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

**Desenvolvimento de um controlador de irrigação acionado mecanicamente
pela tensão da água no solo**

Alexsandro Claudio dos Santos Almeida

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2012**

Alexsandro Claudio dos Santos Almeida
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de um controlador de irrigação acionado mecanicamente pela tensão da água no solo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Tese de doutorado apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Almeida, Alexsandro Claudio dos Santos

Desenvolvimento de um controlador de irrigação acionado mecanicamente pela
tensão da água no solo / Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.- - versão revisada
de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
96 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Automação 2. Inovações tecnológicas 3. Irrigação - Manejo I. Título

CDD 631.7
A447d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

A

DEUS,

Pelas benções concedidas na minha vida.

A Minha mãe, Maria do Socorro de Almeida, e Meu pai, Juares Claudio dos Santos, “*in memória*”, exemplos de amor e dedicação, que me mostraram desde cedo o valor da ética e da educação, sem os quais não teria os valores que levarei por toda minha vida. Mainha tudo isso é fruto do seu empenho para nos educar, da sua capacidade de encontrar alternativas para reverter às situações difíceis de nossa vida e da sua abnegação por seus filhos.

Aos meus irmãos, Allan, Alciele, Alda, fontes de inspiração e motivação. É impressionante como nos inspiramos entre-nos para enfrentar os obstáculos no caminho de nossos sonhos. O amor incondicional de vocês é o meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé e perseverança concedidas em todos os momentos.

Aos meus pais, Maria do Socorro e Juarez, pelos anos dedicados à minha formação e a de meus irmãos. Este trabalho é um dos resultados da decisão que tiveram em privilegiar nossa educação.

Ao Prof. Tarlei Arriel Botrel, pela sua orientação, pela confiança depositada, pela contagiante perseverança na vida, pelo exemplo de ética e de visão de mundo, pela amizade e apoio nas horas mais difíceis.

To Professor Steven Russel Raine for your friendly orientation. You are such great example of a great Professional. I really appreciate everything you did for me during my stay in Australia.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, por intermédio do Departamento de Engenharia de Biossistemas e a Programa de Pós-Graduação em Irrigação e drenagem, pela formação adquirida, pela acolhida e efetivo apoio concedidos.

To National Center for Engineering in Agriculture (NCEA- Toowoomba-QDL-Austrália), especially to Eng. Jochen, Jack McCugh, Lydia, Troy Jesen and Crag Baille for their discussions about my research, also for our friendship.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pelos conhecimentos transmitidos e convivência. Um agradecimento muito especial aos Professores Sergio do Nascimento e José Antonio Frizzzone por todo apoio e amizade, e por serem, fontes de inspiração em suas aulas.

Aos meus grandes amigos Conan, Antonio e Marinaldo, pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente, durante meu estágio sanduiche, em que assumiram muitas das minhas responsabilidades.

I am so thankfull to Amy Johnson for your caring and love. You gave me a lot of support and made my life much easy in Australia. I really appreciate it!

To Johnson´s Family, Mr. Noel e Mrs. Dawn, to be so supportive to me and host me within your family. I am so gratefull for everything.

Aos Funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ-USP, em especial ao seu Hélio, Luiz, Davilmar, Gilmar, Aúreo, Juarez, Chicão e seu Antônio pela ajuda prestada durante a realização do trabalho.

Aos vendedores de equipamento e peças em Piracicaba, em especial à equipe da Bratal, da SOS molas e da Piranel, que atuaram como consultores nas longas conversas e discussões para encontrar soluções no processo de fabricação do equipamento.

Aos amigos da pós-graduação, em especial ao Pedro Robson, Allan, Crhistian, Pedro Giongo, Lucas Velame, Ronaldo, Elenilson, Rafael Mingoti, Rochane, Kely, Cláudio Japonês, Valfísio, Eusímio, Everaldo, Rafael, Renato, Cornélio, Danilton, Adriano, Fábio, Janaina, Ligia, Jussálvia, Roberto Argentino, Osvaldo, Carlão, Cesar, João Lelis, Ricardo, Daniel, Fernando, Isaac, Mateus marafron, entre outros, pelo convívio, amizade e os bons momentos que passamos juntos durante o curso.

Aos grandes amigos e irmãos (de orientação), Dinara, Leonardo, Vanessa, Ezequiel e Ana Paula, pelo excelente convívio e amizade.

Aos amigos Marinaldo, Conan, Lucas Vellame, Antonio, Marcos Alex, Roque, Deived e Renan pelo inestimável apoio dado na instalação dos experimentos, na programação do datalogger, no desenho em CAD, na revisão e análise dos dados da tese.

Aos amigos de república, Aderbal, Tonhão, Magid, Ismel e Xiaoyang, pela amizade, pelas festas e excelente convívio. Como também, aos amigos que curtiram as festas em nossas republicas: Carol, Simone (s), Cartiane, Roberta, Dalila, Juliana, Inocência, Jerônimo, Mateus, Sanzio, Passa Tempo, Michele, Marcelo, dentre outros.

Aos amigos das corridas, em especial ao Samuel, Claudinei, Rodrigo Murakami (Murakami Team), Marcos Borges, Marcos Fornazaro e Luiz Sturion (Vou Treinar), pelo incentivo na prática de esportes para manutenção da saúde mental e pela amizade construída.

Ao Grupo de Oração Universitário (Gou Água Viva) pelo crescimento espiritual e fortalecimento nas horas difíceis, em especial para Aninha, Rafa, Angelina, Dalila, Mariana, Renata, Lorena, Thati, entre outros, pelo exemplo de fé e perseverança em Deus.

À FAPESP pela concessão da bolsa de estudos para realização do doutorado.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos para realização do doutorado sanduiche.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

I am so thankful to SCIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Austrália) to allow us to use the SWIMv2.1 software.

Ao CECA-UFAL, em especial aos Professores: Geraldo Veríssimo, Paulo Vanderley, Iêdo Teodoro e Leonaldo Souza por todo apoio, incentivo dado para fazer pós-graduação, pelo exemplo de vida, ensinamentos para vida e amizade.

Aos Professores da banca examinadora da defesa de doutorado: Professor Doutor Lucas Vellame, Professor Doutor Rubens Coelho, Professor Doutor Sergio Moraes, Professor Doutor Fernando Tangerino e Professor Doutor Tarlei Botrel, pelas valiosas contribuições.

E a todos, que de forma direta e indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

“As explicações são reformulações da experiência aceitas por um observador. (...) A ciência não tem a ver com a predição, com o futuro, com fazer coisas, mas sim com o explicar. Os cientistas são pessoas que têm prazer em explicar.”

Humberto Maturana i
Livro: Cognição, Ciência e Vida.

“In a gentle way, you can shake the world.”

Mahatma Gandhi.

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS.....	17
LISTA DE TABELAS.....	21
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Automação no manejo da irrigação	25
2.2 Manejo da irrigação baseado em informações da umidade do solo	27
2.2.1 Tensiometria na automação	30
2.2.1.1 Desempenho do tensiômetro	31
2.3 Controladores de irrigação acionados mecanicamente.....	33
2.4 Eficiência de irrigação	34
2.5 Modelos de simulação da água no solo	36
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Princípio de funcionamento do controlador.....	39
3.2 Desenvolvimento e construção do controlador de irrigação.....	41
3.2.1 Protótipo I	41
3.2.2 Protótipo II	43
3.3 Funcionamento do controlador e calibração dos sensores de pressão.....	43
3.4 Caracterização do experimento em laboratório	46
3.5 Caracterização do experimento em campo	47
3.5.1 Em vasos.....	48
3.5.2 Em pomar de frutíferas	49
3.6 Quantificação das forças atuantes na ativação do controlador	51
3.7 Simulação	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Avaliação em laboratório	57
4.1.1 Forças atuantes no acionamento do controlador.....	58
4.1.1.1 Força requerida para ativar a válvula de três vias	59
4.1.1.2 Força requerida para ativar a mola de calibração	59
4.1.1.3 Força requerida para superar a resistência	61

4.1.1.4	Contribuição percentual de cada componente de força	62
4.1.2	Calibração individualizada do controlador	64
4.2	Avaliação em campo	67
4.2.1	Controle da irrigação em vasos	67
4.2.2	Controle da irrigação em pomar de fruteiras	69
4.2.3	Efeito da temperatura do ar no acionamento da irrigação	73
4.3	Simulações de desempenho do controlador	75
4.3.1	Posicionamento correto do controlador	79
4.4	Implicações para a operação em campo	85
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS.....	89

RESUMO

Desenvolvimento de um controlador de irrigação acionado mecanicamente pela tensão de água no solo

A automação do manejo da irrigação é uma alternativa para maximizar a eficiência de uso da água e a produtividade de culturas irrigadas. Entretanto, a maioria dos controladores de irrigação automatizados é ativada eletricamente e inapropriada para uso em propriedades rurais onde não há disponibilidade de energia. Nesta pesquisa, foi desenvolvido e avaliado um controlador de irrigação acionado mecanicamente pela tensão da água no solo. O equipamento usa a variação de tensão dentro do tensiômetro, instalado na zona radicular da cultura, para acionar mecanicamente uma válvula de três vias (válvula de atuação hidráulica), que por sua vez, opera sobre uma válvula de suprimento da irrigação (válvula hidráulica). O controlador foi projetado e construído utilizando conexões de PVC e outros componentes de PVC construídos em tornos mecânicos. Foram construídos dois protótipos de controlador, denominados protótipo I e II. A tensão da água no solo requerida para acionar o sistema de irrigação é regulada pelo ajuste de uma mola. O desempenho de seis amostras do protótipo I e protótipo II foi avaliado em campo e laboratório, respectivamente. O equipamento foi capaz de ligar e desligar o sistema de irrigação tanto na avaliação em laboratório quanto no campo. Entretanto, variações (desvios padrão de até 5 kPa) nas tensões para acionar e desligar a irrigação foram observadas entre as amostras dos controladores. Porém, a calibração tanto do acionamento quanto do desligamento para cada controlador individualmente é possível e mostrou-se capaz de reduzir a variação para < 1 kPa. Simulações de água no solo foram conduzidas utilizando-se o programa SWIMv2.1 para avaliar o efeito da acurácia do sensor, tipo de solo, taxa de aplicação de irrigação e a profundidade de instalação do sensor no desempenho da irrigação. O controlador apresentou os melhores desempenhos quando instalado em profundidades maiores que 15 cm e para tensões de acionamento maiores do que 15kPa. Em situações em que maior precisão é requerida no acionamento do SI (irrigação de culturas com sistema radicular raso) e/ou é necessário maior flexibilidade na definição lâmina de água a ser aplicado é recomendada a utilização de dois controladores, um para ligar e outro para desligar o SI. As melhores eficiências de aplicação da irrigação e de armazenamento da água no solo foram verificadas com o controlador instalado em profundidades de 30 a 40% da profundidade efetiva do sistema radicular.

Palavras-chaves: Manejo da irrigação; Inovações tecnológicas; Automação

ABSTRACT

Development of an irrigation controller mechanically actuated by soil-water tension

The automation of irrigation scheduling is critical to maximizing water use efficiency and productivity in irrigated crops. However, the majority of automated irrigation controllers are electrically actuated and inappropriate for use by small-plot holders where there is no electricity. This research has developed and evaluated a mechanical irrigation controller actuated by soil-water tension for use by small-plot holders. The device uses the energy fluctuations inside a tensiometer located in the active root zone of the crop to mechanically actuate a switch valve which in turn operates the irrigation supply valve. The controller was designed and constructed using readily available irrigation fittings and other components constructed in a lathe. It was constructed two prototypes, called prototype I and II. The performance of six irrigation controllers from the prototype I and prototype II were evaluated in laboratory and in field experiments, respectively. The controller was able to turn on and off irrigation system both in field and laboratory conditions. However, variations (up to 5 kPa standard deviation) in the irrigation actuation and cut-off soil tensions were identified between individual controllers. However, the calibration of either the actuation or the cut-off soil tension for individual controllers is possible and shown to reduce the variation between controllers to < 1 kPa for the calibrated function. Soil-water simulations were conducted using SWIMv2.1 model to evaluate the effect of sensor accuracy, soil type, irrigation application rate and the installation depth of the sensor on irrigation performance. The controller was shown to perform best when placed in depths bigger than 15 cm and soil-water activation bigger than 15 kPa. In the situation where more precision is required in the actuation of the irrigation system (irrigated crops with shallow root system) and/or is necessary more flexibility in the water depth to be applied, it is recommended utilize two controllers, one to turn on the irrigation and another to turn it off. The best application and soil water storage efficiencies were verified in controller placement depths between from 30 to 40% of the active root system of the crop.

Keywords: Irrigation scheduling; Technological innovation; Automation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Controlador de irrigação acionado mecanicamente pela tensão de água no solo sob condições de solo seco (a) e solo úmido (b).....	39
Figura 2 - a) controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão da água no solo e b) controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão de água no solo explodido: 1- cápsula porosa, 2 – tubo de PVC, 3- conector de redução, 4 – tubo de acrílico, 5 – Tê, 6 – curva, 7 – tubo de acrílico, 8 – borracha de diafragma, 9 – flange, 10- diafragma, 11- haste de ativação, 12- mangueira, 13- suporte externo da válvula de atuação hidráulica (válvula de três vias), 14 a 17 – válvula de atuação hidráulica (14- corpo da válvula, 15- êmbolo da seringa, 16- cilindro da seringa, e 17- conector microtubo), 18-porca reguladora da mola, 19- arruela da porca e 20 - mola de calibração (ajuste)	42
Figura 3 - a) Características da mola helicoidal cilíndrica de compressão; b) Máquina de ensaio de materiais modelo de dupla coluna Série 4466, marca Instron, utilizada para determinação da relação entre a carga da mola e a sua extensão.....	43
Figura 4 - a) Protótipo 2 do controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão da água no solo e b) Protótipo 2 do controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão de água no solo explodido: 1 – diafragma entre dois flanges de PVC, 2 – pino de ativação, 3 – mola de calibração, 4- porca para regular a mola de calibração, 5 e 7– suporte interno da válvula de 3 vias, 6 – válvula de 3 vias – suporte externo da válvula de 3 vias. c) foto do protótipo II. d) parte superior do controlador e e) detalhe da válvula de 3 vias e da mola de calibração	44
Figura 5 - Válvula de 3 vias de atuação mecânica, 1 – porta de entrada, 2 – porta de saída, 3 – porta de exaustão e 4 – pino de ativação com atuação mecânica	44
Figura 6 - Bancada de testes dos controladores com mesa de tensão, detalhe da mola de calibração do protótipo I	45
Figura 7 - Detalhe do ensaio de calibração do sensor de pressão MPX5100DP feito em laboratório (Extraído de Queiroz 2007)	46
Figura 8 - Relação entre o vácuo aplicado e a leitura dos sensores de pressão (MPX5100DP) (a) dos sensores utilizados no experimento em casa de vegetação e (b) dos sensores utilizados no experimento do pomar	46
Figura 9 - Avaliação do Protótipo II em uma bancada hidráulica	47
Figura 10 - Croqui do experimento na casa de vegetação	48
Figura 11 - Experimento na casa de vegetação para avaliação do controlador de irrigação..	49
Figura 12 - Croqui do experimento em um pomar com seis linhas de fruteiras de diferentes espécies	50
Figura 13 - Experimento no pomar	51

- Figura 14 - Curva de retenção da água no solo para os sete solos estudados entre as tensões de 0 e 60 kPa..... 55
- Figura 15 - (a) Tensão da água no solo (kPa) requerida para iniciar o sistema de irrigação nas seis amostras do protótipo II do controlador de irrigação e (b) Tensão da água no solo (kPa) requerida para desligar o sistema de irrigação pelas seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, controlador 1; C2, controlador 2, ..., C6 controlador 6) 57
- Figura 16 - Diferença entre a tensão de acionamento e desligamento do SI para cada amostra (C1, controlador 1; C2, controlador 2, ..., C6 controlador 6) do protótipo II..... 58
- Figura 17 - (a) Força necessária para superar a força da mola de calibração em um ajuste específico; (b) desvio da força em relação aos valores médios das seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, mola do controlador 1;...; C6, mola do controlador 6) 60
- Figura 18 - (a) força (N) requerida para deformar a mola de calibração no comprimento mínimo para ativar o pino da válvula de três vias; (b) desvio dos valores médios das seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, mola do controlador 1;...; C6, mola do controlador 6) 61
- Figura 19 - (a) Força para superar a resistência; (b) desvio da força de cada amostra em relação aos valores médios das seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, mola do controlador 1;...; C6, mola do controlador 6)..... 62
- Figura 20 - (a) Força requerida (e desvio padrão) para superar a forças opostas ao acionamento do controlador; b) Valores médios da contribuição das quatro componentes de forças atuantes para acionar o SI em cinco diferentes tensões críticas..... 63
- Figura 21 - (a) Desvio no ajuste da mola de calibração necessária para acionar o SI na mesma tensão de água no solo, (b) Desvio no ajuste da mola de calibração necessária para desligar o SI na mesma tensão de água no solo 65
- Figura 22 - Tensão da água no solo medido a 15 cm de profundidade nos vasos cultivados com grama e os eventos de irrigação acionados pelas nove amostras do protótipo I de controlador de irrigação (C1, controlador instalado no vaso 1;...; C6, controlador instalado no vaso 6) 68
- Figura 23 - Tensão da água no solo medido a 15 cm de profundidade e eventos de irrigação em um calendário diário. (C1, controlador instalado na linha 1;...; C6, controlador instalado na linha 6)..... 71
- Figura 24 - Leituras da tensão da água no solo no controlador de irrigação versus o tempo na escala horária a 15 cm de profundidade nas seis de linhas de plantas 75
- Figura 25 - Influência da TASc e da taxa de aplicação da irrigação sobre a profundidade de instalação do controlador de irrigação para desligar o SI em um sistema radicular

com 30 cm em diferentes tipos de solo. O controlador foi configurado para desligar a irrigação quando a TAS atinge 10 kPa..... 81

Figura 26 - Influência da tensão crítica e da taxa de aplicação da irrigação sobre a profundidade de instalação do controlador de irrigação para desligar o SI em um sistema radicular com 60 cm. O controlador foi configurado para desligar a irrigação quando a tensão atinge 10 kPa..... 82

Figura 27 - Influência da profundidade de instalação do controlador (responsável pelo desligamento da irrigação) e da taxa de aplicação na eficiência de aplicação (E_a) e de armazenamento (E_{ar}) em diferentes solos 84

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Parâmetros hidráulicos da equação de Van Genuchten (teor de água saturado, θ_s ; teor de água residual, θ_r valor inverso da entrada de ar, α ; índice de distribuição de tamanho de poros, n ; e condutividade hidráulica do solo saturado, K_s), densidade aparente (ρ), e percentual de areia, silte e argila para os solos em estudos obtidos do programa ROSSETA. Os dados texturais dos solos arenoso, argiloso e siltoso não foram fornecidos, pois representam dados médios (DM) de uma série de solos..... 54
- Tabela 2 – Lâmina de irrigação a ser aplicada (mm) nos diferentes tipos solos nas simulações de determinação do posicionamento correto do controlador em função da tensão crítica de acionamento (TASc) 56
- Tabela 3 - Comprimento e força mínimos e força para curso total (3 mm de deslocamento) para ativar a válvula de 3 vias nas seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, válvula do controlador 1; ..; C6, válvula do controlador 6)..... 59
- Tabela 4 - Valores médios (μ) e coeficiente de variação (CV) da influencia de cada componente de força que atua no acionamento do controlador em diferentes tensões críticas de água no solo (TASc) 64
- Tabela 5 - Calibração individual da mola de calibração (mm) de cada amostra do protótipo II de controlador para acionar e desligar o SI em diferentes tensões de água no solo (TAS) 66
- Tabela 6 - Valores médios, desvio médio absoluto, desvio padrão e incerteza da tensão da água no solo (TAS) observado na avaliação do protótipo II com calibração geral e com calibração individualizada de cada amostra (*) 66
- Tabela 7 - Dados do experimento em pomar de fruteiras..... 72
- Tabela 8 - Valores médios, desvio médio absoluto, desvio padrão e incerteza da tensão da água no solo (TAS) observado na avaliação do protótipo I com calibração geral e com calibração individualizada de cada amostra (*) 72
- Tabela 9 - Horários em que cada evento de irrigação foi acionado 74
- Tabela 10 - Lâmina infiltrada (I) e seu coeficiente de variação (%) para 7 tipos de solos de acordo com a variação na taxa de aplicação da irrigação (P), profundidade de instalação do controlador e tensão de água no solo para acionar o SI (TASc). (a) Os valores de TAS para desligar o SI foram de 12 ± 1 kPa (para TASc de 15 kPa) e (b) 21 ± 2 kPa (para TASc de 25 kPa). NA: não aplicável, pois, não permite simulação para P maior que 5 mm/h devido ao baixo K_s 78
- Tabela 11 - Valores de lâmina infiltrada (I) e o seu coeficiente de variação (%) para 7 tipos de solos de acordo com a variação na taxa de aplicação da irrigação (P), na tensão de água no solo para acionar o SI (TASc) e número de controladores para ativar o SI. (a) Os valores de tensão para desligar o SI utilizando apenas um controlador foram de 12 ± 1 kPa (para TASc de 15 kPa) e (b) 21 ± 2 kPa (para TASc de 25 kPa). Para

dois controladores foi de $12 \pm 0,5$ kPa (para TAsC de 15 kPa) e (b) 21 ± 0.5 kPa (para TAsC de 25 kPa) . NA: não aplicável, pois, não permite simulação para P maior que 5 mm/h devido ao baixo Ks. As simulações foram realizadas com o controlador instalado a uma profundidade de 15 cm..... 80

1 INTRODUÇÃO

O manejo da irrigação utilizando controladores de irrigação tem melhorado significativamente a eficiência de uso da água e a produtividade de culturas irrigadas (MUNOZ-CAPERNA et al., 2008). Entretanto, a maioria dos controladores de irrigação automatizados é alimentada eletricamente e, portanto, é inapropriada para uso em pequenas propriedades rurais onde não há disponibilidade de energia elétrica ou suporte técnico e há limitada capacitação em manutenção eletrônica. Segundo Vaccaro et al. (2012) 40 % da população dos países em desenvolvimento não tem acesso a energia elétrica. Além do que, o custo de aquisição de muitos dos controladores existentes está além do poder de compra dos pequenos agricultores em regiões de baixo desenvolvimento econômico. Existe, portanto a necessidade de desenvolvimento de tecnologias de controle apropriadas que possam ser aplicadas para sistemas de irrigação (SI) a um baixo custo.

