



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

LEANDRO DE MATOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA ENSAIOS HIDRÁULICOS E
ANÁLISES DE VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO**

**GUANAMBI
BAHIA - BRASIL
2024**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

LEANDRO DE MATOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA ENSAIOS HIDRÁULICOS E
ANÁLISES DE VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO**

Dissertação apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional.

**GUANAMBI
BAHIA-BRASIL
2024**

Catálogo: Leidiane Reis - CRB-5/1959
IF Baiano, Campus Guanambi

M433d Matos, Leandro De

Desenvolvimento de um sistema para ensaios hidráulicos e análises de válvulas reguladoras de pressão. / Leandro de Matos. -- Guanambi, Ba., 2024.

00f.: il.

Dissertação ((Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - Campus Guanambi.

Orientador (a): Marcelo Rocha dos Santos.

Coorientador: Vinícius Mendes Rodrigues de Oliveira

1. Desempenho hidráulico 2. Variáveis agrícolas. 3. Instrumentação. I. Título.

CDU: 626.8



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO

TERMO DE APROVAÇÃO DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA ENSAIOS HIDRÁULICOS E ANÁLISES
DE VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO

por

LEANDRO DE MATOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado às 08 horas do dia 09 de dezembro de 2024, como requisito para a conclusão do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – *Campus* Guanambi. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
CARLOS ELIZIO COTRIM
Data: 22/06/2025 10:24:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Carlos Elizio Cotrim
Membro



Documento assinado digitalmente
FLAVIO GONCALVES OLIVEIRA
Data: 27/06/2025 19:30:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Flávio Gonçalves Oliveira
Membro



Documento assinado digitalmente
VINICIUS MENDES RODRIGUES DE OLIVEIRA
Data: 30/06/2025 19:51:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Vinícius Mendes Rodrigues de Oliveira
Coorientador



Documento assinado digitalmente
MARCELO ROCHA DOS SANTOS
Data: 22/06/2025 15:20:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Marcelo Rocha dos Santos
Orientador

RESUMO

MATOS, Leandro de, M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – *Campus* Guanambi, dezembro de 2024. **Desenvolvimento de um sistema de ensaios hidráulicos e análises de válvulas reguladoras de pressão**. Orientador Marcelo Rocha dos Santos. Coorientador: Vinícius Mendes Rodrigues de Oliveira.

A prototipagem e a instrumentação agrícola são pilares essenciais para a inovação no setor agrícola. O desenvolvimento de novos dispositivos e sistemas permite testes e melhorias antes da implementação em larga escala, garantindo precisão e eficiência. A instrumentação envolve o uso de equipamentos precisos para medir e controlar variáveis agrícolas, como a pressão da água, assegurando a operação eficiente e sustentável dos sistemas de irrigação. Objetivou-se, com este trabalho, desenvolver e avaliar um protótipo para a realização de ensaios automáticos de caracterização hidráulica de válvulas reguladoras de pressão em campo. O estudo foi realizado no Estado do Mato Grosso, na cidade de Sorriso. As válvulas reguladoras de pressão utilizadas foram coletadas em seis fazendas distintas. O protótipo de ensaios hidráulicos é constituído por tubulação em circuito fechado, bomba hidráulica, reservatório de acrílico, dois sensores de pressão, um emissor com bocal, uma placa Arduino e uma programação para as análises dos dados. Os instrumentos utilizados foram: sensores de pressão, manômetros de glicerina de (0 a 5 Kgf cm⁻²) e dispositivo eletrônico de controle (placa Arduino + programação). Foi desenvolvido uma programação em linguagem C++, que integrada à placa Arduino que permitiu a leitura, o processamento e o armazenamento dos dados. Os testes foram realizados utilizando válvulas reguladoras de pressão com 0 (A), 3000 (B), 5000 (C), 7000 (D), 8500 (E) e 12000 (F) horas de funcionamento em campo. Os resultados apresentaram gráficos de dispersão positiva e valores de r^2 de 0,9009 (A); 0,9613 (B); 1,0 (C); 0,9665 (D); 0,9705 (E) e 0,9999 (F), indicando a eficácia do protótipo com o sensor de pressão e placa Arduino programada na aquisição, processamento e armazenamento dos dados.

Palavras-chave: Válvulas, regulador de pressão, desempenho, instrumentação.

ABSTRACT

MATOS, Leandro de, M.Sc. Federal Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – *Campus* Guanambi, december de 2024. **Development of a Hydraulic Testing System and Analysis of Pressure Regulating Valves**. Advisor: Marcelo Rocha dos Santos. Co-advisor: Vinícius Mendes Rodrigues de Oliveira.

Prototyping and agricultural instrumentation are essential pillars for innovation in the agricultural sector. Developing new devices and systems enables testing and improvements before large-scale implementation, ensuring precision and efficiency. Instrumentation involves the use of precise equipment to measure and control agricultural variables, such as water pressure, ensuring the efficient and sustainable operation of irrigation systems. This study aimed to develop and evaluate a prototype for conducting automatic hydraulic characterization tests of pressure regulating valves in the field. The study was conducted in the state of Mato Grosso, in the city of Sorriso. The pressure regulating valves used were collected from six different farms. The hydraulic testing prototype consists of a closed-circuit pipeline, a hydraulic pump, an acrylic reservoir, two pressure sensors, an emitter with a nozzle, an Arduino board, and programming for data analysis. The instruments used included pressure sensors, glycerin manometers (0 to 5 Kgf cm⁻²), and an electronic control device (Arduino board + programming). A program was developed in C++ language, integrated with the Arduino board, which enabled data reading, processing, and storage. Tests were conducted using pressure regulating valves with 0 (A), 3000 (B), 5000 (C), 7000 (D), 8500 (E), and 12000 (F) hours of field operation. The results showed positive dispersion graphs and r^2 values of 0.9009 (A); 0.9613 (B); 1.0 (C); 0.9665 (D); 0.9705 (E); and 0.9999 (F), indicating the effectiveness of the prototype with the pressure sensor and programmed Arduino board in data acquisition, processing, and storage.

Keywords: Pressure regulator, performance, instrumentation.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela saúde, pelas oportunidades e por me conceder força, paciência e serenidade nos momentos de desafio.

Aos meus pais, Neivaldão e Dona Miraneide, aos meus queridos irmãos Letícia e Neivaldo, pela base sólida que sempre me deram, pelo carinho, apoio incondicional e por acreditarem em mim desde o início. A vocês, minha eterna gratidão.

A Jéssica Vale pelo apoio, fé e força em todos os momentos difíceis e alegres da minha vida pessoal e da minha trajetória acadêmica.

A conclusão desta etapa tão significativa da minha vida acadêmica e profissional só foi possível graças à contribuição e ao apoio de muitas pessoas e instituições, a quem expresso minha mais profunda gratidão.

Ao meu orientador Marcelo Rocha dos Santos e coorientador Vinícius Mendes Rodrigues de Oliveira, pela confiança, paciência, incentivo e orientações seguras ao longo de toda a trajetória. A dedicação de vocês foi fundamental para o amadurecimento desta pesquisa e para minha formação enquanto pesquisador.

Aos professores e colaboradores do curso do Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Baiano – *Campus Guanambi*, por todo o conhecimento compartilhado, pelo comprometimento com o ensino e pela contribuição essencial no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de mestrado e amigos da área de irrigação, pela troca de ideias, pela parceria nos desafios de campo e pela convivência enriquecedora.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com este trabalho e com minha jornada de formação. Este projeto é resultado de um esforço coletivo que levarei para toda a minha trajetória profissional e pessoal.

Gratidão!

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Regulador de pressão, modelo de mola	15
FIGURA 2: Sensor de pressão, modelo F1CD.....	24
FIGURA 3: Placa Arduino, modelo UNO R1.	25
FIGURA 4: Manômetro de glicerina para observações das pressões de entrada e saída na válvula reguladora de pressão.....	25
FIGURA 5: Caixa reservatório de água em acrílico.....	26
FIGURA 6: Bombeamento e conexões de sucção e recalque.	27
Figura 7: Aspersor Senninger modelo LDN e bocal modelo UP3	27
FIGURA 8: Esquema de pré-montagem do dispositivo de avaliação.	28
FIGURA 9: Organograma de montagem e funcionamento.	29
FIGURA 10: Programação responsável por receber a leitura dos sensores e converter o sinal elétrico para a unidade de medida bar.	30
FIGURA 11: Programação responsável por analisar e fazer a recomendação.	31
FIGURA 12: Placa GPS SHIELD + cartão de memória integrada a placa UNO R1.....	32
FIGURA 13: Programação com a função de armazenar os dados.....	32
FIGURA 14: Padrão de dispersão linear da correlação entre as pressões observadas no manômetro e emitidas pelo sensor.....	36
FIGURA 15: Caixa de acrílico com descolamento lateral da estrutura.....	40
FIGURA 16: Rompimento do fundo e descolamento de estrutura da caixa acrílica.....	41

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	10
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 AGRICULTURA MODERNA E A IMPORTÂNCIA DO USO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EFICIENTES.....	11
2.2 VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO.....	13
2.3 MODELOS DE REGULADORES DE PRESSÃO	15
2.4 NECESSIDADE DE AVALIAR O DESEMPENHO DOS REGULADORES DE PRESSÃO EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO	16
2.5 PROTOTIPAGEM E INSTRUMENTAÇÃO AGRÍCOLA	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	24
3.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO.....	29
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS	44

1.0 INTRODUÇÃO

No Brasil, uma das maiores dificuldades encontradas em relação ao monitoramento em tempo real e automação da irrigação está relacionado ao alto custo de equipamentos, o que torna muitas vezes, inviável a adoção destes métodos e controle da irrigação. O uso de sensores e equipamentos de baixo custo pode contribuir para maior difusão desta tecnologia (Loureiro et al., 2017).

Com a adoção desse sistema de avaliação com a instrumentação, os custos envolvidos na realização dos ensaios podem ser inferiores aos do método convencional, pois consegue-se realizar um maior número de ensaios no mesmo intervalo de tempo. Além disso, reduz o número de operadores na realização simultânea de diversos ensaios no campo ou em laboratório. Essa situação pode servir de estímulo ao mercado, devido a uma tendência de aumento do número de ensaios de caracterização de parâmetros e aprimoramento de equipamentos para uma irrigação de precisão, como por exemplo o pivô central.

Os reguladores de pressão exercem um papel fundamental nos sistemas de irrigação, ajustando a pressão da água para um nível desejado, garantindo uma distribuição uniforme e adequada da água nas áreas irrigadas (FAO, 2007). A presença de reguladores de pressão adequados ao sistema de irrigação é essencial para garantir que todas as plantas ou área irrigada recebam a quantidade necessária de água, independentemente de sua localização no campo (FAO, 2007).

