**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Desenvolvimento de um regulador de pressão microprocessado

Leonardo de Lucena Martins

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2012**

Leonardo de Lucena Martins
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de um regulador de pressão microprocessado

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2012

Dedico

A Deus

Pela vida e sabedoria

A Nossa Senhora

Pela poderosa intercessão

Ofereço

Aos meus amados pais

José Cláudio Martins e Adelaide Salas de L. Martins
Por serem a razão da minha vida

A meu padraсто

Altamiro Rodrigues de Oliveira
Pelos constantes exemplos de determinação, persistência, honestidade e ensinamentos

Aos meus queridos irmãos

Ana Cláudia, Luis Henrique e Luciane
Pelo amor, carinho, amizade e incentivo

Aos meus lindos sobrinhos

Munan, Miller e José Cláudio
Aos quais libero as palavras de um futuro promissor e marcado por benções divinas

A minha amada namorada

Cartiane R. M. da Rocha
Pelo amor, companheirismo, incentivo, compreensão e força

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e com ela a capacidade de sonhar, lutar e conquistar meus ideais. A Ele, toda gratidão por ser meu pai nos momentos de alegria, por ser o caminho nos momentos de incertezas e por ser o refúgio nos momentos necessários. “O impossível é apenas uma das especialidades de Deus”.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela realização do meu mestrado.

Ao professor Dr. Tarlei Arriel Botrel, pela orientação, confiança, amizade e pelo exemplo de caráter e sabedoria. Pela demonstração de que é possível conquistar o sucesso superando as dificuldades, limitações ou fracassos, respeitando o próximo, com muita humildade, honestidade e sempre com simplicidade.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas pelo conhecimento transmitido.

Aos funcionários do Departamento pela atenção e disposição durante a realização dos trabalhos.

Aos amigos Marinaldo e Antônio, pela amizade e grande contribuição na realização desta pesquisa.

Aos amigos de laboratório Alex, Dinara, Ana Paula, Vanessa, Isaac e Ezequiel pela amizade, paciência, companheirismo e pelos bons momentos compartilhados.

Em especial, agradeço também ao Conan, pelo convívio, paciência, ensinamentos, gentileza, amizade, atenção e auxílio no desenvolvimento desta dissertação. Obrigado por tudo, sou e serei sempre grato a você. “A gente não faz amigos, reconhece-os”.

À amiga Deinha, parceira de república, providência de Deus em minha vida, uma das pessoas mais guerreiras e determinadas que conheci, exemplo de fé, caráter e fortaleza. Obrigada pelos ensinamentos, pelo exemplo e pela amizade.

Ao amigo-irmão Hilo, que desde o início desta nova etapa de minha vida, sempre esteve ao meu lado me aconselhando, dando forças, compartilhando momentos de alegria e de tristeza e que terei sempre como exemplo de determinação e amor a profissão.

Aos amigos, Sandrina, Denis, Nathy, Si, Rô, Jú, Rê, Oscar, Fábio, Luizinho, Karina e Tiago pelo carinho, amizade e incentivo. Obrigada por serem minha família aqui. “Amigos são familiares que cada um escolhe sozinho”.

Aos meus amigos de graduação Andrea, Márcio, Romulo, Adrian, Lorena e Alinne, por terem proporcionado indispensáveis palavras de força, batalha, determinação e conquista.

A Carty (preta), minha namorada amada, pela amizade, confiança e companheirismo, que zela pela minha felicidade, que se coloca a postos para ouvir minhas súplicas, meus anseios, calenta meus choros dizendo palavras confortáveis nos momentos mais difíceis, e que compartilha comigo momentos de felicidades inesquecíveis. “Quando se ama não é preciso entender o que se passa lá fora, pois tudo passa a acontecer dentro de nós”. Obrigado por tudo!.

Aos meus sogros, Dona Rubenita e Seu Carlos, pelo apoio e incentivo, que certamente me motivaram a perseverar neste trabalho. “A verdadeira família é aquela unida pelo espírito e não pelo sangue.”

A minha família, meus irmãos, meus sobrinhos, avós, primos, tios (em especial as Tias Lúcia, Tio Ito e tio Manoel) e cunhados, pelo amor, apoio e dedicação, que me possibilitaram cumprir mais uma etapa. “A Família não nasce pronta; constrói-se aos poucos, e é o melhor laboratório do amor”. Por isso, que todos os dias, experimento com profundidade a grande aventura de ama-lós sem medo, no meu laboratório chamado coração.

Ao meu pai, pois “num misto de imensa alegria e saudade, ao receber mais uma vitória sinto-me com mais propriedade a força desse amor. Fecho meus olhos e percebo que você está mais perto do que nunca. Está no meu olhar, nos meus gestos, nas minhas palavras, no meu modo de ver o mundo. Consigo perceber em meio aos aplausos a sua presença, vejo seus olhos marejados de emoção e um sorriso de orgulho em seu rosto. O senhor está comigo da mesma forma que esteve até agora em todos os momentos da minha vida. Minhas palavras nunca expressarão a saudade que sinto do senhor, mas quero que saiba que sua ausência nunca significou esquecimento, onde quer que esteja, dedico essa vitória a você, meu querido e sempre admirável pai. Te amo!

E por fim, a minha mãe guerreira e padraсто vitorioso digo obrigado, simplesmente porque, não há uma palavra que expresse a proporção da minha gratidão e orgulho. Como agradecer a tantas renúncias a meu favor, os conselhos,

lições, as lágrimas derramadas por conta da distância; ensinaram-me a nunca desistir dos meus sonhos e sempre agradecer, mas não avisaram que em momentos como este, não haveria palavras para exprimir essa emoção... e hoje, só posso dizer: Mãe e Altamiro, vocês são meus exemplos de vida e meus refúgios. Amo vocês!

A Capes pela concessão da Bolsa de Mestrado.

Muito Obrigado!

EPÍGRAFE

“Mais do que máquinas
precisamos de humanidade.
Mais do que inteligência precisamos de
afeição e doçura.
Sem essas virtudes a vida será de
violência e tudo estará perdido”

Charles Chaplin.

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 DESENVOLVIMENTO	23
2.1 Revisão Bibliográfica	23
2.1.1 Uso da água na agricultura	23
2.1.2 Eletrônica e a automação agrícola	24
2.1.3 Reguladores de pressão e sua aplicação.....	25
2.1.4 Classificação dos reguladores de pressão	28
2.1.5 Regulagem de pressão	28
2.1.6 Característica de fabricação.....	29
2.1.7 Desempenho de reguladores na ausência de vazão	29
2.1.8 Exatidão do regulador	29
2.1.9 Faixa de regulação	30
2.2 Material e métodos	30
2.2.1 Composição e montagem do hardware.....	31
2.2.2 Transdutor de pressão	34
2.2.3 Calibração do sensor de pressão.....	37
2.2.4 Válvula hidráulica	38
2.2.5 Válvula solenóide	38
2.2.6 <i>Software</i> de controle	39
2.2.7 Montagem da estrutura física experimental.....	44
2.2.8 Teste do regulador eletrônico de pressão	44
2.3 Resultados e discussão.....	46

2.3.1 Resposta do regulador a mudanças de pressão na entrada	46
2.3.2 Níveis de exatidão para pressão de saída versus pressão de entrada e vazão constante.....	54
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
4 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65
ANEXOS.....	69

RESUMO

Desenvolvimento de um regulador de pressão microprocessado

Dentre os fatores que afetam a uniformidade de aplicação de água, cita-se a variação de pressão no sistema, causada principalmente pela topografia do terreno e pela inexistência ou operação inadequada de reguladores de pressão. Nesse sentido, têm-se empregado válvulas reguladoras de pressão nos projetos de irrigação com variações topográficas. Contudo, a pressão de saída na válvula nem sempre será correspondente a apresentada no catálogo do fabricante. Com o avanço da eletrônica e a modernização da agricultura irrigada, justifica-se a busca para o aperfeiçoamento das técnicas de controle de pressão em sistemas de irrigação, visando à redução das perdas e o atendimento dos preceitos da irrigação sustentável. Portanto, a automação de reguladores de pressão deve torná-lo capaz de manter constante a pressão de saída, independente da pressão de entrada, além de possibilitar estabelecer a pressão de saída de acordo com as necessidades específicas de cada sistema de irrigação. De acordo com o que foi exposto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um regulador de pressão microprocessado. O sistema de regulação desenvolvido foi composto por uma válvula hidráulica, um transdutor de pressão, duas válvulas solenóides, um aspersor e um circuito microprocessado. Baseado na leitura do transdutor de pressão de saída, o controlador eletrônico acionava as válvulas solenóides para pressurizar ou para aliviar o diafragma da válvula hidráulica. O tempo de abertura da válvula solenóide era função da pressão instantânea na tubulação. Avaliou-se o equipamento atuando até uma diferença entre pressão de entrada e de saída de 250 kPa. As pressões de entrada foram alteradas em intervalos de 49,03 kPa a cada 60 segundos, sendo estas avaliadas em um primeiro momento de forma crescente, e posteriormente de forma decrescente. As pressões de ajuste avaliadas foram de 98,06 kPa, 196,13 kPa, 294,19 kPa e 392,26 kPa. A faixa de vazão avaliada foi de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, tendo o respectivo intervalo de velocidade de $0,42 \text{ m s}^{-1}$ a $2,12 \text{ m s}^{-1}$. Os resultados mostraram um tempo de ajuste entre 10 s e 20 s nos ensaios com pressão de entrada crescente e de 15 s e 30 s nos ensaios com pressão de entrada decrescente. Ao se avaliar a atuação do regulador eletrônico operando em toda a faixa de vazão estudada, verifica-se que este foi capaz de manter a pressão ajustada dentro dos limites aceitáveis ao valor estabelecido no dispositivo eletrônico, enquadrando-se, em um contexto geral, como controlador com nível de exatidão A ($\pm 10\%$ de desvio). Dessa forma, pode-se concluir que o controlador, operando nas condições definidas acima, apresentou um bom desempenho ao regular a pressão de saída.