O tensiômetro é um dos instrumentos de medição mais simples e utilizados para determinação da água no solo para manejo da irrigação, devido ao menor custo de aquisição, a facilidade de instalação e operação. Com isso, uma estratégia comumente adotada de manejo da irrigação é a utilização de leituras de tensiômetros para ligar o SI para aplicar uma lâmina fixa de água (utilizando tempo de irrigação ou volume de água como variável controle) toda vez que uma determinada tensão crítica da água no solo (ou ponto de reposição) é atingida (DABACH et al., 2011). O momento para desligar a irrigação pode ser determinado por meio de leituras do mesmo tensiômetro (ou vários) quando a tensão atinge um baixo valor de tensão. Sendo que, os controladores de irrigação de baixo custo para uso em propriedades rurais em países em desenvolvimento utilizam tensiômetros (PINMANEE et al., 2011).

O desempenho do manejo da irrigação baseado no uso de tensiômetros é geralmente avaliado pela acurácia do controlador em acionar o SI nos valores de tensões estabelecidos (MIRANDA et al., 2005; MUNHOZ-CARPENA et al., 2005). Entretanto, diversos fatores (incluindo tempo de resposta do sensor, profundidade de instalação, tensão da água solo para acionar o SI, tipo de solo e taxa de aplicação da irrigação) influenciam o desempenho da irrigação manejada com uso de sensores de solo (COELHO; OR 1996; AYARS; PHENE 2007; DABACH et al., 2011). A avaliação da relação desses fatores em diferentes condições requer vários experimentos de campo e muita mão-de-obra. Uma alternativa é a simulação utilizando modelos numéricos que tem como base o fluxo de água no solo (DABACH et al., 2011). Uma comparação entre modelos numéricos, feita com resultados de balanço hídrico de sete diferentes modelos largamente adotados, mostrou que o modelo SWIMv2.1 (Soil Water

Infiltration Movement, versão 2.1, VERBURG; ROSS; BRISTOW, 1996) é apropriado para simular o movimento de água (SCANLON et al., 2002), sendo utilizado com sucesso em simulações de transporte de água e nutrientes (BOND; SMITH; ROSS, 1997) e em estudos de melhorias da eficiência de uso da água em SI (HURST et al., 2004).

Em face da carência de tecnologias de controle da irrigação em áreas sem disponibilidade de energia elétrica, os objetivos desta pesquisa foram (a) desenvolver e avaliar um controlador de irrigação mecânico que possa ser utilizado por pequenos agricultores em países em desenvolvimento e (b) estabelecer recomendações para uso do controlador em diversas condições de solo, taxa de aplicação da irrigação, tensões de acionamento e profundidade de instalação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Automação no manejo da irrigação

O manejo correto da irrigação visa à obtenção de alta eficiência de uso de água e energia nos cultivos irrigados através da aplicação da quantidade de água demandada pela cultura no momento certo. Sendo que, para um eficiente manejo, é necessário monitorar o consumo hídrico da planta em todo seu ciclo vegetativo. Monitorar precisamente esse consumo demanda tempo e esforços consideráveis por parte do irrigante, tornando difícil a decisão de quanto e quando irrigar, uma vez que é um processo dinâmico de interação entre água-solo-planta-atmosfera. A automação da irrigação com a utilização de controladores tem facilitado essa tomada de decisão e conferido melhorias na eficiência de uso da água (EVANS, 2009) e redução da mão-de-obra. Em sistemas de irrigação com alta frequência de aplicação (localizado e pivô central) pequenas interrupções no manejo da irrigação podem rapidamente criar limitação da disponibilidade de água na planta. Portanto, nesses sistemas, o controle da irrigação deve ser automatizado e capaz de responder às pequenas e rápidas mudanças no conteúdo de água no solo (AYARS; PHENE, 2007).

Um controlador é um dispositivo que age sobre um processo, tendo como base, variáveis de entrada que influem na saída do processo controlado. No caso de SI as variáveis de entrada podem ser dados (em tempo real) de leituras de sensores de uma ou mais variáveis do sistema planta-solo-atmosfera ou dados climatológicos históricos da região. O controlador toma a decisão em função dos critérios estabelecidos pelo irrigante e opera sobre os atuadores (válvulas, motores, bombas, *switches*). O tempo de irrigação pode fixo em controladores mais simplificado ou determinado pelo monitoramento da demanda da cultura.

A forma mais simplificada são os controladores que têm o tempo de irrigação como única variável de controle. O controlador é programado para acionar o SI e aplicar a lâmina de irrigação correspondente ao intervalo de tempo programado, sendo que neste caso, o tempo é a única variável. Eles executam apenas um programa de gerenciamento de portas, abrindo e fechando válvulas em datas (turno de rega) e tempos de irrigação pré-estabelecidos pelo irrigante. O irrigante define o turno de rega e o tempo de irrigação, geralmente, em função da demanda hídrica histórica média da região, determinada por dados climatológicos e levando em conta a capacidade de armazenamento de água do solo e os coeficientes de cultivo da cultura. Essa estratégia é muito empregada, porém pouco precisa, sobretudo, devido às variações climáticas anuais e de desenvolvimento da cultura. Neste caso, o sistema de

automação auxilia na prática da irrigação, mas, não é capaz de responder autonomamente a mudanças no ambiente que exijam resposta imediata por parte do controlador.

Há controladores automáticos simplificados que também têm o tempo como variável de controle, porém o acionamento do SI é comandado por sensores. Assim, o volume aplicado é fixo e o intervalo entre irrigações é variável, sendo que, convencionalmente, a decisão do controlador do momento de irrigar é baseada na estimativa da umidade do solo e/ou medidas atmosféricas (JONES, 2004). Sensores que estimam hidratação ou nível de estresse hídrico nas plantas também são utilizados em controladores de irrigação para definir o momento de irrigar (GOLDHAMER; FERRERES, 2004). Essa estratégia confere maior eficiência de controle da irrigação que a anterior, pois, o controlador responde às mudanças ambientais monitoradas pelos sensores.

Os controladores mais complexos podem controlar diversas operações de irrigação em uma propriedade, incluindo a operação das bombas, distribuição de água nos setores, diagnóstico de falhas ou quebras (COATES; DELWICHE; BROWNM, 2006) e a tomada de decisão do manejo pode ser baseada em informações de diversos sensores (TESTEZLAF et al., 1996), permitindo maior eficiência.

Independentemente da simplicidade do controlador, a eficiência do controle da irrigação é, predominantemente, dependente do método empregado para a determinação da demanda hídrica. Wiedenfeld (2004) comparou a eficiência da irrigação em cana-de-açúcar controlada por controladores que utilizavam diferentes metodologias: tensiômetros, tanque classe A e ETo obtida por Penman-Monteith. Davis e Dukes (2010) compararam controladores que usam metodologias de ETo com controladores de tempo e intervalo fixo na irrigação de gramas. McCarthy (2010) utilizou controladores que utilizam informações de sensores de temperatura das plantas, sensores de umidade do solo e de estações meteorológicas para a irrigação em cultura do algodão. Todos os métodos/técnicas conseguiram definir a irrigação e promoveram economias de água quando comparados aos métodos comumente empregados (lâmina e tempo fixo). Porém, todas as técnicas apresentaram limitações intrínsecas que podem levar a irrigações inadequadas.

A demanda atmosférica é muito utilizada para estimar o uso diário de água pela planta (ALLEN et al., 1998). Essa metodologia é muito utilizada para manejo de irrigação de cultivos em largas escalas de produção. As medidas atmosféricas são tipicamente obtidas de estações meteorológicas próximas ao cultivo (DAVIS; DUKES, 2010) ou de redes de estações meteorológicas da região (MATEOS et al., 2002). Uma das limitações dessa técnica é a disponibilidade de adequados coeficientes de culturas. Embora o coeficiente de cultivo possa

ser ajustado para diversas condições de cultivo (por exemplo, cobertura do dossel e estágio vegetativo), não há valores apropriados para diferentes cultivares/variedades e práticas de cultivo (WHITE; RAINE, 2008). Outra limitação se dá em cultivos em pequenas áreas devido à influência da energia de advecção (ITIER et al., 1996), pois, as medidas atmosféricas são normalmente obtidas de uma estação local e é assumida constante toda área ao redor.

Os sensores de planta podem ser utilizados em conjunto com sensores de solo, ou unicamente, em controladores de irrigação (JONES, 2004). Os sensores estimam o momento de irrigar e/ou o volume a ser aplicado com base em medidas da radiação interceptada pelo dossel das plantas (ROH; LEE, 1996; CASADEUS et al., 2011), do fluxo de seiva (FERNANDEZ et al., 2008), temperatura do dossel (EVETT et al., 2006; MCCARTHY, 2010) e diâmetro do caule (MORIANA et al., 2010). Alguns controladores já são comercializados utilizando alguns desses sensores, entretanto, a estratégia baseada na temperatura do dossel e radiação interceptada pelo dossel das plantas encontram-se em fase de desenvolvimento, sendo necessário realizar calibrações para cada espécie de planta para definir os limites críticos (JONES, 2004). Evans et al. (2001), Sadler et al. (2002) e McCarthy (2010) desenvolveram controladores com termômetros infravermelhos em SI por pivô central para monitorar a eficiência da irrigação, o sistema não está totalmente desenvolvido para controlar totalmente o SI.

Todas as estratégias têm como grande fator limitante a variabilidade espacial da demanda hídrica dentro do talhão. Por isso elas são mais adequadas para áreas ou zonas com baixa heterogeneidade.

2.2 Manejo da irrigação baseado em informações da umidade do solo

Controladores de irrigação programados para acionar o SI com base no monitoramento da umidade de solo por sensores, localizados nas zonas de maior extração de água pelo sistema radicular da cultura, são muito utilizados. Eles têm conferido economia de água enquanto mantêm as altas produtividades das culturas irrigadas (PHENE; HOWEL, 1984). A eficiência desse tipo de controle da irrigação é dependente da correta determinação dos parâmetros que determinam a lâmina de água a ser aplicado no solo (Q_i , mm), definido por,

$$Q_i = \int_{z=0}^{Z_f} (\theta_f - \theta_i) dz \quad (1)$$

Em que, Z_f é a profundidade do solo desejada para ser umedecida até a capacidade de campo (mm); θ_f é o conteúdo de água na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e θ_i é o conteúdo de água programado para iniciar o SI ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

A determinação correta (precisão e exatidão) da curva de retenção de água do solo é essencial para o cálculo correto da lâmina a ser aplicada. Sua determinação, efetuada por meios de técnicas tradicionais de laboratório, tais como a câmara de pressão e da centrífuga, esta sujeita a erros devido à influência do período de centrifugação (SILVA; AZEVEDO, 2002). O número de pontos a ser observado (SILVA et al., 2006) e o processo destrutivo de coleta das amostras são outras importantes fontes de erros. O monitoramento da drenagem, através da instalação de um sensor em uma profundidade na parte inferior da profundidade do sistema radicular da cultura, permite ajustar a lâmina de irrigação à capacidade real de armazenamento do perfil e minimizar a percolação (AYARS; PHENE, 2007).

A função da maioria dos sensores de solo é apenas indicar para o controlador o momento de ligar o SI, enquanto a lâmina depende das propriedades hidráulicas do solo, como curva de retenção, e da cultura a ser irrigada. O SI é acionado quando a umidade do solo atinge o valor crítico (θ_i) e é desligado após a aplicação do Q_i . O tempo (duração) da irrigação é definido pela lâmina. Diversos trabalhos foram desenvolvidos com essa estratégia utilizando sensores de medição do conteúdo de água (NOGUEIRA et al., 2002; BONQUIST JR.; JONES; ROBISON, 2006; MUNOZ-CARPENA et al., 2008) ou da tensão da água no solo (AUGUSTIN; SNYDER, 1984; MUNOZ-CARPENA et al., 2005; HOPPULA; SALLO, 2007). Em sua maioria, os controladores operaram eficientemente na automação do SI nas mais variadas condições de clima e solo.

Na estratégia de manejo com turno de rega fixo e lâmina variável, o controlador é programado para acionar o SI a intervalos fixos (independentemente da umidade inicial, θ_i), e o sensor indica a umidade atual para o controlador calcular a lâmina de irrigação a ser aplicada ou indica o momento de desligar (detectores da frente de molhamento). A lâmina é definida pelo volume necessário para repor a umidade de todo perfil do solo (dz) à capacidade de campo (θ_f). No controlador desenvolvido por Queiroz, Botrel e Frizzone (2008) a irrigação do sistema de pivô central foi programada com turnos de rega fixos, sendo que, a lâmina foi calculada em função da umidade atual do solo (medida por tensiômetros).

Zur et al. (1994) e Stirzaker e Hutchison (2005) desenvolveram controladores que utilizam o sinal da chegada da frente de molhamento (detectado por sensores de solo), a uma determinada profundidade, para desligar o SI. O detector consiste de um recipiente em formato de funil, enterrado no solo. Com a chegada da frente de molhamento no funil, o fluxo passa de não saturado no topo do funil a saturado na base, ocasionando o aumento relativo da água livre que é eletronicamente detectada e o SI é desligado. O controlador foi eficiente no desligamento do SI, entretanto, algumas limitações foram observadas para desligar o SI em

dias com chuva de baixa intensidade. Segundo Stirzaker e Hutchison (2005), o sensor não foi capaz de detectar a passagem da frente de molhamento quando a frente se move lentamente, uma vez que, ele requer uma quantidade mínima de água (da chuva e/ou irrigação) para propagar uma frente de molhamento com força suficiente para ser ativado. Portanto, a definição do turno de rega é o fator determinante para alcançar boa eficiência na irrigação controlada com detectores da frente de molhamento, sendo que os turnos maiores aumentam a lâmina de água aplicada e melhoram a eficiência de detecção da frente de molhamento pelo sensor.

Nos controladores que utilizam as informações dos sensores para definir tanto o momento de irrigar quanto a lâmina a ser aplicada, o SI é programado para ligar quando a umidade do solo atinge um valor crítico (θ_i) e para desligar quando a lâmina necessária para repor a umidade de todo perfil do solo (dz) à capacidade de campo (θ_f) for aplicada. Dukes e Scholberg (2005) utilizaram sensores TDR (23 cm de profundidade) acoplados aos controladores para ligar e desligar o SI de gotejamento superficial em conteúdo de água no solo de 10% e 14%, em solo arenoso, na Flórida. A eficiência do controle foi comparada com o manejo tradicional dos agricultores (aplicação de uma lâmina fixa por dia), e um sensor foi instalado a 60 cm para monitorar a drenagem. Os autores concluíram que, em ambas as estratégias de controle a produtividade foi igual, porém, no tratamento com os sensores TDR, houve uma economia de 23% no volume de água aplicado e menor drenagem. Pinmanee et al. (2011) também observou economia de aplicação de água no tratamento controlado por tensiômetros para ligar e desligar o SI. As possibilidades de erro na aplicação de uma lâmina desejada dependem das limitações relativas à velocidade de resposta do sensor e da redistribuição da água no perfil do solo (AZEVEDO; SILVA, 1999).

Sensores de solo que utilizam as mais variadas técnicas de medição vêm sendo utilizados nos controladores, tais como: tensiômetros (FISCHBACH; THOMPSON; STETSON, 1970; HOPPULA; SALLO, 2007), sensores capacitivos (PHENE; HOFFMAN; AUSTIN, 1973; SHULL; DYLLA, 1980; PATHAN; BARTON; COLMER, 2007; MUNOZ-CARPENA et al., 2008) e as técnicas eletromagnéticas de TDT (time domain transmissometry) (BONQUIST JR.; JONES; ROBISON, 2006; MCCREADY; DUKES; MILLER, 2009), TDR (time domain reflectometry) (DUKES; SHOLBERG, 2005). Em sua maioria, eles conseguem determinar o conteúdo de água com precisão de $0,001 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (CHARLESWORTH, 2005). Como as variações do conteúdo de água no solo ($\theta_f - \theta_i$) em um cultivo irrigado se dão predominante numa amplitude menor de $0,1 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, então, esses sensores apresentam confiabilidade para medir a depleção da água no solo.

O manejo da irrigação por controladores com sensores de solo não requer muitas informações para tomar as decisões de quando e quanto irrigar e estes são, geralmente, facilmente operados. Atualmente, vários controladores desse tipo estão disponíveis no mercado para automatizar os SI (CHARLESWORTH, 2005), sendo que o manejo da irrigação baseado em controladores com sensores de tensão da água no solo têm a vantagem de serem aptos para uso em diversos tipos de solo, sem necessidade de calibração para cada tipo de solo (MATHEW; SENTHILVEL, 2004; AYARS; PHENE, 2007).

