

PROJETO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA

**WAGNER WILSON ÁVILA BOMBARDELLI¹; ANTONIO PIRES DE CAMARGO²;
ROGÉRIO LAVANHOLI³; ANA CLAUDIA SÁTIRO ARAUJO¹; MARCUS
VINICIUS TALAMINI JUNIOR¹ E JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE⁴**

¹ Mestrando, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba - SP. E-mail: wavila@usp.br, satiroagro@gmail.com, talamini.1988@gmail.com

²Especialista em Laboratório, Departamento de Engenharia de Biosistemas - ESALQ/USP, e-mail: apc.pires@gmail.com

³ Doutorando, Departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ/USP, e-mail rogeriolavanholi@usp.br

⁴ Prof. Dr. Titular, Departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ/USP, e-mail: frizzone@usp.br

1 RESUMO

As perdas de carga localizadas são relevantes principalmente no dimensionamento de subunidades de sistemas de microirrigação. O uso de sistemas automatizados adequadamente projetados e validados para a execução de ensaios é conveniente, pois assegura maior estabilidade das condições de ensaio, otimização do tempo de operação, redução das falhas ou imperfeições humanas, consequentemente conduzindo a melhor qualidade dos resultados de ensaio. Deste modo, o presente trabalho propôs projetar, instalar e validar uma bancada automatizada para condução de ensaios de perda localizada de carga. Desenvolveu-se o circuito eletrônico microcontrolado que dispõe de funcionalidades para aquisição e condicionamento de sinais de sensores; controle de inversor de frequência e válvula proporcional; controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID); e, comunicação Modbus RTU com outros dispositivos através de rede RS-485. O firmware implementado no microcontrolador foi desenvolvido na linguagem C, enquanto que a interface gráfica do usuário (GUI) foi desenvolvida em C#. A validação da bancada foi efetuada a partir de ensaios de estabilidade, que permitem afirmar o adequado funcionamento da bancada de ensaios.

Palavras-chave: circuito eletrônico microcontrolado, hidráulica, microirrigação

**W. W. Á. BOMBARDELLI; A. P. CAMARGO; R. LAVANHOLI; A. C. S. ARAUJO;
M. V. TALAMINI JUNIOR; J. A. FRIZZONE
DESIGN AND EVALUATION OF A TEST BENCH FOR DETERMINING MINOR
PRESSURE LOSSES**

2 ABSTRACT

The minor pressure losses are fundamental in the development of subunits for micro-irrigation systems. The use of well-designed and validated automated systems in order to perform tests is convenient because it ensures a greater stability of test conditions, and also improves the use of operating time, reducing the risk of faults or human error, consequently, thus having better

quality in the test results. Thereby, this paper aims to develop, install and validate an automated bench to conduct minor pressure loss tests. The previously developed micro-controlled electronic circuit has features to input and store signals from sensors; Frequency inverter controller and proportional valve; Proportional-Integral-Derivative Controller (PID); and a Modbus RTU communication protocol to interact with other devices via RS-485 network. The firmware implemented in the microcontroller was developed using the C programming language, whereas the graphical user interface (GUI) was programmed in C#. The validation of the bench was carried out using stability tests, which approved the test bench performance.

Keywords: micro-controlled electronic circuit, hydraulic, micro-irrigation

3 INTRODUÇÃO

Os ensaios hidráulicos para levantamento de informações técnicas de peças e acessórios de irrigação constituem tarefas repetitivas que, se executadas manualmente, estão sujeitas a diversas imperfeições. O uso de sistemas automatizados adequadamente projetados e validados para a execução de tarefas dessa natureza assegura maior estabilidade das condições de ensaio, otimização do tempo de operação, redução das falhas ou imperfeições humanas e, conseqüentemente, conduzindo uma melhor qualidade dos resultados de ensaio.