Palavras-chave: Automação; Controlador eletrônico; Válvula hidráulica; Engenharia de irrigação

ABSTRACT

Development of a microprocessed pressure regulator

The pressure variation is an important factor that affects the uniformity of water application in irrigation systems. This variation is caused by topography, the lack or improper operation of pressure regulators. Pressure regulating valves have been used in irrigation projects where there are problems of uneven topography. However, the output pressure on the valve will not be always corresponding to the manufacturer's catalog. Researches on techniques improvement for pressure controlling in irrigation systems are necessary to reduce losses in accordance with sustainable irrigation. The automation of pressure regulators must assure a constant outlet pressure independent of input pressure, and flexibility to set output pressures according to different conditions. Based on the previous content, the aim of this study was to develop a microprocessed pressure regulator. The developed system has a hydraulic valve, a pressure transducer, two solenoid valves, a sprinkler, and a microprocessed circuit. Based on data gathered from pressure transducer, the electronic controller triggered solenoid valves for pressurizing or relieving the hydraulic valve diaphragm. The opening time of the solenoid valve was a function of the instantaneous pressure in the pipe. We evaluated the operating equipment in a difference up to 250 kPa between input and output pressure. The inlet pressures were tested at intervals of 49.03 kPa every 60 seconds. We performed tests increasing and decreasing inlet pressure. The desired and evaluated output pressures were 98.06, 196.13, 294.19, and 392.26 kPa. The flow rate evaluated range was from $0.75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ to $3.74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, which the respective speed range was from 0.42 m s^{-1} to 2.12 m s^{-1} . The results presented a required adjustment time between 10 to 20 seconds in tests with increasing inlet pressure, and from 15 to 30 seconds in tests with inlet pressure decreasing. The pressure regulator was able to maintain the preset output pressure within desired limits, when evaluating the performance of the electronic regulator operating in the flow range specified. Considering the results, the electronic developed device can be considered a controller that belongs in accuracy level A ($\pm 10\%$ deviation). Thus, we conclude that the controller was successful on controlling the output pressure, when operating under the conditions defined above.

Keywords: Automation; Electronic control; Hydraulic valve; Irrigation engineering

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regulador de pressão.....	27
Figura 2 - Regulador eletrônico de pressão, onde V1 e V2 são válvulas solenóides	31
Figura 3 - Circuito impresso com a disposição das trilhas de condução e dos componentes eletrônicos	33
Figura 4 - Circuito eletrônico utilizado para regular pressão: sistema de aquisição e processamento de dados (a); sistema para interface de comunicação (b); sistema regulador de tensão (c) e interface de potência (realiza ações sobre atuadores) (d)	34
Figura 5 - Sensor de pressão Mpx5700dp	35
Figura 6 - Detalhes do transdutor de pressão identificando os pinos e as porta de acesso à câmara sensível.....	36
Figura 7- Envoltório de proteção do transdutor de pressão: vista superior externa do conjunto envoltório/sensor de pressão (a); vista superior interna do conjunto envoltório/sensor de pressão (b)	36
Figura 8 - Conjunto de válvulas solenóide e hidráulica: vista frontal com V1 à direita e V2 à esquerda (a); vista lateral (b) do conjunto de válvulas	39
Figura 9 - Fluxograma de inicialização e sequenciamento das opções no menu de navegação do <i>software</i> de controle	41
Figura 10 - Fluxograma de sequenciamento da lógica de controle utilizado no microcontrolador	43
Figura 11 - Estrutura física do regulador de pressão montado em bancada para realização dos ensaios experimentais	44
Figura 12 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de 0,75 m ³ h ⁻¹ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de 1,05 m ³ h ⁻¹ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de 1,25 m ³ h ⁻¹ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de 1,47 m ³ h ⁻¹ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição	49
Figura 13 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de 0,75 m ³ h ⁻¹ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de 1,05 m ³ h ⁻¹ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de 1,25 m ³ h ⁻¹ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de 1,47 m ³ h ⁻¹ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição	50

Figura 14 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $3,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição..... 52

Figura 15 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $3,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição..... 53

Figura 16 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $1,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio 55

Figura 17 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $1,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio 56

Figura 18 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $3,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio 58

Figura 19 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $3,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Componentes utilizados no circuito eletrônico	(continua)
.....	31
Tabela 1- Componentes utilizados no circuito eletrônico	(conclusão)
.....	32
Tabela 2- Propriedades técnicas dos principais componentes utilizados no circuito eletrônico.....	32
Tabela 3 - Leitura do ADC em função da pressão crescente e decrescente submetida pelo manômetro tipo peso morto	37
Tabela 4 - Valores de vazão e velocidade da água, obtidas pela combinação dos bocais, para o regulador operando com diferentes pressões de ajuste	45

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é uma tecnologia que tem como propósito a aplicação de água ao solo de forma artificial, atuando sobre sua umidade e proporcionando o suprimento das necessidades hídricas da planta através do fornecimento eficiente, econômico e ambientalmente sustentável de água às culturas.

A discussão crescente em torno da disponibilidade e uso da água tem levado à busca de sistemas de irrigação mais eficientes, tendo em vista que a agricultura irrigada responde por 70 % dos recursos hídricos utilizados no mundo, sendo vista nesse processo como vilã, pois o volume de água utilizado é demasiadamente grande competindo com as atividades de produção de energia, usos industriais e com o consumo humano, conforme apresentado no relatório mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos - WWDR4 (2012).

O desperdício de água na agricultura é da ordem de $2.500 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, valor muito superior ao que a indústria desperdiça ($117 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$) e ao que o uso doméstico também desperdiça ($64,5 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$) (COELHO; COELHO FILHO; OLIVEIRA, 2005). Segundo estes autores, a eficiência de irrigação no âmbito mundial ainda é muito baixa, situando-se, em termos médios, em torno de 37 %. Segundo os mesmos autores a simples melhora de 1 % na eficiência do uso da água de irrigação significaria uma economia de 200 mil litros de água por hectare por ano.

O consumo elevado de água na agricultura é reflexo do manejo inadequado da irrigação por parte de agricultores, do uso de equipamentos inapropriados aos diferentes métodos e sistemas de irrigação e ao fato de que os projetos de irrigação, em sua grande maioria, são elaborados pressupondo-se uma área uniforme quanto às características do solo, o que resulta em uma lâmina de irrigação constante em toda a área de produção, fugindo aos preceitos dos projetos de irrigação que consideram as diferentes faixas de solo com capacidades distintas de armazenar água.

Para contornar estes indicadores, Lima et al. (2003) citam que os sistemas de irrigação devem ser bem projetados, sobretudo em áreas de topografia acidentada, em que se observa acentuada variação na pressão do sistema,

causando significativas diferenças de vazão e desuniformidade de aplicação de água. A instabilidade da pressão em sistemas de irrigação resulta em desvios indesejáveis de vazão e desuniformidade na aplicação de água.

Dentre os fatores que afetam a uniformidade de aplicação de água, deve-se citar a variação de pressão no sistema, causada principalmente pela topografia do terreno, e a inexistência ou operação inadequada de reguladores de pressão.

Nesse sentido, têm-se empregado as válvulas reguladoras de pressão nos projetos de irrigação com variações topográficas, as quais, quando bem dimensionadas, controlam essas flutuações e previnem a desuniformidade da aplicação de água, melhorando a eficiência do sistema de irrigação. Contudo, de acordo com Lima et al. (2007), a pressão de saída na válvula nem sempre será correspondente a apresentada no catálogo do fabricante, caso se altere a pressão de entrada ou a vazão do sistema em relação aos valores fixados na sua curva de desempenho.

Com o avanço da eletrônica e a modernização da agricultura irrigada, justifica-se a atenção para o aperfeiçoamento das técnicas de controle de pressão em sistemas de irrigação, tornando este processo mais eficiente e com padrões de qualidades que se mantenham em níveis aceitáveis, buscando a redução das perdas de forma a atender os preceitos da irrigação sustentável.

Partindo-se deste contexto, os avanços das técnicas de eletrônica permitem o uso de microcontroladores que auxiliam no controle de processos, fornecendo suporte à tomada de decisão e possibilitando a automação de reguladores de pressão que sejam capazes de manter constante a pressão de saída, independente da pressão de entrada e que possibilitem estabelecer a pressão de saída de acordo com as necessidades individuais de cada sistema de irrigação.

De acordo com o que foi exposto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um regulador de pressão microprocessado, que possibilite o controle eficaz da pressão de saída do controlador, a qual pode ser estabelecida pelo usuário, favorecendo a uma melhora na uniformidade de distribuição de água e, conseqüentemente, um aumento na eficiência dos sistemas de irrigação.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Uso da água na agricultura

A capacidade mundial de fornecer alimentos a crescente população está limitada a fatores como a capacidade de produção agrícola, que engloba as tecnologias de produção que levem a um aumento de produtividade das culturas e à disponibilidade de água e de áreas cultiváveis. A água, recurso natural cada vez mais escasso, tornou-se o elo entre os desafios que envolvem a geração de energia, a produção de alimentos, os fatores climáticos, o desenvolvimento econômico e a segurança alimentar humana.

Segundo Christofidis (2006) no ano 2000 a captação de água para atender a produção de alimentos no mundo foi da ordem de 2.595 km^3 , o que correspondeu a 70,2 % da água derivada para os principais usos consuntivos. Shiklomanov (2003) estima que, no ano 2025, o volume anualmente captado para o uso na agricultura seja 3.190 km^3 , dessa forma, a captação de água para produção de alimentos deverá responder por 68 % do total da água derivada para os usos consuntivos.

Em 2025, estima-se que três bilhões de pessoas serão afetadas pela escassez de recursos hídricos, cuja disponibilidade será inferior a $1700 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (CHRISTOFIDIS, 2002). Essa escassez de água tem proporcionado uma maior procura por métodos de irrigação que possibilitem o aumento na eficiência do uso da água (RIBEIRO; PATERNIANI, 2007; RIBEIRO et al., 2005; AIROLDI et al., 2003).