2.2.1 Tensiometria na automação

O tensiômetro é o instrumento mais utilizado para medição da tensão da água no solo (OR, 2001), sobretudo, devido ao relativo menor custo de aquisição e a facilidade de instalação (MUNOZ CARPERNA et al., 2005; HOPPULA; SALO, 2007). Com o avanço da eletrônica o tensiômetro tem sido utilizado como sensor nos controladores de irrigação (MARTHALER et al., 1983; LOWERY; DATIRI; ANDRASKI, 1986; VELLIDIS; SMAJSTRLA; ZAZUETA, 1990), conferindo aumento na eficiência de uso da água e de fertilizantes e minimização de impactos ambientais. Entretanto, a necessidade de manutenção frequente para alguns tipos de solos e a sua faixa operacional (cerca de 0-85 kPa) (MUNOZ-CARPENA et al., 2008) são relatadas como limitações do uso desse equipamento no manejo da irrigação em algumas condições.

O sistema de controle desenvolvido por Fischbach, Thompson e Stetson (1970) foi um dos primeiros a utilizar leituras automáticas de tensiômetros para a automação do acionamento da irrigação. Desde então, esta estratégia tem sido utilizada em diferentes culturas e SI.

Hodnett, Bell e Ahkoon (1990) relataram maior produtividade de cana-de-açúcar em tratamentos com a aplicação da irrigação controlada com base em dados tensiométricos quando comparada com tratamentos com a aplicação baseada na estimativa da ET potencial. A aplicação de água baseada na tensiometria em SI por gotejamento foi mais econômica na cultura do tomate quando comparado com a aplicação baseada na estimativa de ET pelo tanque classe A e turno de rega fixo (SMAJSTRLA; LOCASCIO, 1996), sem redução da produtividade. Cornejo, Haman e Yeager (2005) observaram economia de água de 50% em tratamentos que utilizaram tensiômetros para a determinação do momento de irrigar. Irrigações manejadas para a grama bermuda utilizando tensiômetros resultaram em economia

de água de 20 a 95 % comparadas com manejo baseado em temporizadores (AUSGUSTIN; SNYDER, 1984).

Resultados similares de economia de água também foram obtidos, na cultura do milho irrigado por sulcos (MATHEW; SENTHILVEL, 2004), em morango (HOPPULA; SALO, 2007) e em cultivo de pinheiros (plantas ornamentais para árvore de natal) irrigados por gotejamento (NZOKOU; GOOCH; CREGG, 2010). Os maiores valores de economia de água foram obtidos nas épocas do ano com chuvas imprevisíveis. A maior economia de água nos experimentos manejados com controladores, quando comparados aos manejados com dados climáticos históricos e turno de rega fixo, pode ser atribuída à determinação adequada da necessidade hídrica da cultura, principalmente nos estágios de seu estabelecimento, e à determinação adequada do conteúdo de água no solo nos períodos de maior instabilidade climática (chuvas imprevisíveis e evapotranspiração muito variável).

Mais recentemente foram desenvolvidos protótipos de controladores de irrigação visando o manejo da irrigação considerando a variabilidade espacial dos talhões. Nesses protótipos, a leitura dos tensiômetros é realizada por sensores que enviam os dados para os computadores dos controladores via tecnologia sem fio (radio frequência) (TORRE NETO; SCHULLER; HAMAN, 2000; VELLIDIS et al., 2008; QUEIROZ; BOTREL; FRIZZONE, 2008). Os sensores tomam medidas pontuais em pontos localizados do talhão para aplicação de irrigação.

2.2.1.1 Desempenho do tensiômetro

O desempenho do tensiômetro está relacionado à sua capacidade de informar precisamente a tensão da água no solo. Esse desempenho depende de fatores relacionados ao equipamento, ao conteúdo de água no solo e ao tipo de solo.

O contato da cápsula porosa do tensiômetro com o solo determina o equilíbrio entre a água do tensiômetro e a água do solo. Uma vez, o tensiômetro é instalado no solo, a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo através dos poros da cápsula porosa e o equilíbrio tende a se estabelecer (REICHARDT; TIM, 2004). Esse equilíbrio se dá, devido à transferência de certo volume de água entre o tensiômetro e o solo até que as pressões se igualem. Na maioria das condições de solo ocorre um contato suficiente do solo com a cápsula do tensiômetro. Em solos com alto percentual de areia e substratos altamente porosos esse equilíbrio é difícil de ser conseguido, devido ao contato insuficiente da cápsula cerâmica

do equipamento com o solo. Com isso, maior vazão de água do tensiômetro é demandada para alcançar o equilíbrio e requer manutenções muito frequentes (HANSEN; PASIAN, 1999; MUNOZ-CARPENA et al., 2005).

O tempo necessário para ocorrer o equilíbrio entre a pressão no tensiômetro e no solo é denominado tempo de resposta (SOCCOL et al., 2005), o qual está sujeito à condutância da cápsula e à condutividade hidráulica do solo no qual o instrumento está instalado (KLUTE; GARDNER, 1962). Para Cassel e Klute (1986) o tempo de resposta de um tensiômetro é a medida de sua sensibilidade às mudanças de sucção da água no solo junto à superfície externa da cápsula. Baixas condutividades hidráulicas do solo ao redor da cápsula pode ser um fator limitante à resposta do instrumento. O tempo de resposta dos tensiômetros é inversamente proporcional a condutividade hidráulica do solo e a condutância da cápsula de cerâmica. A condutância da cápsula é definida como a quantidade de água que passa através da cápsula de cerâmica, por unidade de tempo e por unidade de diferença de pressão.

Soccol et al. (2005), observaram tempos de resposta em tensiômetros variando de 2 a 10 minutos. Sendo que, o tempo de resposta tende a ser maior de acordo com o tempo de uso e em valores altos de tensão.

A faixa de tensão da água no solo na qual se pode utilizar o tensiômetro é de zero até aproximadamente 85 kPa (RICHARDS; GARDNER, 1936). Essa faixa parece pequena, entretanto para a maioria dos solos, a maior quantidade de água é retida entre as tensões de 0 e 100 kPa (REICHARDT; TIMM, 2004). A faixa de tensão de 0 a 100 kPa cobre o principal intervalo de umidade do solo e corresponde de 25 a 75% da água disponível no solo, dependendo da sua textura e estrutura (FARIA; COSTA, 1987). Para o manejo da irrigação de alta frequência, os tensiômetros são eficazes devido à boa precisão nas medidas de tensão na faixa de 10 a 50 kPa (THOMPSON et al., 2006).

A correta utilização do tensiômetro no controle de irrigação, dentro das suas limitações operacionais, permite redução no uso da água e dispêndio de energia elétrica e menor requerimento de mão-de-obra, conferindo com isso uma redução no custo operacional total da irrigação. Porém, todos os controladores mencionados acima, bem como os controladores disponíveis no mercado, em sua maioria, são eletrônicos e restritos para áreas com disponibilidade de energia elétrica. Além disso, esses sistemas tecnológicos têm maior potencial de uso para área com boa disponibilidade de suporte técnico e de manutenção.

2.3 Controladores de irrigação acionados mecanicamente

Os controladores de irrigação disponíveis no mercado são predominantemente eletrônicos. Segundo o relatório do “*Humanitarian Technology Challenge*” (VACARRO et al., 2012) aproximadamente 40% da população do meio rural em países em desenvolvimento não tem acesso a energia elétrica e, portanto não tem como usufruir das vantagens do uso da automação dos sistemas de irrigação. Adicionalmente, nos “kits de irrigação” (SI de baixa pressão para pequenas áreas de hortas agrícolas) a pressurização ocorre predominante por gravidade. Algumas propostas de controladores de irrigação com acionamento sem requerimento de energia elétrica têm sido desenvolvidas (TAL, 1975; PETERSON; GLENN; WOLFORD, 1993; KLEIN, 2001; PINMANEE et al., 2011).

Tal (1975), Peterson, Glenn e Worford (1993) e Klein (2001) desenvolveram controladores de irrigação que utilizam a tensão gerada pela água no solo no interior de tensiômetros para ligar e desligar mecanicamente sistemas de irrigação. Sensores de pressão (diafragmas ou pistões) montados sobre tensiômetros controlam a abertura e fechamento e/ou fluxo de água em válvulas de irrigação, através de pinos atuadores. Os sensores de pressão movem-se de acordo com a variação de pressão dentro do tensiômetro. No controlador desenvolvido por Tal (1975) e na proposta de controlador de Klein (2001) são utilizados sensores de pressão do tipo diafragma flexível. O diafragma atua sobre a válvula de irrigação através de pinos atuadores. O pino atuador controla a passagem de água na válvula. No controlador desenvolvido por Peterson, Glenn e Worford (1993), em vez do diafragma, dois pistões foram utilizados como sensores de pressão. O primeiro pistão foi montado sobre o tensiômetro e ele é movido de acordo com a variação de tensão dentro do tensiômetro. Enquanto que o segundo sua função é controlar a abertura da válvula que controla o fluxo de água do SI. O controlador apresentou resultados satisfatórios no controle da irrigação de vasos com solo.

Pinmanee et al. (2011) desenvolveram um sistema de controle com acionamento mecânico da irrigação por gotejamento para a cultura da lichia. O controlador desenvolvido é composto das seguintes partes: tensiômetro, válvula de operação, alavanca, contrapeso, cilindro controle. Nos extremos da alavanca foi montado de um lado o contrapeso e do outro o cilindro controle. O tensiômetro regula a entrada de água no cilindro controle através da válvula de operação. O contrapeso mantém a válvula de irrigação fechada. Quando o solo seca e atinge a tensão de 45 kPa, a água da linha lateral enche o cilindro de controle, a alavanca abre a válvula da irrigação. Quando a tensão no solo cai para 30 kPa, a água do

cilindro é drenada, fechando a irrigação. O controlador manteve o solo na faixa de tensão desejada (entre 45 e 30 kPa) durante o período de avaliação.

Embora algumas propostas de controladores com acionamento mecânico tenham sido desenvolvidas em pesquisas, não há disponibilidade no mercado de controladores com dispositivo de acionamento mecânico. Talvez o não interesse das indústrias em desenvolver esse tipo de controlador seja sua limitação para áreas com disponibilidade de pressão positiva na linha lateral (pressurização por gravidade). Porém é necessário fornecer alternativas tecnológicas de automação para SI em áreas sem disponibilidade de energia elétrica.

No Brasil, a EMBRAPA oferece tecnologias de controle da irrigação chamada “Irrigas” que são dispositivos pneumáticos que usam ar comprimido para acionar a aplicação de água assim que a tensão da água se tornar maior que um determinado valor crítico. A ação de ativadores de irrigação desenvolvidos para controle automático e pontual de irrigação aciona válvulas pressostáticas magnéticas que abrem a passagem de água com vazão e com pressão adequadas (GALBO; SILVA; 2005).

2.4 Eficiência de irrigação

A avaliação do desempenho dos sistemas de irrigação permite avaliar o quanto da água das fontes de captação foi efetivamente disponibilizada à planta ou armazenada na zona radicular das plantas (IRMAK et al., 2011). Existem vários índices e metodologias para quantificar a eficiência de aplicação da irrigação (WANG; JAN FEYEN, 1996), sendo que os mais utilizados são a eficiência de aplicação e a eficiência de armazenamento da água no solo, pois a sua interpretação permite identificar as perdas por percolação e evaporação e indica a disponibilidade de água na zona radicular da cultura (FRIZZONE, 1992; ZOCOLER; CESAR; VANZELA, 2004).

Quando se utiliza controladores de irrigação no manejo da irrigação, há maior potencial para aumentar a eficiência no manejo e o desempenho da irrigação, porém, diversos fatores contribuem para obter alta eficiência de aplicação. Para controladores de irrigação baseados em informações de sensores de solo, os fatores chave são a definição do correto posicionamento do sensor (profundidade e distância da planta e/ou emissor), a tensão crítica de acionamento para as variadas práticas agrícolas (taxa de aplicação da irrigação, tipo de sistema de irrigação, entre outras) e tipos de solo (COELHO; OR, 1996; BLONQUIST; JONES; ROBISON, 2006; AYARS; PHENE, 2007; COELHO; SILVA; MIRANDA, 2010; DABACH et al., 2011).

A tensão crítica de água no solo para acionar (TASc) o SI determina a lâmina de água ser aplicada e, conseqüentemente, o tempo e a frequência (turno de rega) da irrigação (DABACH et al., 2011). Para tanto, a tensão deve ser ajustada à frequência de irrigação e à demanda hídrica, sendo que, quanto mais água a ser aplicada, maior será a tensão para estender o tempo (duração) de irrigação e o intervalo entre irrigações.

Dabach et al. (2011) determinaram tensões críticas de 20 kPa e 5,3 kPa para turnos de rega de 4 e 1 dias, respectivamente, para o controle do SI na cultura do feijão irrigado por gotejamento com o tensiômetro instalado à 10 cm de profundidade e 10 cm de distância do emissor. Para um determinado volume de água e frequência de irrigação, a tensão crítica deve ser ajustada com a profundidade de instalação do sensor. Como a extração de água tende a ser maior nas menores profundidades o tempo de resposta à variação na tensão é curto. Com isso, a tensão crítica deve ser maior quando o sensor de água no solo for instalado nessa zona. Ao passo que, quando instalado em profundidades maiores, onde a menor extração de água resulta em menor variação da tensão e longo tempo de resposta, a tensão crítica deve ser menor (BLONQUIST; JONES; ROBISON, 2006). A definição da tensão crítica é dependente da tolerância da cultura ao estresse hídrico e dos objetivos do manejo (HOPPULA; SALO, 2007; AYARS; PHENE, 2007). Quando a irrigação é manejada para manter a umidade próxima à capacidade de campo (baixa variação de tensão), o risco de perdas por percolação é maior (ANDREU; HOPMANS; SCHWANK, 1997), portanto o manejo deve ser mais criterioso.

As recomendações para a localização dos sensores no solo têm como base o conhecimento da distribuição radicular da cultura (BLONQUIST; JONES; ROBISON, 2006; COELHO; SILVA; MIRANDA, 2010), sendo que o sensor é instalado nas zonas de maior extração de água pelo sistema radicular. Muitas das recomendações são para instalar o sensor a 50% da profundidade efetiva do sistema radicular (Z). Entretanto, o desenvolvimento do sistema radicular é condicionado pela percentagem de área molhada, que depende do SI utilizado (COELHO; SANTOS; AZEVEDO, 2007).

Em SI que umedecem área parcial, o desenvolvimento do sistema radicular é condicionado ao volume de solo molhado. Em SI por gotejamento, Andreu, Hopmans e Schwank (1997) e Coelho, Santos e Azevedo (2007) observaram que as zonas de extração de água foram influenciadas pela disposição e número de emissores em relação à planta, onde o aumento do número de emissores na linha de irrigação resultou em maior área efetiva de extração de água. Para a cultura da bananeira irrigada por gotejamento com emissores em dispostos em faixa contínua, Coelho, Silva e Miranda (2010) recomendam a instalação de

tensiômetros entre as profundidades de 0,20 – 0,40 m; 0,25 - 0,40 m; e 0 - 0,35 m para os sistemas que utilizam dois, quatro e cinco emissores por planta, respectivamente. Para a cultura da batata irrigada por aspersão, Stieber e Shock (1995) recomendam as instalações dos sensores em profundidades entre 0,1 e 0,2 m.

As recomendações de posicionamento dos sensores acima citadas são relacionadas aos sensores de solo, em que a função é definir o momento de irrigar e/ou monitorar a umidade para cálculo do balanço hídrico do solo. Para controladores em que os sensores de solo também têm a função de indicar o desligamento do SI, é imprescindível determinar a profundidade máxima a serem instalados, pois eles determinam o volume a ser aplicado.

A maior profundidade de instalação será aquela em que a chegada da frente de molhamento ocorre depois de decorrido o tempo para aplicar o volume de água necessário para retornar a umidade à capacidade de campo (ZUR et al., 1994). Sendo assim, a chegada da frente de molhamento a essa profundidade é utilizada como sinal para desligar o SI (STIRZAKER; HUTCHISON, 2005). Entretanto, a determinação dessa profundidade é complicada, uma vez que a velocidade da frente de molhamento depende de vários fatores, tais como: conteúdo inicial de água no solo, condutividade hidráulica do solo (que varia para cada tipo de solo) e aplicação da irrigação (RUBIN; STEINHARDT, 1963). Essa determinação pode ser realizada por uma série de experimentos de campo, que requer tempo e esforços consideráveis para sua execução. Uma alternativa para os laboriosos experimentos de campo é a utilização de modelos numéricos ou analíticos que tem como base o fluxo de água no solo (DABACH et al., 2011).

2.5 Modelos de simulação da água no solo

A utilização de modelos de simulação que solucionam numericamente ou analiticamente a equação de Richards do fluxo de água no solo com adequados dados de entrada e condições de contorno permite estimar ou descrever a dinâmica de água do solo em qualquer tempo ao longo do ciclo de irrigação. Com isso, esses modelos têm se apresentado com uma ferramenta útil na otimização do dimensionamento de SI (PATEL; RAJPUT, 2008) e manejo da irrigação (COTES et al., 2003; BLONQUIST JR.; JONES; ROBINSON, 2006; KANDELOUS et al., 2012).

A dimensão do volume molhado e a distribuição de umidade dentro deste volume são dois fatores essenciais no dimensionamento de SI por gotejamento subterrâneo para irrigação em faixa contínua (determinação da profundidade de instalação, espaçamento entre os gotejadores

e vazão dos gotejadores). O dimensionamento correto implica em umedecer um volume de solo que maximize a eficiência de aplicação de água e fertilizantes e evitar percolação (KANDELOUS et al., 2012). Nesse sentido, vários pesquisadores tem se interessado em utilizar modelos numéricos para avaliar o fluxo de água em solos com sistemas de gotejamento subterrâneo. Skaggs et al. (2004), Patel e Rajput (2008), Kandelous e Simunek (2010) comparando resultados de simulações com dados de campo, concluíram a eficiência de modelos numéricos em 2D (HYDRUS 2D) como ferramenta de apoio no dimensionamento de SI.

A utilização dos modelos no estudo da distribuição de água e das zonas de extração de água pelo sistema radicular nos perfis de solo tem permitido aperfeiçoar o manejo da irrigação. Cote et al. (2003), Kandelous e Simunek (2010) estimaram a distribuição temporal e espacial do conteúdo de água no solo do conteúdo de água em solo irrigados por gotejamento com emissores instalados a diferentes profundidades. Dabach et al. (2011) otimizaram a eficiência de aplicação da irrigação com uso de modelos numéricos na definição das tensões críticas de acionamento e da lâmina a ser aplicada. Pinho (2010) utilizou modelo numérico para simular o movimento de água e solutos (Nitrato e potássio no solo) para os solos Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo. Coelho e Or (1996) determinaram o posicionamento de instalação de tensiômetros na cultura do milho irrigado por gotejamento com a utilização de modelos semi-analíticos. Blonquist Jr., Jones e Robinson (2006) estudaram a relação entre as profundidades de instalação de sensores de umidade (TDT) e os conteúdos de água críticos para acionamento do SI. Os resultados de simulação permitiram indicar a profundidade de instalação que maximiza o uso da água evitando percolação.