Acerca da área de estudo, percebe-se que a automação de ensaios para irrigação não é uma tentativa recente, como verifica-se nos ensaios para aspersores conduzidos por Fisher e Wallender (1988) Seginer et al. (1992), Tarjuelo et al. (1999) e Zanon; Testezlaf; Matsura (2000). Os ensaios automatizados na área mantêm-se sob contínuo aperfeiçoamento, como exemplificado pela análise de incertezas de Saretta (2016). No campo de pesquisas relacionadas à obstrução de emissores, destaca-se a bancada automatizada desenvolvida por Niu, Liu e Chen (2013), a qual possibilitou realizar um grande número de avaliações de gotejadores, de longa duração e com diferentes qualidades de água. Perboni (2016) descreveu o desenvolvimento e validação de uma estrutura automatizada para o monitoramento contínuo da vazão de gotejadores, permitindo, além do monitoramento individualizado, a redução da mão de obra na condução dos ensaios. Conforme este autor, desde que o sistema seja devidamente validado, a automatização assegura confiabilidade dos resultados.

A instabilidade nos sistemas de controle e medição pode afetar diretamente a qualidade dos resultados dos ensaios. Conforme Rocha (2016), as causas de instabilidade podem agir naturalmente em qualquer sistema de medição, seja por interferência do operador, imperfeições em dispositivos mecânicos ou eletrônicos, oscilações na fonte de energia, vibrações mecânicas e ruídos elétricos. Uma quantificação da instabilidade pode ser obtida por meio de técnicas e ferramentas de controle estatístico de processos, para avaliar o grau de adequação de bancadas de ensaio.

Dessa forma, o presente estudo propôs desenvolver e validar uma bancada de ensaios automatizada para determinação da perda localizada de carga ocasionada por peças, conexões e acessórios de microirrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

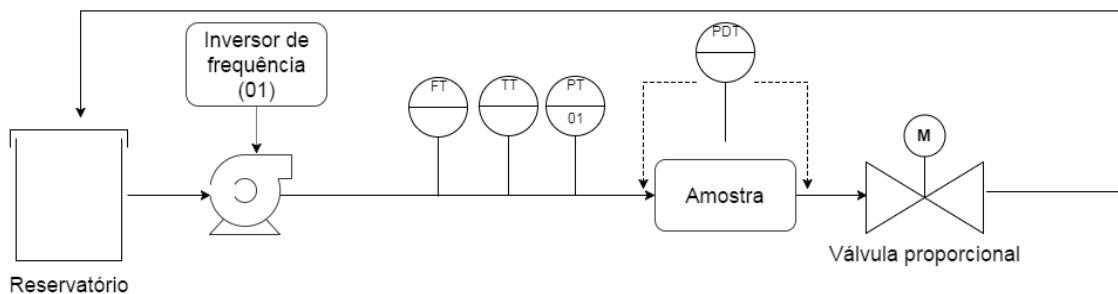
Os procedimentos de projeto e validação da bancada automatizada de ensaios de perda localizada de carga foram executados no Laboratório de Irrigação do Departamento de

Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, município de Piracicaba, SP.

A norma ISO 9644:2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008) é aplicável a determinações de perda de carga em válvulas de irrigação, sendo a referência normativa mais próxima do problema tratado nesse trabalho. A referida norma especifica que o desvio admissível entre a leitura indicada nos aparelhos de medição e o valor real deve ser, no máximo, 2% para medições de vazão, pressão de ensaio e pressão diferencial, e 1°C para a temperatura da água.

A Figura 1 apresenta um fluxograma de instrumentação que ilustra os elementos constitutivos da bancada de ensaios. A estrutura consiste num circuito fechado conectado a um conjunto motobomba responsável pela pressurização do sistema.

Figura 1. Fluxograma de instrumentação (FT: medidor de vazão; TT: transmissor de temperatura; PT: transmissor de pressão de ensaio; PDT: transmissor de pressão diferencial).