A falta de instrumentos de medição acessíveis e precisos impede a identificação de problemas nos reguladores de pressão e dificulta a tomada de medidas corretivas. Este cenário é exacerbado pela ausência de assistência técnica e treinamento adequados para os agricultores, que muitas vezes não possuem os conhecimentos necessários para utilizar essas tecnologias de forma eficaz (Banco Mundial, 2020). A falta de instrumentos e dispositivos de medição automatizados acessíveis e precisos dificulta a identificação rápida de problemas nos sistemas de irrigação e especificamente em reguladores de pressão em sistema de irrigação por pivô, o que dificulta a tomada de medidas corretivas por produtores rurais irrigantes. O Banco Mundial (2020) destaca também a necessidade de investimentos em infraestrutura tecnológica e programas de capacitação para agricultores, visando melhorar a eficiência e a sustentabilidade das práticas agrícolas. Além disso, enfatiza a importância de políticas governamentais que incentivem a adoção de tecnologias inovadoras e facilitem o acesso a dispositivos e sistemas de monitoramento a preços acessíveis.

Como alternativa para minimizar os efeitos da variação de pressão na vazão dos aspersores em sistemas de irrigação por pivô, utilizam-se válvulas reguladoras de pressão. Essas válvulas são essenciais, pois garantem que a vazão dos aspersores permaneça constante, promovendo uma distribuição uniforme de água ao longo de todo equipamento. O papel dessas válvulas é manter a pressão de saída dentro de uma faixa definida, independente das variações na pressão de entrada. As empresas Senninger e Nelson que fabricam e distribuem válvulas reguladoras de pressão no mundo recomendam o limite, por garantia, a faixa entre 6,0 a 8,0 Kgf cm⁻² de pressão na entrada do regulador de pressão para que ele atue perfeitamente em sua função.

A aplicação da automação em bancadas de ensaio de caracterização hidráulica de peças e acessórios de irrigação, por sistemas adequadamente projetados e validados, assegura maior estabilidade das condições de ensaio, otimização do tempo de operação, redução das falhas ou erros humanos e, conseqüentemente, conduz a consistência dos resultados do ensaio (Bombardelli et al., 2017). A confiabilidade dos resultados é garantida somente após a validação da estrutura e sistema autônomo implementados (Perbone, 2016).

Entender a dinâmica do sistema em relação a coleta e precisão dos dados permite uma avaliação mais eficiente dos reguladores de pressão. Isso não só agiliza a análise, mas também permite determinar se os reguladores estão operando dentro dos parâmetros adequados, sem comprometer a eficiência do emissor ou do sistema como um todo.

O objetivo com este trabalho foi o desenvolvimento de um dispositivo utilizando Arduino e sensores de pressão de baixo custo, que possibilite a aferição da pressão e que emita um rápido diagnóstico da condição, da válvula reguladora de pressão, indicando se a mesma está apta ou não para continuar utilizando no sistema de irrigação. Essa abordagem pode se tornar uma valiosa ferramenta para consultores, empresas e produtores rurais ao tomar decisões sobre a manutenção (preventiva ou periódica) e aprimoramento do sistema de irrigação por pivô central.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AGRICULTURA MODERNA E A IMPORTÂNCIA DO USO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EFICIENTES

A agricultura moderna é essencial para garantir a segurança alimentar e o

desenvolvimento social e econômico de uma nação (Pereira et al., 2009). De acordo com Barbosa (2012) para alcançar um desempenho eficiente e sustentável, é necessário o uso de tecnologias adequadas, como sistemas de irrigação eficientes.

Otimizar o consumo de água envolve entender as necessidades de diferentes plantas e ajustar a irrigação de acordo. Ao aumentar a eficiência da irrigação, como por meio de manutenção adequada do sistema e inspeções regulares, vazamentos ou mau funcionamento em potencial pode ser identificados logo no início para minimizar o desperdício do consumo de água. Empregar tecnologias inteligentes, como controladores baseados no clima, ajuda a alinhar os cronogramas de irrigação com as condições ambientais em tempo real (Martim, 2024).

Corroborando Loureiro et al (2017) relata que nas áreas irrigadas é crescente a necessidade do monitoramento do desempenho dos sistemas de irrigação, como forma a assegurar uso racional de recursos hídricos e energia. Nos sistemas pressurizados de irrigação, a distribuição espacial da pressão é um parâmetro importante a ser monitorado no processo na avaliação do desempenho destes sistemas. O correto funcionamento dos sistemas pressurizados de irrigação depende de uma distribuição espacial adequada da pressão.

Sistemas de irrigação contribuem com a consolidação de atividades agrícolas para o desenvolvimento do agronegócio, criação de empregos e desenvolvimento de regiões economicamente desfavorecidas, mas com vocação agrícola (Ferreira et al., 2020). De acordo com Testezlaf (2017) que quando os agricultores adotam técnicas de irrigação, diversos benefícios são observados, o que destaca a importância dessa prática na agricultura e entre os benefícios estão: a garantia de produção em relação às necessidades hídricas, a redução dos riscos de quebra de safra devido à seca, o aumento da produtividade das culturas, a criação e ampliação da oferta de emprego e o aumento do número de safras e colheitas na entressafra.

Dentro desse panorama podemos relatar que a agricultura irrigada proporciona uma garantia de produção e tem a possibilidade de aumento significativo na produtividade das culturas, já na agricultura de sequeiro ou não irrigado a produtividade fica susceptível a variabilidade das condições climáticas em relação a disponibilidade de água, diminuindo e as vezes até extinguindo a garantia de produção da cultura.

De acordo com De Souza et al. (2011) com a escassez de água e as mudanças climáticas, é fundamental garantir o uso racional da água na agricultura para evitar o desperdício e maximizar a produtividade. Um dos benefícios da utilização de sistemas de irrigação eficientes é a redução no consumo de água. Sistemas como irrigação por

gotejamento permitem a aplicação direta de água nas raízes da planta, que pode reduzir as perdas por evaporação e escoamento superficial. Além da economia de água, sistemas de irrigação eficientes também contribuem para a economia de energia, pois pode ocasionar a diminuição do tempo de uso do sistema.

Outro aspecto importante de sistemas de irrigação eficientes é o aumento da produtividade agrícola. Plantas adequadamente irrigadas apresentam melhor absorção de nutrientes e desenvolvimento mais saudável. Além disso, a água fornece o substrato necessário para os processos de fotossíntese e transpiração, essenciais para o crescimento das plantas. Com o uso de sistemas de irrigação eficientes, é possível fornecer a quantidade necessária de água às plantas com precisão, evitando tanto o estresse hídrico quanto o excesso de umidade (Jing Zhihao et al., 2019).

Sabe-se dos inúmeros benefícios de sistemas de irrigação eficientes, é fundamental que governos e instituições promovam políticas público-privado e investimentos nessa tecnologia. Em continuidade a essa analogia o Estado do Mato Grosso iniciou a realização de um estudo sobre a inteligência territorial e hídrica da agricultura irrigada por meio da Associação dos Produtores de Feijão, Pulses, Grãos Especiais e Irrigantes de Mato Grosso (APROFIR), onde visam não só viabilizar a irrigação, mas também que o desenvolvimento social das regiões envolvidas esteja incluso como princípio.

Na agricultura moderna, onde a eficiência e a sustentabilidade são imperativos, o funcionamento correto dos reguladores de pressão em sistemas de irrigação assume uma grande importância. Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na otimização do uso da água, garantindo uma distribuição uniforme e precisa ao longo da área irrigada e do sistema de irrigação. Além disso, válvulas reguladoras de pressão operando de forma eficiente contribuem para a redução do desperdício de água, minimizando os custos operacionais e promovendo uma gestão mais responsável dos recursos hídricos.

Portanto, este trabalho de conclusão de curso não apenas destaca a relevância dos sistemas de irrigação eficientes na agricultura moderna, mas também enfatiza a necessidade crítica de assegurar o funcionamento adequado dos reguladores de pressão, como parte integrante desses sistemas, para alcançar os objetivos de produção agrícola sustentável.

2.2 VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO

Os reguladores de pressão mantêm uma pressão de saída predefinida constante que pode ser adaptada ao emissor, independentemente das variações na pressão de entrada. Isso

ajuda a manter a integridade do padrão de distribuição e o desempenho ideal de um aspersor. As variações descontroladas de pressão nos sistemas de irrigação resultam em desvios indesejados de vazão causando o excesso ou deficiência de aplicação de água ao longo do sistema. Essas variações ocorrem com os ciclos de ligar/desligar um canhão final, ativação de um braço articulado (corner), variações na elevação da topografia em um ponto no campo ou mesmo o fornecimento de água. O uso correto das válvulas reguladoras de pressão ajuda a manter a eficiência alta do sistema de irrigação.

A principal função da válvula reguladora de pressão é manter o desempenho desejado do sistema de irrigação, controlando as pressões de entrada excessivas ou maiores que o necessário e variáveis para manter a pressão constante de saída. O uso adequado dos mesmos ajuda a manter a eficiência geral do sistema de irrigação. Os reguladores de pressão garantem o bom desempenho do aspersor e podem ajudar a reduzir os custos de energia e a economizar água. Além disso, a utilização dessas válvulas ajuda a prolongar a vida útil dos emissores e a reduzir o desgaste do sistema de irrigação, diminuindo a necessidade de manutenção e substituição de componentes precocemente.

Os fabricantes oferecem vários modelos de válvulas reguladoras de pressão para atender a várias necessidades de irrigação: faixas de vazão, classificação de pressão operacional, pressão máxima de entrada, tamanho da conexão de entrada e saída e tipo de conexão como NPT (National Pipe Thread), BSPT (British Standard Pipe Thread) e roscas de conexão da mangueira.

Segundo Zaggo et al. (1990) as válvulas reguladoras de pressão são equipamentos que reagem a um acréscimo de pressão diminuindo a seção de passagem de água e, conseqüentemente, aumentando a perda de carga localizada provocada pela válvula.

O funcionamento se baseia na passagem de água através da entrada do regulador por uma base fixa até a área de vazão crítica. Depois, a água entra em um cilindro oco (êmbolo) ou uma haste de controle de vazão presa a um diafragma. O aumento da pressão de entrada faz com que a válvula se feche. A redução da pressão de entrada permite que a válvula se abra. A pressão de saída regulada é determinada pela força de compressão da mola. Abaixo segue uma imagem ilustrativa de um regulador de pressão por mola:

FIGURA 1: Regulador de pressão, modelo de mola



Fonte: Catálogo Senninger (2022).

A caracterização dessas válvulas é especificada pela Norma ISO 10522 (2022), este documento define os critérios de construção, desempenho e métodos de teste para válvulas reguladoras de pressão de ação direta, que são projetadas para operar em sistemas de irrigação com água a temperaturas não superiores a 60°C. Estas válvulas podem ser utilizadas com fertilizantes e produtos químicos comumente utilizados na irrigação agrícola, em diversos tipos e concentrações.

Os testes são procedimentos metódicos e laboriosos, devido ao número de repetições, tempo de execução e estrutura, além da dedicação de um profissional capacitado. Esses ensaios ainda são escassos no Brasil, o que para Lima (2001) é justificado pelo número reduzido de laboratórios especializados e corpo técnico qualificado para a execução deles. Vale destacar ainda, que a demanda por esses laboratórios tende a aumentar, devido ao crescimento da irrigação nos últimos anos (IBGE, 2018) e por causa das exigências atuais do mercado.

