

## Sensores IGstat para controle da irrigação: construção, aferição e sistema de controle





ISSN 1518-7179

Dezembro, 2023

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

BOLETIM DE PESQUISA  
E DESENVOLVIMENTO  
46

**Sensores IGstat para controle da irrigação:  
construção, aferição e sistema de controle**

*Carlos Manoel Pedro Vaz  
Luiz Henrique Basso  
André Torre Neto  
Nicoly Javaroti Plaine  
Carlos Ignácio D'Alkaine  
Luiz Fernando Porto*

*Embrapa Instrumentação  
São Carlos, SP  
2023*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Instrumentação**  
Rua XV de Novembro, 1452  
Caixa Postal 741  
CEP 13560-970 São Carlos, SP  
Fone: (16) 2107 2800  
Fax: (16) 2107 2902  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente  
*Daniel Souza Corrêa*

Membros  
*Elaine Cristina Paris*  
*Maria Alice Martins*  
*Cristiane Sanchez Farinas*  
*Cinthia Cabral da Costa*  
*Carlos Renato Marmo*  
*Paulo Renato Orlandi Lasso*  
*Maria do Socorro Gonçalves de Souza Monzane*

Editoração eletrônica e  
tratamento das ilustrações  
*Valentim Monzane*

Foto da capa  
*Pitaya Tech Irrigação Eficiente Indústria*  
*Comércio Ltda*

**1ª edição**  
1ª impressão (2023): 100 exemplares

**Todos os direitos reservados**

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

**Dados internacionais de Catalogação na publicação (CIP)**

Embrapa Instrumentação

---

Sensores IGstat para controle da irrigação: construção, aferição e sistema de controle / Carlos Manoel Pedro Vaz, Luiz Henrique Bassoi, André Torre Neto, Nicoló Javaroti Plaine, Carlos Ignácio D'Alkaine, Luiz Fernando Porto. – São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2023.  
PDF (19 p.). : il. ; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Instrumentação, ISSN 1518-7179; 46).

1. Instrumentação. 2. Irrigação por limiar. 3. Microesferas de vidro. 4. Padronização. 5. Sensor. I. Vaz, Carlos Manoel Pedro. II. Bassoi, Luiz Henrique. III. Torre Neto, André. IV. Plaine, Nicoló Javaroti. V. D'Alkaine, Carlos Inácio. VI. Porto, Luiz Fernando. VII. Título. III. Série.

## Sumário

---

Resumo.....	5
Abstract.....	7
Introdução.....	9
Material e Métodos.....	11
Descrição do sensor IGstat e equipamento.....	11
Método e equipamento para a aferição da PB.....	12
Avaliação da tecnologia na irrigação por limiar.....	16
Resultados e Discussão.....	16
Conclusões .....	17
Agradecimentos.....	17
Referências .....	17



# Sensores IGstat para controle da irrigação: construção, aferição e sistema de controle

Carlos Manoel Pedro Vaz<sup>1</sup>

Luiz Henrique Bassoi<sup>2</sup>

André Torre Neto<sup>3</sup>

Nicolly Javaroti Plaine<sup>4</sup>

Carlos Ignácio D'Alkaine<sup>5</sup>

Luiz Fernando Porto<sup>6</sup>

**Resumo** - Sensores de água no solo são importantes ferramentas para o manejo da irrigação e em outras aplicações. Para isso, há dois parâmetros relevantes, a umidade ( $\theta$ ) e o potencial matricial da água no solo ( $\psi$ ). Para a medida da umidade do solo há um grande número de sensores comerciais cobrindo toda a faixa de medida, de solo seco a saturado, diferentes tipos e condições de solo. Já os sensores de  $\psi$  são mais limitados em termos de faixa de operação, custo, manutenção e disponibilidade comercial. Este documento apresenta o modo de funcionamento, construção e de medida do sensor IGstat, desenvolvido e patentado pela Embrapa, para utilização no controle da irrigação por limiar de  $\psi$ . O sensor IGstat é formado por uma cápsula porosa de alta pressão de borbulhamento (PB), um núcleo de partículas de microesferas de vidro e duas mangueiras para entrada e saída do ar. Foi estabelecida uma relação experimental entre o diâmetro médio das microesferas de vidro e a pressão de borbulhamento a qual facilita a construção dos sensores IGstat em diferentes faixas de PB. Essas faixas de medição são usadas para acionar a irrigação quando o solo atinge valores específicos de limiares para cada cultura. A relação experimental entre o diâmetro médio das microesferas de vidro e a pressão de borbulhamento foi estabelecida em  $PB = 338,46 \text{ diâmetro}^{-0,817}$ . Para a aferição da PB dos sensores foi desenvolvida uma plataforma pneumática para testes e aferição, possibilitando a medida de conjuntos de 10 sensores por vez, de forma totalmente automática. O trabalho apresenta a plataforma de aferição desenvolvida, bem como o procedimento estabelecido para a aferição dos sensores, e uma avaliação do desempenho de sensores com diferentes PBs utilizando um equipamento simples e de baixo custo para o acionamento da irrigação pela resposta do sensor IGstat.