A demanda por água procede basicamente de quatro atividades, a saber: a agricultura e pecuária (ou agropecuária), a produção de energia, os usos industriais e o consumo humano, sendo a agricultura e a pecuária, os setores que fazem uso intensivo da água (WWDR4, 2012). Segundo Queiroz, Botrel e Frizzone (2008), a irrigação é apontada como uma técnica de produção agrícola que concorre, em algumas regiões, diretamente com a indústria e as cidades (abastecimento humano), pelo uso da água, sendo vista nesse processo como vilã, pois o volume de água utilizado é demasiadamente grande quando comparado aos demais usos concorrentes.

Para Alves Filho (2007), o mau uso da água na agricultura é resultado do manejo inadequado por parte de agricultores, o que tem levado ao consumo exagerado desse recurso natural em áreas irrigadas com baixa eficiência.

Adicionalmente, Armindo (2009) afirma que uma das causas da baixa eficiência dos sistemas de irrigação está ligada ao fato de que os projetos de irrigação ainda são elaborados partindo-se do pressuposto de que a área a ser irrigada seja totalmente uniforme, resultando em uma lâmina de irrigação constante em toda a sua extensão.

Contrapondo-se a concepção de que a agricultura irrigada é tomada como vilã quanto ao uso excessivo de água, segundo o relatório mundial das Nações Unidas sobre o Programa de Avaliação da Água - WWAP (2012), apenas 20 % das terras cultivadas no mundo são irrigadas (275 milhões de hectares), no entanto esta área é responsável por 40 % de todo o alimento produzido no planeta. Tal conclusão demonstra a vital importância da aplicação desta técnica na produção de alimentos, diante da atual conjuntura do crescimento demográfico mundial.

Há uma tendência natural de aumento do uso da água no futuro, seja pelo aumento populacional, que resultará em maior necessidade por alimentos, seja pela disponibilidade de terras com aptidão para uso na agricultura irrigada, estimadas em 470 milhões de hectares (CHRISTOFIDIS, 2002).

Observa-se, portanto, que para atender à demanda futura por alimentos, a água terá que ser empregada de forma mais eficiente, tendo como direcionamento a necessidade e importância da elaboração e execução de projetos de pesquisa que desenvolvam equipamentos de irrigação mais eficientes, incentivando e esclarecendo aos produtores sobre a importância do manejo da irrigação, tomando como base o conceito de irrigação de precisão, que segundo Stone et al. (2006) vem sendo desenvolvido em resposta à necessidade de se fornecer água ao solo de acordo com a variabilidade espacial da topografia, do tipo de solo, da disponibilidade de água no solo, do sistema de produção e de outros fatores que venham a otimizar a produção e conservar os recursos hídricos e o ambiente.

Miranda et al. (2005) destacam que a aplicação espacialmente diferenciada de água ou irrigação de precisão possibilita maximizar a produtividade e a eficiência do uso da água.

2.1.2 Eletrônica e a automação agrícola

A produção agrícola moderna tem passado por uma intensa 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 (MANTOVANI; QUEIROZ; DIAS, 1998).

A rápida evolução da eletrônica, associada à crescente expansão do mercado, tem permitido o acesso à tecnologia e a ferramentas antes encontradas somente em laboratórios bem equipados e em centros de pesquisa (GOMIDE, 1998). Neste contexto, o desenvolvimento da engenharia agrícola vem se beneficiando dos avanços tecnológicos tanto no desenvolvimento de novos equipamentos, quanto na adaptação daqueles já disponíveis no mercado (VILELA et al., 2003).

Segundo Camargo (2009), a eletrônica tem um importante papel no processo de modernização do setor agrícola, possibilitando a automação de equipamentos e tornando as atividades mais rápidas e precisas.

Alencar et al. (2007) relatam que a automação é um sistema autônomo de tomada de decisões, geralmente tendo como base dados fornecidos por sensores, subsidiado por processadores previamente programados, os quais tem a finalidade de substituir o homem em tarefas complexas.

A inteligência artificial é uma ferramenta que vem sendo utilizada em processos que envolvem decisões de alta complexidade, e que está sendo difundida em sistemas de automação que utilizam um grande volume de informação (PINTO, 2010). As redes neurais e a lógica Fuzzy são as principais técnicas de controle de sistemas inteligentes, em que esta última baseia-se no controle proporcional integrativo derivativo (PID) apresentando um grande potencial de aplicação no controle de sistemas irrigados (PINTO, 2011).

O setor da irrigação tem avançado quanto à automação de seus sistemas (ALENCAR et al., 2007), onde se tem utilizado microprocessadores no processo de aquisição de informações e na tomada de decisão sobre ações, baseados em lógicas de controle implementadas no sistema, tendo em vista que estes são componentes de baixo custo e compactos (LOPES et al., 1992; IBARS, 2004).

2.1.3 Reguladores de pressão e sua aplicação

Segundo Lima (2003), a vazão de um emissor está sujeita ao diâmetro do seu bocal e à sua pressão de operação, sendo esta última, determinada pela

pressão de saída da válvula reguladora de pressão. Assim, se tem que, o controle da pressão em sistemas de irrigação pode determinar a vazão dos emissores.

Considera-se um sistema de irrigação em bom estado de funcionamento, aquele que apresenta alta uniformidade de distribuição de água entre os emissores, a qual pode ser influenciada pela combinação de diversos fatores, como por exemplo, a variação de vazão dos emissores ao longo da linha lateral a qual é função da flutuação da pressão e da própria variabilidade existente entre os emissores, das condições de vento e da altura do emissor em relação ao solo (FRIZZONE, 1992).

A avaliação dos parâmetros que afetam a eficiência e a qualidade da irrigação, principalmente aqueles relacionados à uniformidade de distribuição de água no sistema em uso, é indispensável quando se trabalha com agricultura irrigada (ANDRADE JUNIOR et al., 1997). Dentre os fatores que afetam a uniformidade de distribuição de água, se pode citar projetos inadequados que levam a diferenças de pressão no sistema devido às perdas de carga, topografia do terreno, falta de reguladores de pressão, mau funcionamento dos mesmos, entre outros (SOUZA et al., 2000).

Como alternativa para controlar os efeitos da flutuação de pressão em sistemas de irrigação, têm-se empregado o uso de reguladores de pressão, os quais evitam o excesso de aplicação de água e conservam a uniformidade geral do sistema por meio do controle da pressão de saída em detrimento de uma faixa definida de pressão de entrada. Conforme relatado por Zocoler, César e Vanzela (2004), a atuação adequada dos reguladores de pressão tem grande importância sobre a uniformidade de aplicação de água.

James e Blair (1984), citados por Lima (2001), avaliaram o desempenho de seis pivôs centrais analisando os parâmetros que teriam influência na uniformidade de aplicação de água, e constataram que a taxa de aplicação e a declividade do terreno, pouco ou nada, tiveram influência, graças ao funcionamento dos reguladores de pressão.

Os reguladores são equipamentos utilizados para possibilitar uniformidade de aplicação de água dentro dos limites razoáveis de operação dos aspersores no campo (BENAMI; OFEN, 1984). Lima (2001) cita que em condições normais de operação, os reguladores podem suprimir problemas de pressão excessiva,

flutuações de pressão causados por desníveis da linha lateral ou ondulações do terreno.

De acordo com Zaggo, Colombo e Gil (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, de forma que haja uma compensação do aumento da pressão de entrada, mantendo-se a pressão de saída dentro de certos limites, os quais irão individualizar a “pressão de regulação da válvula”.

Tarjuelo (1995) relata que os reguladores mais comuns são aqueles constituídos de uma carcaça que aloja um êmbolo tracionado por uma mola. A mola empurra o êmbolo tendendo a mantê-lo na posição de máxima abertura, assim, quando a pressão da água abaixo do regulador atua sobre a superfície do fixador da mola e, se essa pressão é menor que a pressão nominal do regulador, a mola mantém o êmbolo aberto e a água passa com uma perda de carga relativamente pequena. No entanto, se a pressão atuante for maior, ela é transmitida momentaneamente, criando uma força superior à resistência oferecida pela mola, e fechando parcialmente o êmbolo, o que irá provocar um aumento na perda de carga até o ponto em que a pressão fique estabilizada próxima à pressão nominal do regulador (Figura 1).

Figura 1 - Regulador de pressão
Fonte: Senninger irrigation Inc. (2012)

O regulador de pressão ideal seria aquele capaz de manter a pressão de saída constante independentemente da pressão de entrada e da vazão (VON BERNUTH; BAIRD, 1990).

A pressão de saída no regulador pode diferir, em alguns casos, dos valores da pressão nominal apresentada no catálogo do fabricante, pois caso a pressão de

entrada e a vazão no sistema não estejam dentro dos limites apresentados na curva de desempenho do regulador de pressão, a pressão de saída será alterada (LIMA et al., 2007). De acordo com o estabelecido pelas Normas da Organização Internacional de Padronização – ISO (1993), a pressão de regulação declarada pelo fabricante deve ser aquela apresentada na saída do regulador de pressão, tendo 1 m s^{-1} como a velocidade de referência para o fluxo de água.

Os equipamentos utilizados para o controle da pressão em sistema de irrigação devem seguir os avanços tecnológicos da eletrônica e da automação na busca por um dispositivo capaz de controlar automaticamente a pressão de saída independente da pressão e da vazão de entrada, norteado pelo conceito de regulador de pressão ideal.

2.1.4 Classificação dos reguladores de pressão

As válvulas reguladoras de pressão são classificadas segundo os requisitos da norma ISO 10522-1993. A seguir serão apresentados alguns requisitos estabelecidos por esta norma.

2.1.4.1 Regulagem de pressão

São considerados reguladores de pressão fixo aqueles que mantêm a pressão de saída fixada em um valor, sem que haja a possibilidade de variá-la. Por sua vez, os reguladores variáveis possuem opção de se ajustar a pressão de saída, regulando-se componentes como a mola, o disco, entre outros, mas sem ajuste externo.