2.3 MODELOS DE REGULADORES DE PRESSÃO

Um dos tipos mais comuns de reguladores de pressão utilizados na irrigação é o regulador de pressão de mola. De acordo com o catálogo de produtos da Senninger, (2020) este tipo de regulador é geralmente instalado em tubulações de PVC e possui uma mola que

exerce uma pressão contrária à pressão da água, regulando assim a pressão de saída, esses reguladores são indicados para sistemas de irrigação. Eles são simples de instalar e ajustar, além de possuírem um custo relativamente baixo. No entanto, os reguladores de pressão de mola podem apresentar variações na pressão de saída em função do fluxo de água, podendo ser menos eficientes em sistemas de irrigação com alta demanda hídrica.

Outro tipo de regulador de pressão utilizado na irrigação é o regulador de pressão por diafragma. Neste tipo de regulador, um diafragma flexível é aplicado para ajustar a pressão da água auxiliado por um piloto de controle. Este tipo de regulador é mais preciso e constante do que os reguladores de pressão de mola, o que o torna adequado para sistemas de irrigação com maior demanda de água (CATÁLOGO BERMAD, 2022). No entanto, os reguladores de pressão por diafragma podem ser mais caros e requerem uma manutenção mais frequente em comparação com os reguladores de pressão de mola.

Além dos reguladores de pressão de mola e por diafragma, também existem os reguladores de pressão de pistão. Estes reguladores são compostos por um pistão que se move para ajustar a pressão da água. De acordo com o catálogo técnico (ARO, 2022), reguladores de pressão de pistão são indicados para sistemas de irrigação que operam com pressões de até 500 psi. Eles são geralmente utilizados em sistemas de irrigação de grande escala, como os sistemas de abastecimentos de água. Os reguladores de pressão de pistão oferecem uma pressão de saída mais estável e possuem uma maior capacidade de ajuste em comparação com os reguladores de pressão de mola e por diafragma. No entanto, eles também são mais complexos e possuem um custo mais elevado.

2.4 NECESSIDADE DE AVALIAR O DESEMPENHO DOS REGULADORES DE PRESSÃO EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

De acordo com Castiblanco (2009) os sistemas de irrigação por pivô central, utilizam válvulas reguladoras de pressão, para minimizar os efeitos da variação de pressão na vazão dos emissores, porém essas válvulas diminuem sua capacidade de regulação, seja ele por dimensionamento inadequado da linha lateral ou por desgaste pelo uso, diminuindo a uniformidade de aplicação do pivô central.

Para Frizzzone (1992) um sistema de irrigação é considerado em bom estado de operação quando ele apresenta uma alta uniformidade de distribuição de água entre os emissores, a qual pode ser influenciada pela combinação de fatores diversos, e cita como um exemplo a flutuação da pressão que irá variar a vazão do emissor no sistema de irrigação.

Nesta mesma linha Souza et al., (2000) menciona que dentre os fatores que afetam a uniformidade de distribuição de água além de projetos inadequados, topografia, perdas de cargas, tem-se a falta de válvulas reguladoras de pressão ou o mau funcionamento delas. Para Andrade Junior et al. (1997) a avaliação dos parâmetros que afetam a eficiência e a qualidade da irrigação são indispensáveis quando se tratar de agricultura irrigada.

Em suma, a avaliação dos reguladores de pressão em sistemas de irrigação por pivô central possui um papel de extrema importância. Essa avaliação contribui para a manutenção da pressão adequada da água, redução do desperdício, economia de energia, sustentabilidade ambiental e aumento da produtividade agrícola. Portanto, é fundamental que agricultores, técnicos e investigadores estejam atentos a essa questão e promovam a avaliação regular desses dispositivos para garantir um melhor desempenho do sistema de irrigação.

Os sistemas de irrigação do tipo pivô central são amplamente utilizados na agricultura devido à sua eficiência e praticidade. Um elemento fundamental nesses sistemas é o regulador de pressão, que tem como objetivo fornecer uma pressão constante da água ao aspersor ao longo de toda a linha do pivô, seja ele central ou linear. No entanto, é necessário avaliar o desempenho desses reguladores para garantir uma irrigação eficiente e econômica. Neste ensaio discutiremos a importância de avaliar o desempenho dos reguladores de pressão em sistemas de pivô central, analisando os principais aspectos envolvidos e as consequências da falta de controle adequado.

Os aspersores são as peças responsáveis pela distribuição da água nos sistemas de irrigação por pivô central. Quando a pressão da água é muito alta, os aspersores podem sofrer danos, como entupimentos e quebras, o que impacta diretamente na distribuição uniforme da água. A avaliação do desempenho dos reguladores de pressão é essencial para evitar esses danos e garantir que a irrigação seja efetuada de forma adequada. Citando Fernandes et al. (2020), é destacada a importância da pressão correta na irrigação por pivô central, pois baixas pressões podem causar atenuação na molhagem dos cultivos e altas pressões podem gerar grandes variações na vazão de água e, conseqüentemente, uma má distribuição hídrica.

A avaliação do desempenho dos reguladores de pressão também contribui para a economia de água. Quando a pressão é bem controlada, há uma redução nos desperdícios de água causados por vazamentos e excesso de irrigação. Além disso, um sistema de irrigação eficiente permite o uso de uma quantidade menor de água para alcançar os mesmos resultados produtivos. De acordo com Santana et al. (2018), a pressão excessiva nas tubulações dos sistemas de pivô central pode resultar em perdas consideráveis de água, sendo necessário o uso de reguladores de pressão para minimizar esse problema.

A uniformidade de irrigação é um fator essencial para o sucesso das culturas irrigadas. A falta de controle adequado da pressão da água pode levar a uma distribuição desigual nos aspersores ao longo da linha do pivô, resultando em uma irrigação irregular e até mesmo em déficits hídricos em determinadas áreas. Conforme apontado por Klar et al. (2001), um bom controle da pressão da água é fundamental para garantir uma equilibrada distribuição hídrica em sistemas de irrigação por pivô central, evitando assim o stress hídrico e aumentando a eficiência do sistema.

A avaliação do desempenho dos reguladores de pressão também está diretamente relacionada à vida útil do sistema de irrigação. A pressão inadequada pode sobrecarregar os componentes do sistema, acelerando o seu desgaste e reduzindo sua vida útil. Por outro lado, quando há um controle eficiente da pressão, os componentes do sistema de irrigação tendem a operar de forma mais estável e duradoura. Segundo Campos et al. (2017), a instalação de reguladores de pressão em sistemas de pivô central contribui para a redução do desgaste dos aspersores e tubulações, prolongando assim a vida útil do sistema de Irrigação.

Em suma, a avaliação do desempenho dos reguladores de pressão em sistemas de irrigação do tipo pivô central é de extrema importância para garantir a eficiência, economia e vida útil do sistema. Através do controle adequado da pressão, é possível prevenir danos aos aspersores, economizar água, promover a uniformidade de irrigação e prolongar a vida útil dos componentes do sistema. Por isso, é fundamental que os agricultores e empresas de irrigação realizem avaliações periódicas nesses componentes para garantir o devido funcionamento desses reguladores.

2.5 PROTOTIPAGEM E INSTRUMENTAÇÃO AGRÍCOLA

De acordo com Mantovani (1998) a produção agrícola moderna tem passado por uma imensa modificação, devido ao crescente uso de tecnologia de ponta voltada para aumentar a capacidade de trabalho e a precisão dos equipamentos agrícolas, objetivando racionalizar os recursos naturais e diminuir os impactos sobre o meio ambiente. Nesse sentido Vilela et al. (2003), menciona que esses avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de novos equipamentos e a adaptação daqueles já disponíveis no mercado.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto e hardware livre, que surgiu em 2005, na cidade de Ivrea, Itália, como ferramenta de prototipagem rápida para estudantes leigos em eletrônica e programação. Devido ao sucesso, a placa passou por mudanças para se adaptar aos novos desafios que lhe foram impostos e, assim, suprir as

novas demandas do mercado (ARDUINO, 2019). O Arduino possui portas que podem ser configuradas para funcionarem como entrada ou saída de dados, e permitem conectar, por exemplo, sensores, LEDs, motores, interfaces para armazenamento de dados e, até mesmo, integração com a internet (ARDUINO, 2019).

A linguagem de programação necessária para passar os comandos ao Arduino é a Linguagem C, que, por meio de uma lista de instruções e funções, transmite ao *Arduino*, as ordens que devem ser seguidas, com o intuito de provocar uma tomada de decisão em suas saídas (MONK, 2013). Os agricultores podem adaptar e modificar os sistemas de irrigação baseados em Arduino para atender às suas necessidades e requisitos específicos. Eles podem facilmente adicionar novos sensores, atuadores ou algoritmos de controle para melhorar o desempenho de seu sistema de irrigação. Além disso, ao fazer parte de uma comunidade online vibrante, os agricultores podem compartilhar suas experiências, trocar ideias e acessar uma riqueza de conhecimentos sobre aplicações do Arduino na agricultura (Moreno et al., 2016).

Com a crescente profissionalização do setor da irrigação Brasil tem-se avançado no quesito de automações, utilizando microprocessadores e sensores no processo de aquisição e análises de informações auxiliando assim o produtor na tomada de decisão.

A utilização do Arduino em instrumentação agrícola para irrigação está se tornando cada vez mais popular devido aos seus inúmeros benefícios e melhorias em relação aos métodos tradicionais de irrigação (Yang et al., 2017). Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto que fornece aos usuários uma placa micro controladora e um ambiente de desenvolvimento para escrever software. É amplamente utilizado em diversas indústrias, inclusive na agricultura, devido à sua flexibilidade, facilidade uso e baixo custo (Gao et al., 2019).

Uma das principais vantagens do uso do Arduino na instrumentação agrícola é o custo-benefício. Os sistemas de irrigação tradicionais podem ser caros para instalar e manter, especialmente para pequenos agricultores. O Arduino, por outro lado, oferece uma solução econômica que permite aos agricultores monitorarem e controlar vários parâmetros de irrigação sem gastar muito dinheiro. A própria placa Arduino é relativamente barata e os sensores e atuadores necessários podem ser facilmente adquiridos a preços acessíveis (Yang et al., 2017). Além disso, a natureza de código aberto do Arduino permite personalização e inovação.

Na agricultura, onde a eficiência e a sustentabilidade são imperativos, o funcionamento correto dos reguladores de pressão em sistemas de irrigação assume uma

grande importância. Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na otimização do uso da água, garantindo uma distribuição uniforme e precisa ao longo da área irrigada. Além disso, reguladores de pressão eficientes contribuem para a redução do desperdício de água, minimizando os custos operacionais e promovendo uma gestão mais responsável dos recursos hídricos. Portanto, este trabalho de conclusão de curso não apenas destaca a relevância dos sistemas de irrigação eficientes na agricultura moderna, mas também enfatiza a necessidade crítica de assegurar o funcionamento adequado dos reguladores de pressão, como parte integrante desses sistemas, para alcançar os objetivos de produção agrícola sustentável.