**Termos de indexação:** Irrigação por limiar, Sensor, Microesferas de vidro, Instrumentação, Padronização

---

<sup>1</sup> Físico, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

<sup>3</sup> Engenheiro Elétrico, doutor em Física, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

<sup>4</sup> Graduada em Engenharia Agrônômica, aluna do Centro Universitário Central Paulista, São Carlos, SP.

<sup>5</sup> Engenheiro Agrônomo, bolsista Fapesp, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP.

<sup>6</sup> Engenheiro Mecânico, pesquisador da Tecnicer Tecnologia Cerâmica, São Carlos, SP.





## IGstat sensors for irrigation control: construction, measurement and control system

**Abstract** - Soil water sensors are important tools for irrigation management and other applications. To this end, there are two relevant parameters, the soil water content ( $\theta$ ) and the soil water matrix potential ( $\psi$ ). To measure  $\theta$ , there are a large number of commercial sensors covering the entire measurement range from dry to saturated soil, different soil types and conditions. Sensors for  $\psi$  are more limited in terms of operational range, cost, maintenance and commercial availability. This document presents the operation, construction and measurement mode of the IGstat sensor, developed and patented by Embrapa, for use in irrigation control based on  $\psi$  threshold. The IGstat sensor consist of a high bubbling pressure porous cup (PB), a glass microsphere core and two hoses for air inlet and outlet. To facilitate the construction of IGstat sensors with different PB values, to trigger irrigation when the soil reaches specific threshold values for each crop, an experimental relationship was established between the average diameter of the glass microspheres and the sensor bubbling pressure ( $PB = 338.46 \text{ diameter}^{-0.817}$ ). To measure the sensors PB, a pneumatic platform for tests and measurements was developed, enabling the measurement 10 sensors at a time in a fully automatic way. The work presents the developed platform, as well as the established procedure for measuring sensors and an evaluation of the performance of sensors with different PBs using a simple and low-cost equipment to trigger irrigation by the response of the IGstat sensor.

**Indexing Terms:** Threshold irrigation, Sensor, Glass microspheres, Instrumentation, Standardization



## Introdução

---

Um dos principais desafios do século é alimentar uma população crescente frente às mudanças climáticas e às exigências de uma produção agrícola e pecuária sustentável (Schlor et al., 2015). Para tanto, a irrigação tem um papel importante para o alcance dessas metas. Nos últimos 50 anos as áreas irrigadas praticamente dobraram, sendo atualmente de cerca de 24% da área cultivada com cereais e responsável por 40% da produção mundial (Jagermeyr et al., 2015). A irrigação é o principal setor de consumo de água, responsável por cerca de 70% do total e a ampliação no uso da água e da terra praticamente atingiram seus limites mundialmente (Steffen et al., 2015; Gerten et al., 2013).

O Brasil possui cerca de 8,2 milhões de hectares irrigados, o que representa 10% de toda área nacional utilizada na agropecuária (ANA, 2021). Entretanto, o uso excessivo de água para irrigação pode levar a uma super-exploração dos recursos hídricos e deterioração do ambiente (Turner et al., 2019). O uso técnico e na medida certa da água de irrigação traz benefícios como produtos de qualidade e a racionalização dos insumos (água, energia e fertilizantes), levando a um aumento na produtividade da água (razão entre a quantidade de água de irrigação utilizada e a produtividade da cultura). Assim, é importante se buscar métodos de irrigação com foco no aumento da produtividade da água de irrigação e conservação dos recursos hídricos (Zheng et al., 2013).

Em geral, procedimentos de irrigação baseiam-se em avaliações da demanda hídrica das culturas, em monitoramentos do status da água no solo com sensores, e em informações climáticas (Thompson et al., 2006). Na questão do monitoramento da água no solo, existem 2 parâmetros relevantes utilizados, o potencial da água no solo que está relacionado à energia da água no solo ou a força com que a água está retida no solo, e a umidade volumétrica ( $\theta$ ) ou gravimétrica do solo ( $u$ ) que estão relacionados às proporções do volume ou massa da água no solo. A energia potencial da água no solo é formada por diversos componentes de potencial, como o gravitacional, matricial, de pressão e osmótico. O potencial matricial ( $\psi$ ) ocorre quando o solo está parcialmente saturado, sendo, portanto, o componente da tensão de água de maior interesse na irrigação, uma vez que o componente de pressão ocorre somente em solo saturado e alagado, o osmótico é em geral muito pequeno e o gravitacional de fácil determinação. De um modo prático, a medida de  $\psi$  no solo pode indicar o momento de se irrigar, uma vez que há na literatura valores dos limiares de  $\psi$  para a irrigação da maioria das culturas (Taylor, 1965; Marouelli et al., 1996). Assim, sensores de  $\psi$  são de extrema importância para uma irrigação eficiente (Smith et al., 1996), bem como para outras aplicações práticas e estudos de processos fundamentais em agricultura, hidrologia e ecologia (Wang et al., 2007; Zhang et al., 2019; Van Lier, 2020).