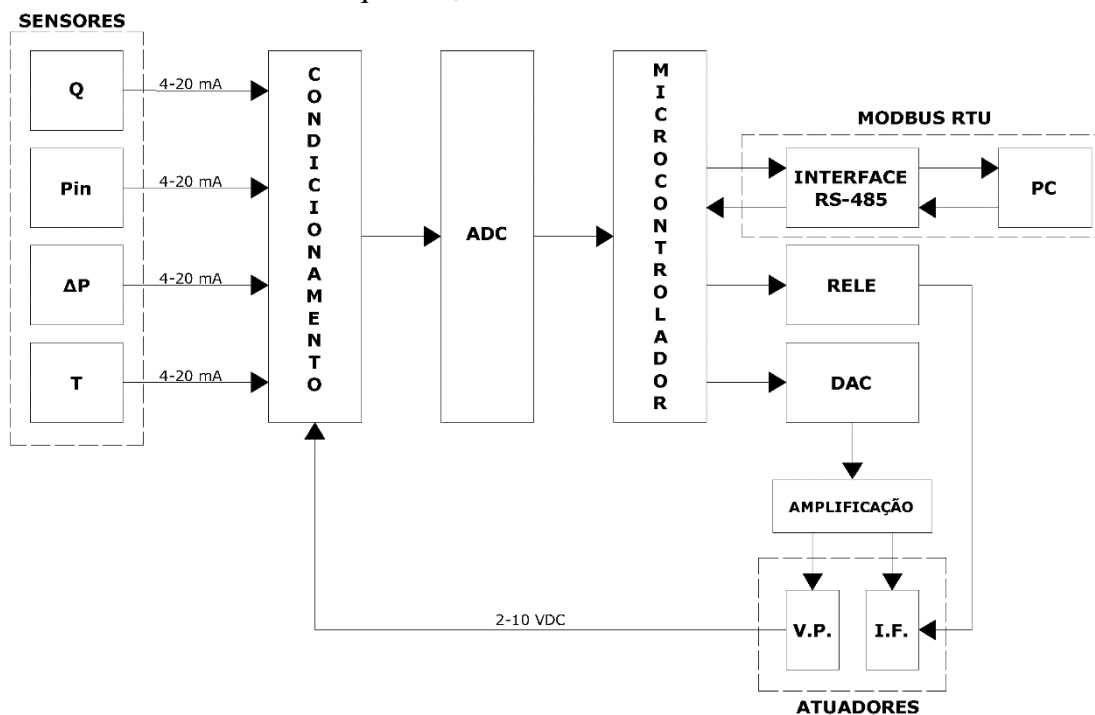
O monitoramento de vazão utilizou um medidor eletromagnético de vazão, de marca Krohne®, modelo IFC 010 D, com resolução de $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, faixa de vazão de 0 a $4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e incerteza expandida de 0,5% em relação a fundo de escala (FE). Esse instrumento foi instalado a montante da amostra sob avaliação. A queda de pressão devido à perda localizada de carga foi mensurada por um transmissor de pressão diferencial, marca Novus®, modelo NP800H, resolução de $1 \cdot 10^{-2} \text{ kPa}$, faixa de medição de 1-100 kPa, exatidão de 0,075% informada pelo fabricante. A temperatura da água foi monitorada por um transmissor de temperatura marca Zürich®, modelo TZD.420, com resolução de 0,1°C, faixa de medição entre 0 e 50°C, incerteza de medição de 0,5% FE. O monitoramento da pressão de ensaio é realizado por um transmissor de pressão, marca Zürich®, modelo Z.10.B.420, faixa de medição de 0 a 5 bar com incerteza de medição de 0,1% FE. O ajuste da vazão de ensaio é obtido pelo controle eletrônico da válvula proporcional Belimo® LRB24-3, com passagem de $\frac{1}{2}$ ", instalada a jusante da amostra sob teste. O comando é operado através da entrada de sinais elétricos numa faixa de 2-10 VDC.

O inversor de frequência utilizado é da marca Weg, modelo CFW-08. Na configuração em estado remoto, converte a faixa de tensão recebida (0-10 VCC) em uma frequência para alimentação da bomba, conferindo a velocidade de rotação da bomba e, conseqüentemente, a pressurização do sistema.

O controle da pressão de ensaio opera em malha fechada, utilizando-se a lógica de controle Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID). Os sinais de pressão de entrada são comparados ao parâmetro da pressão estabilizada (*setpoint*), o qual é definido previamente ao ensaio. Por sua vez, seu processamento é retornado analogicamente ao inversor de frequência, que mantém o domínio direto da frequência de alimentação da motobomba. O uso de controlador PID visa assegurar acurácia no controle das pressões de ensaio.