Uma grande variedade de modelos numéricos e analíticos foi desenvolvida recentemente (PINHO, 2010), sendo que, o aplicativo SWIMv2.1 (Soil Water Infiltration Movement, versão 2.1, VERBUG; ROSS; BRISTOW, 1996) é um desses modelos apropriados para simular o movimento de água (SCANLON et al., 2002) e solutos no perfil do solo. Ele foi utilizado com sucesso em simulações de transporte de água e nutrientes (BOND; SMITH; ROSS, 1997) e em estudos de melhorias da eficiência de uso da água em SI (HURST et al., 2004). Sendo assim, o aplicativo SWIMv2.1 foi utilizado neste trabalho para identificar o desempenho do controlador de irrigação proposto em diversas condições de taxa de aplicação, instalação do sensor e tipos de solo para estabelecer recomendações para uso e operação do controlador.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Princípio de funcionamento do controlador

O controlador de irrigação (Figura 1) usa a variação de energia dentro do tensiômetro (instalado na zona radicular ativa da cultura) para acionar e desligar mecanicamente o sistema de irrigação (SI), quando a tensão de água no solo atinge determinados limites. A ação mecânica se dá por meio de uma válvula de três vias (válvula de atuação hidráulica), que, por sua vez, opera sobre uma válvula de suprimento da irrigação (válvula hidráulica, VH). Com o secamento do solo (Figura 1.a), parte da água do tensiômetro flui para o solo ocasionando uma tensão (ou vácuo parcial) na água dentro do tensiômetro e no diafragma. Contrariamente, com o umedecimento do solo (Figura 1.b), a água do solo flui para o dentro do tensiômetro e a tensão diminui.

Figura 1 - Controlador de irrigação acionado mecanicamente pela tensão de água no solo sob condições de solo seco (a) e solo úmido (b)

Os cinco componentes principais do controlador de irrigação são: tensiômetro, diafragma, haste de ativação, mola de calibração e válvula de 3 vias (Figura 2). O diafragma funciona como conversor de pressão e sua função é transformar a variação de energia potencial dentro do tensiômetro em energia mecânica para movimentar a haste de ativação, que aciona a válvula de 3 vias (de atuação hidráulica). A válvula de 3 vias, por sua vez,

controla o acionamento da válvula de suprimento da irrigação. A mola de calibração ajusta o controlador para acionar a irrigação a diferentes tensões de água no solo (quanto mais comprimida à mola, maior será a tensão de acionamento da irrigação).

O acionamento da irrigação ocorre quando a tensão (Força ou sucção de acionamento, $F_{\text{acionamento}}$) dentro do tensiômetro supera as forças de sentido oposto (Eq. 2): força da mola de calibração (F_{mola}), a resistência ao movimento ($F_{\text{resistência}}$) e a força requerida para ativar a válvula de três vias ($F_{\text{válvula}}$).

$$F_{\text{acionamento}} > F_{\text{mola}} + F_{\text{resistência}} + F_{\text{válvula}} \quad (2)$$

Em que, $F_{\text{acionamento}}$ é a força (N) requerida para iniciar a irrigação; F_{mola} é a força (N) requerida para ultrapassar a força da mola em um determinado ajuste; $F_{\text{resistência}}$ é a força (N) requerida para vencer todas as resistências ao movimento (atrito); e $F_{\text{válvula}}$ é a força (N) requerida para ativar a válvula de três vias.

A força de acionamento é diretamente proporcional à tensão dentro do tensiômetro e da área do diafragma (Eq. 3):

$$F_{\text{acionamento}} = P_{\text{acionamento}} \cdot Ad \quad (3)$$

Em que, $P_{\text{acionamento}}$ é a pressão (tensão da água no solo) selecionada para acionar a irrigação (N m^{-2}) e Ad é a área do diafragma (m^2).

A tensão da água no solo requerida para acionar o sistema de irrigação, ou tensão da água no solo crítica, é regulada por uma mola de compressão. A mola é fabricada em aço (Fig. 2.b.20) e comprimida por uma porca (Fig. 2.b.18). A lei de Hooke (Eq. 4) estabelece que a força requerida para comprimir a mola é diretamente (linearmente) proporcional ao seu deslocamento do estado inicial (equilíbrio). O equilíbrio da mola ocorre em seu estado natural, ou seja, sem estar comprimida ou tracionada.

$$F = -K x \quad (4)$$

Em que, F é o vetor força resultante; x é o vetor deslocamento – a distância e direção em que a mola é deformada; K é a taxa – constante elástica da mola, o valor da constante depende do material e da construção da mola. Por isso, mudanças no vetor deslocamento da mola (x) podem mudar a tensão da água no solo requerida para acionar o SI.

3.2 Desenvolvimento e construção do controlador de irrigação

3.2.1 Protótipo I

O protótipo I de controlador de irrigação foi projetado e construído utilizando conexões de PVC e outros componentes de PVC construídos em tornos mecânicos na ESALQ. O tensiômetro tem uma cápsula cerâmica de 60 mm de comprimento (Fig. 2.b.1) e tubo de PVC de 250 mm (Fig. 2.b.2), ambos com diâmetro de 20 mm. Um tubo de acrílico (60 mm de comprimento) foi conectado ao tensiômetro para permitir visualizar o nível de água (Fig. 2.b.4). Uma borracha flexível de diafragma (1 mm de espessura) foi instalada entre dois flanges de PVC de 90 mm na parte superior do tensiômetro (Fig. 2.b.10). O lado inferior do diafragma foi exposto à água e/ou vácuo parcial dentro do tensiômetro. Na superfície superior do diafragma foi colado um conector de plástico que liga a haste de ativação (Fig. 2.b.11) com diâmetro de 8 mm fabricada em aço. A haste de acionamento foi diretamente conectada à válvula de três vias (Fig. 2.b.14 a 17) utilizando um parafuso. O suporte da válvula (Fig. 2.b.13) e o corpo da válvula (Fig. 2.b.14) foram construídos com tarugos de plásticos torneados em torno mecânico.

Uma seringa de vidro (10 mL) foi adaptada para ser usada como uma válvula hidráulica de três vias de acionamento mecânico. No cilindro da seringa foram feitos dois furos de 2,5 mm para conectar 2 adaptadores que servem de portas da válvula. A porta de entrada recebe um microtubo (4 mm) com água da linha principal e a porta de saída recebe um microtubo que é conectado com a válvula de suprimento da irrigação. O bico da seringa serve como porta de exaustão. No êmbolo da seringa foram construídos dois canais, um canal radial que conecta a porta de entrada à porta de saída e o outro canal (no sentido longitudinal do êmbolo) conecta a porta de saída à porta de exaustão. Quando a válvula de 3 vias não está ativada, a água passa da porta de entrada para a porta de saída até a VH (irrigação desligada). Ao contrário, quando a válvula de 3 vias é ativada, ela bloqueia o fluxo de água e a VH aciona a irrigação.

O teste preliminar de compressão com molas de diferentes constantes elásticas resultou na seleção da mola com a seguinte especificação: diâmetro externo = 10 mm (Figura 3); diâmetro interno = 7,5 mm; constante elástica = 0,29, comprimento livre da mola = 40 mm; passo da mola = 1 mm e número de espirais = 11.

Figura 2 - a) controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão da água no solo e b) controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão de água no solo explodido: 1- cápsula porosa, 2 – tubo de PVC, 3- conector de redução, 4 – tubo de acrílico, 5 – Tê, 6 – curva, 7 – tubo de acrílico, 8 – borracha de diafragma, 9 – flange, 10- diafragma, 11- haste de ativação, 12- mangueira, 13- suporte externo da válvula de atuação hidráulica (válvula de três vias), 14 a 17 – válvula de atuação hidráulica (14- corpo da válvula, 15- êmbolo da seringa, 16- cilindro da seringa, e 17- conector microtubo), 18- porca reguladora da mola, 19- arruela da porca e 20 - mola de calibração (ajuste)

Para determinação das relações entre intensidade da força e da excursão (deformação) retilínea das molas e coeficientes de rigidez (constante elástica da mola), foram realizados ensaios na máquina de ensaio de materiais, modelo de dupla coluna Série 4466, marca Instron (Fig. 3.b), no laboratório de Instrumentação Eletrônica da ESALQ/USP. As molas foram inicialmente fixadas no centro das duas células de carga da máquina. A velocidade de avanço da máquina utilizada foi de 1,5 mm/minuto. Foram observados os valores de carga em 16 comprimentos de deformação (de -1 a -16 mm de deformação), com intervalo de 1 mm, ou

seja, do comprimento de 40 mm ao de 24 mm (que representa 40% de compressão da mola ou a máxima solicitação admissível no campo da elasticidade para os tipos de molas utilizados).

Figura 3 - a) Características da mola helicoidal cilíndrica de compressão; b) Máquina de ensaio de materiais modelo de dupla coluna Série 4466, marca Instron, utilizada para determinação da relação entre a carga da mola e a sua extensão

3.2.2 Protótipo II

O protótipo I apresentou variações que foram decorrentes, predominantemente, do processo de fabricação artesanal utilizado na construção da válvula de 3 vias utilizando seringas de vidro. Com isso, o protótipo I foi reprojetoado, substituindo a válvula de 3 vias por uma válvula de 3 vias comercial. O suporte externo da mesma também foi reprojetoado. O protótipo I remodelado foi denominado protótipo II (Fig. 4).

Uma válvula pneumática (fim de curso 3/2 vias NA AI9310, marca Univer) ativada por um pino de atuação mecânica (Fig. 5.4) foi utilizada como válvula de 3 vias no protótipo II (Fig. 4.b.6 e Fig. 5). A porta de entrada (Fig.5.1) recebe o microtubo (4 mm de diâmetro) da linha principal e a porta de saída (Fig.5.2) recebe o microtubo da válvula hidráulica de irrigação. Quando o pino não está ativado, a água flui da porta de entrada para a porta de saída até a VH de irrigação (sem irrigação). Contrariamente, quando o pino é ativado, o fluxo de água é bloqueado e a VH inicia a irrigação.

3.3 Funcionamento do controlador e calibração dos sensores de pressão

Uma bancada de teste com mesa de tensão foi adaptada para verificar o funcionamento dos controladores. A bancada (Fig. 6) foi composta de: motobomba, filtro de tela, registro de gaveta e manômetro digital para monitoramento da pressão. Foram montadas três mini linhas laterais, composta cada uma de: registro de 16 mm, 1 válvula hidráulica de 25 mm (1”),

conectores com microtubos para tomada de água para o controlador de irrigação e um emissor.

Figura 4 - a) Protótipo 2 do controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão da água no solo e b) Protótipo 2 do controlador de irrigação mecanicamente acionado pela tensão de água no solo explodido: 1 – diafragma entre dois flanges de PVC, 2 – pino de ativação, 3 – mola de calibração, 4 – porca para regular a mola de calibração, 5 e 7 – suporte interno da válvula de 3 vias, 6 – válvula de 3 vias – suporte externo da válvula de 3 vias. c) foto do protótipo II. d) parte superior do controlador e e) detalhe da válvula de 3 vias e da mola de calibração

Figura 5 - Válvula de 3 vias de atuação mecânica, 1 – porta de entrada, 2 – porta de saída, 3 – porta de exaustão e 4 – pino de ativação com atuação mecânica

A câmara de vácuo foi construída utilizando-se tubo de PVC de 20 mm de diâmetro por 100 cm de comprimento, sendo que em uma das extremidades e em outros três pontos

(espaçados 40 cm entre si) foram conectados T's com tubos de acrílico fechados com borrachas de silicone. Na borracha de silicone da extremidade foi inserido um tensímetro de punção digital e nas outras três borrachas foram inseridas mangueiras transparentes de 4 mm que se conectavam com os controladores de irrigação. Uma seringa de 50 mL foi utilizada para simular vácuo no tensiômetro do controlador de irrigação (tensões de 10 a 50 kPa).

Figura 6 - Bancada de testes dos controladores com mesa de tensão, detalhe da mola de calibração do protótipo I

Os sensores de pressão foram calibrados individualmente em uma bancada de tensão provida de coluna de mercúrio. Cada sensor foi ligado individualmente a uma das entradas de um microcontrolador PIC, programado para efetuar a aquisição de sinais. Foram aplicados 10 valores de vácuo (entre 0 kPa e 80 kPa) em ordem decrescente e crescente (Fig. 7). Os vácuos foram aplicados com uma seringa de 50 mL e os valores medidos em um vacuômetro de mercúrio graduado em milímetros (0,133 kPa).

A equação de regressão com dados da calibração dos 13 sensores do modelo MPX5100DP utilizados no experimento na casa de vegetação é apresentada na Figura 8.a. Observa-se um bom ajuste da equação de regressão aos dados a equação, indicando que apenas uma equação pode ser usada para todos os sensores de pressão. A equação de regressão com dados da calibração dos 6 transdutores MPX5100DP utilizados no experimento no pomar também apresentou bom ajuste (Fig. 8.b). Utilizou-se a equação fornecida pelo fabricante para os sensores de pressão MPX5700DP e MPX5500DP, utilizados para verificar a pressurização da linha lateral.

Figura 7 - Detalhe do ensaio de calibração do sensor de pressão MPX5100DP feito em laboratório (Extraído de Queiroz 2007)

Figura 8 - Relação entre o vácuo aplicado e a leitura dos sensores de pressão (MPX5100DP) (a) dos sensores utilizados no experimento em casa de vegetação e (b) dos sensores utilizados no experimento do pomar

3.4 Caracterização do experimento em laboratório

O protótipo II foi testado em uma bancada hidráulica no laboratório de hidráulica da University of Southern Queensland (USQ), Campus Toowoomba, Queensland, Austrália. A bancada hidráulica foi adaptada para ensaiar o controlador (Fig. 9). A bancada hidráulica consistiu de: mangueira, registro de gaveta, válvula hidráulica de irrigação, sistema de aquisição de dados, mesa de tensão e transdutores de pressão. A mangueira (1 mm de diâmetro) foi conectada a uma tomada de água (pressão de 15 kPa) em uma extremidade e na outra extremidade a uma VH. Microtubos (4 mm de diâmetro) conectaram a porta de entrada (suprimento de água) do controlador à mangueira e a porta de saída à válvula hidráulica de

irrigação. Seringas de plástico (10 e 50 mL) foram utilizadas para simular a variação de tensão. Uma mesa de tensão foi adaptada para facilitar a simulação de tensões (extração e inserção de ar, conexão dos transdutores de pressão).

Figura 9 - Avaliação do Protótipo II em uma bancada hidráulica

O ensaio incluiu os seguintes passos: 1) Ajuste da mola de calibração do controlador para a tensão crítica; 2) extração de ar (com a seringa inserida na borracha de silicone da mesa de tensão) do tensiômetro até acionar o SI; 3) leitura do valor da tensão; 4) inserção de ar no tensiômetro até desligar o SI; e 5) leitura do valor da tensão.

Cada uma das seis amostras do protótipo II foi avaliada em oito tensões críticas com quatro repetições. Cada tensão correspondeu a um ajuste da mola de calibração. O controlador foi testado com o ajuste da mola de calibração de 1 mm a 15 mm de deformação, com intervalo de ajuste de 2mm (1 mm de deformação na mola de calibração correspondeu a 1 kPa de tensão). Os oito ajustes da mola de calibração corresponderam a tensões críticas de aproximadamente 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 22,5 e 25 kPa.

3.5 Caracterização do experimento em campo

O protótipo I foi avaliado em condições de campo em duas etapas. Na primeira etapa foi realizado um experimento para controle da irrigação de vasos cultivados com grama e a segunda etapa outro experimento para controle da irrigação em um pomar.

3.5.1 Em vasos

Em uma casa de vegetação, dez amostras do protótipo I foram instaladas para controlar a irrigação de 10 vasos cultivados com grama batatais (Fig. 10 e 11). Cada amostra foi responsável pelo controle da irrigação (um gotejador auto-compensante com vazão de 2 L/h) em cada vaso. Os vasos (10L) foram preenchidos com Latossolo Vermelho Amarelo, textura arenosa, denominado “Série Sertãozinho”. No fundo do vaso foram colocados brita e bidim para promover a drenagem do excesso de água.

Cada vaso representa uma linha lateral de irrigação. Cada linha lateral foi composta de 1 registro, 1 VH e 1 gotejador, de forma que a irrigação de cada uma é comandada pelo controlador de irrigação instalado no vaso. O sistema de irrigação foi composto de: caixa d’água de 500 L, 1 bóia para controle do nível de água na caixa, 1 bomba P500 de 370 W ($\frac{1}{2}$ CV), 1 filtro de disco de 25 mm (1”), 1 registro de gaveta, 1 regulador de pressão de 30 kPa, 1 manômetro, 1 retorno para a caixa d’água e 1 linha principal com derivações para 10 linhas laterais. A bomba centrífuga ficou ligada durante todo o dia, sendo que um sensor de luz a desligava no período noturno.

Figura 10 - Croqui do experimento na casa de vegetação

Sensores de pressão (MPX5100DP e MPX5500DP) foram instalados para avaliar o desempenho do controlador. Sensores do modelo MPX5100DP foram instalados no controlador para monitorar a tensão da água no solo. Sensores do modelo MPX5500DP foram instalados na linha lateral (após a VH) para informar o início e o final da irrigação. No total foram instalados 13 sensores MPX5100DP (1 para cada controlador de irrigação e mais 3 que monitoravam a tensão de 3 tensiômetros instalados em vasos, aleatoriamente) e 11 sensores de MPX5500DP (1 para cada linha lateral e mais 1 instalado na linha principal). Os dados observados nos 24 sensores foram armazenados em um *datalogger* CR10 da Campbell. A gravação dos registros na memória do *datalogger* foi realizada a cada 5 minutos, contendo dados de data, hora e leitura dos sensores de pressão diferencial.

Figura 11 - Experimento na casa de vegetação para avaliação do controlador de irrigação

3.5.2 Em pomar de frutíferas

Seis amostras do protótipo I foram testadas em um pomar cultivado com seis espécies diferentes de árvores de frutíferas (Fig. 12 e Fig. 13). O pomar é formado de 6 fileiras de plantas (com 7 plantas cada linha), sendo que cada linha é cultivada com as seguintes frutíferas: romã, cereja asiática, pitanga, maçã, noz e lichia. O pomar tem uma idade média de

6 anos. Cada amostra do protótipo I controlou a irrigação de uma linha de plantas. O teste do controlador com culturas de espécies diferentes teve como objetivo avaliar seu desempenho em uma situação com diferentes demandas hídricas.

O pomar foi irrigado por um sistema de irrigação por gotejamento pressurizado por gravidade. A pressão no início da linha lateral foi de 63,7 kPa. O SI foi composto de um cabeçal de controle, uma linha principal e seis linhas laterais (Fig. 12). O cabeçal de controle tem um filtro de disco de 25 mm (1"), um manômetro e uma válvula de derivação. Em cada linha lateral foi instalada uma válvula de esfera, uma VH, um controlador de irrigação e sete emissores (gotejadores) microtubo. Para cada planta foi instalado um emissor microtubo com vazão de 4 L h^{-1} (0,7 mm de diâmetro interno e 25 cm de comprimento). O controlador de irrigação foi instalado a uma profundidade de 15 cm e localizado a 15 cm de distância a partir do emissor. Utilizou-se um padrão único para a calibração das seis amostras do protótipo I. A mola de calibração foi ajustada com uma compressão de 10 mm, que corresponde a uma tensão de acionamento de 20 kPa (na profundidade de 15 cm).

Figura 12 - Croqui do experimento em um pomar com seis linhas de fruteiras de diferentes espécies

Para avaliar o desempenho dos controladores, a tensão da água no solo em cada controlador e a pressão no início de cada linha lateral foram monitorados. Para medir a tensão, os controladores foram equipados com sensores de pressão (MPX5100DP). Sensores de pressão do tipo MPX5500DP foram instalados no início da linha lateral (após a VH) para medir a pressão e indicar o momento e duração das irrigações. Todos os sensores de pressão

foram conectados a um sistema de aquisição de dados (Fig. 13) desenvolvido na ESALQ/USP. O sistema de aquisição de dados desenvolvido consiste de microcontrolador PIC18F4550, circuito RTC (*Real Time Clock*), cartão de memória, LCD (*Liquid Crystal Display*) de 16 caracteres e 2 linhas e outros componentes eletrônicos. A leitura dos sensores foi realizada a cada 15 segundos, sendo calculada a média dos valores medidos a cada 5 minutos e armazenada no cartão de memória. Cada registro descreve a data, hora e leitura dos sensores. O circuito RTC foi usado para fornecer data e hora com precisão e também para manter os dados mesmo durante interrupções de energia. O sistema tornou-se operacional em julho de 2011. O desempenho do sistema de automação proposto foi avaliado durante 64 dias. Durante esse período as únicas operações manuais foram o *download* dos dados e a limpeza do filtro.