Há no mercado um grande número de dispositivos sensores de medida da umidade volumétrica do solo cobrindo toda a faixa de medida (solo seco a saturado), diferentes tipos de solo e condições (laboratório, campo, custo, precisão) (Vaz et al., 2013). Já os sensores de potencial matricial da água no solo são mais limitados em termos de faixa de operação, custo, manutenção e disponibilidade comercial.

Os dispositivos de medida de  $\psi$  mais comuns são os tensiômetros com cápsula de cerâmica porosa com a medida da tensão (pressão negativa) por vacuômetro de mercúrio, mecânico ou eletrônico (Marouelli, 2008). Os tensiômetros têm boa precisão e medem diretamente o potencial matricial, mas apresentam alguns inconvenientes como a ocorrência de cavitação ou embolia da água (formação de bolhas de ar) no interior do tensiômetro, quando a tensão atinge o valor da pressão barométrica. Nesse caso, tensiômetros comuns perdem suas funcionalidades, havendo a necessidade do seu preenchimento com água e estabelecimento de novo vácuo no sistema.

Para solucionar esse problema, foram desenvolvidos tensiômetros preenchidos com uma solução polimérica que ampliam a faixa de utilização, de zero até valores próximos ao ponto de murcha permanente, que é de -1500 kPa (Ploeg et al., 2010). Entretanto os tensiômetros com polímero são de alto custo dificultando a sua aplicação de uma forma mais ampla na irrigação comercial.

Há outros sensores comerciais de tensão da água no solo como os de medida da resistividade elétrica em bloco poroso de gesso ou outro material poroso, como é o caso do sensor Watermark (Irrrometer, EUA). Esses dispositivos, apesar de não apresentarem problemas de cavitação, são afetados por variações da temperatura e da salinidade do solo, além de perda de eficiência com o tempo de uso (Mota et al., 2018). Há ainda outros tipos de sensores para a medida de  $\psi$ , como os de medida da dissipação de calor (Flint et al., 2002; Matile et al., 2013) e de propriedades dielétricas (Malazian et al., 2011) em blocos porosos em equilíbrio com o solo. Entretanto, esses dispositivos apresentam limitações como necessidade de calibrações e a aplicação de funções para corrigir variações de resposta dos sensores (devido à variabilidade entre sensores), correções para variações de temperatura, dentre outras.

Por esses motivos, ainda há grande interesse e demanda no desenvolvimento de novos sistemas de medida de  $\psi$  para irrigação no campo e em estufas, buscando-se sensores/dispositivos/equipamentos de custo acessível, amplas faixas de medida, não ocorrência de cavitação e consequente redução de ações de manutenção como ocorre nos tensiômetros comuns, boa precisão de medida e baixa influência de fatores como temperatura e salinidade, dentre outros aspectos.

Visando contribuir com o manejo da irrigação pelo uso de sensores, a Embrapa desenvolveu as tecnologias dos sensores Irrigás (Calbo, 2000) e IGstat (Calbo, et al., 2013). As duas tecnologias são constituídas por uma cerâmica externa, uma cavidade interna e mangueiras, onde é aplicada uma pressão de ar. A diferença é que no sensor IGstat parte da cavidade interna é preenchida por microesferas de vidro de granulometria conhecida. O princípio de funcionamento é que quando o solo está úmido, o ar aplicado com uma pequena pressão não flui no sensor, mas quando o solo seca para uma tensão de água equivalente à pressão de borbulhamento do sensor, o ar permeia o sensor e a consequente redução da pressão de ar pode acionar uma bomba de irrigação. Assim, esses 2 sensores podem ser utilizados no manejo da irrigação por limiar. A principal diferença entre essas 2 tecnologias é que o núcleo do sensor IGstat é composto de material particulado não-sinterizado (microesferas de vidro) facilitando a sua construção e padronização. Além disso, no IGstat, o ar passante é direcionado para a mangueira de saída, podendo acionar outros dispositivos como por exemplo sistemas de atmogotejamento (Calbo et al., 2013).

O sensor Irrigás vem sendo utilizado comercialmente (<https://www.hidrosense.com.br/controle-de-irrigacao/controlador-autonomo-de-irrigacao-mri>) com ótima aceitação e desempenho (Wamser et al., 2021) e o sensor IGstat está em fase de desenvolvimento dos seus produtos pelas empresas licenciadas (<https://pitayairrigacao.com.br/>), instalação de unidades de demonstração, realização de testes e avaliações de desempenho em estufas e no campo e início de comercialização.

O objetivo desse trabalho é apresentar os conceitos básicos do sensor IGstat, da sua instrumentação de medida, uma bancada de testes e controle de qualidade, e resultados de sensores com diferentes faixas de resposta.