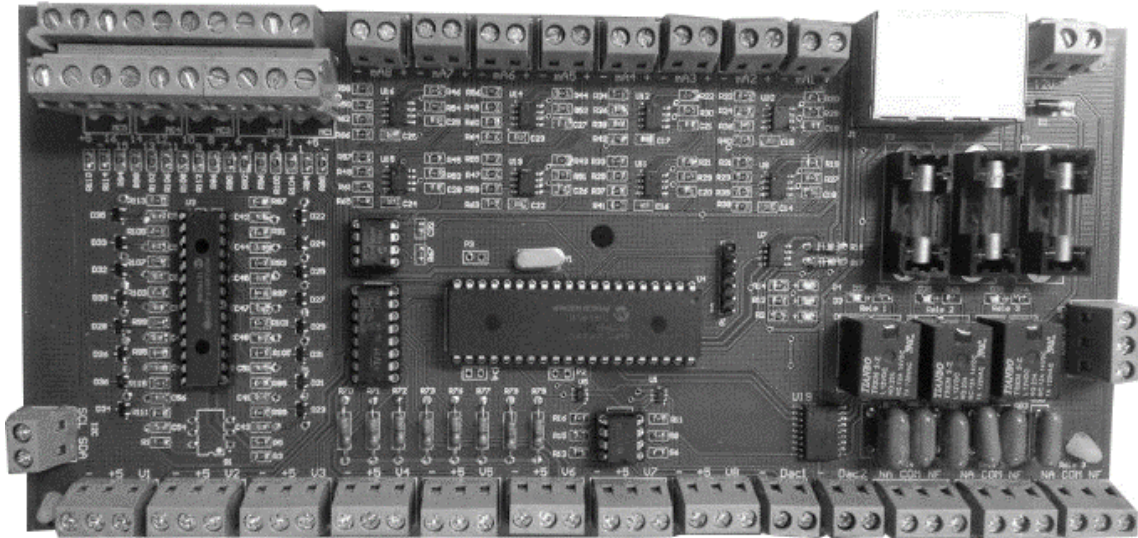
Uma placa para aquisição de dados e controle de atuadores baseada no microcontrolador dsPIC30F4013 foi desenvolvida para a aquisição, controle das operações e transmissão de dados para plataforma PC (Figura 2).

Figura 2. Diagrama em blocos das funções do hardware desenvolvido: Q – vazão; Pin – pressão de ensaio; ΔP – pressão diferencial; T – temperatura; V.P. – válvula proporcional; I.F. – inversor de frequência; ADC/DAC – canais de conversão.



Os sensores operam com sinais analógicos de 4-20 mA; os quais são condicionados para uma faixa de tensão contínua (0-5 VCC). Adicionalmente, dois canais são exclusivos para conversão digital-analógico (*Digital-to-Analog Converter*) 12-bit, com controles PID individualizados, permitindo obter um ajuste dos atuadores para domínio das condições de ensaio. Após essa retificação analógica regulada pelo DAC, os sinais são amplificados para uma faixa de até 10 VDC. Um dos canais foi dedicado com uso da lógica PID ao controle do IF e outro, com saída bruta, para ajuste da válvula proporcional. Permite-se ainda, 16 entradas digitais (expandindo-se as portas I/O) e 3 saídas digitais aos reles para controle de energização de dispositivos. Um rele encarrega-se pelo controle automático de energização do IF para cada início e fim de ensaio. Por fim, a placa construída é apresentada pela Figura 3.

Figura 3. Placa desenvolvida para aquisição e condicionamento de sinais, controle de atuadores e transmissão de dados.



O microcontrolador foi programado em C utilizando o compilador CCS. A transmissão de dados utiliza o padrão RS-485 e protocolo de comunicação serial Modbus RTU, que é um dos protocolos de comunicação mais utilizados na indústria (URREA; MORALES; KERN, 2016).

Uma interface gráfica do usuário (GUI) foi desenvolvida para plataforma PC pelo Microsoft® Visual Studio® 2017, em linguagem C#. A GUI permite a execução e monitoramento de ensaios.