Enquadram-se como reguladores de pressão fixo reguláveis os dispositivos que possuem a pressão de saída fixada em determinado valor, mas que permite sua variação externamente, sem que haja a substituição de peças do equipamento.

Por fim, os reguladores de pressão variáveis reguláveis, além de possibilitar a variação da pressão de saída com o ajuste dos componentes como a mola, o disco, dentre outros, permitem a substituição de peças do regulador.

O regulador de pressão proposto neste trabalho foge a alguns termos que o enquadrariam em um dos tipos de reguladores citados acima, porém há uma tendência do mesmo ser descrito como um regulador variável, já que é facultado ao

usuário a seleção da pressão de saída, de acordo com suas necessidades, sem que haja necessidade de alterar peças, mas sim os parâmetros de entrada que irão nortear a ação do regulador.

2.1.4.2 Característica de fabricação

Um regulador de pressão é considerado comum quando este se destina à instalação em equipamentos de irrigação, sendo constituído por uma parte que independe do sistema de irrigação a ser acoplado.

Porém, o regulador de pressão integrado, constitui parte ou é apropriado a determinado sistema de irrigação.

O regulador eletrônico de pressão desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado em qualquer sistema de irrigação, inclusive, em laboratórios para ensaios de equipamentos de irrigação, pois este permite determinar mais de uma pressão de saída a qual se deseja manter constante, de acordo com o que for pré-estabelecido pelo usuário.

2.1.4.3 Desempenho de reguladores na ausência de vazão

Os reguladores de pressão podem apresentar dois tipos de funcionamento quando a vazão é nula. No primeiro caso, a pressão regulada iguala-se à pressão de entrada para o fluxo zero. Contudo, no segundo caso, a pressão regulada apresenta-se menor que aquela existente na entrada do equipamento quando o fluxo é zero.

Deve-se ter atenção quanto à questão da determinação do desempenho de reguladores de pressão na ausência de vazão, pois entende-se que em condutos forçados com fluxo zero, a pressão em toda a tubulação seria igual, desde que esta esteja em nível.

2.1.4.4 Exatidão do regulador

A determinação do nível de exatidão de um regulador de pressão é definido conforme o valor do desvio da pressão de saída, (ou pressão regulada) em relação a pressão de saída declarada pelo fabricante. Dessa forma os reguladores podem

apresentar nível de exatidão “A” caso o desvio apresentado por este não seja superior a $\pm 10\%$, e “B” caso este nível não ultrapasse $\pm 20\%$.

A Equação 1 é utilizada para o cálculo do desvio da pressão de saída em reguladores.

$$Desvio(\%) = \frac{P_S - P_D}{P_D} \times 100 \quad (1)$$

sendo:

P_S – valor médio empírico da pressão de saída regulada;

P_D – pressão de regulação declarada pelo fabricante.

2.1.4.5 Faixa de regulação

A faixa em que determinado equipamento é capaz de regular a pressão é aquela em que se enquadra dentro dos limites do nível de exatidão do regulador, ou seja, para reguladores com nível de exatidão A, o intervalo de controle é estabelecido pela pressão de regulação declarada $\pm 10\%$, enquanto que para reguladores com nível de exatidão B, o intervalo de controle é estabelecido pela pressão de regulação declarada $\pm 20\%$.

A pressão inicial de regulação é determinada pelo menor valor da pressão de entrada para a qual se obtêm a pressão regulada, dentro dos níveis de exatidão especificados.

2.2 Material e métodos

O desenvolvimento do regulador de pressão, bem como os ensaios pertinentes à avaliação do *software* de controle foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Universidade de São Paulo – USP). O regulador de pressão construído é eletronicamente controlado, visando regular a pressão de saída em condutos forçados, por meio da ação conjunta de uma válvula hidráulica, um sensor de pressão, duas válvulas solenóides e um circuito microprocessado (Figura 2).

O equipamento desenvolvido pode ser dividido em três partes definidas por: dispositivo de controle, composto pelo circuito eletrônico; sensor (transdutor de

pressão) e os atuadores, os quais são as válvulas solenóides responsáveis por pressurizar ou aliviar a membrana elástica no cabeçote da válvula hidráulica.

Figura 2 - Regulador eletrônico de pressão, onde V1 e V2 são válvulas solenóides

2.2.1 Composição e montagem do hardware

As particularidades técnicas dos componentes eletrônicos utilizados na montagem do equipamento e sua descrição podem ser observadas na

Tabela 1 e Tabela 2. A elaboração do circuito eletrônico foi auxiliada por um programa utilizado na confecção de circuitos eletrônicos, dando suporte para a composição do projeto, sendo disponibilizadas duas saídas: esquema de ligação (Anexo A); e, circuito impresso com a disposição das trilhas de condução e dos furos de alocação e solda dos componentes eletrônicos (Figura 3).

Tabela 1- Componentes utilizados no circuito eletrônico (continua)		
Componente	Símbolo	Descrição
Capacitor cerâmico 1	CC1	27 pF
Capacitor cerâmico 2	CC2	100 nF
Capacitor eletrolítico 1	CE1	1 µF
Capacitor eletrolítico 2	CE2	0,1 µF
Cristal	CR	4 Mhz
Diodo	D	1n4007
Display de cristal líquido	LCD	-
Ponto de conexão 1	P1	conexão com Push button
Ponto de conexão 2	P2	conexão com gravador PIC
Ponto de conexão 3	P3	conexão com sensor de pressão
Ponto de conexão 4	P4	conexão com tela LCD
Ponto de conexão 5	P5	conexão com conector serial
Relê	R	-
Resistor 1	R1	10 kΩ
Resistor 2	R2	4,7 kΩ

Tabela 1- Componentes utilizados no circuito eletrônico (conclusão)

Componente	Símbolo	Descrição
Resistor 3	R3	1,2 kΩ
Terminal conector	TERM	-
Regulador de Tensão	TRV	7805

Tabela 2- Propriedades técnicas dos principais componentes utilizados no circuito eletrônico

Propriedade	Descrição	Unidade
Componente PIC 18F4550		
Fabricante	Microship Technology	-
Alimentação	5	Volts
Número de pinos	40	-
Pinos AD (10bits)	13	-
Portas	5	-
Memória Flash	32	kBytes
Memória EEPROM	256	Bytes
Temperatura	- 40 a 85	°C
Impedância de entrada máxima	2,5	kΩ
Componente MAX 232		
Fabricante	Texas Instruments	-
Número de pinos	16	-
Temperatura	0 a 70	°C
Alimentação	5	Volts
Componente ULN 2803		
Fabricante	Toshiba	-
Número de pinos	18	-
Temperatura	- 40 a 85	°C
Alimentação	- 0,5 a 30	Volts

Para a montagem do circuito imprimiu-se o esquema de trilhas de condução e disposição de componentes (Figura 3) em placa de fenolite de dimensões 0,1 m x 0,1 m. Os furos para posicionamento e solda dos componentes eletrônicos foram feitos manualmente, bem como todo seu processo de montagem, no qual se utilizou uma estação e um sugador de solda, um multímetro digital e alicates de corte e de bico.

O circuito eletrônico é composto por cinco partes definidas de acordo com sua função, a saber: a aquisição de dados; o processamento (microprocessador); o controlador (ação sobre os atuadores); a interface de comunicação com o usuário (comunicação serial e display LCD) e o regulador de tensão (Figura 4). Foi utilizado o microprocessador PIC 18F4550 fabricado pela Microship, com memória flash de 32 kBytes, sendo este programado em linguagem computacional C. O circuito

eletrônico possui duas formas para interface de comunicação com o usuário, sendo a primeira subsidiada pelo circuito integrado MAX 232, a qual permite a aquisição e visualização dos dados por meio de interface serial; e a segunda que possibilita a visualização instantânea (ou em tempo real), por meio de display LCD, da pressão de entrada, da pressão regulada e da vazão durante o processo de correção. Realizou-se o acionamento dos relés por uma interface de potência utilizando-se o circuito integrado ULN 2803 fabricado pela Toshiba.

O circuito eletrônico foi alimentado por uma fonte com fornecimento de tensões de 24 Vca (volt em corrente alternada), a qual é a tensão requerida para o acionamento das válvulas solenóides, e de 12 Vcc (volt em corrente contínua) para o acionamento dos relés, sendo esta última regulada pelo sistema regulador de tensão, para uma tensão de 5 Vcc utilizada na alimentação dos demais componentes do circuito eletrônico.

Figura 3 - Circuito impresso com a disposição das trilhas de condução e dos componentes eletrônicos

Figura 4 - Circuito eletrônico utilizado para regular pressão: sistema de aquisição e processamento de dados (a); sistema para interface de comunicação (b); sistema regulador de tensão (c) e interface de potência (realiza ações sobre atuadores) (d)

2.2.2 Transdutor de pressão

Os sensores de pressão utilizados no regulador foram os transdutores diferenciais, modelo MPX 5700DP (Figura 5) fabricado pela empresa Motorola. Segundo o fabricante, este sensor possui compensação interna de temperatura, sendo possível de ser utilizado tanto para medir a pressão efetiva, necessitando apenas que uma de suas entradas esteja sob efeito da pressão atmosférica; ou o diferencial de pressão existente entre dois pontos.

O modelo dos transdutores selecionados, possui erro máximo de 2,5 % para temperaturas entre 273,3 K (0,3 °C) e 358,3 K (85,3 °C), podendo ser utilizado em uma faixa de pressão que varia de 0 kPa a 700 kPa. Quando alimentado por uma tensão estabilizada de 5 Vcc, o transdutor emite sinais analógicos que variam de 0,2 Vcc a 4,7 Vcc, os quais permitem serem transformados em leituras de pressão.

Figura 5 - Sensor de pressão Mpx5700dp
Fonte: Future Electronics (2012)

Os transdutores de pressão MPX5700DP fazem parte de uma série de sensores piezoresistivos monolíticos de silício, ou seja, que possuem uma placa de silício acoplado a eletrodos metálicos, e quando estes são submetidos a uma tensão mecânica altera-se sua resistência. Assim, proporcionando-se a este material uma compressão, expansão ou torção, altera-se a sua resistência elétrica e consequentemente a diferença de potencial entre os eletrodos, proporcional à deformação (pressão) ao qual o material está sendo submetido.