Figura 13 - Experimento no pomar

3.6 Quantificação das forças atuantes na ativação do controlador

De acordo com a equação 5, quatro tipos de forças exercem influência na ativação do controlador.

$$F_{acionamento} = F_{mola} + F_{DMAV} + F_{válvula} + F_{resistência} \quad (5)$$

Em que, $F_{\text{acionamento}}$ é a força (N) necessária para iniciar a irrigação; F_{mola} é a Força (N) necessária para superar a força da mola de calibração em um ajuste específico; F_{DMAV} é a força (N) requerida para deformar a mola de calibração no comprimento requerido para ativar o pino da válvula de três vias; $F_{\text{válvula}}$ é a força (N) requerida para ativar a válvula de três vias; $F_{\text{Resistência}}$ é a força (N) requerida para vencer a resistência ao movimento (atrito).

Para determinação das F_{mola} , F_{DMAV} e $F_{\text{válvula}}$ foram realizados ensaios na máquina de ensaio de materiais modelo de dupla coluna Série 4466, marca Instron, no laboratório de Instrumentação Eletrônica do National Center for Engineering in Agriculture da USQ. As molas foram inicialmente fixadas no centro das duas células de carga da máquina. A velocidade de avanço da máquina utilizada foi de 3 mm/minuto. Foi considerado -15 mm como limite elástico das molas, que representa 38% de deformação. A válvula de três vias foi fixada no centro das duas células de carga da máquina. O comprimento necessário de deslocamento do pino de ativação da válvula foi de -3 mm. A válvula foi testada em uma velocidade de avanço menor (1 mm h^{-1}). Tanto no ensaio da mola quanto no da válvula a máquina foi programada para gravar os dados a cada 0,2 mm de avanço e cada ensaio foi repetido por 3 vezes.

3.7 Simulação

Utilizou-se o software SWIMv2.1 (Soil Water Infiltration Movement) para avaliar a influência da acurácia do controlador, da tensão crítica de acionamento do SI (15 e 25 kPa), da profundidade de instalação (15, 30 e 45 cm), da taxa de aplicação da irrigação (5, 10 e 15 mm h^{-1}) e dos tipos de solo (7 tipos de solo) no desempenho da irrigação (variação da lâmina aplicada pelo controlador). O SWIMv2.1, desenvolvido pela Divisão de Solos do CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Austrália), é um pacote de *softwares* que se baseia na equação de Richards para simular o movimento unidimensional de água e solutos no solo. A equação de Richards é resolvida numericamente pelo método de Newton-Raphson (VERBURG; ROSS; BRISTOW, 1996).

A simulação seguiu, resumidamente, os seguintes passos: 1) inserção dos parâmetros hidráulicos no programa HYPROPS do SWIMv2.1; 2) conversão dos parâmetros hidráulicos para um formato específico do SWIMv2.1 no HYPROPS; 3) definição dos parâmetros de entrada e das condições de contorno para simulação no SWIMv2.1.exe; e 4) Conversão dos dados de saída do SWIMexe para formato de texto no SWIMread. Detalhamento dos passos

da simulação são encontrados no manual do SWIMv.21 (VERBURG; ROSS; BRISTOW, 1996).

A precisão de acionamento do controlador variou de acordo com o tipo de calibração utilizada e com o número de controladores utilizados para ativar (ligar e desligar) o SI. O valor da precisão foi considerado como sendo o somatório dos desvio absolutos no acionamento e desligamento do SI obtidos nos testes em laboratório. Os valores de precisão na tensão de acionamento 15 kPa foram de $\pm 2,5$ kPa; de $\pm 1,25$ kPa e de $\pm 0,75$ kPa para os controladores com calibração geral, com calibração individualizada e para calibração individualiza com dois controladores, respectivamente. Já para a tensão de acionamento de 25 kPa os valores foram de ± 4 kPa; $\pm 1,7$ kPa e $\pm 0,7$. A tensão de água no perfil de solo foi considerada uniforme no acionamento do SI (início da simulação) e igual as tensões simuladas. As profundidades de instalação dos controladores representam os pontos de observação no perfil do solo em que o SI foi desligado.

As propriedades hidráulicas do solo curva de retenção e condutividade hidráulica são representadas pelo conjunto de equações de Mualem (1976) e de Van Genuchten (1980). Os parâmetros de ajuste dessas equações (teor de água residual, θ_r ; teor de água saturado, θ_s ; valor inverso da entrada de ar, α ; índice de distribuição de tamanho de poros, n ; e condutividade hidráulica do solo saturado, K_s) para os solos arenoso, siltoso e argiloso (dados médios de textura) foram estimados pelo programa ROSSETA por Schaap e Leij (1998), e para os solos Neossolo (Neossolo Quartzarênico distrófico) e Luvoso (Luvoso Vermelho aramerolo distrófico) por Silva et al. (2006). Para os solos Latossolo (Luvoso Vermelho Amarelo) e Nitossolo (Nitossolo Vermelho) foi feito o ajuste da curva de retenção ao modelo de Van Genuchten por Pinho (2010).

O ROSSETA utiliza uma rotina de redes neurais e implementa funções de pedotransferência que prevêm os parâmetros hierarquicamente a partir de dados de classe textural dos solos, densidade aparente e de pontos da curva de retenção de água no solo. Os valores dos cinco parâmetros (θ_r , θ_s , α , n e K_s) de saída do ROSSETA estão listados na Tabela 1.

As simulações foram aplicadas a um solo sem vegetação e assumindo que não houve evaporação, para um período de 24 h e com saídas de dados a cada 10 minutos. O tempo inicial foi considerado como tempo zero (início da irrigação) e o tempo final (fim da irrigação) como o tempo decorrido até a tensão na profundidade de instalação do controlador atingir o valor de desligamento. As propriedades físicas do solo foram consideradas uniformes no perfil do solo (60 cm de profundidade) e não considerou o fenômeno de histerese Para

todos os cenários simulados, o índice de gravidade foi definido para fluxo vertical. Usou-se uma função potencial para o escoamento superficial e a drenagem livre a 0,6 m para as condições de contorno na superfície e no limite do perfil, respectivamente. Para simular a taxa de aplicação da irrigação (5, 10 e 15 mm h⁻¹), três diferentes incrementos de chuva foram adicionados (por exemplo, para a taxa de aplicação de 5 mm h⁻¹, foi incrementado 0,5 cm de precipitação a cada hora na chuva acumulada). Os dados de saída da simulação foram: tempo de irrigação, lâmina aplicada, tensão da água no solo, conteúdo de água, drenagem e escoamento superficial. Esses dados foram também utilizados para estimar a eficiência de aplicação e eficiência de armazenamento.

A profundidade de instalação do controlador, que maximiza o armazenamento de água no solo sem que ocorram perdas de água por percolação e escoamento superficial, foi simulada no SWIMv2.1. Ela foi estimada pela metodologia desenvolvida por Zur et al. (1994), em que, é a profundidade na qual o valor de tensão da água no solo é igual a capacidade de campo (10 kPa para os solos em estudo) depois de decorrido o tempo necessário para aplicar o volume máximo de armazenamento de água no solo na profundidade do sistema radicular. Esse volume foi determinado com base nas curvas de retenção (Fig. 14) para cada tipo de solo e tensão crítica, ele representa o volume de água retido entre a capacidade de campo e a tensão crítica estabelecida (Tabela 2). Esta determinação foi realizada para os sete tipos de solos estudados em diferentes condições de taxa de aplicação de irrigação, tensão crítica e profundidade de sistema radicular (Z), sendo que foram utilizadas as mesmas condições de contorno e parâmetros de entrada do parágrafo anterior.

Tabela 1 - Parâmetros hidráulicos da equação de Van Genuchten (teor de água saturado, θ_s ; teor de água residual, θ_r valor inverso da entrada de ar, α ; índice de distribuição de tamanho de poros, n ; e condutividade hidráulica do solo saturado, K_s), densidade aparente (ρ), e percentual de areia, silte e argila para os solos em estudos obtidos do programa ROSSETA. Os dados texturais dos solos arenoso, argiloso e siltoso não foram fornecidos, pois representam dados médios (DM) de uma série de solos

Tipo de solo	ρ (kg.dm ⁻³)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm.h ⁻¹)
Arenoso	DM	DM	DM	DM	0,30	0,057	0,0363	3,23	21
Argiloso	DM	DM	DM	DM	0,515	0,102	0,0309	1,202	1,07
Siltoso	DM	DM	DM	DM	0,476	0,145	0,027	1,349	0,34
Latossolo	1,5	81	2,7	16,3	0,423	0,025	0,0343	1,463	9,52
Nitossolo	1,35	28	31,8	40,2	0,505	0,068	0,0301	1,176	7,814
Neossolo	1,311	88,4	0,4	11,2	0,462	0,127	0,0356	1,926	12,6
Lavsolo	1,092	27,2	16,9	55,9	0,516	0,247	0,0382	1,369	1,94

Figura 14 - Curva de retenção da água no solo para os sete solos estudados entre as tensões de 0 e 60 kPa

Tabela 2 – Lâmina de irrigação a ser aplicada (mm) nos diferentes tipos solos nas simulações de determinação do posicionamento correto do controlador em função da tensão crítica de acionamento (TASc)

TASc (kPa)	Z (cm)	Lâmina (mm)						
		Arenoso	Siltoso	Argila	Latossolo	Nitossolo	Neossolo	Lavsolo
15	30	12	8	7	10	6	9	6
15	60	21	15	13	20	12	17	12
25	30	12	18	15	21	14	16	13
25	60	23	35	29	42	27	33	26
35	30	12	22	20	27	19	20	17
35	60	24	43	39	54	37	40	34
45	30	12	25	23	31	23	22	20
45	60	24	50	46	62	44	44	39

A eficiência de aplicação foi definida pela relação entre a quantidade de água incorporada ao solo até a profundidade efetiva do sistema radicular e a quantidade aplicada (Eq. 6).

$$E_a = (V_{ar} / V_t) \times 100 \quad (6)$$

em que, E_a é eficiência de aplicação (%); V_{ar} é o volume (mm) de água de um evento de irrigação armazenado na zona radicular entre tensão crítica e a Cc (10 kPa); e V_t é o volume total aplicado no evento de irrigação (mm).

A eficiência de armazenamento foi definida pela relação entre o volume de água retido na zona radicular efetiva e o volume necessário (Eq. 7).

$$E_{ar} = \{V_{ar} / (V_{cc} - V_a)\} \times 100 \quad (7)$$

em que, E_{ar} é eficiência de armazenamento (%); V_{ar} é o volume (mm) de água de um evento de irrigação armazenado na zona radicular entre tensão crítica e a Cc (10 kPa); V_{cc} é o volume de água na zona radicular na capacidade de campo (mm) e V_a é o volume de água na zona radicular antes do evento de irrigação (mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação em laboratório

Nos oito ajustes da mola de calibração todas as amostras do protótipo II foram capazes de acionar e desligar o SI (Fig. 15a e 15b, respectivamente). Os valores de tensão da água no solo para ativar (ligar e desligar) o SI seguiram uma tendência crescente de acordo com o aumento na deformação da mola. Esta tendência indica que o controlador pode ser configurado para ativar o SI em diferentes valores tensões, desde que seja escolhido o ajuste específico da mola.

Figura 15 - (a) Tensão da água no solo (kPa) requerida para iniciar o sistema de irrigação nas seis amostras do protótipo II do controlador de irrigação e (b) Tensão da água no solo (kPa) requerida para desligar o sistema de irrigação pelas seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, controlador 1; C2, controlador 2, ..., C6 controlador 6)

A tensão da água no solo requerida para acionar a irrigação apresentou variação de até 20% entre as seis amostras de controladores no mesmo ajuste da mola de calibração (Fig. 15.a). O aumento no ajuste da mola de calibração resultou em um aumento na tensão de acionamento do SI. Para cada controlador, o ajuste na mola de calibração apresentou uma relação linear com a tensão de acionamento variando de 1 a 1,5 kPa mm⁻¹. O aumento no ajuste também aumentou a tensão de desligamento do SI (Fig. 15.b).

Apesar das amostras apresentarem curvas com formato similar há notáveis diferenças entre elas. Em geral, nos menores ajuste de compressão da mola a variação da tensão de acionamento entre as amostras foi pequena, porém com o aumento no ajuste a variação aumentou. A amostra C1 requereu os menores valores de tensão para a tivar o SI (2 a 4 kPa a

menos do que os valores utilizados pela média das amostras). Ao contrário, C2 requereu de 1 a 3 kPa a mais. Os valores requeridos de tensão na C5 para ativar o SI foram cerca de 1kPa acima dos valores médios das amostras. Porém, os valores de desvio padrão não aumentaram com o aumento da tensão crítica de acionamento ($10 \pm 1,38$ kPa; $15 \pm 1,32$ kPa; $20 \pm 1,37$ kPa e $25 \pm 1,3$ kPa).

Uma variável importante a ser analisada é a diferença entre a tensão para acionar e desligar o SI, porque o seu valor influencia no tempo de irrigação, e, por conseguinte, na lâmina de água a ser aplicada em cada irrigação. Em geral, as amostras apresentaram diferença média em tensão entre o acionamento e desligamento de $3,47 \pm 0,94$ kPa (Fig. 16). Sendo que, esse valor é menor nos ajustes menores ($2,5 \pm 0,29$ kPa) e é maior em ajustes maiores ($5 \pm 0,89$ kPa). Em 65% dos ajustes da mola de calibração as amostras C3, C4, C5 e C6 apresentaram valores de diferença iguais. E nos outros 35%, as amostras C3, C4 e C5 mostraram uma diferença de 1 kPa menor do que os valores médios. C1 obteve as menores diferenças em todos os ajustes (1 kPa nos menores ajustes e 3 kPa nos maiores, a menos do que os valores médios). Contrariamente, C2 mostrou diferenças que variaram de 1 a 4 kPa a mais do que os valores médios de acordo com aumento do ajuste da mola de calibração.

Figura 16 - Diferença entre a tensão de acionamento e desligamento do SI para cada amostra (C1, controlador 1; C2, controlador 2, ..., C6 controlador 6) do protótipo II

4.1.1 Forças atuantes no acionamento do controlador

Uma avaliação mais detalhada da variação do desempenho das amostras do protótipo II nos diferentes ajustes da mola de ajuste foi realizada analisando a influência de cada força atuante na ativação do controlador.

4.1.1.1 Força requerida para ativar a válvula de três vias

A válvula de três vias tem um pino de ativação (Fig. 5.4), sendo que o seu deslocamento comanda a ativação da válvula. Na tabela 3 se encontra o deslocamento (comprimento) mínimo necessário do pino para ativar a válvula e a força correspondentemente, bem como a força necessária para atingir o curso total (deslocamento máximo de 3 mm do pino de ativação). A válvula de três vias utilizada é projetada para trabalhar com ar (pneumática) e no catálogo do fabricante o deslocamento mínimo para ativar a válvula é de 1,5 mm. No entanto, as amostras testadas requereram um maior deslocamento para permitir o fluxo de água. C1, C3 e C6 requereram 2 mm de deslocamento para ativar a válvula e força de $5,18 \pm 0,4$ N, $5,57 \pm 0,69$ N e $5,17 \pm 1,24$ N, respectivamente. C4 e C5 requereram o mesmo deslocamento (2,4 mm), no entanto com uma diferença de 3 N na força. C2 requereu o maior deslocamento (2,6 mm). No geral, a variação da força requerida para ativar a esse componente do controlador foi pequena (cinco amostras apresentaram desvio inferior a 1 N), apenas C4 mostrou um desvio maior que 1 N dos valores médios. A força para atingir o curso total do pino de ativação foi de aproximadamente $7,07 \pm 0,8$ N para todas as amostras. Este valor é menor do que o apresentado no catálogo do fabricante (14 N). A força requerida para ativar a válvula de três vias é constante para os diferentes ajustes da mola de calibração.

Tabela 3 - Comprimento e força mínimos e força para curso total (3 mm de deslocamento) para ativar a válvula de 3 vias nas seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, válvula do controlador 1; ..., C6, válvula do controlador 6)

Amostra	Comprimento mínimo (mm)	Força mínima (N)	Força para curso total (N)
C1	2	$5,18 \pm 0,34$	$8,16 \pm 0,35$
C2	2,6	$4,98 \pm 1,24$	$6,57 \pm 0,60$
C3	2	$5,57 \pm 0,69$	$7,56 \pm 0,35$
C4	2,4	$7,56 \pm 0,69$	$6,57 \pm 0,91$
C5	2,4	$4,78 \pm 0,00$	$6,17 \pm 0,34$
C6	2	$5,17 \pm 1,24$	$6,97 \pm 0,34$
Média			$7,07 \pm 0,80$

4.1.1.2 Força requerida para ativar a mola de calibração

A força exercida pela mola de calibração foi dividida em duas forças para melhor compreensão. Uma delas é a força requerida para superar a força da mola em determinado ajuste (F_{mola}). A segunda é a força requerida para deformar a mola de calibração (F_{DMAV}) no

comprimento mínimo para ativar o pino da válvula de três vias. As curvas da relação de força versus comprimento da mola das seis amostras de molas de calibração testadas mostraram formatos semelhantes, com a F_{mola} gradualmente aumentado com a deformação da mola (Fig. 17.a). Os valores de força das seis amostras de molas, entre as deformações de 0 e 10 mm, apresentaram desvios dos valores médios menores do que 1N (Fig 17.b). Entretanto, a amostra C6 variou no ajuste 12 e 14 mm e mostrou um desvio de 5 N da média. Este componente é importante, pois é o ajuste da mola que permite o controlador ativar o SI em diferentes tensões.

Figura 17 - (a) Força necessária para superar a força da mola de calibração em um ajuste específico; (b) desvio da força em relação aos valores médios das seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, mola do controlador 1;...; C6, mola do controlador 6)

A F_{DMAV} (Fig. 18a) das amostras em todos os ajustes foi pequena ($3,20 \pm 0,90$ N). Assim como $F_{\text{válvula}}$, os valores de F_{DMAV} foram praticamente constantes com o incremento no ajuste. Os resultados de F_{DMAV} mostraram pequena variação na maioria dos ajustes, principalmente entre 0 e 10 mm. No entanto, no ajuste de 12 mm, C1 e C6 mostraram desvios dos valores médios de 1,5 e 3,2 N, respectivamente. No ajuste de 14 mm, ambos C1 e C3 mostraram desvios de 1,4 N. A descontinuidade na linearidade dos valores médios foi devida principalmente à elevada variação de C6 no ajuste de 12 mm.

Figura 18 - (a) força (N) requerida para deformar a mola de calibração no comprimento mínimo para ativar o pino da válvula de três vias; (b) desvio dos valores médios das seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, mola do controlador 1;...; C6, mola do controlador 6)

4.1.1.3 Força requerida para superar a resistência

A Força de resistência representa todas as forças que não podem ser medidas individualmente e que atuam no sentido inverso da força de acionamento dos controladores (por exemplo, o atrito e a resistência do diafragma). Esta força foi estimada pela Equação 1. Comparando com os outros três componentes de forças, a força de resistência apresentou os maiores valores. A força de resistência aumentou progressivamente com o incremento no ajuste da mola de calibração (Fig. 19a). No entanto as amostras apresentaram variação significativa entre elas. Ambas C1 e C2 mostraram tendência para aumentar o desvio em relação aos valores médios com o aumento do ajuste (Fig. 19b). A força de resistência em C1 foi $7,8 \pm 2,32$ N menor que a dos valores médios. Contrariamente em C2 foi $10,66 \pm 2,58$ N maior. C5 também mostrou uma grande variação em relação aos valores médios ($5,4 \pm 2,22$ N), porém sem tendência de aumento com o incremento no ajuste da mola de calibração. C3 e C4 apresentaram os menores desvios (± 1 N) em todos os ajustes. C6 mostrou um baixo desvio ($1,58 \pm 0,58$ N) entre os ajustes 0 e 10 mm, mas em ajustes maiores mostrou desvio de $-3,15 \pm 0,89$ N.