Na vanguarda da agricultura moderna, a prototipagem e instrumentação agrícola emergem como ferramentas essenciais para impulsionar a eficiência e a precisão no campo. Neste contexto, a criação de um dispositivo móvel específico para avaliação de reguladores de pressão representa um avanço significativo. Este dispositivo não só permite a realização de ensaios automáticos de caracterização hidráulica, como também oferece uma abordagem inovadora para monitorar e otimizar o desempenho dos sistemas de irrigação. A integração de tecnologia e conhecimento agrônomo permite uma análise mais detalhada e em tempo real do funcionamento dos reguladores de pressão, possibilitando ajustes precisos e uma gestão mais eficaz da irrigação. Assim, a prototipagem e instrumentação agrícola desempenham um papel crucial na busca por práticas agrícolas mais sustentáveis e produtivas, impulsionando a inovação e o progresso no setor agrícola.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em parceria com a empresa Senninger Irrigação do Brasil e com o IF Baiano – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia - *Campus* Guanambi, localizado a 14° 13' 30" de latitude sul e 42° 46' 53" de longitude oeste e altitude de 525,0 m. Os testes foram realizados em Sorriso – MT, onde foram coletadas as amostras das válvulas reguladoras de pressão com os tempos de operação especificados em 0 hora (A), 3000 horas (B), 5000 horas (C), 7000 horas (D), 8500 horas (E) e 12000 horas (F). Ao todo foram seis fazendas que disponibilizaram as amostras das válvulas reguladoras de pressão para os testes e análises com o protótipo. Como referência de tempo de operação das válvulas reguladoras de pressão foi observado e anotado o horímetro do painel de controle do pivô central. Os testes elaborados, em tempos de vida úteis diferentes, deveram-se a necessidade

de evidenciar a precisão dos sensores de pressão na diversidade de tempos de operação (vida útil) e desgaste dos reguladores de pressão que podem ser encontradas em campo.

Durante a condução dos testes experimentais, o sistema de irrigação foi operado sob condições hidráulicas controladas, a fim de garantir a confiabilidade e reprodutibilidade dos dados coletados. A velocidade média da água nos trechos principais da tubulação permaneceu entre 0,9 e 1,0 m/s, assegurando um regime de escoamento estável e condizente com aplicações reais em sistemas pressurizados, além de ser a velocidade média da água para o bocal instalado no aspersor.

A pressão máxima de operação foi correspondente ao limite superior oferecido pelo conjunto motobomba empregado para alimentação do circuito de testes. Esse limite foi observado e mantido para evitar variações que comprometessem a padronização das leituras de pressão.

A vazão do sistema foi ajustada (com o bocal do aspersor) para 1152 L/h, compatível com o emissor e regulador testados, garantindo o funcionamento contínuo dos sensores de pressão e estabilidade do sistema ao longo dos ensaios. Tais condições permitiram a análise precisa do desempenho dos dispositivos avaliados, favorecendo a aplicação dos testes estatísticos adotados nesta pesquisa.

O protótipo do sistema de avaliação de reguladores de pressão é constituído por 30 cm de tubulação de PVC de 25 mm de diâmetro, dois manômetros de glicerina de 0 a 5 Kgf cm⁻², uma motobomba periférica (marca Thebe modelo TP 80 de 1,0 CV - bivolt), 2 sensores de pressão, um emissor com bocal modelo LDN UP3 instalado sem a placa defletora para o controle da vazão no sistema e conexões de PVC de 25 mm para instalação. Todos os componentes hidráulicos integraram um circuito fechado, no qual a água pressurizada retorna ao reservatório de origem.

Neste trabalho, utilizou-se os testes estatísticos do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), o Coeficiente de Determinação (r²), Gráfico de Dispersão, o Índice de Concordância de Willmott (d), o Índice de desempenho ou Coeficiente de Camargo e Sentelhas (c) e a Classificação de desempenho segundo Hopkins et al. (2009) para avaliar a precisão e a confiabilidade dos sensores de pressão em comparação com as leituras observadas nos manômetros. As considerações de cada teste estão descritas abaixo.

Coeficiente de Correlação de Pearson (r): Esse coeficiente mede a relação linear entre as leituras dos sensores e dos manômetros, confirmando a força e a direção da relação observada.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (1)$$

onde,

O_i é o valor observado (manômetro);

E_i é o valor estimado (sensor);

$\bar{O}$ é a média dos valores obtidos pelo manômetro; e

$\bar{E}$ é a média dos valores obtidos pelo sensor.

Coefficiente de Determinação (r^2): esse coeficiente quantifica a proporção da variabilidade nas leituras de pressão que pode ser explicada pelo modelo linear, pode variar entre valores de 0,0 a 1,0. Valores próximos de 1,0 representam uma alta precisão. O coeficiente de determinação (r^2) é obtido pela equação 2.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

Onde,

O_i é o valor observado (manômetro);

E_i é o valor estimado (sensor); e

$\bar{E}$ é a média dos valores distribuídos.

Índice de Concordância de Willmott (d): De acordo com Willmott et. al (1985), este índice avalia a concordância entre os valores observados e estimados, sendo um valor adimensional entre 0,0 e 1,0. É uma métrica útil para medir o alinhamento entre as leituras dos sensores e dos manômetros (eq. 3).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}| + |E_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

Onde,

O_i é o valor observado (manômetro);

E_i é o valor estimado (sensor); e

$\bar{O}$ é a média dos valores observados no manômetro.

Índice de desempenho ou Coeficiente de Camargo e Sentelhas (c): Esse coeficiente mede a precisão relativa dos sensores em relação aos manômetros, levando em observação tanto a relação linear quanto o desvio sistemático. Os valores obtidos e analisados a partir dos critérios de desempenho para péssimo (valores abaixo de 0,40) a ótimo (valores acima de 0,85) de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

$$c = r \times d \quad (4)$$

Onde,

r é o Coeficiente de Correlação de Pearson;

d é o Índice de Willmot.

Classificação de desempenho segundo Hopkins et al. (2009): Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos nos testes estatísticos, adotou-se a escala proposta por Hopkins et al. (2009) para a classificação do coeficiente de desempenho (c). Essa classificação qualitativa categoriza os resultados em diferentes níveis de correlação entre os valores observados (O_i) e estimados (E_i), variando de trivial ($c < 0,1$), pequena (0,1 a 0,3), moderada (0,3 a 0,5), grande (0,5 a 0,7), muito grande (0,7 a 0,9), quase perfeita (0,9 a 0,99) até perfeita ($c = 1,0$). Essa abordagem contribui para uma análise mais clara e objetiva dos resultados obtidos nos ensaios de avaliação dos reguladores de pressão.

Os dados coletados foram compilados e analisados utilizando o programa Microsoft Excel. Este software foi utilizado para organizar os dados, realizar a limpeza e preparação necessárias, e conduzir as análises estatísticas. As funções e ferramentas do Excel, como: tabelas dinâmicas, gráficos e suplementos de análise de dados foram empregadas para calcular medidas descritivas, realizar testes e análises estatísticas, e gerar as visualizações correspondentes.

Como parte do desenvolvimento e validação do sistema de ensaio hidráulico para reguladores de pressão, foi incluída uma análise descritiva e funcional da estrutura física utilizada durante os testes. O protótipo foi construído com paredes de acrílico transparente, visando permitir a visualização do fluxo de água, facilitar a inspeção durante os ensaios e manter a leveza do conjunto para transporte e montagem.

Durante a condução dos ensaios, foi realizada uma avaliação observacional e

comparativa da integridade física da estrutura, com o objetivo de identificar possíveis falhas relacionadas ao desgaste por esforço mecânico, pressurização contínua e interação com a água pressurizada. Os principais critérios observados foram:

- Estabilidade estrutural e resistência dos painéis laterais;
- Integridade das juntas e colagens;
- Revelação de vazamentos ou fissuras;
- Durabilidade ao longo do tempo de uso e número de ciclos operacionais.

Essa etapa foi essencial para verificar a viabilidade do material escolhido para compor a estrutura do protótipo, bem como para embasar futuras adaptações visando maior robustez e segurança em aplicações de longa duração ou em campo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

A instrumentação necessária para a obtenção da leitura do protótipo foi composta por dois sensores de pressão modelo F1CD de baixa corrente (Figura 2) com escala de trabalho de 0,0 a 10,0 Kgf.cm⁻² e fonte de alimentação de 9 a 32 VDC.

FIGURA 2: Sensor de pressão, modelo F1CD.



Fonte: Elaboração do autor.

O dispositivo eletrônico de controle Arduino é uma placa modelo UNO R1 (Figura 3) com alimentação de pino de 5 a 12V, possui um conector para usb para inserção da programação e não possui conectividade Bluetooth e Wi-fi.

FIGURA 3: Placa Arduino, modelo UNO R1.



Fonte: Internet – Casa da robótica.

Na Figura 4 temos os manômetros utilizados foram de inox glicerinado com rosca de entrada de 1/4" e escala de 0,0 a 5,0 Kgf.cm⁻² para uma melhor precisão das medições.

FIGURA 4: Manômetro de glicerina para observações das pressões de entrada e saída na válvula reguladora de pressão.



Fonte: Elaboração do autor.

Foi utilizado um tubo de PVC BR de 25 mm com 0,30 m de comprimento, quatro conexões tipo "T" de PVC BR (25 mm), duas buchas de redução de $\frac{3}{4}$ " x $\frac{1}{4}$ " e fita veda rosca para vedação das roscas. A pressurização do sistema foi realizada por meio de uma motobomba periférica de 1,0 cv (marca Thebe, modelo TP-80, bivolt). Para o armazenamento da água e funcionamento do circuito de testes, utilizou-se um reservatório construído em acrílico, com dimensões de 40 cm x 40 cm x 80 cm, que serviu como caixa d'água auxiliar durante os ensaios hidráulicos. A montagem do sistema pode ser visualizada na Figura 5 a seguir.

FIGURA 5: Caixa reservatório de água em acrílico.



Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 6 podemos observar o espaço de acomodação do bombeamento junto com as conexões de sucção e recalque. O bombeamento possui sucção positiva (bombeamento afogado) para evitar problemas de cavitação e o bombeamento ter o melhor rendimento durante os testes.

FIGURA 6: Bombeamento e conexões de sucção e recalque.



Fonte: Elaboração do autor.

O sensor de pressão 01 e o manômetro 01 foram instalados a montante (entrada do regulador de pressão) e o sensor de pressão 02 e o manômetro 02 foram instalados a jusante do regulador de pressão. A vazão foi controlada através do bocal número #15 (vazão 1152,0 litros/h, quando instalado em regulador de pressão de 10 psi) instalado no aspersor marca Senninger e modelo LDN UP3, instalado sem o defletor. Abaixo segue a Figura 7 mostrando o modelo do aspersor.