O sensor possui 6 pinos, sendo o pino 1 identificado através de uma marca no formato de semi círculo, o qual é responsável pela emissão do sinal de saída (Vout) do sensor, o pino 2 é o terra (GND) e o pino 3 é responsável pela alimentação do dispositivo (Vin), a qual foi feita pelo circuito eletrônico regulador de pressão por uma tensão de 5 Vcc (Figura 6). Os pinos 4, 5 e 6 são conexões internas do dispositivo, portanto não foram utilizados. Além disto, o sensor conta com duas portas de entrada para a câmara sensível, sendo a porta 1 utilizada para pressões maiores que as aplicadas na porta 2 (Figura 6).

Os sinais analógicos emitidos pelo transdutor foram enviados ao ADC do microcontrolador via cabo coaxial composto de um conector molex, para que este pudesse ser lido, processado e enviado ao display de LCD, permitindo sua visualização imediata.

Figura 6 - Detalhes do transdutor de pressão identificando os pinos e as porta de acesso à câmara sensível

Fonte: Adaptado Digi-Key Corporation (2012)

Foram utilizados dois pontos para tomada de pressão, um para a verificação da pressão de entrada (a montante da válvula hidráulica) e outro para a verificação da pressão de saída (a jusante da válvula hidráulica). A pressão foi transmitida aos sensores por meio de microtubos de polietileno com diâmetro de 4 mm, conectados a porta 1 de cada transdutor e lida pelos ADCs do microprocessador a cada 1 milissegundo, sendo a pressão apresentada no display o resultado médio de 10 leituras. A porta 2 dos transdutores foi mantida sob pressão atmosférica. A pressão de entrada foi tomada apenas para visualização, não tendo influência sobre a lógica adotada para o controle da pressão.

Objetivando a proteção dos sensores, estes foram acondicionados e montados no interior de uma caixa termoplástica com dimensões de 51 mm x 63 mm x 29 mm (Figura 7).

Figura 7- Envoltório de proteção do transdutor de pressão: vista superior externa do conjunto envoltório/sensor de pressão (a); vista superior interna do conjunto envoltório/sensor de pressão (b)

2.2.3 Calibração do sensor de pressão

Os sensores de pressão utilizados foram calibrados com auxílio de um manômetro tipo peso morto, obtendo-se experimentalmente a correlação entre os valores de pressão em kPa e da leitura em bytes (Tabela 3). Os valores em bytes foram visualizados no display LCD constituinte do próprio circuito eletrônico, utilizando-se o software de calibração representado pelo fluxograma exposto no Anexo B. A calibração foi realizada partindo-se de pressão igual a zero, em seguida adicionou-se o primeiro peso equivalente a 98,06 kPa e posteriormente acrescentou-se pesos correspondentes à pressão de 49,03 kPa até que se atingisse o valor de 686,42 kPa. Para se verificar erros de histerese, foi realizado o caminho inverso de calibração do sensor, partindo-se de peso correspondente a pressão de 686,42 kPa do qual se diminuiu pesos correspondentes à pressão de 49,03 kPa até que se atingisse pressão equivalente a zero.

Tabela 3 - Leitura do ADC em função da pressão crescente e decrescente submetida pelo manômetro tipo peso morto

Pressão (kPa)	Leitura do ADC (Bytes)		Média da leitura (Bytes)
	Crescente	Decrescente	
0	39	40	39,5
98,06	163	165	164,0
147,09	229	230	229,5
196,12	293	294	293,5
245,15	358	353	355,5
294,18	422	421	421,5
343,21	486	486	486,0
392,24	549	552	550,5
441,27	616	619	617,5
490,30	679	683	681,0
539,33	743	744	743,5
588,36	806	808	807,0
637,39	877	872	874,5
686,42	934	936	935,0

Os dados obtidos na calibração foram plotados em gráfico e através da análise de regressão, foi possível obter a equação da pressão em função da diferença de potencial apresentada pelo ADC (Equação 2), apresentando um coeficiente de determinação em que 99,997 % da variação é explicada pelo modelo.

$$P = 0,76283 \cdot b - 28,01015 \quad (2)$$

em que,

P – pressão, kPa;

b – leitura do conversor ADC, bytes.

2.2.4 Válvula hidráulica

A válvula hidráulica utilizada foi do fabricante Bermad, série 200, do tipo globo com seção transversal de 25 mm de diâmetro e produzida em material plástico resistente à incidência de raios solares ultravioletas. Este modelo pode ser utilizado em uma ampla gama de pressões, apresentando limites que variam de 68,95 kPa a 1034,21 kPa, possibilitando uma variação de perda de carga de 56 kPa. A válvula é capaz de operar em boas condições à temperatura máxima de 353,15 K (80,15 °C).

Estas válvulas possibilitam o uso de solenóides em seu cabeçote, as quais possibilitam sua operação por meio de pulsos elétricos, o que permite variar a perda de carga segundo a vazão pretendida, de acordo com sua abertura, estabelecida pelo nível de deformação do bloco do diafragma. Os modelos de solenóides utilizados neste equipamento não eram apropriados para operar em pulsos, dessa forma, observou-se que o tempo mínimo de acionamento destes era de 30 milissegundos (ms).

2.2.5 Válvula solenóide

As duas válvulas solenóides utilizadas fazem parte da série “S” dos produtos de irrigação fabricados pela Bermad, sendo selecionado o modelo S-390, a qual opera com uma tensão de 24 Vca, podendo ser utilizada em operações com pressões no intervalo de 0 kPa a 1000 kPa.

As válvulas solenóides (V1 e V2), eram responsáveis por controlar o nível de abertura da válvula hidráulica, funcionando como atuadores do regulador de pressão. A alimentação das válvulas se deu por meio do circuito eletrônico operando por intermédio de pulsos elétricos de 24 Vca emitidos ou não, de acordo com a necessidade de controle a cada instante de medição da pressão (atuação).

Para pressurizar o bloco do diafragma, a válvula solenóide 1 (V1) era acionada, liberando o fluxo na tubulação a montante para o interior do cabeçote da

válvula hidráulica. Por outro lado, a despressurização do bloco de diafragma, era feita através da válvula solenóide 2 (V2), a qual, por meio de comunicação entre as válvulas solenóides, liberava o fluxo do interior do cabeçote da válvula hidráulica para a tubulação à jusante do regulador (Figura 2). Dessa forma, o controle sobre o nível de abertura do bloco do diafragma da válvula hidráulica (e consequentemente a alteração da perda de carga atuante) ocorreu através de um esquema de comunicação entre as válvulas solenóides e a tubulação do módulo de ensaio.

Para a comunicação entre válvulas foi utilizado microtubo de polietileno com diâmetro de 4 mm, enquanto as ligações entre as solenóides e a tubulação foi feita através de microtubo de 0,6 mm de diâmetro com um metro de comprimento, visando restringir a vazão neste percurso.

As válvulas solenóides foram montadas sobre a válvula hidráulica, tendo como base uma peça adaptada a partir de uma lâmina de alumínio, na qual foram feitas perfurações para fixação das válvulas solenóides, servindo como base de sustentação para as mesmas (Figura 8).

Figura 8 - Conjunto de válvulas solenóide e hidráulica: vista frontal com V1 à direita e V2 à esquerda (a); vista lateral (b) do conjunto de válvulas

2.2.6 Software de controle

A idealização do *software* de controle tem como premissa a possibilidade de interação do usuário com o controlador, permitindo-o selecionar alguns parâmetros que servirão de diretrizes para as tomadas de decisão do controlador.

A simbologia adotada nos fluxogramas é descrita abaixo:

A rotina de operação do controlador disponibiliza ao usuário interagir com o menu de navegação no display LCD, além de acessar uma rotina para inserir o valor da pressão de saída a ser ajustada (parâmetro de controle) e dos coeficientes da equação vazão x pressão do emissor utilizado, possibilitando determinar a vazão de acordo com a pressão ajustada (Figura 9).

O controle da pressão de saída pelo regulador, a qual atuará no emissor, opera por meio de um tempo de abertura das válvulas solenóides. A lógica de controle implementada, fundamenta-se em uma ação proporcional, a qual toma como base de decisão o erro absoluto (ou o módulo da diferença) entre as entradas e as saídas do controlador (Equação 3). Portanto, o controlador determina o valor da pressão na tubulação por meio dos dados enviados ao ADC pelo transdutor de pressão (Pressão Lida – PL), em seguida o microprocessador compara esse valor com o selecionado pelo usuário (Pressão Ajustada - Paj) e envia o sinal de saída correspondente ao tempo de abertura (Ta) da válvula solenóide.

Figura 9 - Fluxograma de inicialização e sequenciamento das opções no menu de navegação do software de controle

$$Erro = |press\tilde{a}o\ lida - press\tilde{a}o\ ajustada| \quad (3)$$

Foram realizados testes preliminares para se determinar a lógica de controle que determinaria o T_a , bem como os coeficientes destas equações. Para isto, avaliaram-se três lógicas de controle, sendo uma proporcional ao erro (equação do tipo linear), uma em que se utilizou equação do tipo potencial, e por fim uma lógica em que se fez a junção das duas anteriores, ajustando sempre os coeficientes das equações que apresentaram melhores resultados. Com os resultados obtidos em cada teste foi possível verificar o desempenho das lógicas de controle utilizadas, para isso determinou-se os índices de desempenho IAE (integral do valor absoluto do erro), ISE (integral do valor quadrático do erro) e ITAE (integral do erro absoluto ponderado no tempo), seguindo a metodologia de cálculo proposta por FACCIN et al. (2004). Observou-se que a lógica que melhor se adaptou as necessidades do regulador eletrônico foi a que aliou a equação linear com a equação potencial.