Figura 19 - (a) Força para superar a resistência; (b) desvio da força de cada amostra em relação aos valores médios das seis amostras do protótipo II de controlador de irrigação (C1, mola do controlador 1;...; C6, mola do controlador 6)

4.1.1.4 Contribuição percentual de cada componente de força

As forças F_{DMAV} e $F_{\text{válvula}}$ mostraram significativa influência na ativação do SI em tensões críticas baixas (7,5 kPa), 10% e 22%, respectivamente (Fig. 20; Tabela 4). Entretanto, com o aumento na tensão, ocorre uma gradual redução na contribuição dessas duas forças. Em altas tensões (25 kPa) suas contribuições foram de 5,64% e 7%, respectivamente. Simultaneamente, a força da mola de calibração se comporta de maneira oposta, ela aumenta gradativamente a sua contribuição com o aumento da tensão crítica. Em baixas tensões (7,5 kPa), ela praticamente não exerce influência, no entanto, em altas tensões (25 kPa), a sua influência é em torno de 25%. A Força de resistência foi o componente de força dominante em todos os ajustes avaliados, sendo que sua contribuição no acionamento do SI é em torno de $67,8 \pm 5,7\%$. C2 foi a amostra que apresentou os maiores valores de contribuição da $F_{\text{resistência}}$ (72%) e também a que requereu os maiores valores de tensão para acionar o SI. Inversamente, C1 e C4 apresentaram os menores valores de $F_{\text{resistência}}$, 61,4% e 63,3%, respectivamente, e foram as amostras que requereram os menores valores de tensão para acionar o SI.

$F_{\text{válvula}}$ contribuiu com cerca de $11,6 \pm 2,9\%$ no total das forças para acionar o SI, e C4 foi a amostra que apresentou maior valor de contribuição desta força (15,4%). A F_{DMAV} foi o componente de força com a menor influência ($5,8 \pm 1,2\%$). A F_{mola} é a que representa a força com a segunda maior contribuição no acionamento do SI ($14,8 \pm 1,4\%$), sendo que C1 foi a amostra com maior valor de contribuição deste componente (17%) e C2 foi a menor (12,8%).

Figura 20 - (a) Força requerida (e desvio padrão) para superar a forças opostas ao acionamento do controlador; b) Valores médios da contribuição das quatro componentes de forças atuantes para acionar o SI em cinco diferentes tensões críticas

A F_{mola} foi o componente de força que mostrou o menor coeficiente de variação ($CV\% = 4,7$). Em 80% dos ajustes, o desvio das seis molas foi inferior a 1N, sendo que este componente é o único que pode ser configurado. As forças da F_{FDM} e da $F_{\text{válvula}}$ foram os componentes de força que apresentaram os maiores coeficiente de variação, 16,87% e 23,91%, respectivamente. No entanto, as suas contribuições para a ativação SI são baixas. Como resultado, esses dois componentes de força tem pouca influência na variação entre as amostras, como pode ser observado nas baixas tensões críticas, em que as suas contribuições representam 30%, a variação entre as amostras foi pequena. Entretanto, a resistência que é a componente de força dominante, pois sua contribuição no acionamento do SI é de $68 \pm 5,7\%$, apresentou CV de 16%. Portanto, a resistência também é o componente dominante na

variação entre as amostras, pois a resistência é função da precisão no processo construtivo dos protótipos, sendo assim, redução na variação entre as amostras pode ser obtida melhorando o processo de construção dos protótipos.

Tabela 4 - Valores médios (μ) e coeficiente de variação (CV) da influencia de cada componente de força que atua no acionamento do controlador em diferentes tensões críticas de água no solo (TASc)

TASc (kPa)	Componente de força							
	Válvula		F _{DMAV}		Mola		Resistência	
	μ (N)	CV(%)	μ (N)	CV(%)	μ (N)	CV(%)	μ (N)	CV(%)
7,5	5,54 $\pm$ 0,7	12,6	3,15 $\pm$ 0,06	1,82	0,40 $\pm$ 0,10	25	17,35 $\pm$ 2,4	13,84
10	5,54 $\pm$ 0,7	12,6	3,05 $\pm$ 0,33	10,80	3,22 $\pm$ 0,17	5,36	23,45 $\pm$ 2,24	9,55
15	5,54 $\pm$ 0,7	12,6	3,05 $\pm$ 0,27	8,91	8,69 $\pm$ 0,23	2,64	35,6 $\pm$ 5,6	15,72
20	5,54 $\pm$ 0,7	12,6	3,42 $\pm$ 0,54	15,70	13,60 $\pm$ 0,21	1,58	47,96 $\pm$ 3,6	7,50
25	5,54 $\pm$ 0,7	12,6	3,32 $\pm$ 1,33	40,23	19,97 $\pm$ 1,49	7,47	59,31 $\pm$ 9,66	16,29

4.1.2 Calibração individualizada do controlador

A avaliação das seis amostras do protótipo II mostrou uma variação considerável entre elas. Para acionar o SI, o coeficiente de variação entre as amostras foi de 12%, 9%, 10% e 9%, para as tensões de acionamento de 10, 15, 20 e 25 kPa, respectivamente. Outros tipos de controladores de irrigação que usam sensores de tensão da água no solo para acionar o SI apresentaram problemas semelhantes quando utilizada uma calibração geral (IRMAK; HAMAN, 2001; LEIB; JABRO; MATTEWS, 2003). McCann, Kincaid e Wang (1992) relataram CV de 11% na leitura de tensão de 49 sensores watermark.

Como no experimento não foi estabelecido nenhum tratamento padrão (testemunha) para comparar o desempenho do controlador, os resultados de cada amostra do protótipo II fora comparados em relação aos valores médios das amostras. Os dados da Figura 15 foram correlacionados e se obtiveram equações lineares da relação de tensão e compressão da mola de calibração. Estas equações foram utilizadas para determinar o ajuste necessário em cada amostra de controlador para acionar o SI na tensão crítica dos valores médios. O desvio de cada amostra do protótipo II em relação aos valores médios para cada tensão crítica foi comparado (Fig. 21). Observou-se que apenas a metade das amostras ativou (ligaram e desligaram) o SI no mesmo ajuste. A outra metade mostrou desvio no ajuste da mola de

calibração, que variou de - 4 mm a 2 mm para iniciar o SI (Figura 21a) e de - 3 mm a 1 mm para desligar o SI (Figura 21b). Estes resultados sugerem que os controladores quando submetidos a uma calibração única (geral) não são exatos na ativação do SI.

Figura 21 - (a) Desvio no ajuste da mola de calibração necessária para acionar o SI na mesma tensão de água no solo, (b) Desvio no ajuste da mola de calibração necessária para desligar o SI na mesma tensão de água no solo

Uma alternativa para melhorar a precisão dos controladores na ativação do SI é fazer uma calibração individual para cada amostra. Na tabela 5 é apresentada a calibração da mola em cada amostra de controlador para acionar o SI em quatro diferentes tensões (10, 15, 20 e 25 kPa). Porém só é possível calibrar o acionamento ou desligamento do SI. Se o controlador for calibrado para acionar o SI em uma tensão de 25 kPa, o SI será desligado quando a tensão cair para $15 \pm 2,5$ kPa. Analogamente, se for calibrado para desligar o SI em uma tensão de 15 kPa, o SI será acionado em tensão crítica de $11 \pm 1,1$ kPa.

A calibração individualizada de cada amostra do protótipo II melhorou significativamente a precisão na tensão de acionamento do SI (Tabela 6). A incerteza foi reduzida praticamente pela metade, sendo que os valores dos desvios a redução foi mais significativa. O desvio máximo que é de 2,1; 2,3 e 3,8 kPa para as tensões de acionamento de 15, 20 e 25 kPa com calibração geral é reduzido para 0,3; 0,6 e 0,3 kPa, respectivamente. A calibração individualizada reduziu os valores dos desvios na tensão de desligamento do SI, porém não foi observado reduções na incerteza.

Simulou-se o desempenho da irrigação em para cenários com o controlador calibrado com calibração geral e com calibração individualizada, em um solo argiloso e com o controlador em três profundidades de instalação (15, 30 e 45 cm). Os resultados de lâmina

infiltrada e seu coeficiente de variação para o solo com o controlador simulado com uma calibração geral foram de 17,5 mm (5%), 38 mm (5%) e 57 mm (5%) mm para a profundidade de instalação de 15, 30 e 45 cm, respectivamente. Na simulação com a calibração individual os resultados foram de 18,1 mm (4%), 38,6 mm (2%) e 57 mm (1%). Se tomados como critérios de cenários de recomendação do controlador apenas aqueles onde os valores de CV são menores do que 5%, a calibração geral inviabiliza a utilização do controlador proposto (protótipo II).

Tabela 5 - Calibração individual da mola de calibração (mm) de cada amostra do protótipo II de controlador para acionar e desligar o SI em diferentes tensões de água no solo (TAS)

Amostra	Ajuste da mola de calibração (mm)							
	TAS para acionar o SI (kPa)				TAS para desligar o SI (kPa)			
	10	15	20	25	10	15	20	25
C1	4	8	13	18	6	11	15	20
C2	2	5	8	12	6	10	14	18
C3	3	7	10	14	5	9	13	18
C4	2	6	10	14	4	9	13	17
C5	2	6	9	13	4	8	12	16
C6	3	6	10	14	5	9	14	18
Média	2	6	10	14	5	9	14	18

Tabela 6 - Valores médios, desvio médio absoluto, desvio padrão e incerteza da tensão da água no solo (TAS) observado na avaliação do protótipo II com calibração geral e com calibração individualizada de cada amostra (*)

	TAS média	Desvio absoluto	Desvio máximo	Incerteza
Acionamento	15	1,54	2,1	0,41
	20	1,77	2,3	0,43
	25	2,65	3,8	0,72
Acionamento*	15	0,25	0,3	0,25
	20	0,6	0,6	0,42
	25	0,3	0,3	0,2
Desligamento	10	0,98	1,1	0,22
	15	1,16	1,3	0,26
	20	1,38	2,5	0,5
Desligamento*	10	0,5	0,5	0,35
	15	0,6	0,6	0,45
	20	0,4	0,5	0,35

4.2 Avaliação em campo

4.2.1 Controle da irrigação em vasos

A Figura 22 apresenta valores diários de tensão da água no solo de nove vasos cultivados com grama e os eventos de irrigação acionados pelas amostras do protótipo I de controlador de irrigação. Foram avaliadas dez amostras, porém, no vaso 3 o controlador não acionou o SI durante o período de avaliação. A maioria dos picos de tensão coincide com eventos de irrigação. Sendo que nos casos em que não houve irrigação, o declínio na tensão foi devido à quebra da coluna de água do tensiômetro (entrada de ar). Os controladores foram configurados para acionar o SI em tensão de 25 kPa. Entretanto, em apenas três vasos os controladores acionaram o SI em valores de tensão próximos ao configurado. Enquanto que, nos outros vasos, foram observadas tensões superiores a 30 kPa.

No vaso 1 (Fig. 22.a), o controlador C1 acionou 2 vezes a irrigação, sendo que o primeiro evento de irrigação foi acionado antes de a tensão atingir o valor de 25 kPa, porém a segunda irrigação foi acionada ao atingir 28 kPa. No vaso 2 (Fig. 22.b), o controlador acionou quatro vezes a irrigação, sendo que em apenas uma delas a tensão crítica foi abaixo da programada (10 kPa). Nas outras irrigações foram acionadas quando a tensão atingiu valores muito superiores aos programados. No vaso 4 (Fig. 22.c), foi onde o controlador acionou o SI mais vezes, 11 vezes. Todas as irrigações foram efetuadas em tensões menores que 25 kPa. No vaso 5 (Fig. 22.d), o controlador acionou o SI 7 vezes, mantendo a tensão sempre abaixo de 30 kPa. Em sua maioria, as irrigações ocorreram quando a tensão atingiu valores próximos de 15 kPa. No vaso 6 (Fig. 22.e), o controlador acionou o SI 5 vezes, sendo que em duas a tensão crítica foi superior a 25 kPa. O controlador do vaso 7 acionou 7 vezes o SI (Fig. 22.f), das quais duas foram acionadas com tensões muito superiores à estabelecida (42 e 36 kPa). O controlador do vaso 8 acionou o SI 5 vezes (Fig. 22.g), sendo que em apenas uma situação a tensão de acionamento foi superior a 25 kPa. No vaso 9, o controlador acionou o SI 3 vezes em valores de tensão próximos de 12 kPa. No vaso 10, o controlador apenas acionou o SI uma vez.

Figura 22 - Tensão da água no solo medido a 15 cm de profundidade nos vasos cultivados com grama e os eventos de irrigação acionados pelas nove amostras do protótipo I de controlador de irrigação (C1, controlador instalado no vaso 1;...; C6, controlador instalado no vaso 6)

Embora os resultados dessa avaliação preliminar tenham mostrado grande variação na tensão de acionamento dos controladores que foram calibrados para acionar o SI em tensão de 25 kPa, eles comprovaram que os controladores foram capazes de ligar e desligar o SI. As variações devem-se às diferenças entre as próprias amostras e as variações temporais para as mesmas amostras, devido ao processo artesanal de construção utilizado. Embora não tenham

sido quantificadas as forças atuantes na ativação dessas amostras de controlador, foi observado uma significativa variação na força requerida para ativar a válvula de 3 vias. Essa variação se deve as diferenças na construção dos canais no êmbolo da seringa. Como essas 10 amostras do protótipo I foram as primeiras a serem construídos e avaliadas, esse experimento forneceu informações importantes para melhorar a construção das outras seis amostras que foram avaliados no experimento no pomar.

4.2.2 Controle da irrigação em pomar de fruteiras

As leituras de tensão da água no solo nas seis linhas de plantas durante os 64 dias de avaliação são mostradas na Figura 23, que também mostra os dias em que o SI foi acionado em cada linha pelo protótipo I de controlador de irrigação. Todas as amostras do protótipo testado foram capazes de ligar e desligar o SI, sendo que, os picos de tensão coincidiram com os eventos de irrigação. O controlador (C2) instalado na linha 2 acionou 16 vezes o SI, toda vez que a TSA atingiu valores de $18,5 \pm 0,89$ kPa. Os controladores da linha 3 (C3) e linha 4 (C4) acionaram o SI 11 e 7 vezes quando a TSA atingiu valores de $19,1 \pm 1,3$ kPa e $17,5 \pm 1,16$ kPa, respectivamente. Contrariamente, nas linhas 1 e 6 mostraram grande variação nos valores de tensão em que os controladores iniciaram a irrigação quando comparado ao valor estabelecido (20 kPa), $-7,5$ and $+10,8$ kPa, respectivamente. O controlador (C1) instalado na linha 1 acionou a irrigação em baixos valores de TSA ($12,5 \pm 0,39$ kPa) e acionou a irrigação mais frequentemente, 26 vezes. Já o C6 acionou o SI quatro vezes em altos valores de tensão ($30,8 \pm 4,5$ kPa). No geral, quanto maior o valor de tensão utilizado para acionar o sistema de irrigação menor foi a frequência de acionamento. Resultados similares foram obtidos em outras pesquisas (HOPPULLA; SALO, 2007; MUNOZ-CARPENA et al., 2008; DABACK et al., 2011). Outra explicação para justificar a maior frequência de irrigação nas linhas 1, 2 e 5 (27, 16 e 15 eventos de irrigação, respectivamente) é que as plantas nessas linhas estavam em fase de frutificação e floração. Durante estas fases o aumento da taxa de transpiração leva à maior absorção de água pelas raízes (DABACH et al., 2011).

Os menores valores de tensão da água no solo foram observados nos dias chuvosos (tensões próximos de 3 kPa). No dia 46, uma precipitação de 15,7 mm ocorreu e promoveu uma queda nos valores de tensão e um evento de irrigação foi evitado na maioria das linhas de irrigação. No final do período de avaliação choveu durante cinco dias (nos dias 57, 61, 62 e 63), com um total de precipitação de 113 mm. Para o período sem chuva (primeiros 50 dias de avaliação) os menores valores de tensão da água no foram em média 5,1; 6,5; 5,9; 5,8; 6,5 e

5,7 kPa, para as linhas de plantas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Entretanto, os valores utilizados pelos controladores para desligar o SI foram mais altos: $7,3 \pm 0,4$; $14,5 \pm 1,1$; $10,3 \pm 2,2$; $9,4 \pm 0,4$; $8,3 \pm 0,4$, e $7,9 \pm 1,43$ (Tabela 7). Isto sugere que depois que o SI foi desligado, a frente de molhamento no solo continuou em movimento descendente, contribuindo para o aumento do conteúdo de água no solo e redução da tensão.

Apesar de todas as seis amostras do protótipo ter sido capazes de ativar o SI (ligar e desligar), apenas metade das delas (C2, C3 e C4) funcionou de modo satisfatório durante todo o período, sendo que o critério para classificar o desempenho do controlador de irrigação como satisfatório foi um desvio de 10% da tensão crítica de acionamento, 20 ± 2 kPa (MIRANDA et al., 2005). C1 acionou a irrigação e manteve a tensão da água no solo em valores menores que o estabelecido, no entanto com uma grande diferença nos valores utilizados para acionar o SI ($12,5 \pm 0,4$ kPa). Inversamente, C5 e C6 acionaram o SI em valores de tensão acima do limite predefinido. Considerando-se que as amostras do protótipo foram submetidas a uma calibração única (mesmo ajuste na mola de calibração), as diferenças entre elas são predominantemente devidas à falta de precisão no processo de construção dos protótipos (processo realizado manualmente). Além disso, este problema é crítico principalmente na construção da válvula de três vias, em que uma pequena variação pode afetar de forma intensa a força de resistência. Com isso o protótipo I foi remodelado para substituir a válvula de três vias (construída manualmente na oficina da ESALQ com seringas de vidro) por uma válvula de três vias fabricada industrialmente. O protótipo com a nova válvula foi denominado protótipo II.

O valor de tensão da água no solo estabelecido para acionar o SI foi de 20 kPa, mas o valor médio da tensão de acionamento dos 79 eventos de irrigação realizados pelas seis amostras do controlador foi de $17,8 \pm 4,9$ kPa (Tabela 8). O alto valor do desvio padrão mostra a inviabilidade do uso do protótipo I com calibração geral para controle da irrigação. Por outro lado, se em vez de realizar uma calibração geral for realizada uma calibração individual para cada amostra a precisão do controlador pode ser melhorada. Para as tensões de acionamento de 13 e 18 kPa o desvio máximo foi reduzido para 1,1 e 0,9 kPa, respectivamente, quando considerado calibrado individualmente. Para as tensões maiores (22 e 30 kPa) não foram observadas reduções consideráveis na incerteza do controlador devido ao pequeno número de eventos de irrigação considerado. A calibração geral não promove melhoria significativa no desligamento do SI. Como é apenas possível calibrar o acionamento ou o desligamento por controlador, é recomendado realizar a calibração para o acionamento.