Gráficos de controle de Shewhart para observações individuais foram utilizados para o monitoramento da média e da variabilidade da pressão de ensaio. Os gráficos de controle foram gerados utilizando o aplicativo Action Stat Quality®. Com base nas especificações da norma ISO 9644:2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008), foi atribuído os seguintes limites de especificação: (1) $\pm 2\%$ em relação ao valor alvo ou médio para as variáveis pressão de ensaio, vazão e pressão diferencial; (2) $\pm 1^\circ\text{C}$ em relação ao valor médio para a variável temperatura da água. As variáveis de interesse, ou seja, as características da qualidade avaliadas foram: pressão de ensaio, vazão, temperatura da água e pressão diferencial.

Foram coletados dados para a pressão de ensaios de 150 kPa (1,50 bar) sob vazão de 0,90 e 2,70 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Ensaios de perda de carga localizada em peças, conexões e acessórios de microirrigação são conduzidos sob pressão de ensaio constante, sendo que 150 kPa foi considerado um valor usual. As vazões avaliadas representam limites práticos das condições de ensaio.

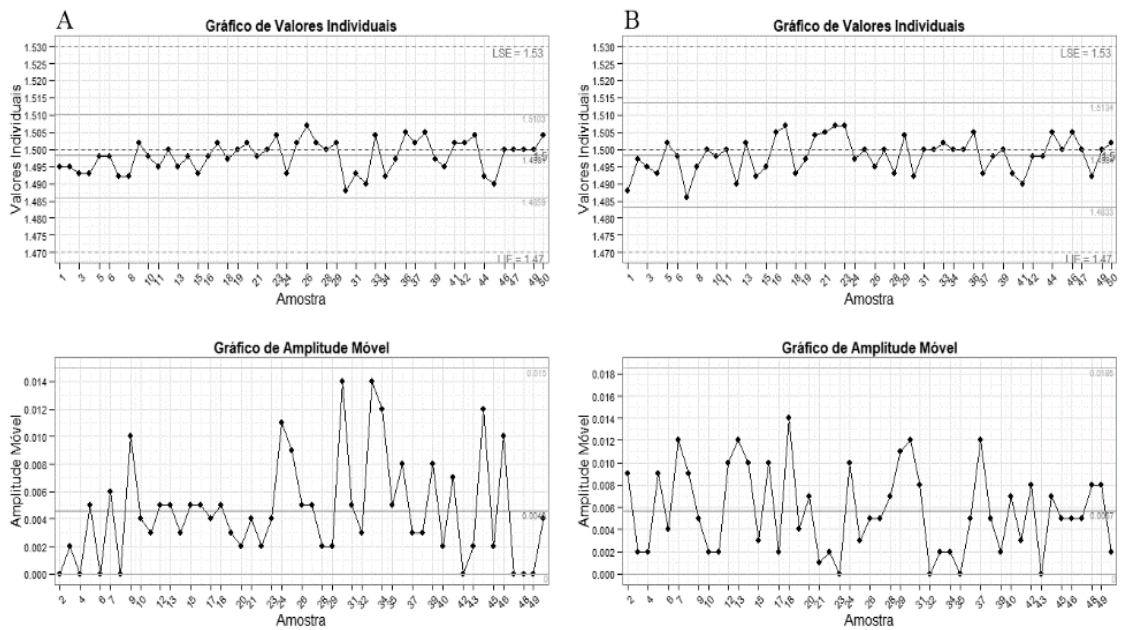
O conjunto de dados utilizado para as análises consta de 50 subgrupos racionais com uma única observação. Após o ajuste e estabilização das condições de ensaio, os dados foram coletados em intervalos de 5 segundos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta gráficos de controle utilizados para monitoramento da média e da variabilidade da pressão de ensaio. Dada a pressão de ensaio de 1,50 bar (valor alvo), os limites

