controle medial, que é constituída por um compressor, um regulador de pressão e o transdutor de pressão de leitura. No sistema medial ilustrado na Fig. 3 pode-se, de acordo com Calbo e Silva (2006) demonstrar que no caso mais usado, isto é sem correção para a compressibilidade dos gases, a pressão média ( $p_m$ ) lida é dada pela equação 2:

$$p_m = (p_1 + p_2 \dots + p_n) / n = \sum_{i=1}^{i=n} (p_i / n) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde  $p_1, p_2, \dots$  e  $p_n$  são respectivamente as pressões de equilíbrio em cada sensor Irrigas, de acordo com a tensão da água a que estão submetidos. Consequentemente,  $p_i$  é a pressão no sensor Irrigas  $i$ . Caso todos os sensores Irrigas estejam submetidos a tensões de água de módulo inferior a  $T_s$ , então, por conseguinte, a tensão da água média ( $T_m$ ) no transdutor de pressão central pode ser calculada pela expressão:

$$T_m = T_{s_m} - p_m \quad \text{Eq. 3}$$

onde o subscrito  $m$  representa o valor médio. Nos casos comuns de uso do Irrigas,  $T_{s_m}$  e  $T_{s_i}$  são valores próximos, visto que se recomenda que todos os sensores Irrigas utilizados, em um sistema deste tipo, tenham a mesma tensão crítica de sorção  $T_s$  e as mesmas características físicas - mesmo fabricante e modelo.

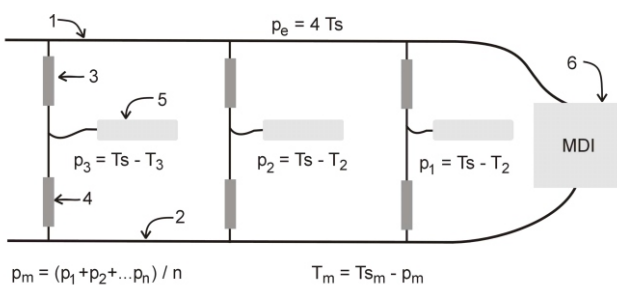


Fig. 3 - Esquema do sistema medial de leitura da tensão média ( $T_m$ ) da água no solo com sensores Irrigas. 1- linha de entrada de ar na pressão  $p_e$ , 2- linha de leitura com a pressão de ar média ( $p_m$ ) dos sensores, 3 - restrição ou capilar de entrada, 4 - restrição de saída, 5 - sensor Irrigas instalado no solo, 6- Instrumento com fonte de ar de pressão ajustada e leitor de pressão,  $T_s$  - tensão crítica de sorção,  $p_1, p_2 \dots p_n$  pressões de ar nos respectivos sensores Irrigas,  $T_1, T_2 \dots T_n$  as tensões de água do solo na vizinhança de cada sensor Irrigas.

Idealmente, a estimativa de  $T_s$  empregada para os sensores Irrigas, nestas aplicações, deve ser aquela obtida com o sensor submetido ao fluxo de ar de trabalho. Caso  $T_s$  seja estimado usando um fluxo diferente, haverá a introdução de um pequeno erro sistemático na leitura da tensão da água no solo.

No sistema da Fig. 3, não fica evidente, porém, que na prática o agricultor pode conferir a tensão de cada sensor Irrigas. Para esta verificação, desconecta-se o tubo de leitura por alguns instantes, conecta-se o tensímetro e mede-se a pressão no tubo Irrigas em consideração. A tensão da água do solo neste ponto é então calculada com a equação 1. Deste modo, verifica-se possíveis problemas locais do cultivo, e se confere se houve danos aos sensores ou tubos durante os tratos culturais. Após a

medição de aferição o tubo de leitura é novamente conectado. Evidentemente, no sistema medial a idéia é considerar a leitura da central e estas aferições são importantes, tão somente, para a verificação de que todos os sensores estão instalados e em situações representativas.

A precisão da estimativa da tensão da água do solo pelo método medial apresenta pequenas restrições dadas pelos seguintes fatores:

1- O ar é compressível e, por isto, de acordo com a equação de Poiseuille modificada para gases (MOORE, 1972), possibilita mais entrada de ar dos sensores Irrigas em solo úmido (pressão maior), do que proporcionalmente escapa em direção aos sensores Irrigas em solo mais seco (pressão menor). Esta distorção é tanto maior quanto maior for a tensão crítica de sorção ( $T_s$ ) dos sensores Irrigas. Este é um fator que causa uma pequena subestimativa da tensão da água e que pode ser relevante quando a tensão da água no solo ao redor de cada sensor Irrigas é bem diferente da tensão média da água no solo.