Estabeleceu-se um intervalo de erro em que o controlador permaneceria em “dormência” (sem enviar sinal aos atuadores). O intervalo de dormência era aquele em que PL era maior ou igual à Paj menos uma constante de intervalo (C_i) e/ou aquele em que PL era menor ou igual a Paj somada a C_i , conforme apresentado na expressão abaixo.

$$PL \geq P_{aj} - C_i \quad e/ou \quad PL \leq P_{aj} + C_i$$

Tomando como base a expressão apresentada acima, ensaios preliminares com o regulador de pressão foram realizados com o objetivo de se ajustar a C_i , variando-a aleatoriamente entre 0 e 1. Dessa forma, pode-se observar que havia uma relação entre a pressão de entrada e a C_i , que mantinha o regulador operando com uma maior estabilidade em torno da P_{aj} . Assim, para pressões de entrada de 490,32 kPa (50 mca), a C_i que melhor se ajustou foi 0,05, enquanto que para pressões de entrada de 127,48 kPa (13 mca), a C_i que melhor se ajustou foi 0,25. Para valores intermediários de pressão de entrada, tem-se por interpolação a determinação da C_i por meio da Equação 4, sendo esta implementada na lógica de controle.

$$C_i = \left(\frac{50 - P_{aj}}{50 - 13} \times 0,2 \right) + 0,05 \quad (4)$$

A lógica de controle implementada, assume o T_a da válvula solenóide de acordo com o erro. Desse modo, para erros maiores do que 1 a lógica utiliza a equação do tipo linear (Equação 5); para erros menores do que 1 e maiores do que 0, a lógica utiliza uma equação do tipo potencial (Equação 6); e para erros abaixo de 0 a lógica também utiliza uma equação do tipo potencial (Equação 7).

$$T_a = 1000 \times (\text{erro absoluto}) \quad (5)$$

$$T_a = 29 + (\text{erro absoluto})^5 \quad (6)$$

$$T_a = 99 + (\text{erro absoluto})^5 \quad (7)$$

Como o tempo mínimo de resposta da válvula solenóide era de 30 ms (valor observado empiricamente), adotou-se como constante da equação potencial o valor de 29, o que limitava ao T_a mínimo de 30 ms caso o erro fosse zero. Durante a realização dos ensaios preliminares observou-se que o regulador apresentava uma resposta mais lenta quando o erro estava abaixo de zero, portanto houve a necessidade de se ajustar a constante da equação que atuaria nesta faixa de erro para um valor que se obtinha a resposta com o mesmo desempenho das equações anteriores, e neste caso, o valor obtido experimentalmente foi de 99 ms (Equação 7).

A lógica de controle de pressão adotada, pode ser melhor compreendida com a visualização da rotina de *software* gravada no microprocessador, cujo fluxograma é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de sequenciamento da lógica de controle utilizado no microcontrolador

2.2.7 Montagem da estrutura física experimental

O regulador de pressão foi instalado em bancada para os ensaios hidráulicos (Figura 11), em que se utilizou tubulação de PVC com diâmetro de 25 mm para a condução de água. Realizou-se o monitoramento da vazão no regulador durante os ensaios experimentais, com o auxílio de um medidor eletrônico de vazão.

Figura 11 - Estrutura física do regulador de pressão montado em bancada para realização dos ensaios experimentais

No final da linha de condução de água acoplou-se um aspersor do fabricante Agropolo, modelo MV 360L com a finalidade restringir o fluxo a uma dada vazão de interesse. Foram utilizados dois bocais de diâmetros distintos, sendo estes, o bocal azul (3,5 mm x 2,5 mm) e o bocal verde (7,0 mm x 2,5 mm), assim, pode-se verificar o desempenho do regulador de pressão operando nas condições extremas (mínima e máxima) de vazão e velocidade, possíveis de se obter com o emissor utilizado nos testes.

2.2.8 Teste do regulador eletrônico de pressão

Os ensaios foram feitos com 3 repetições, utilizando-se a combinação dos dois bocais de aspersores. O equipamento foi avaliado atuando sobre diferentes pressões de entrada, partindo-se do ponto da pressão ajustada menos 9,81 kPa até o ponto em que o regulador de pressão se mostrou capaz de atuar, ou até a pressão máxima de 608 kPa. As pressões de entrada eram alteradas em 49,03 kPa a cada 60 segundos, sendo estas avaliadas em um primeiro momento de forma crescente, e

posteriormente de forma decrescente, possibilitando constatar a ocorrência da histerese.

As pressões de ajuste avaliadas foram de 98,06 kPa, 196,13 kPa, 294,19 kPa e 392,26 kPa para as quais, os valores (média de 3 repetições) da velocidade da água na válvula hidráulica e da vazão são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de vazão e velocidade da água, obtidas pela combinação dos bocais, para o regulador operando com diferentes pressões de ajuste

Pressão de ajuste (kPa)	Bocal			
	Azul (3,5 x 2,5 mm)		Verde (7,0 x 2,5 mm)	
	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Velocidade (m s ⁻¹)
98,06	0,75	0,42	1,93	1,09
196,13	1,05	0,59	2,76	1,56
294,19	1,25	0,71	3,44	1,95
392,26	1,47	0,83	3,74	2,12

Os pontos de monitoramento da pressão foram instalados a uma distância superior a 4 vezes o diâmetro da tubulação a partir do eixo central da válvula hidráulica, evitando-se erros advindos da turbulência ocasionada por esta peça. Para a instalação dos pontos de tomada de pressão, utilizou-se um colar de PVC furando-se a tubulação com broca de 0,005 m de diâmetro para permitir a passagem de água e conseqüentemente a pressurização do transdutor.

Como forma de verificar a eficiência do controlador em regular a pressão, uma série de testes foram realizados, sendo os dados coletados através de porta serial e armazenados no computador com o auxílio de programa desenvolvido em linguagem Delphi para a recepção dos valores de pressão medidos pelo sensor ao longo do tempo do ensaio. Tal programa fornece a data e a hora da coleta, juntamente com o valor das variáveis analisadas pelo microcontrolador. A taxa de transferência de dados é de 9600 bits por segundo.

Os dados dos ensaios foram salvos em arquivos no formato VCS, em pasta escolhida pelo usuário, sendo passíveis de serem manipulados em planilha eletrônica MS-Excel[®].

2.3 Resultados e discussão

A normatização de reguladores de pressão é estabelecida pela ISO 10522-1993, porém, apesar de ter base nesta norma, a avaliação do equipamento proposto neste trabalho teve como foco principal, demonstrar a capacidade do regulador eletrônico em permitir que as pressões de saída fossem ajustadas de acordo com a necessidade do sistema, sendo esta estabelecida pelo usuário, mantendo-a regulada para diferentes pressões de entrada. Diante do objetivo deste projeto, não se priorizou a elaboração da curva característica (ou faixa) de operação do regulador de pressão avaliado.

Deve-se destacar que os ensaios apresentaram particularidades devido ao conjunto de fatores que envolvem o controle da pressão de saída, como por exemplo, o tempo de ajuste, o qual para uma mesma pressão de entrada e vazão operou com diferentes tempos para ajustar a pressão de saída. Assim, optou-se por representar os dados das repetições, obtidas nos ensaios, por meio de curvas plotadas individualmente nos gráficos.

Buscou-se verificar em cada ensaio experimental a faixa de operação do regulador proposto, de forma que, a diferença entre a pressão de ajuste e a pressão de entrada máxima fosse igual a 250 kPa. A vazão na válvula hidráulica foi determinada no momento em que se constatou a estabilização da pressão de saída. Portanto, os valores de vazão não diferiram entre si no processo de incremento e decréscimo da pressão de entrada, uma vez que a pressão na saída estava estabilizada.

2.3.1 Resposta do regulador às mudanças de pressão na entrada

A Figura 12 e Figura 13 mostram as repetições de ensaios para a variação da pressão de saída em função do tempo de atuação do regulador de pressão, sendo o regulador submetido a pressões de entrada crescente e decrescente, respectivamente. A faixa de velocidade de escoamento avaliada neste ensaio foi de $0,42 \text{ m s}^{-1}$ a $0,83 \text{ m s}^{-1}$.

Comparando-se a duração dos ensaios apresentados na Figura 12 e na Figura 13, para obtenção de um mesmo valor de P_{aj} , verifica-se que houve certa divergência entre eles. Este efeito deve-se ao fato de que, ao ajustar a pressão de

saída, o regulador provocava uma redução da vazão, o que resultou na elevação da pressão de entrada que estava sendo ensaiada. Tal fato poderia ser evitado com a utilização de uma válvula reguladora de pressão, anterior ao controlador que estava sendo estudado. Estes efeitos tiveram maior influência para o regulador atuando com pressões de ajuste de 98,06 kPa e 196,13 kPa, as quais apresentaram vazões iguais a $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente (Figura 12 A e B).

Observa-se, portanto, que para a pressão de entrada crescente, a avaliação do regulador ocorreu em menor tempo. Adicionalmente, observa-se que a pressão de entrada avaliada apresentou-se instável. Em contrapartida, as análises com o regulador operando com pressão de entrada decrescente não apresentaram tal instabilidade, pois ao se iniciar os ensaios, a pressão de entrada encontrava-se estabilizada, o que permitiu a obtenção de um maior conjunto de dados (ou pontos) para representar o comportamento do regulador eletrônico atuando nestas condições.

Para as condições em que o regulador eletrônico foi avaliado com vazões de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (velocidades de $0,42 \text{ m s}^{-1}$ e $0,59 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente) obteve-se uma menor diferença entre a pressão de ajuste e a pressão de entrada máxima, sendo esta de aproximadamente 150 kPa. Entretanto, nas avaliações sob vazões de $1,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (velocidades de $0,71 \text{ m s}^{-1}$ e $0,83 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente) o regulador eletrônico mostrou-se eficiente em manter a P_{aj} , com uma diferença de aproximadamente 200 kPa, em relação à pressão de entrada. Acima destes limites de diferença de P_{aj} e pressão de entrada, sob estas condições de avaliação, houve o fechamento por completo da válvula hidráulica destacando a incapacidade do regulador em atuar sob pressões superiores.