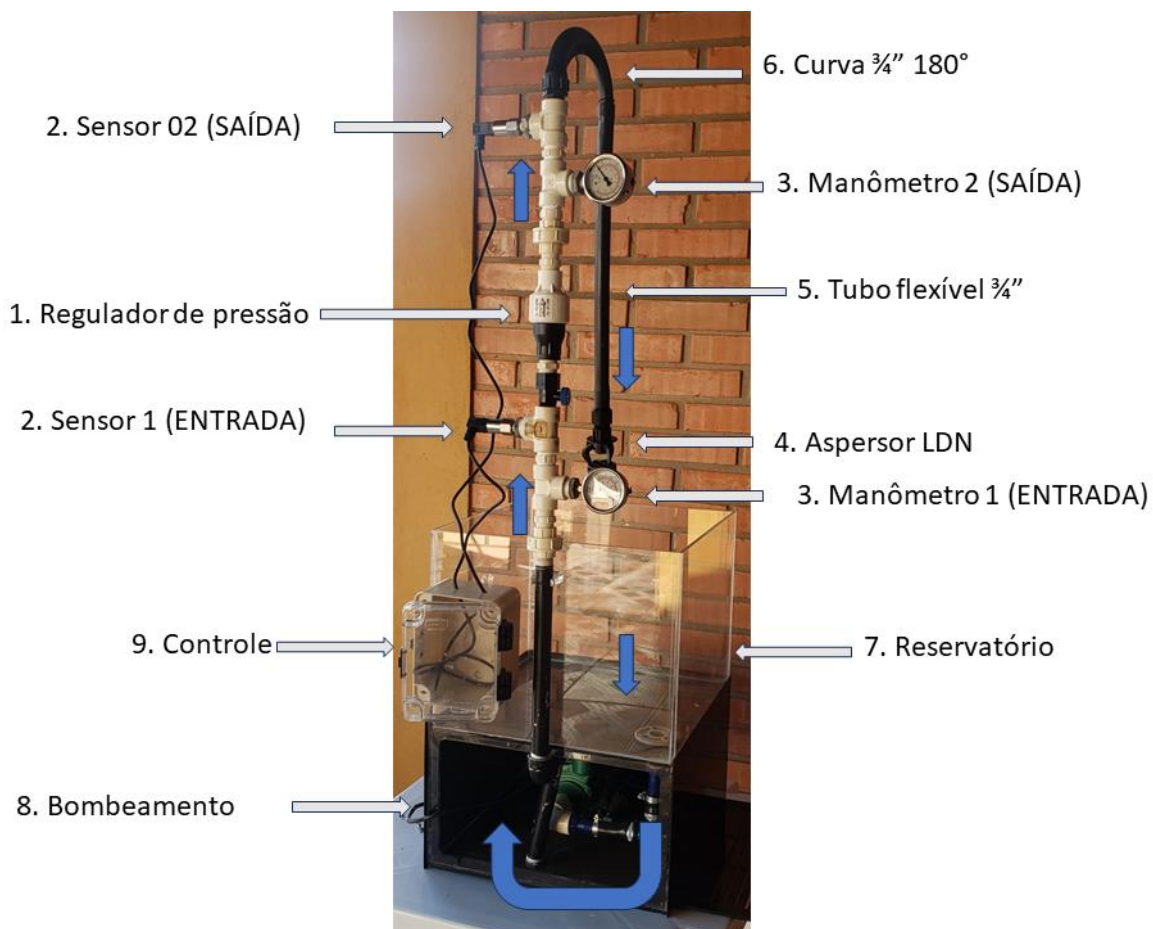
Figura 7: Aspersor Senninger modelo LDN e bocal modelo UP3



Fonte: Catálogo Senninger, (2022).

Foram conectados ao dispositivo de controle (placa Arduino + programação) apenas os sensores de pressão. Abaixo segue a Figura 8 demonstrando o equipamento montado para uma melhor percepção e as setas em azul indicando o fluxo da água no sistema.

FIGURA 8: Esquema de pré-montagem do dispositivo de avaliação.



Fonte: Elaboração do autor.

Descrição dos itens:

01 – Regulador de pressão;

02 – Sensor de pressão;

03 – Manômetro de glicerina 0 a 5 bar;

04 – Aspersor com bocal;

05 – Tubo flexível;

06 – Curva $\frac{3}{4}$ " 180°;

07 – Reservatório;

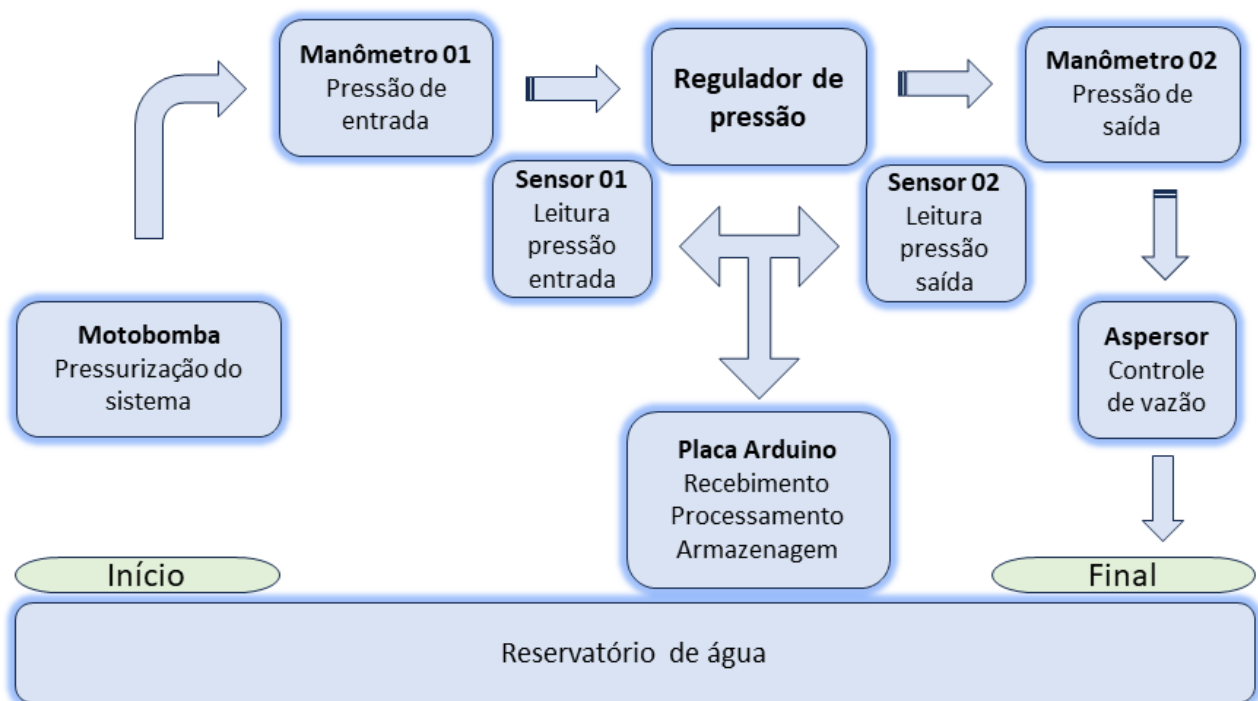
08 – Bombeamento;

09 – Controle e armazenamento.

3.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO

A Figura 9 ilustra o fluxo do sistema, com setas azuis indicando o trajeto percorrido pela água durante o processo de medição e coleta de dados. Após passar por todo o circuito, a água retorna ao reservatório, permitindo sua reutilização em testes subsequentes, promovendo economia e sustentabilidade no experimento.

FIGURA 9: Organograma de montagem e funcionamento.



Fonte: Elaboração do autor.

O sistema foi projetado para simular as condições reais de operação dos reguladores de pressão, permitindo a coleta precisa de dados de entrada e saída hidráulica para fins de análise e calibração.

Inicialmente, a bomba periférica é acionada, pressurizando a água que flui através da tubulação do sistema. Logo após a bomba, a água passa por um sensor de pressão (Sensor 1) e por um manômetro analógico (Manômetro 1), ambos instalados na linha de entrada do regulador de pressão. O Sensor 1 realiza a leitura eletrônica da pressão da água antes do regulador e envia os dados em tempo real para uma placa controladora Arduino, que registra

essas informações para posterior análise. Simultaneamente, a leitura visual do Manômetro 1 é realizada e anotada manualmente, servindo como referência comparativa para validação dos dados captados pelo sensor.

Em seguida, a água entra no regulador de pressão em teste, onde ocorre o ajuste hidráulico para o valor de pressão estabelecido pelo fabricante ou definido previamente no experimento. Na saída do regulador, a pressão da água é novamente medida por meio de outro sensor de pressão (Sensor 2), que também transmite os dados à placa Arduino, e por um manômetro de saída (Manômetro 2), cuja leitura é registrada manualmente.

Esse arranjo permitiu comparar os valores medidos pelos sensores com as leituras dos manômetros, tanto na entrada quanto na saída da válvula reguladora, possibilitando a avaliação do desempenho da válvula reguladora e a confiabilidade das medições realizadas pelos sensores eletrônicos. Os dados coletados foram analisados estatisticamente posteriormente, com base em coeficientes de correlação e desempenho, permitindo uma validação técnica do sistema de monitoramento e do comportamento hidráulico das válvulas. O modelo matemático para conversão do sinal de resposta típico do sensor de pressão em relação a pressão medida será obtido por meio das descrições do fabricante da placa Arduino e a partir daí foi montado uma equação para converter o sinal elétrico em unidade de medida bar para facilitar as leituras. Para a conversão do sinal elétrico ou leitura do sensor em unidade de medida de pressão em “bar” basta multiplicar o sinal emitido por 1,1 e depois dividir o valor por 1024. Conforme segue na programação abaixo.

FIGURA 10: Programação responsável por receber a leitura dos sensores e converter o sinal elétrico para a unidade de medida bar.

```
while ((tempoAtual = millis()) - tempoInicial <= duracaoTeste) {  
    float leituraTransdutorEntrada = analogRead(transdutorEntradaPin);  
    float leituraTransdutorSaida = analogRead(transdutorSaidaPin);  
  
    float pressaoEntrada = (leituraTransdutorEntrada * 1.1) / 1024.0; // Conversão para bar  
    float pressaoSaida = (leituraTransdutorSaida * 1.1) / 1024.0;    // Conversão para bar
```

Fonte: Elaboração do autor

A calibração dessa equação e dos sensores foi executado repetindo os testes e aferindo se ambos estão de acordo com as medições coletadas nos manômetros de glicerina (0,0 a 5,0 Kgf.cm⁻²).

Após as medições realizadas, o dispositivo eletrônico desenvolvido foi responsável pela aquisição, processamento e armazenamento dos dados enviados pelos sensores 1 (pressão de entrada) e 2 (pressão de saída), sendo a coleta de dados realizada por meio da porta serial A1 (Sensor 01) e porta serial A2 (Sensor 02) e o armazenamento em um cartão de memória inserido na placa GPS SHIELD. A placa GPS SHIELD possui um slot para cartão de memória já integrada a ela, sendo assim, poderia ser utilizada também para marcar a localização de onde foi realizado as análises das válvulas reguladoras de pressão.