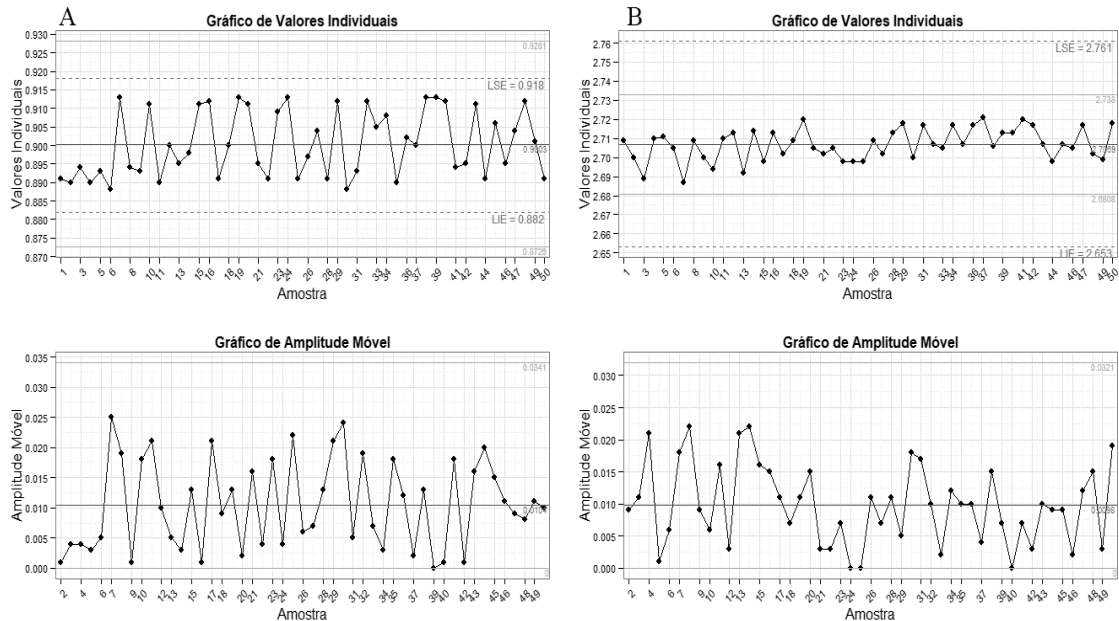
superior e inferior de especificação foram de 1,53 e 1,47 bar, respectivamente. Tanto a média quanto a variabilidade da pressão de ensaio mantiveram-se dentro dos limites de controle e de especificação, o que aponta para um processo sob controle em quaisquer das vazões avaliadas. Desse modo, o sistema utilizado para controle e monitoramento da pressão de ensaio mostrou-se apto a manter o valor dessa variável próximo do alvo desejado e sob variabilidade aceitável. Sobretudo, as observações indicam que pressão de ensaio se manteve dentro dos limites de especificação estabelecidos na norma ISO 9644:2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008).

Figura 4. Gráficos de controle para monitoramento da média e da variabilidade da pressão de ensaio (valor alvo = 1,50 bar) sob duas vazões: (A) vazão baixa, $0,90 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$; (B) vazão elevada, $2,70 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.