A incapacidade de o regulador ser utilizado para ajustar a pressão de saída para uma maior faixa de pressão de entrada, quando operando com vazões de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, pode estar ligada ao fato de que estas vazões resultam em baixa velocidade da água ($0,42 \text{ m s}^{-1}$ a $0,83 \text{ m s}^{-1}$), assim, a variação da pressão de saída torna-se menos sensível às perdas de carga provocadas pelo regulador.

Comparando-se os tempos de ajuste da pressão para os ensaios com pressão de entrada crescente e decrescente (Figura 12 e Figura 13), de maneira geral, conclui-se que o regulador eletrônico demonstrou maior eficácia nos ensaios com pressão de entrada crescente. Foi observado um tempo de ajuste entre 10 s e 20 s nos ensaios com pressão de entrada crescente; enquanto que, nos

ensaios com pressão de entrada decrescente obteve-se um tempo de ajuste entre 15 s e 30 s.

Figura 12 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de 0,75 m³ h⁻¹ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de 1,05 m³ h⁻¹ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de 1,25 m³ h⁻¹ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de 1,47 m³ h⁻¹ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição

Figura 13 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $1,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição

Os ensaios de ajuste da pressão de saída em função do tempo de atuação do regulador eletrônico, operando sob pressões de entrada crescente e decrescente e numa faixa de velocidade de $1,09 \text{ m s}^{-1}$ a $2,12 \text{ m s}^{-1}$, podem ser observados na Figura 14 e na Figura 15, respectivamente.

Verificou-se que, para o intervalo de vazão de $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (intervalo de velocidade de $1,09 \text{ m s}^{-1}$ a $2,12 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente), o regulador eletrônico de pressão mostrou-se eficiente em manter a pressão de saída estabilizada, independente da perturbação causada pela pressão de entrada ser crescente ou decrescente. Desse modo, o regulador não apresentou os problemas observados nos ensaios com pressões de entrada crescente, quando operando na faixa de velocidade de $0,42 \text{ m s}^{-1}$ a $0,83 \text{ m s}^{-1}$. Desse modo, pode-se concluir que o regulador foi capaz de atuar sob uma diferença entre a pressão de saída e a pressão de entrada (ou faixa de operação) de 250 kPa em todos os testes realizados.

Nas condições em que o regulador atuou com vazões superiores a $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (emissor com bocal verde), a pressão de entrada apresentou maior estabilidade quando comparado aos testes com vazões de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (emissor com bocal azul).

Tratando-se do tempo de ajuste da pressão de saída, constatou-se que não ocorreu uma diferenciação significativa, nos casos em que houve acréscimo ou decréscimo da pressão de entrada, conforme verificado na Figura 14 e na Figura 15. Pode-se observar que o tempo para o regulador eletrônico ajustar a pressão de saída para a faixa definida de P_{aj} foi de 10 s a 20 s.

Ao se avaliar a atuação do regulador eletrônico operando em toda a faixa de vazão estudada ($0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), e sob os ensaios com pressão de entrada crescente e decrescente, verifica-se que o controlador proposto neste projeto foi capaz de manter a P_{aj} próximo ao valor estabelecido no dispositivo eletrônico. De maneira geral, os tempos de ajuste observados, mesmo para uma diferença de pressão de entrada e P_{aj} igual a 250 kPa, foram pequenos quando se trata de aplicações na irrigação. Dessa forma, pode-se afirmar que este regulador mostrou-se como um precursor de um controlador de pressão a ser utilizado tanto para fins de pesquisa quanto para a produção comercial.

Figura 14 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de 1,93 m³ h⁻¹ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de 2,76 m³ h⁻¹ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de 3,44 m³ h⁻¹ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de 3,74 m³ h⁻¹ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição

Figura 15 - Tempo de ajuste da pressão de saída, com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $1,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $3,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $3,74 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). PE= pressão de entrada; Paj= pressão de ajuste; R= repetição

2.3.2 Níveis de exatidão para pressão de saída versus pressão de entrada e vazão constante

O nível de exatidão do regulador foi verificado para valores de pressões de entrada acima da pressão de ajuste e para as vazões já citadas no item 2.2.8, conforme as normas da ISO 10522-1993.

Por se tratar de um regulador composto com dispositivo eletrônico fundamentado em lógicas de controle, este necessita de um tempo de ajuste para convergir à pressão de saída quando há variações na pressão de entrada.

Como o regulador eletrônico possibilitava ajustar diferentes pressões de saída, de acordo com as necessidades do sistema, este pode ser enquadrado em diferentes níveis de exatidão, a qual é função da pressão de entrada, da vazão, e da velocidade da água na válvula hidráulica. Destaca-se na Figura 16 e na Figura 17 os níveis de exatidão do controlador atuando sob diferentes condições de vazão, além de terem sido aplicadas pressões de entrada crescentes e decrescentes, respectivamente, para o regulador operando na faixa de velocidade da água de $1,09 \text{ m s}^{-1}$ a $2,12 \text{ m s}^{-1}$.

Observa-se que tanto nos ensaios sob pressões de entrada crescentes e decrescentes, para as pressões de ajuste de 98,06 kPa e 196,13 kPa (Figura 16 A e B e Figura 17 A e B), verificou-se o enquadramento do regulador como sendo de nível de exatidão B. Esse tipo de resposta pode ter ocorrido devido a baixa pressão de ajuste adotada nestes ensaios, o que consequentemente resultou em pequenos valores de vazão e velocidade na válvula hidráulica. Vale ressaltar que variáveis pressões de entrada e de ajuste, vazão e velocidade da água estão intrinsecamente relacionadas, e qualquer alteração em uma delas, consequentemente, influencia as demais.

Analisando-se a atuação do regulador eletrônico nas pressões de ajuste de 294,19 kPa e 392,26 kPa constatou-se que sua atuação foi classificada dentro dos limites do nível de exatidão A. Estes resultados foram atingidos após a pressão de entrada serem superiores, respectivamente, a 365 kPa (Figura 16 C e Figura 17 C) e 470 kPa (Figura 16 D e Figura 17 D). Tal resposta pode ser explicada pois, a partir do ponto determinado por estes valores, os quais referem-se ao primeiro ponto de pressão de entrada superior a P_{aj} , é que se tem a atuação efetiva do regulador no controle da pressão de saída.

Figura 16 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada crescente: P_{aj} de 98,06 kPa e vazão de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); P_{aj} de 196,13 kPa e vazão de $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); P_{aj} de 294,19 kPa e vazão de $1,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); P_{aj} de 392,26 kPa e vazão de $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio

Figura 17 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada decrescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de $1,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de $1,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de $1,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio

Mostra-se na Figura 18 e na Figura 19 os níveis de exatidão do controlador atuando sob uma faixa de velocidade de $1,09 \text{ m s}^{-1}$ a $2,12 \text{ m s}^{-1}$, além de terem sido aplicadas pressões de entrada crescentes e decrescentes, respectivamente.

Apesar da variação da pressão de saída extrapolar os limites de nível de exatidão A, para pressão de ajuste de 98,06 kPa (Figura 18 A), observa-se que o regulador foi capaz de manter a pressão ajustada na faixa de pressão permitida para este nível de exatidão. A mesma classificação foi obtida nos ensaios com pressão decrescente (Figura 19 A). Adicionalmente, verifica-se que nos ensaios realizados com a aplicação de pressão crescente o controlador apresentou maior instabilidade da pressão de saída quando comparado com os ensaios com a aplicação de pressão decrescente. Contudo, embora os ensaios com pressão crescente tenham demonstrado maior variabilidade no ajuste, a lógica inserida na programação do controlador permitiu atuação rápida do regulador e a consequente correção dos desvios.

Na Figura 18 B e na Figura 19 B, verifica-se que, mesmo com a presença de uma perturbação na pressão de saída (196,13 kPa), na faixa de pressão de entrada de 400 kPa a 500 kPa, não houve descaracterização do nível de exatidão do regulador, que nestes casos foram classificados como A. Esta exatidão da regulação da pressão de saída pode ser considerada coerente, uma vez que a lógica de controle efetuou rapidamente sua correção.

Pode-se afirmar que o regulador eletrônico proposto, atuando sob pressões de ajuste de 294,19 kPa e 392,26 kPa, possibilitou um nível de exatidão A, tanto para pressões de entrada crescentes quanto decrescentes (Figura 18 C e D; Figura 19 C e D, respectivamente), de forma que suas curvas permaneceram dentro desses limites de exatidão, sem apresentar uma variabilidade significativa da pressão de saída.

Quando se analisa o conjunto de ensaios para a classificação do nível de exatidão do regulador eletrônico pode-se concluir que o controlador proposto e a lógica de atuação foram eficazes no ajuste da pressão de saída.

Figura 18 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada crescente: Paj de 98,06 kPa e vazão de 1,93 m³ h⁻¹ (A); Paj de 196,13 kPa e vazão de 2,76 m³ h⁻¹ (B); Paj de 294,19 kPa e vazão de 3,44 m³ h⁻¹ (C); Paj de 392,26 kPa e vazão de 3,74 m³ h⁻¹ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio

Figura 19 - Nível de exatidão para o regulador operando com pressão de entrada decrescente: P_{aj} de 98,06 kPa e vazão de 1,93 m³ h⁻¹ (A); P_{aj} de 196,13 kPa e vazão de 2,76 m³ h⁻¹ (B); P_{aj} de 294,19 kPa e vazão de 3,44 m³ h⁻¹ (C); P_{aj} de 392,26 kPa e vazão de 3,74 m³ h⁻¹ (D). Lim. Inf.= limite inferior; Lim. Sup.= limite superior; A e B= níveis de exatidão. R= repetições; A= 0 - 100 s; B= 100 - 200 s; C= 200 - 300 s; D= 300 s - fim do ensaio

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O regulador eletrônico de pressão desenvolvido neste trabalho foi construído com o emprego de peças disponíveis no mercado, sendo realizadas adaptações quando necessárias. Dessa forma, observando o bom desempenho apresentado pelo equipamento nas condições ensaiadas no laboratório, ressalta-se que sua concepção com peças elaboradas em escala industrial poderia aprimorar os resultados obtidos, levando a um ajuste mais preciso e estável da pressão de saída.