## Materiais e Métodos

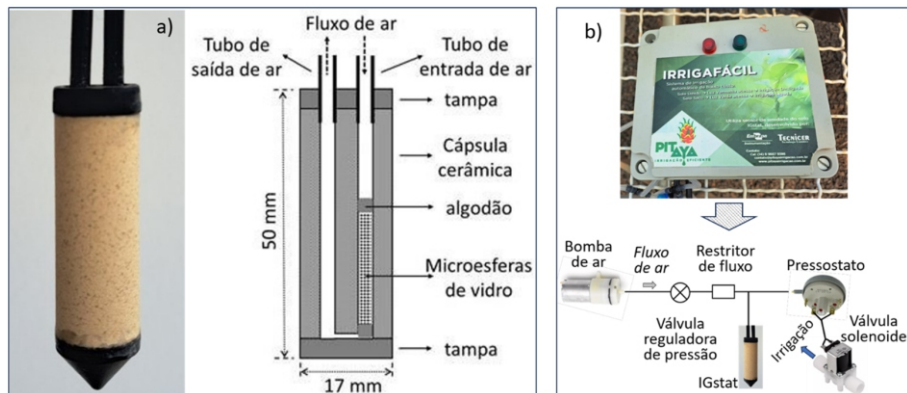
---

### *Descrição do sensor IGstat e equipamento*

O sensor IGstat é composto de uma cerâmica externa, com pressão de borbulhamento de ar-PB (pressão mínima de ar aplicada na cápsula saturada, na qual o ar começa a borbulhar através de seus poros) maior que a PB do núcleo do sensor (microesferas de vidro). Diferentes valores de PB podem ser obtidos mudando-se a granulometria das microesferas de vidro.

Quando o solo está úmido e é aplicada uma pressão menor que a de PB das microesferas de vidro, não ocorre fluxo de ar, ou seja, a pressão é máxima na tubulação de entrada do sensor. Quando o solo está seco com um valor de  $\psi$  igual ou maior que a PB do sensor, ocorre fluxo de ar na tubulação do sensor, com consequente diminuição da pressão na tubulação de entrada. A Figura 1a

apresenta uma visão geral do sensor com a cerâmica externa, as tampas de vedação e os tubos de plástico para entrada e saída do ar, e um corte longitudinal evidenciando as partes internas do sensor com a localização das microesferas de vidro.



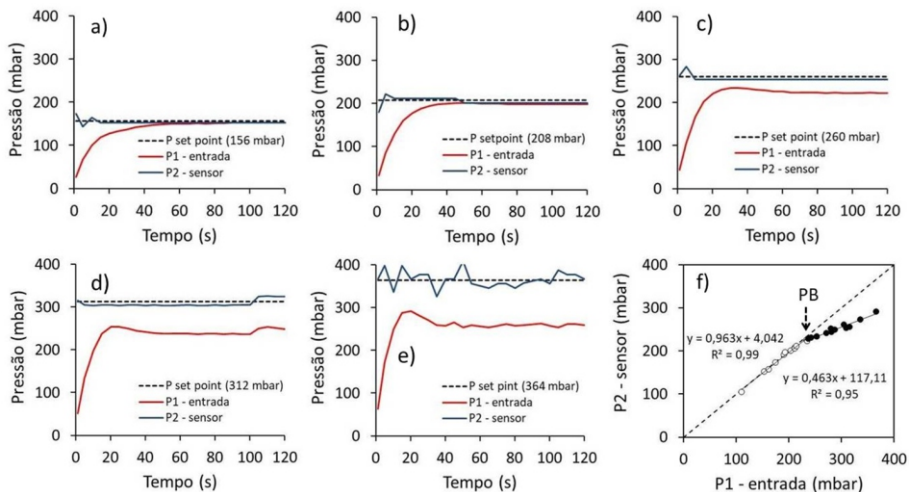
**Figura 1.** Sensor IGstat com detalhes das partes internas (a) e equipamento (Irrigafácil) utilizado para o acionamento da irrigação (b).

Com o sensor IGstat é possível se medir  $\psi$  até o valor da PB do sensor (Calbo et al., 2013) e a faixa de operação é controlada pelo tamanho dos poros que é definido pela granulometria das microesferas de vidro. Entretanto, a sua aplicação mais simples e direta é no controle da irrigação por limiar, ou seja, para o acionamento da irrigação, sempre que o solo atingir o valor da PB do sensor. Nesse caso, pode-se utilizar uma instrumentação muito simples para o acionamento da irrigação, com uma bomba de ar do tipo das utilizadas em aquário, um pressostato do tipo dos utilizados em máquinas de lavar roupa, e válvula solenoide para acionamento da bomba de irrigação (Fig. 1b). O encerramento da irrigação é realizado também de forma automática, quando a água atinge o sensor e a pressão na tubulação de entrada aumenta novamente para o nível da pressão de entrada e o pressostato comanda a válvula para desligamento da bomba de irrigação.