Figura 23 - Tensão da água no solo medido a 15 cm de profundidade e eventos de irrigação em um calendário diário. (C1, controlador instalado na linha 1;...; C6, controlador instalado na linha 6)

Tabela 7 - Dados do experimento em pomar de fruteiras

Linha de plantas	Tensão para iniciar o SI	Tensão para desligar o SI a irrigação	Diferença em tensão na água no solo	Número de irrigações	Tempo das irrigações
	(kPa)	(kPa)	(kPa)		(h)
1	12,6 (3%)	7,3 (6%)	5,3 (13%)	26	2,26 (35%)
2	18,5 (5%)	14,5 (7%)	3,9 (19%)	16	4,05 (26%)
3	19,1 (7%)	10,3 (21%)	8,8 (30%)	11	11 (31%)
4	17,9 (4%)	9,4 (4%)	8,5 (11%)	7	6,07 (37%)
5	21,9 (17%)	8,4 (5%)	13,5 (29%)	15	2,92 (12%)
6	32,2 (13%)	7,9 (18%)	24,3 (12%)	4	0,95 (11%)

Tabela 8 - Valores médios, desvio médio absoluto, desvio padrão e incerteza da tensão da água no solo (TAS) observado na avaliação do protótipo I com calibração geral e com calibração individualizada de cada amostra (*)

	TAS média	Desvio médio	Desvio padrão	Incerteza
Acionamento	17,8	3,09	4,91	1,15
	13	0,68	1,1	0,46
Acionamento*	18	0,75	0,9	0,46
	22	2,63	3,6	1,92
	30	3,16	4,5	4,75
Desligamento	9,5	2,34	2,87	0,67
	14	0,94	1,2	0,6
Desligamento*	10	1,63	2,2	1,4
	8	0,73	1	0,57

Para um determinado solo, quanto maior a tensão crítica maior é quantidade de água a ser aplicada em cada evento de irrigação, pois um maior volume de água é necessário para repor a umidade à capacidade de campo (ZUR et al., 1994; STIRZAKER; HUTCHINSON, 2005; DABACK et al., 2011). Entretanto, o tempo das irrigações nas seis linhas de plantas não obedeceu a essa tendência (Tabela 7). Nas linhas de plantas 2 e 4, onde os valores de tensão crítica foram menores que na linha 5, a duração da irrigação foi maior. Além disso, as linhas 3 e 6 mostraram uma grande discrepância em comparação com as outras. Na linha 3, a irrigação levou 11 horas para alterar a tensão de 19,1 kPa para 10,3 kPa. Já na linha 6 em apenas 0,95 h a tensão reduziu de 32,2 kPa para 7,9 kPa depois de iniciado o SI. Nessas duas linhas pode ter ocorrido fluxo preferencial. Sendo que na linha 6 o caminho preferencial pode ter sido no sentido da localização do controlador (C6), resultando em rápida chegada da frente de molhamento e um tempo de irrigação curto. Inversamente, na linha 3 o caminho preferencial deve ter sido no sentido contrário à localização do controlador C3 que resultou em chegada tardia da frente de molhamento e um tempo de irrigação longo.

Também foi observada variação (11 a 37%, Tabela 7) na duração de cada evento de irrigação dentro da mesma linha de planta ao longo do período de avaliação. Munoz-Carpena et al. (2008) relataram também a ocorrência desse tipo de variação em sistemas de irrigação controlados com base em tensiometria (51% a 90%) e em outros sensores de solo (49% a 52%). Os autores atribuíram essas variações, em parte, à variabilidade nas propriedades da água no solo, bem como, a variação dos sensores submetidos a uma única calibração. Para o presente estudo, o sistema de irrigação por gotejamento pode também ter contribuído para essa variação, uma vez que, com a utilização desse sistema geralmente não se formam bulbos molhados uniformes (COELHO; OR, 1996).

4.2.3 Efeito da temperatura do ar no acionamento da irrigação

As seis amostras do protótipo I de controlador acionaram o SI no total de 80 vezes, durante o período de avaliação. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9, a maioria destes eventos de irrigação (58,75%) ocorreu durante o período noturno (18:00-06:00) e 41,25% durante o dia (6:00-18:00). 64% dos eventos de irrigação no período diurno ocorreram no início da manhã (06:00 às 10:00 h) e fim de tarde (16:00 às 18:00 h), por exemplo, na linha 6 (cultivado com lichia), 75% dos eventos de irrigação ocorreram durante o dia, mas aconteceram no início da manhã. Nas linhas 2 (cereja asiática) e 3 (pitanga) quase todos os eventos de irrigação (93,75% e 90,91%, respectivamente) ocorreram no período de 16:00 h -10:00 h (horários menos quentes do dia) .

A maioria dos eventos de irrigação ocorreu durante horários da noite, de manhã cedo e no final da tarde, em função dos maiores valores de tensão da água no solo ter sido observado nesses horários. Ao passo que, entre 10 horas da manhã e meio dia os valores de tensão tenderam a decrescer e foram instáveis. A fim de avaliar melhor esse fenômeno (Fig. 24) foram selecionados dados de tensão para alguns dias específicos (sem ocorrência de eventos de irrigação e de precipitação). A tensão geralmente diminuiu do nascer do sol (06:00 h) para o meio do dia solar (10:00 h às 12:00 h), e, em seguida, aumentou a partir do meio do dia solar para o nascer do sol seguinte. Camargo (2012) observou instabilidade nas leituras dos tensiômetros realizadas nas horas mais quentes do dia (09:00 até 17:00). Dabach et al. (2011) também observaram a mesma instabilidade. Nas duas pesquisas citadas, a tomada de decisões de quando irrigar durante a instabilidade nas leituras de tensão limitou irrigações nos horários mais quentes do dia. Dabach et al. (2011) programaram o sistema para irrigar apenas no turno noturno quando as leituras são mais estáveis.

Tabela 9 - Horários em que cada evento de irrigação foi acionado

Linha lateral	Número de Irrigações	Durante o dia		Durante a noite	
		6:00-11:59h	12:00-17:59h	18:00-23:59h	0:00-5:59h
1	27	3,70%	40,74%	29,63%	25,93%
2	16	18,75%	6,25%	50,00%	25,00%
3	11	9,09%	18,18%	63,64%	9,09%
4	7	0,00%	14,29%	42,86%	42,86%
5	15	40,00%	26,67%	33,33%	0,00%
6	4	75,00%	0,00%	25,00%	0,00%
total	80	17,50%	23,75%	40,00%	18,75%

A literatura sobre tensiometria e sensores de umidade do solo, sugere que o padrão de leituras diurnas de tensão da água no solo observada neste estudo é universal para diferentes tipos de solo (NYHAN; DRENNON, 1990; COELHO; TEIXEIRA, 2004; DABACH et al., 2011). Nyhan e Drennon (1990) avaliaram o desempenho do conjunto tensiômetro/sensor de pressão para monitorar a tensão de água do solo em ambiente natural e ambiente com controle de temperatura. Os autores observaram efeito da temperatura sobre a tensão medida apenas no ambiente natural. A queda da tensão durante as horas mais quentes do dia é influenciada pela sensibilidade dos sensores de pressão à temperatura, ao processo de redistribuição de água no solo e à expansão de ar dentro do tensiômetro com o aumento da temperatura (WARRICK et al., 1998). Uma das recomendações para minimizar esses efeitos consiste em efetuar as leituras no período menos quente do dia, geralmente pela manhã. Porém para culturas irrigadas com alta frequência faz-se necessário efetuar mais leituras. A instabilidade na tensão durante os horários mais quentes são da ordem de aproximadamente ± 2 kPa. Dependendo da faixa de tensão avaliada e da curva de retenção do solo, essa variação pode representar uma variação significativa no volume aplicado ou um atraso no momento de irrigação, podendo causar estresse hídrico na planta.

Figura 24 - Leituras da tensão da água no solo no controlador de irrigação versus o tempo na escala horária a 15 cm de profundidade nas seis de linhas de plantas

4.3 Simulações de desempenho do controlador

A lâmina de água infiltrada no perfil do solo é função do tempo em que a frente de molhamento leva para atingir a profundidade de instalação da cápsula cerâmica do tensiômetro. Uma vez que a frente de molhamento atinge esta profundidade, o controlador desliga o SI. Na simulação de controle da irrigação utilizando um controlador instalado em diferentes cenários de controle (diferentes: profundidades, tensões críticas de acionamento, taxas de aplicação da irrigação e tipos de solo) a lâmina aplicada aumentou com aumento da profundidade de instalação do controlador, da tensão de acionamento e da taxa de aplicação de irrigação (Tabela 10). Esses resultados eram esperados, uma vez que, quanto maior a

profundidade do sistema radicular e menor o conteúdo de água no momento da irrigação maior é o volume de água para repor a umidade do solo à capacidade de campo. Já que, segundo a equação 8 (RUBIN; STEINHARDT, 1963) o tempo requerido pela frente de molhamento para atingir uma determinada profundidade é diretamente proporcional à profundidade e inversamente ao conteúdo inicial de água e à taxa de aplicação da irrigação. Resultados similares foram obtidos por Stirzaker e Hutchinson (2005) e Zur et al. (1994).

$$T = d (\theta_{wf} - \theta_i) / (IR - K_{\theta i}) \quad (8)$$

Sendo T é o tempo para a frente de molhamento alcançar a distância d; d é a distância até a profundidade desejada; IR é a taxa de aplicação da irrigação; $K_{\theta i}$ é a condutividade do solo não saturado para o conteúdo inicial de água; θ_{wf} é o conteúdo de água atrás da frente de molhamento; e θ_i é o conteúdo inicial de água. Os valores de $K_{\theta i}$ são geralmente de 2 ou 3 ordens de grandeza inferiores à taxa de aplicação da irrigação, de modo que este pode ser negligenciado (ZUR et al., 1994; STIRZAKER; HUTCHINSON, 2005).

A lâmina aplicada aumentou com o aumento da profundidade de instalação do controlador, sendo que, nas profundidades de 30 cm ela foi 2,3 vezes maior que nas profundidades de 15 cm e 3,3 vezes nas profundidades de 45 cm. Dos 102 cenários simulados, em 24 deles o coeficiente de variação foi maior que 4%, sendo que desse total, 83% foram observados em cenários com o controlador instalado a 15 cm de profundidade. Nas maiores profundidades (30 e 45 cm), esse percentual de cenários com $CV > 4\%$ foi de 8%, ou seja, com o aumento na profundidade de instalação do controlador ocorre redução no coeficiente de variação do volume de água aplicado. Isso se deve ao fato de que, quanto maior a profundidade, maior é o volume aplicado e menor é a significância da variação.

Com o aumento da tensão crítica de acionamento do SI (com exceção do solo arenoso) foi observado aumento na lâmina de água aplicada (Tabela 10). As lâminas nos cenários com tensão crítica de 25 kPa foram em média de 24%, 22%, 22%, 21%, 15% e 18% maiores do que nos cenários com tensão de 15 kPa, para os solos Siltoso, Argiloso, Latossolo, Nitossolo, Neossolo e Lavsoil, respectivamente. Portanto, quanto maior a tensão crítica de acionamento maior é o tempo de irrigação, pois, o movimento da frente de molhamento é reduzido com a diminuição no conteúdo de água no solo. Stirzaker e Hutchinson (2005) ressaltaram que o fator dominante no movimento da frente de molhamento foi o conteúdo de água inicial antes da irrigação, não a condutividade hidráulica saturada (K_s). Entretanto, a lâmina aplicada nos cenários com solo arenoso (alta $K_s = 21 \text{ cm h}^{-1}$) em tensões críticas de 25

kPa foi em média 5% menor do que nas de 15 kPa, sugerindo que a K_s para este solo é o fator dominante no movimento da frente de molhamento.

Com o aumento na taxa de aplicação de irrigação, observou-se um aumento na lâmina aplicada. A lâmina aplicada nos cenários com taxa de aplicação de 10 mm h^{-1} foram em média 17,4%, 22,6%, 24%, 20 e 9% maiores do que nos cenários com taxa de aplicação de 5 mm h^{-1} para os solos Arenoso, Latossolo, Nitossolo, Neossolo e Lavsolo, respectivamente. Nos cenários com 15 mm h^{-1} foram de 34%, 32%, 27%, 33,5% e 9% maiores que a menor taxa (5 mm h^{-1}). Embora, o solo Lavsolo apresente K_s maior do que 15 mm h^{-1} , praticamente não ocorreu aumento na lâmina aplicada com o aumento na taxa de aplicação de 10 mm h^{-1} para 15 mm h^{-1} . O aumento na taxa de aplicação só reduziu o CV da lâmina aplicada para os solos Latossolo e Nitossolo. Já para os outros solos, o CV da lâmina aplicada não foi influenciado pela alteração da taxa de aplicação.

Tabela 10 - Lâmina infiltrada (I) e seu coeficiente de variação (%) para 7 tipos de solos de acordo com a variação na taxa de aplicação da irrigação (P), profundidade de instalação do controlador e tensão de água no solo para acionar o SI (TASc). (a) Os valores de TAS para desligar o SI foram de 12 ± 1 kPa (para TASc de 15 kPa) e (b) 21 ± 2 kPa (para TASc de 25 kPa). NA: não aplicável, pois, não permite simulação para P maior que 5 mm/h devido ao baixo Ks

P(mm/h)	TASc (kpa)	Profundidade (cm)	Lâmina aplicada (mm) e seu coeficiente de variação (%) para os tipos de solo						
			Arenoso	Siltoso	Argiloso	Latossolo	Nitossolo	Neossolo	Lavssolo
5	15 ^a	15	10,5 (5%)	16,7 (3%)	14,7 (4%)	12,7 (10%)	8,7 (9%)	14,0 (7%)	13,5 (4%)
		30	25,0 (2%)	36,6 (2%)	31,8 (3%)	31,8 (5%)	21,5 (5%)	34,0 (4%)	31,3 (2%)
		45	38,0 (3%)	54,8 (2%)	47,0 (2%)	53,3 (5%)	44,3 (3%)	55,8 (4%)	48,3 (3%)
	25 ^b	15	9,9 (2%)	20,9 (3%)	18,1 (4%)	15,6 (8%)	11,0 (7%)	16,3 (3%)	16,0 (5%)
		30	24,4(2%)	45,6 (2%)	38,6 (2%)	47,6 (2%)	27,7 (4%)	40,3 (3%)	37,3 (3%)
		45	36,5(2%)	67,0 (1%)	57,0 (1%)	65,2 (4%)	48,9 (4%)	63,3 (3%)	56,4 (2%)
10	15 ^a	15	8,7 (7%)	NA	NA	16,0 (6%)	10,7 (5%)	17,0 (6%)	15,3 (4%)
		30	28,7 (2%)	NA	NA	39,3 (4%)	26,0 (3%)	41,7 (4%)	34,7 (2%)
		45	45,0 (2%)	NA	NA	64,0 (3%)	44,3 (3%)	66,0 (3%)	51,0 (2%)
	25 ^b	15	11,6 (5%)	NA	NA	19,6 (6%)	16,8 (3%)	19,8 (4%)	18,2 (5%)
		30	29,0 (2%)	NA	NA	47,6 (2%)	32,0 (3%)	47,6 (2%)	40,6 (3%)
		45	43,0 (3%)	NA	NA	76,4 (3%)	53,4 (3%)	73,8 (3%)	58,6 (2%)
15	15 ^a	15	14,5 (6%)	NA	NA	18,5 (5%)	12,5 (7%)	20,0 (4%)	13,0 (7%)
		30	34,0 (2%)	NA	NA	43,5 (3%)	28,0 (3%)	46,5 (3%)	34,7 (2%)
		45	50,5 (2%)	NA	NA	70,5 (2%)	47,0 (5%)	73,0 (3%)	51,4 (2%)
	25 ^b	15	13,5 (0%)	NA	NA	22,2 (6%)	15,0 (7%)	21,9 (4%)	19,8 (3%)
		30	31,2 (2%)	NA	NA	52,8 (2%)	34,5 (3%)	52,5 (2%)	40,7 (2%)
		45	48,0 (2%)	NA	NA	83,1 (2%)	58,2 (3%)	80,7 (2%)	59,0 (2%)

Os maiores valores de CV da lâmina de irrigação aplicada foram observados, predominantemente, nas condições de baixo volume de água, sobretudo, nas profundidades menores (15 cm). Nos 34 cenários simulados com o controlador instalado a 15 cm, 59% deles apresentaram $CV \geq 5\%$. Não foi observada uma melhoria no CV da lâmina aplicada com o aumento da tensão crítica (com exceção para os cenários em solo Arenoso), mas tendo em conta que 2/3 dos cenários que apresentaram $CV \geq 5\%$ ocorreram nos cenários com tensão de 15 kPa. Os valores de tensão de 15 kPa são observadas nas partes mais inclinada das curvas de retenção dos solos, por isso, o desvio no acionamento de $\pm 0,3$ kPa e no desligamento de $\pm 1,1$ kPa do sistema de SI (Tabela 6) resultam em significativas variações na lâmina aplicada nessa tensão de acionamento. Portanto, mesmo com a calibração individualizada, a utilização de apenas um controlador de irrigação apresenta limitação para o controle da irrigação em aplicações de pequenas lâminas em profundidades rasas e baixas tensões críticas ($CV \geq 5\%$).

A utilização de dois controladores para ativar o SI, sendo, um responsável pelo acionamento e outro pelo desligamento do SI melhora significativamente a precisão da lâmina aplicada em condições de pequenas lâminas (Tabela 11). A utilização de dois controladores instalados na profundidade de 15 cm (em cenários com diferentes taxas de aplicação, tensões críticas e tipos de solo) reduz significativamente o CV da lâmina em todos os cenários comparada à utilização de apenas um controlador. Dos 18 cenários onde a utilização de um controlador é limitada ($CV \geq 5\%$), o uso de dois controladores é recomendado em 15 deles, devido à redução do CV para valores menores que 5%.

4.3.1 Posicionamento correto do controlador

A profundidade de instalação do controlador aumentou com o aumento da lâmina aplicada (tensão crítica de acionamento e profundidade do sistema radicular da cultura) (Fig. 25). Contrariamente, ela reduziu com o aumento da taxa de aplicação da irrigação e o percentual de argila do solo.