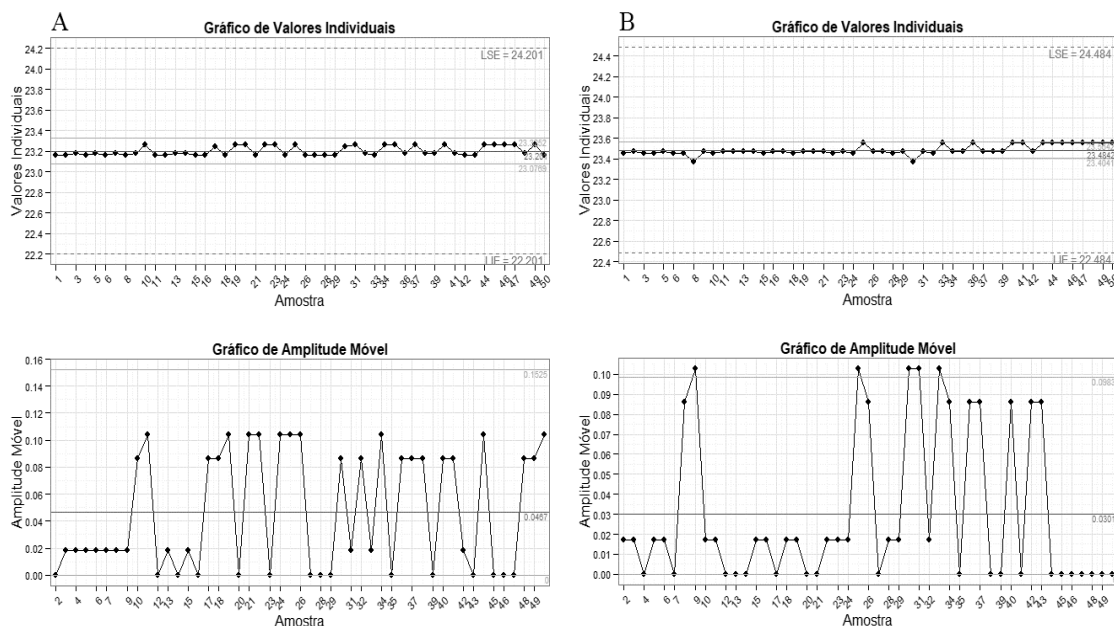
A Figura 5 apresenta gráficos de controle utilizados para monitoramento da média e da variabilidade da vazão. A pressão de ensaio em ambos os testes foi mantida em 1,50 bar. Tanto a média quanto a variabilidade da pressão de ensaio apontam para um processo sob controle em quaisquer das vazões avaliadas. A Figura 5A apresenta limites de especificação mais estreitos que os limites de controle do processo. Talvez os valores atribuídos para os limites de especificação possam ser demasiadamente rigorosos, sendo necessárias análises futuras para verificar essa questão. De qualquer modo, a vazão manteve-se dentro dos limites de controle e de especificação em quaisquer das condições avaliadas.

Figura 5. Gráficos de controle para monitoramento da média e da variabilidade da vazão: (A) vazão baixa, $0,90 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$; (B) vazão elevada, $2,70 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.



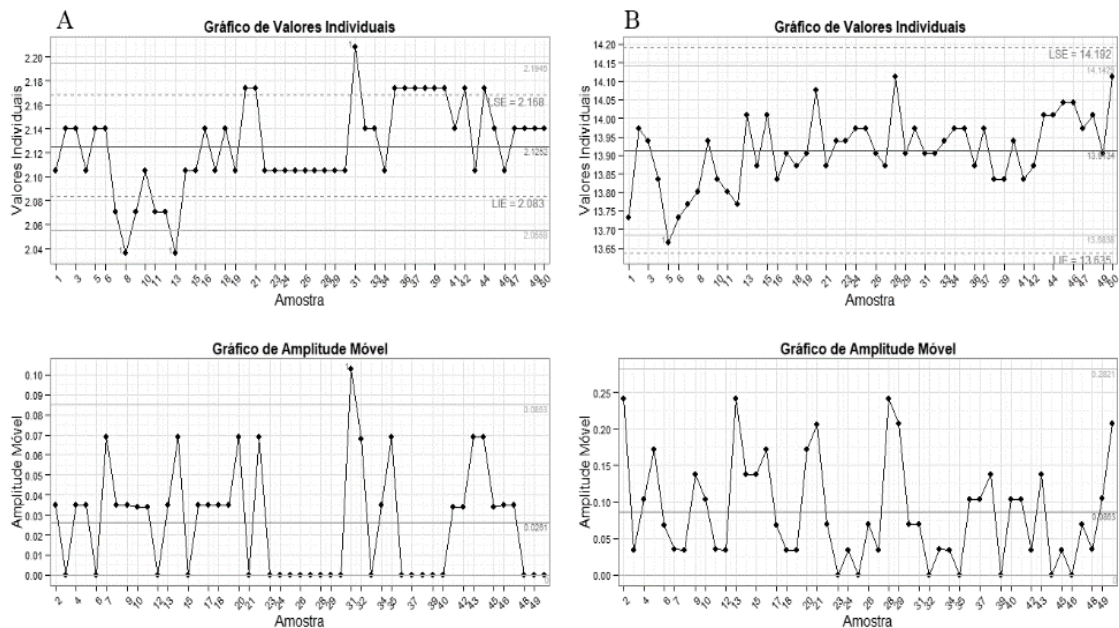
A Figura 6 apresenta gráficos de controle utilizados para monitoramento da média e da variabilidade da temperatura da água. Na condição de ensaio sob baixa vazão, a temperatura da água se manteve também dentro dos limites de controle, indicando um processo sob controle. Entretanto, na condição de vazão elevada, tanto no gráfico de médias quanto de amplitude, observa-se pontos além dos limites de controle. Os valores mínimo e máximo observados na condição de vazão elevada foram $23,37$ e $23,56^\circ\text{C}$, respectivamente. Em termos práticos, a variação de temperatura observada durante o ensaio pode ser considerada desprezível e indica que os limites de controle foram demasiadamente rigorosos para a análise dessa característica da qualidade. Adicionalmente, em ambas as condições de ensaio, a temperatura da água manteve-se dentro dos limites de especificação de $\pm 1^\circ\text{C}$ em relação ao valor médio, e, portanto, a oscilação observada nos valores de temperatura está dentro dos limites estabelecidos pela norma ISO 9644:2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008).