A parte da programação responsável pela análise e processamento das informações coletadas e que fará a recomendação da “troca ou do reuso” da válvula reguladora de pressão testada, seguirá de acordo com o limite máximo estabelecido de variação de 20% em relação a pressão de saída especificada ($0,7 \text{ Kgf cm}^{-2}$). Então quando a pressão de saída for maior que $0,84 \text{ Kgf.cm}^{-2}$ a programação irá recomendar a troca. O trecho da programação é demonstrado na figura 11 abaixo:

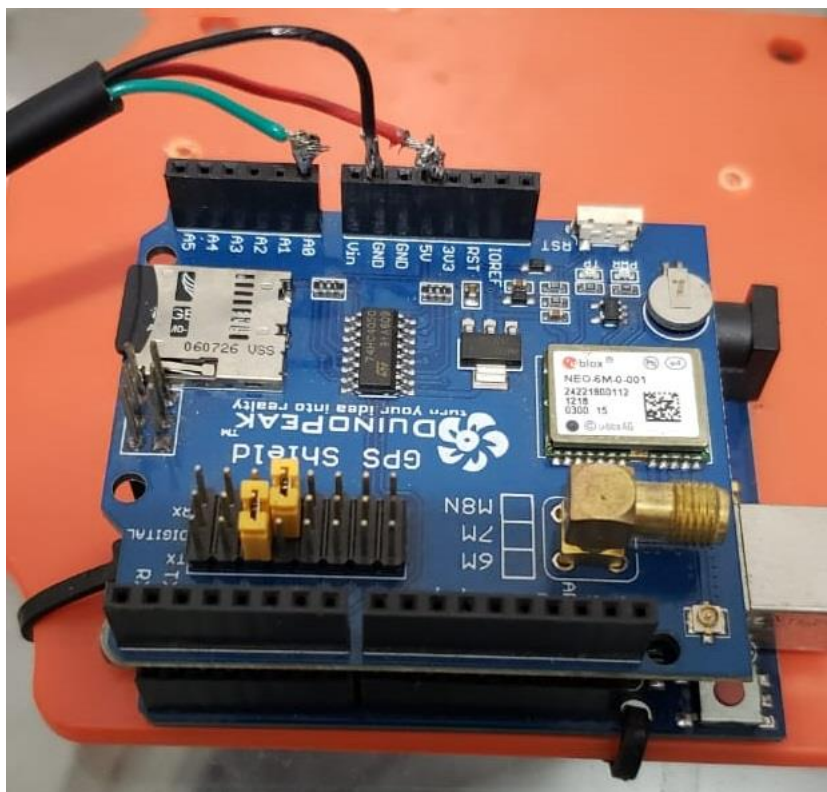
FIGURA 11: Programação responsável por analisar e fazer a recomendação.

```
String recomendacao;  
  
if (pressaoSaida > (pressaoPredefinida + (pressaoPredefinida * limiteVariacao))) {  
    recomendacao = "Trocar";  
    recomendarTroca = true;  
} else {  
    recomendacao = "Reusar";  
}
```

Fonte: Elaboração próprio autor.

Após feita a leitura, análise e a recomendação os dados são armazenados no cartão de memória integrado a placa GPS SHIELD, que está montada junto a placa Arduino UNO R1. Um cartão de memória foi utilizado para salvar os dados, pois a placa Arduino UNO R1 tinha espaço suficiente apenas para a programação, então foi integrado ao sistema a placa GPS SHIELD, pois continha o slot para o cartão de memória. Abaixo, na Figura 12, a demonstração da montagem das placas para integrar o sistema do protótipo.

FIGURA 12: Placa GPS SHIELD + cartão de memória integrada a placa UNO R1.



Fonte: Elaboração do autor.

Abaixo, na Figura 13, estão as linhas de código responsáveis pelo armazenamento dos dados analisados e processados pela programação.

FIGURA 13: Programação com a função de armazenar os dados.

```
// Abre o arquivo de dados para adicionar uma nova linha
dataFile = SD.open("dados.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
  dataFile.print((tempoAtual - tempoInicial) / 1000.0); // Tempo em segundos
  dataFile.print(", ");
  dataFile.print(pressaoEntrada, 3); // Mostrar 3 casas decimais
  dataFile.print(", ");
  dataFile.print(pressaoSaida, 3); // Mostrar 3 casas decimais
  dataFile.print(", ");
}
```

Fonte: Próprio autor

Após a finalização de cada teste, o cartão de memória (micro SD 4 gb) foi removido, sendo possível verificar se as leituras e análises estavam de acordo com o que foi constatado

visualmente nos manômetros. O que por consequência, permitiu analisar sobre a assertividade da recomendação realizada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A norma ABNT NBR ISO 10522:2022 estabelece os requisitos de construção, desempenho e métodos de ensaio para válvulas reguladoras de pressão de ação direta utilizadas em sistemas de irrigação agrícola. Essa normatização tem como objetivo assegurar a uniformidade dos testes e garantir que os reguladores de pressão ofereçam desempenho confiável, especialmente em sistemas que demandam estabilidade hidráulica como os de irrigação localizada e por aspersão. No entanto, o foco principal deste trabalho não foi apenas a conformidade com essa norma, mas sim demonstrar a capacidade do protótipo desenvolvido. Utilizando um sensor de pressão F1CD e uma estrutura móvel robusta, o protótipo demonstrou eficácia na coleta e armazenamento de dados ao longo dos testes realizados.

A não elaboração da curva característica de operação do regulador de pressão, foi devido a necessidade de validar a funcionalidade e a robustez dos sensores, da programação e do protótipo em fazer os ensaios hidráulicos e análises dos testes. Isso assegura que, independentemente das variações específicas das válvulas reguladoras de pressão o protótipo pode fornecer dados precisos e confiáveis, estabelecendo uma base sólida para futuras melhorias e adaptações em conformidade com os padrões normativos.

Durante os ensaios, constatou-se que o dispositivo de controle formado Arduino modelo UNO R1 integrado com a programação desenvolvida em C++ e os sensores de pressão modelo F1CD, possibilitaram a aquisição, processamento e armazenamento eficaz dos parâmetros monitorados continuamente (pressão de entrada e saída) a cada intervalo especificado. É importante destacar que, ao longo de todo período de execução dos testes, não foi detectado nenhuma falha que comprometesse o funcionamento adequado do sistema de instrumentação desenvolvido.

Continuando a avaliação dos sensores de pressão em comparação com as medições observadas nos manômetros de referência, foram gerados gráficos de dispersão que nos mostram a relação de leituras observadas dos manômetros e as leituras emitidas dos sensores.

As equações de regressão podem ser utilizadas como ferramentas de calibração para corrigir os dados obtidos pelos sensores durante a operação dos sistemas irrigados. Isso é especialmente relevante em ambientes que exigem precisão, como em fertirrigação ou

automação agrícola, onde pequenas variações de pressão podem impactar significativamente a eficiência do sistema. Além disso, os modelos gerados podem ser implementados em controladores ou softwares de monitoramento, possibilitando o ajuste automático dos dados conforme a equação calibrada.

A análise das equações de regressão obtidas a partir dos gráficos de dispersão revelou diferenças estatísticas relevantes no desempenho dos sensores de pressão avaliados:

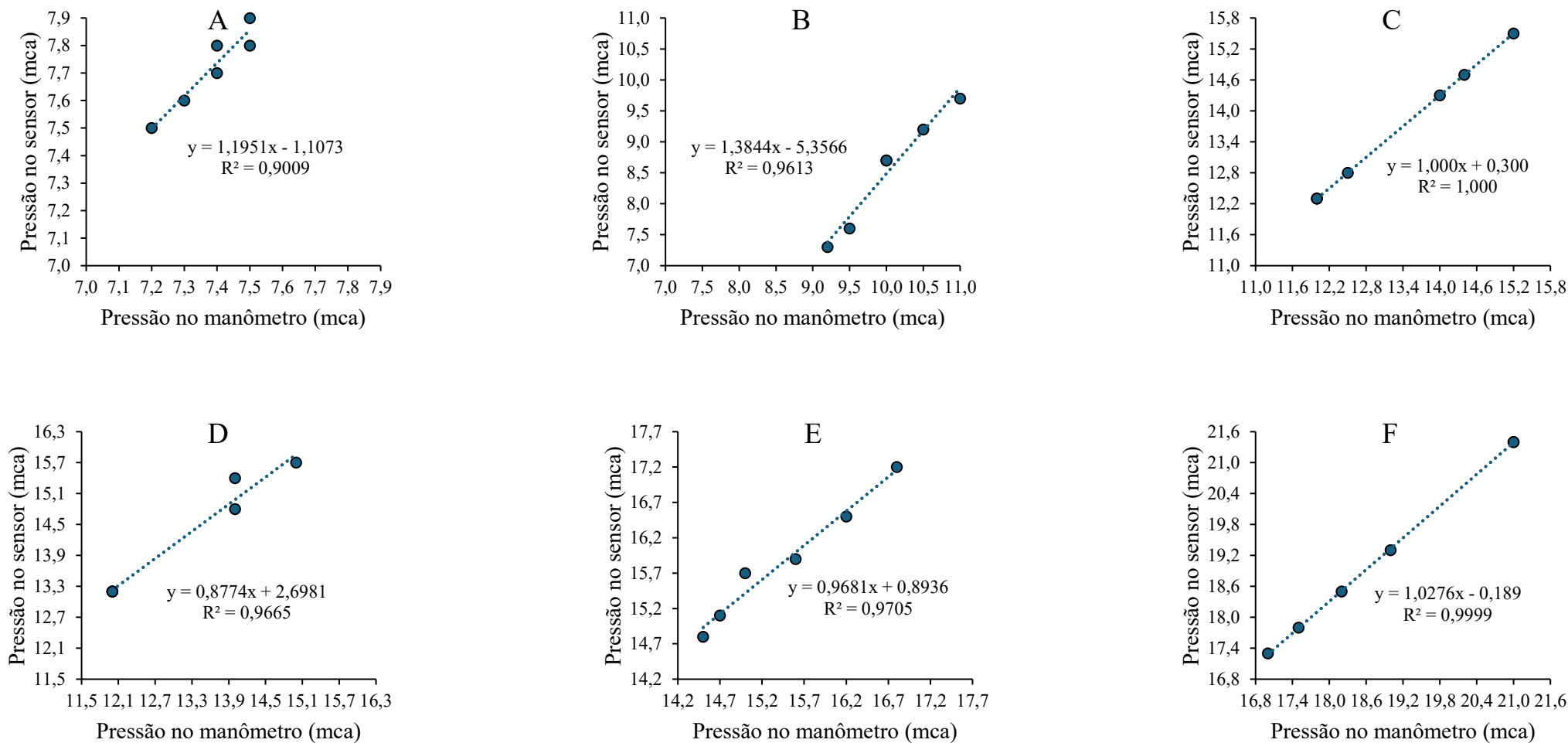
- O Teste **C** destacou-se por apresentar coeficiente angular igual a 1 e intercepto próximo de zero, indicando uma correspondência quase perfeita entre os valores observados (O_i) e os estimados (E_i), o que é reforçado pelo coeficiente de determinação (r^2) de 1,0;
- O Teste **F** apresentou comportamento altamente satisfatório, com coeficiente angular ligeiramente superior a 1 e intercepto negativo pequeno, sugerindo uma leve superestimação em pressões mais baixas, porém com excelente correlação linear ($r^2 = 0,9999$);
- Os Testes **A** e **B** evidenciaram superestimação acentuada dos valores de pressão pelos sensores, com coeficientes angulares significativamente elevados (1,1951 e 1,3844, respectivamente) e interceptos negativos. Apesar dessa tendência, os valores de r^2 (0,9009 e 0,9613) ainda indicam boa relação linear;
- Os Testes **D** e **E** apresentaram coeficientes angulares próximos de 1 e interceptos positivos, o que sugere uma leve subestimação em pressões mais altas, embora mantendo forte correlação (r^2 de 0,9665 e 0,9705, respectivamente).

Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade do uso dos sensores testados em sistemas de irrigação pressurizados, especialmente nas condições simuladas neste estudo. Sensores com desempenho equivalente aos dos Testes C e F podem ser aplicados diretamente em campo com elevada confiabilidade, exigindo mínima ou nenhuma calibração adicional. Por outro lado, sensores com tendência à superestimação (como nos Testes A e B) ou à subestimação (como nos Testes D e E), embora apresentem boa correlação com os manômetros de referência, demandam ajustes ou calibrações específicas para garantir leituras mais precisas ao longo do tempo. Tais desvios podem impactar significativamente o manejo da irrigação, especialmente em sistemas como o pivô central, nos quais a uniformidade da lâmina aplicada depende diretamente da manutenção da pressão adequada em toda a extensão da linha lateral. Portanto, a análise conjunta das equações de regressão e

dos coeficientes estatísticos utilizados neste trabalho proporciona não apenas a validação da eficácia dos sensores avaliados, mas também subsídios técnicos para sua correta calibração e aplicação em condições reais de campo.

A Figura 14 a seguir apresenta os gráficos de dispersão para os diferentes estados de operação das válvulas reguladoras de pressão testadas.

FIGURA 14: Padrão de dispersão linear da correlação entre as pressões observadas no manômetro e emitidas pelo sensor.



Fonte: Próprio autor.

A forte correlação evidenciada nos testes confirma a precisão e eficácia do sensor de pressão utilizando o protótipo, assegurando a sua utilidade em diversas aplicações e no monitoramento de pressão.

Na Tabela 01, são apresentados os coeficientes de determinação (r^2), juntamente com os coeficientes de correlação de Pearson (r), concordância de Willmott (d) e o índice de Camargo e Sentelhas (c), obtidos a partir dos dados gerados pelo sensor de saída em relação ao manômetro para os diferentes tempos de operação das válvulas reguladoras de pressão. Esses coeficientes fornecem uma análise detalhada do desempenho dos senhores em relação a precisão, exatidão e a confiabilidade das medições ao longo do tempo.

TABELA 01: Análises dos coeficientes estatísticos

TESTES	Coeficiente Correlação de Pearson (r)	Coeficiente Determinação (r^2)	Índice de Willmott (d)	Índice de desempenho (c)
A	0,9492	0,9009	0,4160	0,3949
B	0,9804	0,9613	0,5118	0,5018
C	1,0	1,0	0,9857	0,9857
D	0,9831	0,9665	0,8094	0,7957
E	0,9852	0,9705	0,9375	0,9236
F	0,9999	0,9999	0,9890	0,9890

Fonte: Elaboração do autor.

A primeira coluna da tabela 01 representa os testes executados, teste A foram feitos com reguladores novos, teste B com reguladores com 3000,0 horas de funcionamento, testes C com 5000,0 horas, teste D com 7000,0 horas, teste E com 8500,0 horas e teste F para 12000,0 horas.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) revelou uma forte relação linear entre as variáveis em todos os testes, o que indica que há uma associação robusta entre as leituras do manômetro e do sensor. No Teste A, (r) foi de 0,9492, já demonstrando uma correlação significativa. Este valor aumentou para 0,9804 no Teste B, 0,9831 no Teste D e 0,9852 no Teste E, indicando uma correlação muito forte. Nos Testes C e F, o

coeficiente de Pearson atingiu valores de 1,0000 e 0,9999, respectivamente, representando uma correlação quase perfeita entre os valores observados e estimados. Esses altos valores de **(r)** reforçam a confiabilidade dos sensores, indicando que as leituras tendem a seguir uma tendência linear muito próxima aos valores de referência.

Complementando essa análise, o coeficiente de determinação **(r²)** ofereceu insights sobre a variabilidade dos dados explicada pelo modelo. No Teste A, o **(r²)** foi de 0,9009, o que significa que cerca de 90% da variação nas leituras do manômetro pode ser explicada pelo modelo. No Teste B, o **(r²)** aumentou para 0,9613, enquanto no Teste D e no Teste E os valores foram de 0,9665 e 0,9705, respectivamente, indicando uma alta explicação da variância. Nos Testes C e F, o **r²** foi de 1,0000 e 0,9999, respectivamente, o que significa que praticamente toda a variabilidade dos valores observados foi explicada pelo modelo, confirmando a alta precisão dos dados para esses testes.

O coeficiente de concordância de Willmott **(d)** apresentou variações significativas entre os testes, refletindo diferentes níveis de concordância entre os valores observados e estimados. No Teste A, o valor de **(d)** foi de 0,4160, indicando uma baixa concordância e sugerindo possíveis inconsistências ou desvios nos dados coletados. Já no Teste B, o coeficiente aumentou para 0,5118, apresentando uma concordância um pouco mais elevada, embora ainda moderada. Nos Testes C, E e F, os valores de **(d)** atingiram níveis muito altos, de 0,9857, 0,9375 e 0,9890, respectivamente, indicando uma concordância excelente e evidenciando que os valores observados e estimados estão bastante próximos. O Teste D, com **(d)** de 0,8094, também apresentou uma concordância elevada, mas ligeiramente inferior aos Testes C, E e F.

Por fim, o índice de Camargo & Sentelhas **(c)**, que combina informações de correlação e concordância, destacou-se como uma métrica importante para avaliar tanto a precisão quanto a exatidão das medições. O Teste A obteve um valor de **(c)** de 0,3949, refletindo baixa precisão e exatidão, enquanto o Teste B apresentou uma melhoria moderada com **c** de 0,5018. Nos Testes C, E e F, os valores de **(c)** foram elevados, 0,9857, 0,9236 e 0,9889, respectivamente, confirmando a alta confiabilidade dos dados. O Teste D também mostrou um bom desempenho, com **(c)** de 0,7957, o que indica uma precisão e exatidão consideráveis, embora ligeiramente inferior aos Testes C, E e F.

Esses resultados permitem concluir que, enquanto os Testes A e B apresentaram valores mais baixos de concordância e precisão, possivelmente devido a fatores externos ou desvios instrumentais, os Testes C, E e F destacaram-se por sua alta confiabilidade, com valores próximos ou iguais a 1 nos principais coeficientes. Esses testes mostraram

uma correlação e concordância quase perfeitas, reforçando a robustez dos sensores utilizados. Assim, os índices avaliados demonstram que, em condições ideais, os sensores de pressão testados possuem um desempenho excelente, garantindo uma medição precisa e confiável para as condições estudadas.

Foi aplicada a classificação de Hopkins et al. (2009) ao índice de desempenho (c), conforme apresentado na Tabela 02. Essa classificação qualitativa permitiu avaliar a força da associação entre os valores observados e estimados, considerando o grau de concordância dos dados obtidos pelo sistema de medição. A aplicação dessa escala qualitativa torna a análise mais compreensível e facilita a identificação de quais configurações apresentaram melhor desempenho durante os ensaios.

TABELA 02: Análise segundo a classificação de Hopkins (2009).

TESTES	Índice de desempenho (c)	Classificação segundo Hopkins
A	0,3949	Moderada
B	0,5018	Grande
C	0,9857	Quase perfeita
D	0,7957	Muito grande
E	0,9236	Quase perfeita
F	0,9890	Quase perfeita

Fonte: Elaboração do autor

Com base nessa escala, os testes C, E e F apresentaram índices (c) superiores a 0,9, sendo classificados como de “correlação quase perfeita”, o que evidencia uma altíssima concordância entre os valores medidos pelos sensores e os dados observados nos manômetros. Essa elevada correlação reforça a confiabilidade do sistema de medição desenvolvido, onde os sensores apresentaram as melhores respostas.

O teste D, com índice (c) igual a 0,7957, enquadra-se na categoria de “correlação muito grande”, o que ainda representa um excelente desempenho, embora ligeiramente inferior aos anteriores. Já o teste B, com (c) = 0,5018, foi classificado como de “correlação grande”, indicando boa concordância entre os dados, mas com maior dispersão e possível influência de oscilações na leitura e no controle da pressão.

Por fim, o teste A apresentou o menor índice de desempenho $(c) = 0,3949$, sendo classificado como de “correlação moderada”. Esse resultado sugere maior variação entre os dados observados e estimados.

Durante a realização dos ensaios hidráulicos, foi conduzida uma análise descritiva da estrutura em acrílico utilizada como reservatório principal do sistema de testes. A escolha inicial do acrílico baseou-se em suas características vantajosas, como leveza, transparência para visualização do fluxo de água e fácil manipulação. No entanto, ao longo dos testes, foram observados diversos indícios de degradação estrutural progressiva como mostrado nas figuras 15 e 16.

Dentre os principais problemas verificados, destacam-se:

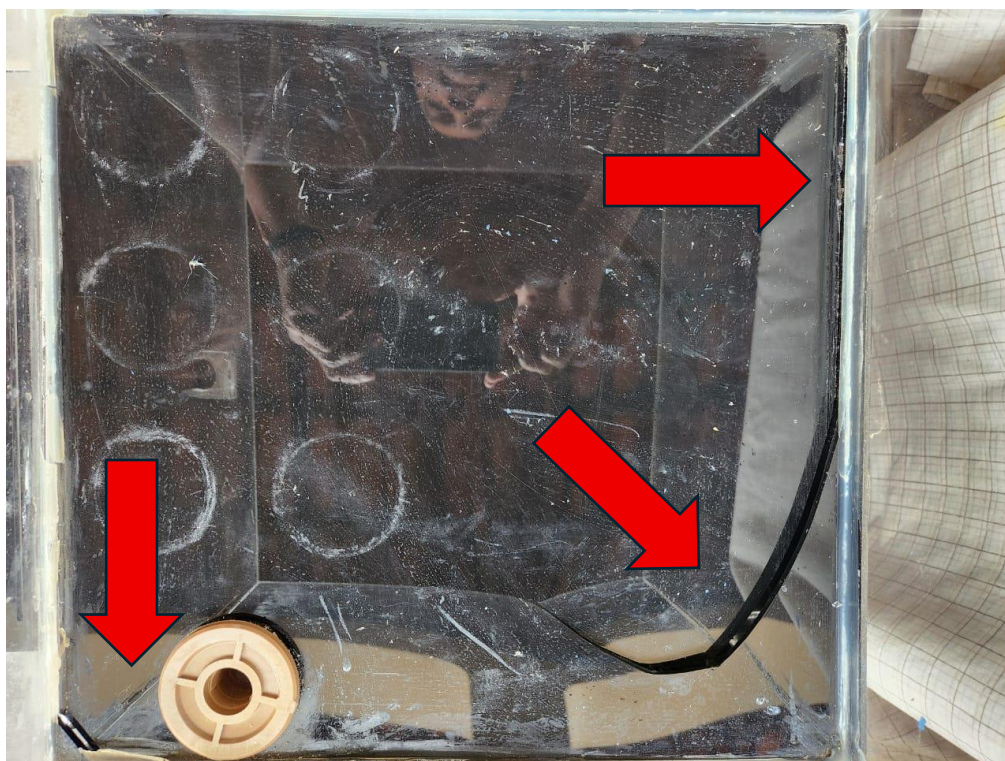
- Empenamento das paredes laterais do reservatório, ocasionado provavelmente pela pressão interna da água aliada às vibrações geradas durante o funcionamento do sistema;
- Descolamento das laterais e regiões de encaixe, sinalizando fragilidade nas conexões feitas com colas ou soldagens plásticas, que não suportaram a tensão acumulada ao longo do tempo;
- Rompimento do fundo do reservatório, gerando vazamentos expressivos que comprometeram a continuidade dos testes em determinadas etapas;
- Afrouxamento gradual da estrutura, tornando o conjunto menos estável à medida que os ensaios avançavam.