### *Método e equipamento para a aferição da PB*

O método padrão utilizado para a determinação da PB de sensores IGstat consiste na aplicação de valores crescentes de pressões de entrada no sensor, medindo-se a pressão final, após o equilíbrio para cada valor de pressão aplicada (método estático), para pressões variando de cerca de 60% até 140% da PB. Posteriormente constrói-se um gráfico da pressão aplicada ( $P_1$ ) versus a pressão final de equilíbrio ( $P_2$ ) e a PB é determinada por um ajuste linear dos pontos onde a pressão entrada é maior que a pressão no sensor, ou seja, quando há borbulhamento e perda de pressão na tubulação. A Figura 2 mostra

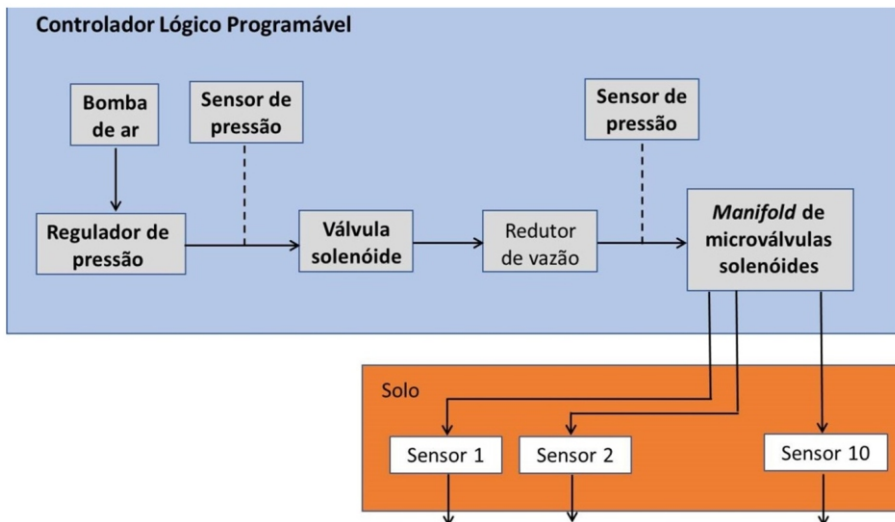
um exemplo típico do procedimento de determinação da PB para um sensor com microesferas de vidro de granulometria de 32-38  $\mu\text{m}$ . A pressão de set point é o valor planejado da pressão de entrada, P1 a pressão efetivamente aplicada e P2 a pressão medida no sensor. Em a) e b) as pressões de entrada de ar (P1) são menores que a PB do sensor (P2) e assim P2 se iguala à P1 após cerca de 60 segundos e não há borbulhamento (perda de pressão). Em c), d), e) as pressões no sensor (P2) estabilizam para valores menores que a pressão de entrada (P1) indicando o borbulhamento (perda de pressão). Na Fig. 2f observa-se o resultado gráfico das pressões P2 no equilíbrio para diversos valores de P1, com a indicação do valor de P1 onde o borbulhamento se inicia, o qual é obtido pelo ajuste linear dos pontos com  $P1 > PB$ .



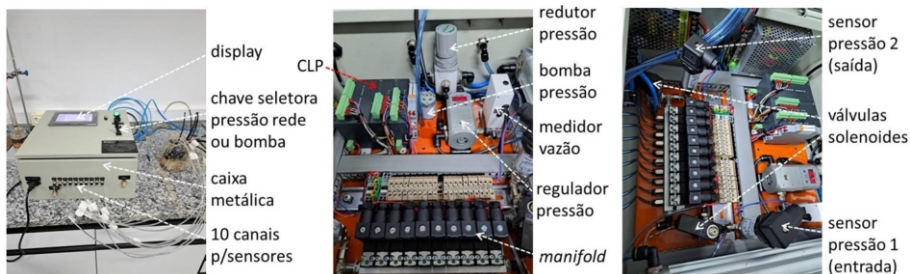
**Figura 2.** Exemplo de medida da PB de um sensor IGstat com granulometria entre 32 e 38  $\mu\text{m}$ , com aplicação de pressões de entrada (P1) variando entre 156 e 364 mbar, e medida da pressão no sensor (P2) em intervalos de 5s por 120s. Em f) são apresentados resultados para um conjunto maior de dados e o processo de identificação e determinação da PB.

Para aferir de forma automática a PB dos sensores foi desenvolvido um equipamento denominado Painel Pneumático para Aferição de Sensores IGstat controlado por CLP (Controlador Lógico Programável), cuja configuração geral é mostrada na Figura 3. A visão geral externa (caixa e display) e interna (módulos de controle e medida) é apresentada na Figura 4. Possui tela sensível ao toque para a programação dos parâmetros de medida, medidor de vazão, regulador de pressão, válvulas solenoides, 2 sensores de pressão, e *manifold* com 10 válvulas solenoides. O equipamento permite a determinação da PB de conjuntos de 10 sensores por vez. Para tanto, define-se no ajuste de parâmetros do painel, a PB esperada do sensor, a faixa de variação percentual de P1 (p. ex. entre 60% e 140%) e o tempo de equilíbrio. As

medidas são realizadas sequencialmente no canal 1 a 10 e as medidas são mostradas no display durante a aquisição dos dados e armazenadas em arquivo xls em um pen-drive, para posterior processamento dos dados (como feito na Fig. 2f) e obtenção dos valores de PB dos sensores.