Figura 6. Gráficos de controle para monitoramento da média e da variabilidade da temperatura da água: (A) vazão baixa, $0,90 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$; (B) vazão elevada, $2,70 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.



A Figura 7 apresenta gráficos de controle utilizados para monitoramento da média e da variabilidade da pressão diferencial. Tanto os gráficos de média quanto de amplitude apresentam pontos fora dos limites de controle e de especificação para a condição de baixa vazão. Para a condição de alta vazão, observou-se apenas um ponto fora dos limites de controle no gráfico de médias. Assim como foi observada para a análise de vazão, os limites de especificação são mais estreitos do que os limites de controle na condição de baixa vazão, sendo bastante provável que o critério adotado nesse trabalho para estabelecer os limites de especificação seja inadequado. Para a condição de baixa vazão os valores mínimo e máximo de pressão diferencial foram 2,036 e 2,208 kPa, resultando numa amplitude máxima de variação de 0,17 kPa. Em termos práticos, tais oscilações nas observações da pressão diferencial são aceitáveis, dadas as instabilidades inerentes a medições de perda de carga e provocadas pela turbulência associada ao escoamento. Embora pontos fora dos limites evidenciem processo fora de controle, Montgomery (2013) alerta para a necessidade de interpretar resultados de gráficos de controle em conjunto com outros critérios técnicos a fim de evitar condenar erroneamente um processo que opera adequadamente.

Figura 7. Gráficos de controle para monitoramento da média e da variabilidade da pressão diferencial: (A) vazão baixa, $0,90 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$; (B) vazão elevada, $2,70 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.



6 CONCLUSÕES

Desenvolveu-se uma bancada de ensaios automatizada para a determinação da perda localizada de carga ocasionada por peças, conexões e acessórios de microirrigação.

Evidenciou-se que os sistemas de medição e controle operaram adequadamente, sendo capazes de atender a requisitos estabelecidos em normas técnicas.

7 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e RSB Plásticos, respectivamente, por concessão de bolsas e fornecimento de material utilizado em sistemas de microirrigação.

8 REFERÊNCIAS

FISCHER, G. R.; WALLENDER, W. W. Collector size and test duration effects on sprinkler water distribution measurement. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 2, p. 538–542, 1988.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9644 - Pressure losses in irrigation valves - Test method**, Genebra, 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NIU, W.; LIU, L.; CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, New York, v. 31, n. 4, p. 545–555, 2013.

PERBONI, A. **Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2016.

ROCHA, H. S. DA. **Controle estatístico de qualidade aplicado a ensaios de material de irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2016.

SARETTA, E. **Análise de incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2016.

SEGINER, I. et al. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 2, p. 523–533, 1992.

TARJUELO, J. M. et al. Irrigation uniformity with medium size sprinklers part I: characterization of water distribution in no-wind conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 42, n. 3, p. 665–675, 1999.

URREA, C.; MORALES, C.; KERN, J. Implementation of error detection and correction in the Modbus-RTU serial protocol. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, Amsterdã, v. 15, p. 27–37, 2016.

ZANON, E. R.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. J. A data acquisition system for sprinkler uniformity testing. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 16, n. 2, p. 123–127, 2000.