FIGURA 15: Caixa de acrílico com descolamento lateral da estrutura.



Fonte: Elaboração do autor.

FIGURA 16: Rompimento do fundo e descolamento de estrutura da caixa acrílica.



Fonte: Elaboração do autor.

Apesar dos benefícios observados, como a leveza do material e a visualização facilitada do interior do sistema, o acrílico demonstrou baixa resistência mecânica e pouca durabilidade frente aos ciclos contínuos de pressurização e despressurização a que foi submetido. Esses resultados reforçam a necessidade de revisão na escolha dos materiais para futuros protótipos ou aplicações em ambientes de campo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados demonstrou que a prototipagem utilizando Arduino, conseguiu executar a programação necessária e atender as demandas das análises do projeto de forma eficaz. O sistema foi capaz de cumprir os objetivos da pesquisa, recebendo e processando as leituras dos sensores de pressão e otimizando os testes realizados.

Os resultados dos testes de desempenho dos sensores em relação aos manômetros para diferentes tempos de operação das válvulas reguladoras de pressão demonstram uma confiabilidade elevada na medição da pressão ao longo do tempo. A análise dos

coeficientes de concordância (d), demonstrativa (r), determinação (r^2) e o índice de Camargo & Sentelhas (c) revela um desempenho robusto dos sensores, especialmente nos tempos de operação mais prolongados, onde os índices atingem valores próximos a 1, revelando uma alta precisão e exatidão.

Em linhas gerais, podemos concluir que os sensores utilizados apresentam uma excelente capacidade de monitoramento, com forte concordância com os valores medidos pelos manômetros. Os coeficientes altos de transparência e determinação refletem uma associação linear e consistente entre os valores coletados e estimados, enquanto os índices diretos de concordância e o coeficiente de Camargo & Sente confirmam a precisão e a confiabilidade das estimativas.

No entanto, algumas melhorias estruturais são necessárias. Considerando os problemas estruturais identificados, recomenda-se a substituição do acrílico por materiais com maior resistência e durabilidade, como:

- Policarbonato, que oferece resistência superior ao impacto e mantém a transparência;
- Polietileno ou PVC técnico reforçado, que, embora menos transparentes, apresentam excelente desempenho sob pressão e são amplamente utilizados em sistemas hidráulicos;
- Estruturas metálicas com visor de inspeção, que combinam robustez estrutural com pontos de visualização estratégicos em acrílico ou policarbonato.

Sugere-se ainda a adoção de reforços adicionais nos pontos de maior esforço mecânico, o uso de vedantes industriais de alta performance e a estruturação modular do sistema, possibilitando substituições rápidas de componentes eventualmente danificados. Tais melhorias visam prolongar a vida útil do dispositivo, garantir segurança operacional e manter a qualidade na coleta dos dados ao longo dos testes.

Por fim, recomenda-se a implementação de um sistema de engate rápido para a conexão e desconexão das válvulas reguladoras durante os testes. Essa solução tende a otimizar o tempo de operação, reduzir o desgaste dos componentes e aumentar a eficiência dos ensaios, especialmente quando há a necessidade de múltiplas trocas de dispositivos. Com essa e outras melhorias estruturais, o protótipo apresenta grande potencial para se consolidar como uma ferramenta prática, confiável e versátil para a

realização de testes hidráulicos em válvulas reguladoras de pressão utilizadas em sistemas de irrigação.

REFERÊNCIAS

ANDRADE JUNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RODRIGUES, B.H.N. Efeito do tempo de uso na uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por gotejamento. Irriga, Botucatu, 1997.

ARDUINO. Digital Pins Explained. Arduino.cc, 2019. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 10 mar. 2024.

ARDUINO. UNO R3 Technical Specifications (ou similar). Arduino.cc, 2019. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 10 mar. 2024.

ARO. Catálogo técnico de válvulas e componentes pneumáticos. [S.l.]: ARO/Ingersoll Rand, 2022. Catálogo técnico.

BANCO MUNDIAL. Global experience from regulatory sandboxes, 2020. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/912001605241080935/pdf/Global-Experiences-from-Regulatory-Sandboxes.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fdocuments1.worldbank.org%2Fcurated%2Fen%2F912001605241080935%2Fpdf%2FGlobal>. (Acesso em 24/07/24)

BARBOSA, E. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C.; DA SILVA, T. J.; SAKAI, E. (2012). Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 16(9), 952-959.

BERMAD. Catálogo técnico de válvulas hidráulicas para controle de irrigação. [S.l.]: Bermad, 2022. Catálogo técnico

BOMBARDELLI, W.W.A.; CAMARGO, A.P.; LAVANHOLI, R.; ARAUJO, A.C.S.; TALAMINI JUNIOR, M.V.; FRIZZONE, J.A. Projeto e validação de uma bancada para ensaios de perda de carga localizada. Irriga, Edição especial Irriga & Inovagri, v.1, n.1, p.1-10, 2017.

CAMARGO, A. P; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPOS, A.; FERREIRA, M.; RIBEIRO, M. (2017). Efeito dos reguladores de pressão na uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por pivô central. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 11(4), 2076-2082.

CASTIBLANCO, C.J.M. Economia de energia em irrigação por pivô central em função da melhoria na uniformidade da distribuição de água, 2009. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba – SP.

DE SOUSA, V. F.; PINTO, J. M.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; DE MEDEIROS, J. F.; SANTOS, F. D. S. Irrigação e fertirrigação na cultura do melão. In: Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF; Embrapa Informação Tecnológica, 2011. P. 659-685.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION). Manual de técnicas de irrigação pressurizada, 2007. Disponível em: <https://www.fao.org/4/a1336e/a1336e00.htm> (Acesso em 20/06/24).

FERNANDES, B.; CARNEIRO, V.; SANTOS, C.; BONGIOVANI, M. (2020). Avaliação da eficiência do sistema de irrigação por pivô central em cultura do feijão. *Revista Agrogeoambiental*, 12(1), 59-67.

FERREIRA, M. D. P.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Eficiência técnica na agropecuária: capacidade de armazenagem e densidade de rodovias. Uma Jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2020.

FRIZZONE, J. A. Uniformidade e eficiência de irrigação. Piracicaba: DER/ESALQ, 1992. 53p (Série didática 3).

GAO, X.; LIU, Y.; ZHU, D.; HUO, Z. (2019). Projeto de um sistema de monitoramento de umidade do solo sem fio baseado em Arduino. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 389(1), 012024.

HOPKINS, W. G.; MARSHALL, S. W.; BATTERHAM, A. M.; HANIN, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, v. 41, n. 1, p. 3–13, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo Agropecuário 2017. Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 108p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 10522:2022 — Agricultural irrigation equipment — Pressure regulators — Performance specifications and test methods. Geneva: ISO, 2022. 18 p.

JING ZHIHAO, J.Z.; JING YUANSU, J.Y.; ZHANG FANGMIN, Z.F.; QIU RANGJIAN, Q.R.; WIDO, H. (2019). Aplicação do modelo Simple Biosphere 2 (SiB2) com módulo de irrigação a uma típica terra de cultivo de solo vermelho baixo e montanhoso e a análise de sensibilidade de fluxos de energia modelados no sul da China.

KLAR, A. E.; SANTANA, R. C.; DUROHA, C. Evaluation center pivot systems using new and old sprays and pressure regulators. *Irriga, Botucatu*, v. 6, n. 1, p. 42–47, abril 2001.

LIMA, S.C.R.V. Avaliação hidráulica de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. 2001. 83p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LOUREIRO, G.F.; ARAÚJO, D.S.A.; COLOMBO, A. Calibração de um sensor MPX5700 conectado a um Arduino modelo uno. In: XLVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 2017.

MANTOVANI, E.C.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Máquinas e operações utilizadas na

agricultura de precisão. In: SILVA, F.M. (Ed). Mecanização e agricultura de precisão. Poços de Caldas: SBEA, 1998. P. 109-157.

MARTIM, L. (2024) Sistemas de irrigação eficientes para conservação de água: compreensão, tipos e benefícios. <https://livinator.com/efficient-irrigation-systems-for-water-conservation-understanding-types-and-benefits/> (Acesso em 23/07/24).

MICROSOFT CORPORATION. (2023). Microsoft Excel. [Software]. Disponível em: <https://www.microsoft.com/excel>.

MONK, S. Programação com Arduino: começando com Sketches. Bookman Editora, 2013.

MORENO, I., POVEDA, E., DIAZ, C., & SOTO, F. (2016). Sistema de irrigação inteligente baseado em Arduino para agricultura ao ar livre. Transações WSEAS sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 12, 58-68.

PERBONE, A. Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia. 2016. 72p. Tese (Doutorado em Ciências), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Lidando com a escassez de água: Enfrentando os desafios. Springer Science & Business Media, 2009. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377411002290> acesso em 25/07/24).

SANTANA, J., SILVEIRA, F., & CARVALHO, I. (2018). Avaliação energética do sistema de irrigação por pivô central em cultivo de batata. ABES-ENASB, 47(1), 65-71.

SENNINGER IRRIGATION INC. Catálogo técnico de produtos Senninger: soluções em irrigação por aspersão e microaspersão. Clermont, FL: Senninger Irrigation, 2020. 72 p. Catálogo técnico.

SOUZA, L. O. C. de; MANTOVANI, E. C.; SOUSA, M. B. A.; BUFFON, V. B.; BONOMO, R.; SOARES, A. A.; RAMOS, M. M. Uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão e pivô central na cafeicultura irrigada. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafês do Brasil (1.: 2000 : Poços de Caldas, MG). Resumos expandidos. Brasília, DF: Embrapa Café; Belo Horizonte: Minasplan, 2000. v. 2, p. 863-864.

TESTEZLAF, R. Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações. Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017, 215 p.

VILELA, L.A.A.; CARVALHO, H.P. PRADO G., BOTREL, T.A. Construção e calibração de um manômetro digital microprocessado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32.,2003.

WILLMOTT, C. J., CKLESON, S. G., DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparision of models. Journal of Geophysical Research. Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

YANG, C.; TANG, Q.; YANG, H. (2017). Um sistema de irrigação por gotejamento automatizado usando microcontrolador Arduino para produção de hortaliças em estufa. *Jornal Internacional de Engenharia Agrícola e Biológica*, 10(2), 153-161.

ZAGGO, S.P., COLOMBO, A.; GIL, O. F. Desempenho de válvulas reguladoras de pressão utilizadas em sistemas pivô central, XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Piracicaba, SBEA, 1990, Anais, Vol. I, p 360-79.