**Figura 3.** Diagrama de blocos do equipamento para medidas automáticas com os sensores IGstat.

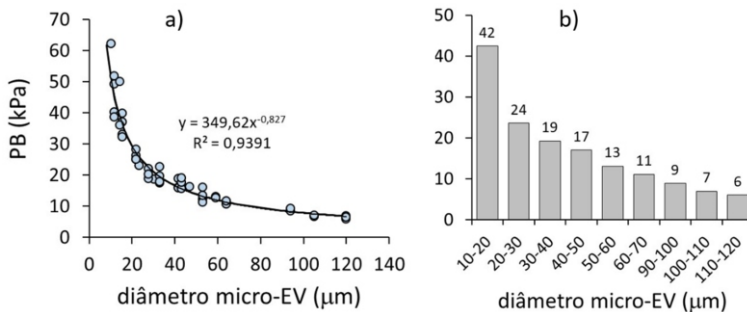


**Figura 4.** Fotos da parte externa e interna do Painel Pneumático para Aferição de Sensores IGstat.

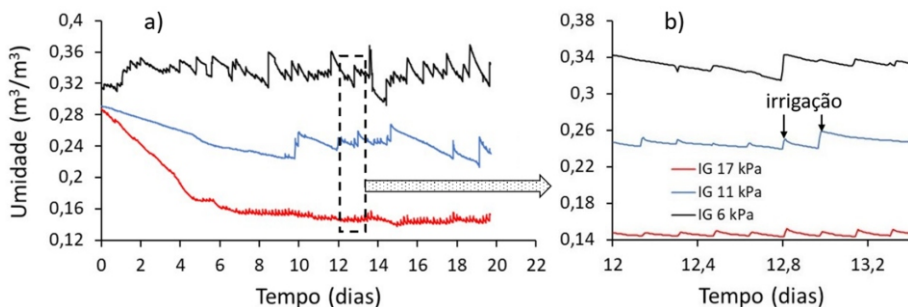
O equipamento foi utilizado para a determinação da PB de um grande número de sensores produzidos com diferentes frações granulométrica de microesferas de vidro, variando de 8,5-12  $\mu\text{m}$  a 100-200  $\mu\text{m}$ , permitindo estabelecer uma correlação experimental entre a granulometria e PB, para uso como referência para a construção de sensores IGstat com a PB desejada, para as diferentes demandas das culturas irrigadas em termos de limiar de irrigação.



O resultado do experimento de controle da irrigação em vasos com a reposição da água evaporada no solo para os limiares de 6, 11 e 17 kPa é mostrado na Figura 7a) e em 7b) um detalhe para um período de cerca de 1 dia evidenciando os picos de aumento da umidade pelo acionamento da irrigação. Em geral, verificam-se pequenas reposições de água a cada 4 horas, que foi o período definido no temporizador para o acionamento do Irrigafácil. Verifica-se que com o uso dos sensores IGstat de diferentes PB e com o Irrigafácil controlando o acionamento e desligamento da irrigação obteve-se um ajuste da umidade nos vasos de  $0,335 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ,  $0,247 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  e  $0,152 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (valores médios a partir da estabilização). Esses valores de umidade estão de acordo com os esperados, em função da curva de retenção da água no solo (curva característica do potencial matricial em função da umidade volumétrica), para o solo LVAd com 32% de argila.



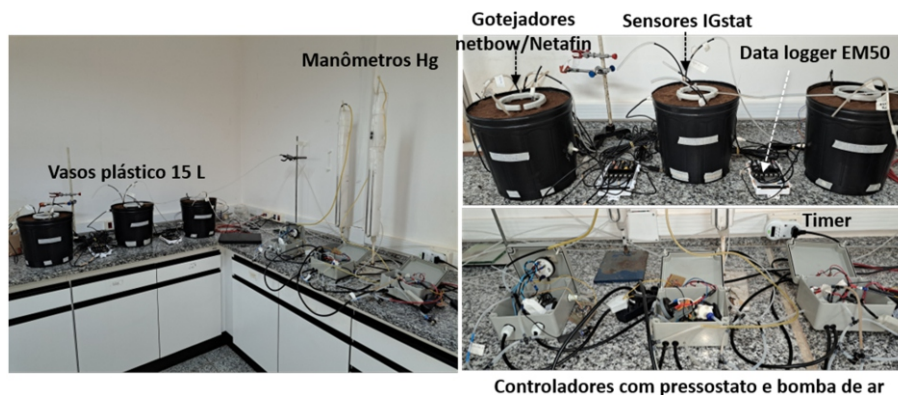
**Figura 6.** Pressões de borbulhamento (PB) obtidos com o Painel Pneumático para Aferição para sensores IGstat construídos com diferentes diâmetros de microesferas de vidro (a) e valores médios de PB para diferentes frações granulométricas (b).