2- Quando a tensão da água em um ou mais sensores Irrigas supera  $T_s$ , qualquer subsequente aumento da tensão da água ao redor deste sensor não é mais percebida, isto é não causa redução de pressão detectável. Assim, como o referido sensor Irrigas não detecta variações da tensão da água acima do seu limite superior  $T_s$ , então, como consequência há uma subestimativa da tensão média da água no solo causada pela exposição deste sensor a uma tensão de água maior que  $T_s$ .

Para o primeiro tipo de erro pode-se desenvolver um sistema de equações mais exato, e complexo, com o emprego da equação de Poiseuille modificada para gases (MOORE, 1972). No entanto, o benefício do uso de uma equação não linear, mais exata, em geral é diminuto para ser considerado valioso em aplicações de manejo de irrigação, nas quais a precisão da leitura média não é um requerimento muito valorizado. Sobre o erro do tipo dois a solução é mais simples e envolve instalar adequadamente os sensores Irrigas e ajustar o "setpoint", preferencialmente, em valor abaixo de 80% de  $T_s$ , para que a possibilidade de ocorrência de sensores em solo sob tensão maior que  $T_s$  seja diminuta.

**Considerações sobre a leitura de sensores Irrigas conectados em paralelo**

De acordo com as condições preliminares se houverem seis sensores em paralelo com fluxo médio de  $10 \text{ ml min}^{-1}$  por sensor, então o fluxo total aplicado pelo instrumento constituído de compressor regulador de fluxo e transdutor de pressão, será (Fig. 4)  $60 \text{ ml min}^{-1}$ . O fluxo forçado de ar através de cada sensor Irrigas, no entanto, dependerá do ambiente, em alguns em solo úmido o fluxo será nulo enquanto em outros em solo já mais seco fluxo será muito maior que a média.

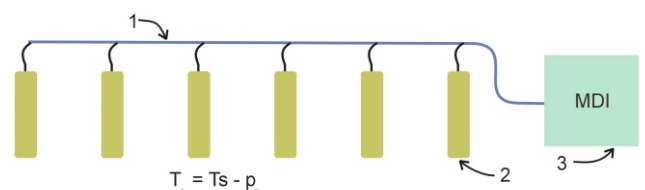


Fig. 4 - Esquema do sistema paralelo com um número determinado de sensores Irrigas (2) conectados ao tubo (1) e ao instrumento de leitura (3), O instrumento de leitura contém um dispositivo de ajuste de um fluxo de ar constante e um transdutor para medir a pressão da linha.  $T_i$  tensão de água estimada no sistema paralelo,  $T_s$  tensão crítica dos sensores Irrigas, todos iguais, e  $p_i$  é a pressão lida.



Uma segunda forma complementar e útil de expressar a pressão média percebida por sensores Irrigas é através da equação 4, que é obtida substituindo-se a equação 1 na equação 2.

$$p_m = \sum_{i=1}^{i=n} (T_{si} - T_i) \quad \text{Eq. 4}$$

Infelizmente na leitura de sensores Irrigas conectados em paralelo a equação 2 e a equação 4 não representam a pressão lida no sistema paralelo. Isto ocorre porque o fluxo através de um dado sensor Irrigas é nulo sempre que a diferença  $T_{si} - T_i$  é maior que a pressão lida, no sistema paralelo. Assim a leitura dos sensores Irrigas em um sistema paralelo é uma medida de tendência central, que tanto se mais desvia da média em direção pressões menores, quanto menor for o fluxo de ar total de ar aplicado. Em outras palavras o sistema paralelo gera leituras de tensão da água no solo de acordo com a equação 1, tanto mais próximas do sensor em solo mais seco, quanto menor for o fluxo total de ar utilizado.

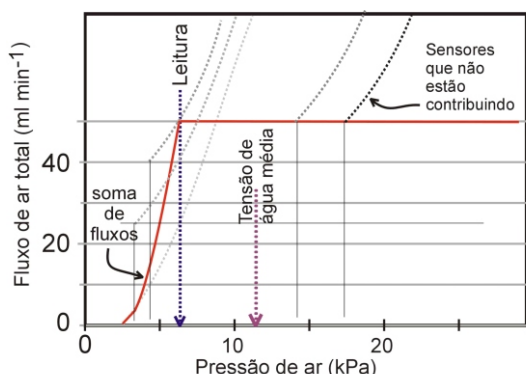


Fig. 5 - Ilustração da pressão resultante em sensores Irrigas conectados em paralelo (Fig. 4), todos com tensão crítica  $T_{si}$  igual a  $T_s$ , e instalados no solo.  $T_i$  é a tensão de água do solo ao redor de cada sensor. As curvas de contribuição de fluxo de ar, tracejadas, iniciam-se nos pontos em que a pressão do ar se torna igual a  $T_{si} - T_i$  para o respectivo Irrigas. A curva de fluxo, traço cheio, é a soma das contribuições dos fluxos através dos sensores, nos quais o ar está fluindo. A leitura de pressão é o valor no lugar geométrico da curva de soma de fluxos versus pressão, em que o fluxo de ar através dos sensores se torna igual ao fluxo insuflado pelo instrumento.