Outro fator importante a ser analisado seria o desvio proporcionado pela lógica de controle, no ajuste da pressão de saída pelo regulador. Após o estudo realizado, pode-se concluir que, mesmo que a lógica de controle permita um controle preciso da Paj, a mesma encontra-se limitada pelas características do material utilizado na construção do diafragma que controla a abertura do cabeçote da válvula hidráulica. Este componente é constituído por um polímero elastômero (borracha), o qual acredita-se possuir um alto módulo de elasticidade, o que resultaria em uma baixa sensibilidade às tensões aplicadas e resultaria em um menor gradiente de deformação elástica do material. Portanto, o emprego de um elastômero apropriado para as condições de contração e distensão causadas durante o processo de regulação da pressão devem permitir a obtenção de uma pressão de saída ajustada mais estável.

As válvulas solenóides utilizadas como atuadores sobre o processo de controle da pressão de saída possuíam um tempo mínimo de resposta de 30 ms para serem acionadas. Portanto, acredita-se que o uso de válvulas solenóides que respondam em um menor tempo de ação, possam contribuir na elaboração de um regulador eletrônico mais eficiente em manter a pressão de saída com maior estabilidade em torno da pressão desejada de ajuste.

Seria recomendado um estudo mais aprofundado para se alcançar resultados mais conclusivos quanto à eficácia da lógica de controle, aplicando-se diferentes valores de pressão de entrada e vazão para uma mesma pressão de ajuste, obtendo-se a curva de desempenho e o intervalo de operação do regulador proposto. Como o regulador desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado para ajustar diferentes valores de pressão de saída, o que não é possível com o uso de reguladores de pressão convencionais, seria oportuna a realização deste estudo

para diferentes pressões de ajuste. Com isso seria possível apresentar toda a faixa de operação do regulador eletrônico de pressão e o seu desempenho esperado.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, para as condições em que se realizou os ensaios apresentados neste trabalho, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- ✓ O regulador de pressão microprocessado desenvolvido possibilitou ajustar a pressão de saída de acordo com o desejado, operando com nível de exatidão A segundo a ISO 10522-1993. Dessa forma, o controlador proposto, possibilita ser operado em conjunto com outros sensores, como por exemplo, de umidade do solo, fazendo o ajuste da pressão de saída em tempo real, e conseqüentemente variando a vazão e a lâmina aplicada, de acordo com as necessidades do sistema.
- ✓ A lógica de controle implementada ajustou a pressão de saída em um tempo máximo de 30 s, quando houve variações da pressão de entrada;
- ✓ O controlador operou sob diferentes pressões de ajuste, mostrando bom desempenho para regular a pressão de saída em uma faixa de velocidade da água de $0,42 \text{ m s}^{-1}$ a $2,12 \text{ m s}^{-1}$.

REFERÊNCIAS

- AIROLDI, R.P.S.; PATERNIANI, J.E.S.; RIBEIRO, T.A.P.; SILVA, M.J.M. Comparação entre elementos filtrantes de manta sintética não tecida e de disco no tratamento de água para irrigação. **Irriga**, Botucatu, v.8, n.3, p.218-233, 2003.
- ALENCAR, C.A.B.; CUNHA, F.F.da; RAMOS M.M.; SOARES, A.A.; PIZZIOLO, T. de A.; OLIVEIRA, R.A. DE. Análise de automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.15, n.2, p. 109-118, 2007.
- ALVES FILHO, M. Tese foca uso racional da água na agricultura. **Jornal da UNICAMP**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 17 de dezembro, 2007. Engenheiro agrícola desenvolve na Feagri protótipo de equipamento que monitora a umidade do solo. 4p.
- ANDRADE JÚNIOR, 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, v.2, n.3, p.135-139, 1997.
- ARMINDO, R.A. **Desenvolvimento de um aspersor de taxa variada para irrigação de precisão**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 98p. 2009.
- BENAMI, A.; OFEN, A. **Irrigation engineering**. Haifa: Irrigation Engineering Scientific Publications, New Orleans, 1984. 257p.
- CAMARGO, A.P. **Desenvolvimento de um medidor eletrônico da vazão utilizando célula de carga**. 2009. 127p. Dissertação (Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo.
- CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável. Water in food production: university and industry work on sustainable development reach. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 37-46, 2006.
- CHRISTOFIDIS, D. **Considerações sobre conflitos e uso sustentável em recursos hídricos**. Brasília: Garamont, 2002. 343p.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, Cruz das Almas, v.7, n.1, p.57-60, set. 2005.
- DIGI-KEY CORPORATION. **MPX5700 Series**. Disponível em: <<http://dikey.com/catalog/en/partgroup/mpx5700-series/11711>> Acesso em: 15 mar. 2012.

FACCIN, F. **Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID**. 2004. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Pesquisa e Desenvolvimento de Processos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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

FUTURE ELECTRONICS. **Freescale Semiconductor**. Disponível em: <<http://uk.futureelectronics.com/en/technologies/semiconductors/analog/sensors/pressure/page/4147633-MPX5700DP.aspx>> Acesso em: 11 abr. 2012.

GOMIDE, R. Monitoramento para manejo de irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L. ; VILELA, L.A.A.; PEREIRA, G.M. **Manejo de irrigação**. Poços de Caldas: SBEA/UFLA/DEG, 1998. p.133-238.

IBARS, R.A.F. **Desenvolvimento e avaliação de tubos Venturi para medição de vazão**. 2004. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION, ISO 10522, **Agricultural irrigation equipment – Direct-acting pressure-regulating valves**. Geneve, 1993. 11p.

LIMA, S.C.R.V.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; TEIXEIRA, M.B.; CARVALHO, M.A.R.; GOMES, A.W.A. Comportamento de Reguladores de Pressão para Pivô Central Após Modificação Interna. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.1, n.1, p.9–14, 2007.

LIMA, S.C.R.V.; FRIZZONE, J.A.; COSTA, R.N.T.; SOUZA, F.; PEREIRA, A.S.; MACHADO, C.C.; JÚNIOR, M.V. Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.201-209, 2003.

LIMA, S.C.R.V. **Avaliação hidráulica de válvulas reguladores de pressão novas e com diferentes tempos de utilização**. 2001. 90p. Dissertação em Agronomia (Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

LOPES, R.J.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNÁNDEZ, J.F. **Riego localizado**. Madrid: Iryda, 1992. 405p.

MANAGING WATER REPORT UNDER UNCERTAINTY AND RISK. **The united nations world water development report – WWDR4 2009**. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/WWDR4%20Volume%201-Managing%20Water%20under%20Uncertainty%20and%20Risk.pdf>> Acesso em: 09 mar. 2012.

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.

MIRANDA F. R.; YODER R. E.; WILKERSON E J. B. Controlador de baixo custo para irrigação de precisão. In: 3º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2005. Sete Lagoas. **Anais...** Embrapa Milho e Sorgo - Sete Lagoas, MG. 2005.

PINTO, M.F. **Desenvolvimento de um sistema para o controle do ph da água para irrigação localizada**. 2010. 85p. Mestrado (Irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo.

PINTO, M.F.; SALVADOR, C.A.; CAMARGO, A.P.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Avaliação do desenvolvimento de controle para ajuste automático do ph da água utilizada em microirrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA CONBEA, 40, 2011, Cuiabá.1-4p.

QUEIROZ, T.M.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.44-54, 2008.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S. Avaliação do efeito da cloração da água em sistemas de filtragem de irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Campinas, v.1, p.31-39, 2007.

RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P.S.; PATERNIANI, J.E.S.; SILVA, M.J.M. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas Grande, v.9, p.450-456, 2005.

SENNINGER IRRIGATION INC. **How does a pressure regulator work?** Disponível em: <<http://senninger.com/2010/4/15/how-does-a-pressure-regulator-work/>> Acesso em: 11 jun. 2012.

SHIKLOMANOV. **World water resources at the beginning of the 21st century**. IHP/UNESCO, Washington, 2003.

SOUZA, L.O.C.; MANTOVANI, E.C; SOARES, A.A.; RAMOS, M.M.; BONOMO, R. Uniformidade de aplicação de água em sistemas de Irrigação por gotejamento, em função do tempo de uso e do tipo de gotejador, utilizados na cafeicultura Irrigada. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL1., 2000. Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas. 2000. v.1, p.865-868.

STONE, K.C.; SADLER, E.J.; MILLEN, J.A.; EVANS, D.E.; CAMP, C.R. Water flow rates from a sites-specific irrigation system. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.22, n.1, p. 73-78, 2006.

TARJUELO, J.M. **El riego por aspersión y su tecnología**. Madrid: Mundi.Prensa, 1995. 491p.

THE DYNAMICS OF GLOBAL WATER FUTURES DRIVING FORCES 2011–2050. **Global Water Futures 2050 - WWAP**. Disponível em:

<<http://unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/The%20Dynamics%20of%20Global%20Water%20Futures.pdf>> Acesso em 22 abri. 2012.

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, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003, 1 CD-ROM.

VON BERNUTH, R.D.; BAIRD, D. Characterizing pressure regulator performance. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.33, n.1, p.145-150, 1990.

ZAGGO, S.P.; COLOMBO, A.; GIL, O.F. Desempenho de válvulas reguladoras de pressão utilizadas em sistemas pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19. **Anais...** Piracicaba:SBEA, 1990. v.1, p.360-379.

ZOCOLER, J.L.; CÉSAR, L.E.V.; VANZELA, L.S. Efeito da posição relativa da linha lateral de um equipamento de irrigação por pivô central na uniformidade de distribuição de água e eficiência da irrigação. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 12, n. 4, p. 290 - 297, out./dez. 2004.

ANEXOS

Anexo A - Projeto em ambiente “Altium Designer Summer 09” para elaboração do circuito eletrônico regulador de pressão

Anexo B - Fluxograma utilizado na calibração do transdutor de pressão