**Figura 7.** Umidade do solo em 3 vasos com irrigação controlada por sensores IGstat, e o Irrigafácil, de PB de 6, 11 e 17 kPa, em função do tempo, com a irrigação acionada pelo Irrigafácil conectado aos sensores. Em a) é apresentado o gráfico para todo o período do experimento (aprox. 20 dias) e em b) um detalhe para um período de cerca de 1 dia, evidenciando os picos de umidade pela irrigação controlada pelos sensores.

### *Avaliação da tecnologia na irrigação por limiar*

Sensores IGstat com PB de 6, 11 e 17 kPa foram construídos com microesferas de vidro de 110-120  $\mu\text{m}$ , 60-70  $\mu\text{m}$  e 40-50  $\mu\text{m}$ , respectivamente, e testados em um experimento em laboratório, para o controle da irrigação por limiar em vasos em um solo Latossolo Vermelho Amarelo distrófico-LVAd (32% de argila). O equipamento Irrigafácil foi utilizado para o acionamento e desligamento da irrigação, em função das respostas dos sensores IGstat (Figura 5). A cada 4 horas, o sistema era ligado, com a utilização de um temporizador programável, e de acordo com pressão de ar nos sensores o pressostato ativava ou não a irrigação, em função da PB de cada sensor. O experimento foi realizado sem a utilização de plantas, sujeito apenas a perda de água por evaporação e reposição da água pela irrigação por gotejamento, baseado nas respostas dos sensores IGstat e controlado pelo Irrigafácil.



**Figura 5.** Experimento para avaliação do sistema de controle de irrigação com sensores IGstat utilizando bomba de ar e pressostato mecânico para acionamento de válvula solenoide.

Para o monitoramento da umidade do solo, foram instalados 2 sensores 5TE (Meter, EUA) por vaso, nas profundidades de 5 e 15 cm e conectados a um coletor de dados EM50 (Meter), com frequência de aquisição de 10 minutos. O experimento completo teve duração de cerca de 20 dias. Foram utilizados gotejadores Netbow (Netafin) com diâmetro de 12 cm.

## Resultados e Discussão

A Figura 6 apresenta a relação experimental obtida entre a PB medida com o painel pneumático de aferição dos sensores e o diâmetro das microesferas de vidro utilizadas na confecção dos sensores IGstat. Os dados foram ajustados por uma função de potência e a equação obtida ( $PB = 338,46 \text{ diâmetro}^{-0,817}$ ) será utilizada para a seleção das frações de microesferas de vidro para a obtenção de sensores para a irrigação de diferentes espécies de plantas, em função dos limiares de potencial matricial ( $\psi$ ) publicados na literatura (Taylor, 1965; Marouelli et al., 1996).

## Conclusões

---

O painel pneumático desenvolvido com controlador CLP para aferição dos sensores IGstat apresentou excelente desempenho para a realização de aferições da PB, bem como ótima robustez dos componentes utilizados, estando em uso contínuo por mais de 6 meses, sem apresentar problemas ou instabilidades. Além do ganho de tempo nas determinações das PBs, quando comparado com as medidas realizadas manualmente, há também a questão da padronização do procedimento operacional possibilitada pelo método e equipamento automático desenvolvido, independente do operador, proporcionando melhorias no controle de qualidade da fabricação dos sensores.

A relação experimental estabelecida entre PB e diâmetro das microesferas de vidro irá facilitar o processo de construção de sensores customizados para o uso em diferentes culturas ou métodos de irrigação, como por exemplo na irrigação por déficit.

Os testes realizados com sensores IGstat de diferentes PB, controlados pelo Irrigafácil apresentou excelente desempenho no controle da irrigação por limiar.

## Agradecimentos

---

Os autores agradecem à Fapesp (proc. 2020/16179-3) e Embrapa (proc. 10.22.00.201.00.00) pelo apoio financeiro, à empresa Pitaya pelos equipamentos Irrigafácil cedidos e ao técnico José Ferrazini Júnior pelo suporte em eletrônica.

## Referências

---

- ANA-Agência Nacional de Águas. Atlas Irrigação - **Uso da água na agricultura irrigada**, Brasília-DF, 2021.
- CALBO, A. G. **Gas irrigation control system based on soil moisture determination through porous capsules**. Patent US6705542B2, 2004.
- CALBO, A. G. **Sistema de controle gasoso de irrigação baseado na determinação de umidade do solo por meio de capsulas porosas**. Patente BR PI 0004264-1, 2000.
- CALBO, A. G.; VAZ, C. M. P.; MAROUELLI, W. A.; PORTO, L. F. **Water tension sensor, system for characterizing and continuously measuring soil water, system for indicating critical soil water tension and irrigation rod**. Patent number: WO 2014172765A1. 2, 2013
- FLINT, A. L.; CAMPBELL, G. S.; ELLETT, K. M.; CALISSENDORFF, C. Calibration and temperature correction of heat dissipation matric potential sensors. **Soil Science Society America Journal**, v. 66, p. 1439-1445, 2002.