A subestimativa da pressão de média, na leitura de sensores Irrigas conectados em paralelo, decorre do fato de que a leitura pressão é dada exatamente pela contribuição de fluxo de ar que passa através de cada um dos sensores Irrigas que estiverem com a diferença  $T_{si} - T_i$  menor que a pressão de ar no sistema. Também não há passagem de ar nos sensores Irrigas que estejam com diferença  $T_{si} - T_i$  maior que a pressão de ar no sistema. A natureza quantitativa da resposta dos sensores Irrigas em paralelo conforme a Fig. 5, possibilita inclusive o estabelecimento do teorema dos sensores Irrigas conectados em paralelo segundo o qual:

*"A pressão resultante quando um fluxo de ar é forçado através de um número de sensores Irrigas conectados em paralelo (Fig. 4), em situação estacionária, é o lugar geométrico no qual a soma dos fluxos de ar parciais, que atravessam cada um dos sensores Irrigas*

*que estiverem com diferença  $T_{si} - T_i$  menor ou igual à pressão resultante seja igual ao fluxo que atravessa todos os sensores em paralelo."*

A decorrência mais simples do teorema dos sensores Irrigas em paralelo é que quando o fluxo tende a zero a pressão resultante ou leitura tende à menor diferença  $T_{si} - T_i$ .

### Considerações finais

Os sistemas de grade de sensores Irrigas e de estações de controle de irrigação aqui consideradas, todas fazem uso de antigos fundamentos, que ao longo do tempo foram utilizados para a fabricação de diferentes "flowboards" usados principalmente em biologia. Quanto aos usos os sistemas de grade, parecem mais propícios para aplicações de monitoramento do ambiente no qual se quer saber o estado da água e se este é tensão de água ou é uma altura de lençol freático, em uma determinada posição e em um dado momento. O sistema de estação de controle medial, é importante para o monitoramento baseado em valores médios da tensão da água no solo. O sistema de estação de irrigação em paralelo, também voltado para manejo de irrigação, tem as mesmas características do sistema anterior, exceto que é mais simples e que as estimativas de tensão de água são em grande parte governadas pelos sensores Irrigas com maior tensão de água. Trata-se de um sistema menos robusto que pode ser utilizado por aqueles que temem sofrer perdas, causadas pela submissão de algumas plantas a tensões de água elevadas, maiores que  $T_s$ . Em suma cada um dos sistemas descritos pode ser valioso em aplicações de monitoramento de água e no manejo de irrigação em situações específicas de aplicações ambientais e agrícolas com vantagens e limitações.

### Referências

- CALBO, A.G. Adaptação de um fluxcentro para estudo de trocas gasosas e um método de aferição de capilares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.6, p.164-179, 1989.
- CALBO, A.G. **Sistema de controle gasoso de irrigação baseado na determinação de umidade do solo por meio de cápsulas porosas**. Patente BR PI 0004264-1, 2000.
- CALBO, A. G.; SILVA, W. L. de C e. Sistema irrigas para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2005. 174 p.
- CALBO, A.G.; SILVA, W.L.C. Gaseous irrigation control system description and physical tests for performance assessment. **Bragantia**, v. 65, v. 3, p. 501-510, 2006.
- CLAYPOOL, L.L.; KEEFER, R.M. A colorimetric method for CO2 determination. **Proceedings of The American Society for Horticultural Sciences**, v. 40, p. 177-186, 1942.
- HIDROSENSE. **MDI**. Jundiaí: Hidrosense, 2006. Disponível em: <www.hidrosense.com.br/MDI.htm>. Acesso em: 08 dez. 2006.
- MOORE, W.J. **Physical Chemistry**. 4. Ed. Sydney: Prentice-hall, , 1972. 977 p.

### Comunicado Técnico, 73

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 3374 2477  
**Fax:** 16 3372 5958  
**E-mail:** sac@cnpdia.embrapa.br  
 www.cnpdia.embrapa.br

**1a. edição**  
 1a. impressão 2006: tiragem 300

### Comitê de Publicações

**Presidente:** Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz  
**Membros:** Dra. Débora Marcondes B. P. Milori,  
 Dr. João de Mendonça Naime,  
 Dr. Washington Luiz de Barros Melo  
 Valéria de Fátima Cardoso

**Membro Suplente:** Dr. Paulo S. P. Herrmann Junior

### Expediente

**Revisor editorial:** Dr. Victor Bertucci Neto  
**Normalização bibliográfica:** Valéria de Fátima Cardoso  
**Tratamento das ilustrações:** Valentim Monzane  
**Foto da capa:** Henrique Vasconi  
**Editoração eletrônica:** Valentim Monzane