- GERTEN, D.; HOFF, H.; ROCKSTROM, J.; JAGERMEYR, J.; KUMMU, M.; PASTOR, A. V. Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: role of environmental flow requirements. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 5, p. 551-558, 2013.
- JAGERMEYR, J.; GERTEN, D.; HEINKE, J.; SCHAPHOFF, S.; KUMMU, M.; LUCH, W. Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. **Hydrology and Earth System Science**, v. 19, p. 3073-3091, 2015.
- MALAZIAN, A.; HARTSOUGH, P.; KAMAI, T.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D. R.; HOPMANS, J. W. Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor. **Journal of Hydrology**, v. 402, p. 126-134, 2011.
- MARQUELLI, W. A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças**. Circular Técnica 57, Embrapa Hortaliças, Brasília, 2008, 14p.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI: EMBRAPA- CNPH, 1996, 72p.
- MATILE, L.; BERGER, R.; WACHTER, D.; KREBS, R. Characterization of a new heat dissipation matrix potential sensor. **Sensors**, v. 13, p. 1137-1145, 2013.
- MOTA, M., T. MARQUES, T. PINTO, F. RAIMUNDO, A. BORGES, J. CACO, J. GOMES-LARANJO. Relating plant and soil water content to encourage smart watering in chestnut trees. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 30-36, 2018.
- PLOEG, M. J. VAN DER; GOOREN, H. P. A.; BAKKER, G.; HOOGENDAM, C. W.; HUISKES, C.; KOOPAL, L. K.; KRUIDHOF, H.; ROOIJ, G. H. Polymer tensiometers with ceramic cones: direct observations of matrix pressures in drying soils. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, p. 1787-1799, 2010.
- SCHLOR, H.; FISCHER, W.; HAKE, J. F. The system boundaries of sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 88, p. 52-60, 2015.
- SMITH, M.; PEREIRA, L. S.; BEREGENA, J.; ITIER, B., GOUSSARD, J.; RAGAB, R.; TOLLEFSON, L. VAN HOFFWEGEN, P. (Eds.). **Irrigation Scheduling: From Theory to Practice**. FAO Water Report 8, ICID and FAO, Rome, 1996.
- STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTROM, J.; CORNELL, S.; FETZER, I.; BENNETT, E.; BIGGS, R.; CARPENTER, S. R.; WIT, C. A. DE; FOLKE, C.; MACE, G.; PERSSON, L. M.; VEERABHADRAN, R.; REYERS, B.; SORLIN, S. Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Nature**, v. 347, 1259855-1-1259855-10, 2015.
- TAYLOR, S. A. Managing irrigation water on the farm. **Transactions of ASAE**, v. 8, p. 433-436, 1965.
- THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; AGUERA, T.; VALDEZ, L.C.; FERNANDEZ, M. D. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. **Irrigation Science**, v. 24, p. 185-202, 2006.
- TURNER, S. W. D.; HEJAZI, M.; YONKOFSKI, C.; KIM, S. H.; KYLE, P. Influence of groundwater extraction costs and resource depletion limits on simulated global nonrenewable water withdrawals over the twenty-first century. **Earths Future**, v. 7, n. 2, p. 123-135, 2019.
- VAN LIER, Q. J. **Física do solo - Baseada em processos**, Piracicaba: Edição do autor, 2020, 413p.
- VAZ, C. M. P.; JONES, S.; MEDING, M.; TULLER, M. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors., v. 12, n. 2, p. 1-16, 2013

- WAMSER, A. F.; FELTRIM, A. L.; VALMORBIDA, J.; MONTEIRO, F. P.; LINS-JUNIOR, J. C.; HAHN, L.; MALLMANN, G.; SERAFINI, T. F. Manejo autônomo da irrigação do tomateiro utilizando sensores Irrigás de solo. **Agropecuária Catarinense**, v. 34, n. 2, p. 55-59, 2021.
- WANG, F. X.; KANG, Y.; LIU, S. P.; HOU, X. Y. Effects of soil matric potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 34-42, 2007.
- ZHANG, Y.; OCHSNER, T.; FIEBRICH, C. A.; ILLSTON, B. G. Recalibration of sensors in one of the world's longest running automated soil moisture monitoring networks. **Soil Science Society America Journal**, v. 83, p. 1003-1011, 2019.
- ZHENG, J.; HUANG, G.; JIA, D.; WANG, J.; MOTA, M.; PEREIRA, L. S.; HUANG, Q.; XU, X.; LIU, H. Responses of drip irrigated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield, quality and water productivity to various soil matric potential thresholds in an arid region of Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 181-193, 2013.





**Embrapa**  

---

*Instrumentação*



MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA E  
PECUÁRIA