Tabela 11 - Valores de lâmina infiltrada (I) e o seu coeficiente de variação (%) para 7 tipos de solos de acordo com a variação na taxa de aplicação da irrigação (P), na tensão de água no solo para acionar o SI (TASc) e número de controladores para ativar o SI. (a) Os valores de tensão para desligar o SI utilizando apenas um controlador foram de 12 ± 1 kPa (para TASc de 15 kPa) e (b) 21 ± 2 kPa (para TASc de 25 kPa). Para dois controladores foi de $12 \pm 0,5$ kPa (para TASc de 15 kPa) e (b) $21 \pm 0,5$ kPa (para TASc de 25 kPa) . NA: não aplicável, pois, não permite simulação para P maior que 5 mm/h devido ao baixo Ks. As simulações foram realizadas com o controlador instalado a uma profundidade de 15 cm

Lâmina aplicada (mm) e seu coeficiente de variação (%) para os tipos de solo									
P(mm/h)	TASc (kPa)	Nº de controlador	Arenoso	Siltoso	Argiloso	Latossolo	Nitosolo	Neossolo	Lavsolo
5	15 ^a	1	10,5 (5%)	16,7 (3%)	14,7 (4%)	12,7(10%)	8,7 (9%)	14,0 (7%)	13,5 (4%)
		2	10,8 (3%)	17,0 (2%)	14,6 (2%)	13,8 (8%)	9,3 (6%)	14,8 (5%)	13,8 (3%)
	25 ^b	1	9,9 (2%)	20,9 (3%)	18,1 (4%)	15,6 (8%)	11,0 (7%)	16,3 (3%)	16,0 (5%)
		2	9,5 (3%)	21,3 (1%)	17,6 (2%)	15,5 (3%)	10,9 (3%)	16,2 (2%)	15,9 (3%)
10	15 ^a	1	8,7 (7%)	NA	NA	16,0 (6%)	10,7 (5%)	17,0 (6%)	15,3 (4%)
		2	12,8 (2%)	NA	NA	16,7 (6%)	11,0 (4%)	17,8 (4%)	15,4 (3%)
	25 ^b	1	11,6 (5%)	NA	NA	19,6 (6%)	16,8 (3%)	19,8 (4%)	18,2 (5%)
		2	11,3 (2%)	NA	NA	19,0 (3%)	13,0 (4%)	19,4 (2%)	17,6 (2%)
15	15 ^a	1	14,5 (6%)	NA	NA	18,5 (5%)	12,5 (7%)	20,0 (4%)	13,0 (7%)
		2	14,2 (3%)	NA	NA	18,9 (4%)	12,4 (3%)	20,0 (3%)	15,7 (4%)
	25 ^b	1	13,5 (1%)	NA	NA	22,2 (6%)	15,0 (7%)	21,9 (4%)	19,8 (3%)
		2	12,6 (1%)	NA	NA	21,5 (2%)	14,5 (3%)	21,5 (2%)	18,4 (2%)

Figura 25 - Influência da TASc e da taxa de aplicação da irrigação sobre a profundidade de instalação do controlador de irrigação para desligar o SI em um sistema radicular com 30 cm em diferentes tipos de solo. O controlador foi configurado para desligar a irrigação quando a TAS atinge 10 kPa

Figura 26 - Influência da tensão crítica e da taxa de aplicação da irrigação sobre a profundidade de instalação do controlador de irrigação para desligar o SI em um sistema radicular com 60 cm. O controlador foi configurado para desligar a irrigação quando a tensão atinge 10 kPa

Para a maioria dos solos o aumento no valor da tensão crítica resultou em aumento na profundidade de instalação do controlador. Entretanto, para os solos com alto percentual de argila, o incremento na profundidade foi mais acentuada. Por exemplo, para o solo Argiloso, as profundidades de instalação do controlador foram de 8, 11, 13 e 14 para as tensões de acionamento de 15, 25, 35 e 45 kPa em profundidades do sistema radicular de 30 cm e taxa de aplicação de irrigação de 5 mm h^{-1} . Enquanto que, para o solo Arenoso, as profundidades de instalação foram de 13, 14, 14 e 14 cm. A baixa influência da tensão de acionamento no posicionamento do controlador em solos arenosos reflete a baixa capacidade de retenção de água desse solo, pois o incremento no volume de água com o aumento na tensão é pequeno. A lâmina aplicada para a menor tensão (15 kPa) foi de 10,5 mm e para as outras tensões críticas (25, 35 e 45 kPa) foi de 12 mm, ou seja, um incremento de apenas 13 %. Já para os solos com alto percentual de argila (maior capacidade de retenção de água), ocorre um incremento significativo no volume de água aplicado (3,5 vezes maior entre a tensão de acionamento de 45 e 15 kPa), o que contribui para a maior diferenciação na profundidade de instalação com o aumento na tensão. Esse resultado é coerente com as observações de Zur et al. (1994), pois a velocidade da frente de molhamento durante a irrigação é essencialmente constante e é função do conteúdo inicial de umidade e da textura do solo. Sendo que, as variações na textura do solo resultam em variações na capacidade de retenção de água nos diferentes tipos de solos (KANDELOUS et al., 2012).

Para a maioria dos solos, as maiores eficiências de aplicação e de armazenamento foram observadas nas profundidades de instalação em torno de 30% e 40% do Z (Fig. 27). Essas profundidades são adequadas para instalação do tensiômetro em várias culturas. Coelho, Silva e Miranda (2010) relatam posicionamento ideal para tensiômetros na cultura da bananeira irrigada por gotejamento entre as camadas que equivalem a 35 a 85% do Z. Enquanto, Stieber e Shock (1995) recomendam instalar os sensores em profundidades de 30 a 75% do Z, na cultura da batata irrigada por aspersão.

Figura 27 - Influência da profundidade de instalação do controlador (responsável pelo desligamento da irrigação) e da taxa de aplicação na eficiência de aplicação (Ea) e de armazenamento (Ear) em diferentes solos

4.4 Implicações para a operação em campo

A faixa de tensão da água no solo em que o controlador foi avaliado (10 a 30 kPa) é geralmente utilizada para a irrigação de alta frequência. Esta situação não é representativa para situações com irrigação de baixa frequência de irrigação, em que o SI é acionado em maiores tensões. No entanto, o controlador pode operar em limites de maiores tensões, desde que, seja trocada a mola de ajuste (molas com coeficiente de elasticidade maior). A única limitação é o limite operacional do tensiômetro, que é entre a capacidade de campo e 80 kPa (RICHARDS; GARDNER, 1936).

O protótipo II não apresenta alta exatidão na tensão ($CV \pm 10\%$) de acionamento quando utilizada uma calibração geral. Entretanto, a calibração individualizada de cada amostra de controlador melhora a exatidão e o desempenho da aplicação de água. Mesmo que esta calibração exija tempo e esforços consideráveis, ela melhora consideravelmente o desempenho da irrigação em função da maior precisão no acionamento do SI.

Ao utilizar sensores de solo para possibilitar a automação da irrigação, o sensor comumente indica a tensão crítica para acionar o SI e o controlador é programado para aplicar uma determinada. Essa lâmina pode ser qualquer quantidade menor ou igual ao volume necessário para repor a umidade à capacidade de campo (válvulas volumétricas e temporímetros controlam o volume). Já para o controlador proposto, a lâmina deverá ser fixa e será definida pela quantidade de água necessária para frente de molhamento alcançar a profundidade da cápsula do tensiômetro.

Nas simulações de desempenho do controlador, com exceção do solo Arenoso, a lâmina aplicada aumentou com o aumento da taxa de aplicação de irrigação. No entanto, para a maioria dos cenários, os valores de CV não foram influenciados pela variação na taxa de aplicação. Porém, mais da metade das simulações para os solos latossolo e nitossolo com taxa de aplicação de 5 mm h⁻¹ os valores de CV foram $\geq 5\%$. Para estes dois tipos de solo o controlador apresenta melhor desempenho quando instalado em profundidade maior (> 15 cm) e sob taxa de aplicação de água maior do que 5 mm h⁻¹. Como a taxa de aplicação é definida pelo sistema de irrigação, portanto, presume-se que para estes tipos de solo o controlador de irrigação tem limitação para controlar os SI com baixa taxa de aplicação.

Nas simulações em solos arenosos (Arenoso e Neossolo), o controlador apresentou bom desempenho em cenários com profundidade de instalação maiores do que 15 cm. No entanto, tensiômetros não têm sido utilizados em solos arenosos extremos, devido ao requerimento de frequente manutenções (MUNOZ-CARPENA et al., 2008). Esta manutenção

frequente é devida ao baixo contato desse solo com a cápsula porosa (solo com estrutura altamente porosa). Esse tipo de solo seca rápido e contrai mesmo em baixas tensões de água no solo (aproximadamente 20 kPa). Com isso, o solo desprende-se da cápsula porosa, e, conseqüentemente, o tensiômetro perde o vácuo e para de medir a tensão (HANSEN; PAISAN, 1999). Em solos francos e argilosos, geralmente, ocorre um bom contato com a cápsula porosa do tensiômetro. No experimento no pomar, os controladores operaram continuamente ao longo do período, não foram observados problemas de instrumentação (escova) e não foram verificadas bolhas de ar nos tensiômetros. Estes bons resultados devem-se à manutenção da tensão da água no solo próximo à capacidade de campo e a textura mais argilosa do solo.

As profundidades apresentadas Fig. 25 e 26 permitem a obtenção de 100% de eficiência de armazenamento e de aplicação. Porém, o conhecimento da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura no campo é difícil de ser obtida, devido às diversas variáveis que influem no comprimento (estágio da cultura, tipo de solo, variedade, etc).

Nas simulações o conteúdo de água no perfil do solo foi considerado como sendo uniforme em solo sem vegetação (sem extração de água). Para essa situação, os modelos no geral conseguem definir adequadamente a distribuição de água no solo e os dados simulados apresentam boa correlação com os dados de campo (SKAGGS et al., 2004; SIMUNEK; HOPMANS, 2009; PINHO, 2010). Entretanto, essa situação no campo está longe de ser uniforme (ZUR et al., 1994), devido, sobretudo, a variabilidade do solo ao longo do perfil e a distribuição do sistema radicular das culturas. Kandelous et al. (2012), ao utilizar diferentes distribuições radiculares de alfafa nas simulações, concluíram que a distribuição radicular exerce grande influência na otimização do manejo da irrigação. Além do que a definição da profundidade de instalação dos controladores é função da determinação das zonas de maior extração de água no perfil do solo, que depende da distribuição radicular. Sendo que, a definição da profundidade máxima de instalação do controlador, tem limitada aplicação se não levado em conta a distribuição do sistema radicular. A instalação em profundidades menores tem menor probabilidade de ocorrer drenagem.

O protótipo II apresentou melhor acurácia do que o protótipo I. Entretanto ele não foi capaz de controlar a irrigação em campo, pois, a válvula pneumática utilizada como válvula de três vias oxidou com o uso de água. Portanto, um novo protótipo deve ser construído utilizando uma válvula de três vias hidráulica.

Pesquisas futuras devem testar novos materiais ou outros tipos de diafragmas e priorizar o emprego de processos industriais para fabricação de protótipos dos controladores.

5 CONCLUSÕES

Os protótipos I e II de controlador de irrigação são capazes de acionar mecanicamente o sistema de irrigação com erro ou incerteza de 1,15 e 0,43 kPa, respectivamente, para tensões críticas de 20 kPa. Os coeficientes de variação observados (9 – 12%) na tensão de acionamento foram similares em magnitude com outros sensores baseados em informações da umidade do solo. Esta variação pode ser reduzida pela a realização de calibrações individualizadas para cada amostra de controlador.

Uma simulação de desempenho do controlador em várias condições de manejo e solos encontrou que o CV na lâmina de água aplicada pelo controlador foi <5% quando o tensiômetro é instalado em profundidades >15 cm, tensões de acionamento é >15 kPa e intensidade de aplicação >5 mm h⁻¹. Isto sugere que o controlador é mais adequado para manejar sistemas de gotejamento em culturas perenes.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)
- ANDREU, L.; HOPMANS, J.W.; SCHWANK, L.J. Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 35, n. 3, p. 123-146, 1997.
- ASSIS JUNIOR, R.N. **Análise do desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação do potencial mátrico da água**. 1995. 85 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- AUGUSTIN, B.J.; SNYDER, G.H. Moisture sensor-controlled irrigation for maintaining Bermuda grass turf. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 848-850, 1984.
- AYARS, J.E.; PHENE, C.J. Automation. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier, 2007. chap. 7, p. 259-284.
- AZEVEDO JA, SILVA, EM. **Tensiômetro: dispositivo prático para controle da irrigação**. Planaltina: Embrapa, 1999. 37 p. (Circular Técnica, 1).
- BIANCHI, W.B. Measuring soil moisture tension changes. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 43, p. 398-399, 1962.
- BOND, W.J.; SMITH, C.J.; ROSS, P.J. Field validation of a water and solute transport model for the unsaturated zone. In: SHALLOW GROUNDWATER SYSTEMS CONFERENCE, 1997, Hannover. **Proceedings...** Hannover: Groundwater Society, 1997. p. 1-5.
- BONQUIST JR., J.M.; JONES, S.B.; ROBISON, D.A. Precise irrigation for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 84, p. 153-165. 2006.
- CAMARGO, A.P. Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais. 2012. 112p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- CASADEUS, J.; MATA, M.; MARSAL, J.; GIRONA, J. Automated irrigation of apple trees based on measurements of light interception by the canopy. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 108, p. 220-226, 2011.
- CASSEL, D.K.; KLUTE, A. Water potential: tensiometry. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: SSSA, 1986. p. 563-596. (Agronomy, 9).
- CHARLESWORTH, P.B. **Soil water monitoring**. 2nd ed. Melbourne: National Program for Irrigation Research and Development, CSIRO, 2005. 100 p.

COATES, R.W.; DELWICHE, M.J.; BROWNM, P.H. Control of individual microsprinklers and fault detection strategies. **Precision Agriculture**, Bedford, v. 7, p. 85-99, 2006.

COELHO E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, p. 2007-2016, 1996.

_____. Modelo de distribuição de água e de potencial matricial no solo sob gotejamento com extração de água por raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 225-234, fev. 1999.

COELHO, E.F.; SANTOS, D.B.; AZEVEDO, C.A.V. Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 46-52, 2007.

COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; MIRANDA, J.H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 608-618, jul./ago. 2010.

COELHO, S.L.; TEIXEIRA, A.S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 536-545, set./dez. 2004.

CORNEJO, C.; HAMAN, D.Z.; YEAGER, T.H. Evaluation of soil moisture sensor, and their use to control irrigation systems for containers in the nursery industry. In: ASAE INTERNATIONAL MEETING, 2005. **Proceedings...** St Joseph: ASABE, 2005. p. 1-13.

COTE, C.M.; BRISTOW, K.L.; CHARLESWORTH, P.B.; COOK, F.J.; THORBURN, P.J. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 22, p. 143-156, 2003.

DABACH, S.; LAZAROVITCH, N.; SIMUNEK, J.; SHANI, U. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. **Irrigation Science**, Amsterdam, May .2011.DOI 10.1007/s0027-011-0289-x. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/t35k7w1631vvq771>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

DAVIS, S.L.; DUKES; M.D. Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 19-28, 2010.

DUKES, M.D.; SCHOLBERG, J.M. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, p. 89-101. 2005.

EVANS, D.E.; SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; MILLEN, J.A. Spatial canopy temperature measurements using center pivot mounted IRTs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2001, Bloomington. **Proceedings...** Bloomington: Precision Agriculture Society, 2001. p. 1-10.

EVANS, R. **Irrigation technologies**. Disponível em: <<http://www.sidney.ars.usda.gov/>>. Acessado em: 10 jul. 2009.

EVETT, S.R.; PETERS, R.T.; HOWELL, T.A. Controlling water use efficiency with irrigation automation: cases from drip and center pivot irrigation of corn and soybean. In: SOUTHERN CONSERVATION SYSTEMS CONFERENCE, 2006, Amarillo. **Proceedings...** Amarillo: SCSC, 2006. p. 1-10.

FARIA, R.T.; COSTA, A.C.S. **Tensiômetro: construção, instalação e utilização.** Londrina: IAPAR, 1987. 24 p. (Circular, 56).

FERNANDEZ, J.E.; ROMERO, R.; MONTANO, J.C.; DIAZ-ESPEJO, A.; MURIEL, J.L.; CUEVAS, M.V.; MORENO, F.; GIRON, I.F.; PALOMO, M.J. Design and testing of an automatic irrigation controller for fruit tree orchards, based on sap flow measurements. **Australian Journal of Agriculture Research**, Collingwood, v. 59, p. 589-598, 2008.

FISCHBACK, P.E.; THOMPSON, T.L.; STETSON, L.E. Electric controls for automatic surface irrigation systems with reuse systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 13, p. 286-288. 1970. 1992. 53 p.

GALBO, A.G; SILVA, W.L.C **Sistema Irrigas para manejo da irrigação: Fundamentos, aplicações e desenvolvimentos.** Brasília: Embrapa, 2005. 186p.

GOLDHAMER, D.A.; FERRERES, E. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 23, p. 11-19, 2004.

HANSEN, R.C.; PASIAN, C.C. Using tensiometers for precision microirrigation of container-grown roses. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 15, p. 483-490, 1999.

HODNETT, M.G.; BELL, J.P.; AHKOON, P.D. The control of drip irrigation of sugar cane using “index” tensiometers: some comparisons with control by water budget method. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p. 189-207, 1990.

HOPPULA, K.I.; SALO, T.J. Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 25, p. 401-409. 2007.

HURST, C.A.; THORBURN, P.J.; LOCKINGTON, D.; BRISTOW, K.L. Sugarcane water use from shallow water tables: implications for improving irrigation water use efficiency. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 65, p. 1-19, 2004.

IRMAK, S.; HAMAN, D.Z. Performance of the watermark granular matrix sensor in sandy soils. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 17, p. 787-795, 2001.

IRMAK, S.; ODHIAMBO, L.O.; KRANZ, W.L.; EISENHAUER, D.E. **Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency.** Lincoln: University of Nebraska, 2011. 7 p.

ITIER, B.; MARAUX, F.; RUELLE, P.; DEUMIER, J.M. Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. In: IRRIGATION SCHEDULING: from theory to practice, 1996, Rome. **Proceedings...** Rome: FAO, 1996. Disponível em: <<http://fao.or/docrep/W4367E/w4367e04.htm>>. Acessado em: 13 set. 2012.

JONES, J. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 55, n. 407, p. 2427-2436, July 2004.

KANDELOUS, M.M.; SIMUNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 1070-1076, 2010.

KANDELOUS, M.M.; KAMAI, T.; VRUGT, J.A.; SIMUNEK, J.; HANSON, B.; HOPMANS, J.W. Evaluation of subsurface drip irrigation design and management parameters for alfafa. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 109, p. 81-93, 2012.

KLEIN, V.A. Uma proposta de irrigação automática controlada por tensiômetros. **Revista Brasileira de Agrociência**, Lages, v. 7, p. 231-234, 2001.

LEIB, B.G.; JABRO, J.D.; MATTHEWS, G.R. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. **Soil Science**, Hagerstown, v. 168, p. 396-408, 2003.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LOWERY, B.; DATIRI, B.C.; ANDRASKI, B.J. An electrical readout system for tensiometers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 494-496, 1986.

MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 624-267, 1983.

MATEOS, L.; LOPEZ-CORTIJO, I.; SAGARDOY, J.A. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 56, p. 193-206, 2002.

MATHEW, A.C.; SENTHILVEL, S. Evaluation of an automated furrow irrigation system using soil moisture sensor. **Madras Agricultural Journal**, Coimbatore, v. 91, p. 215-220, 2004.

MCCANN, I.R.; KINCAID, D.C.; WANG, D. Operational characteristics of the watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 8, p. 603-609, 1992.

MCCARTHY, A.C. **Improved irrigation of cotton real-time, adaptive control of large irrigation machines**. 2010. 278 p. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Faculty of Engineering and Survey, University of Southern Queensland, Toowoomba, 2010.

MCCARTHY, A.C.; HANCOCK, N.H.; RAINE, S.R. Advance process control of irrigation: the current state and an analysis to aid future development. **Irrigation Science**, Amsterdam, DOI: 10.1007/s00271-011-0313-1. 2011. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/contenttyn175051117308r7>>. Acesso em: 20 dez. 2012.

- MCCREADY, M.S.; DUKES, M.D.; MILLER, G.L. Water conservation potential o smart irrigation controllers on St. Augustinegrass. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 1623-1632, 2009.
- MIRANDA, F.R.; YODER, R.E.; WILKERSON, J.B.; ODHIAMBO, L.O. An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 48, n. 3, p. 183-197, Apr. 2005.
- MORIANA, A.; GIRON, I.F.; MARTIN-PALOMO, M.J.; CONEREJO, W.; ORTUNO, M.F.; TORRECILLAS, A.; MORENO, F. New approach for olive trees irrigation scheduling using trunk diameter sensors. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 1822-1828, 2010.
- MUALEM, Y. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Amsterdam, v. 12, p. 513-522, 1976.
- MUÑOZ-CARPENA, R.; DUKES, M.D.; LI, Y.C.; KLASSEN, W. Field comparison of tensiometer and granular matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. **HortTechnology**, Alexandria, v. 15, p. 584-590, 2005.
- _____. Design and evaluation of a new controller for soil water-based irrigation control. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 24, p. 183-191, 2008.
- NOGUEIRA, L.C.; DUKES, M.D.; HAMAN, D.Z.; SCHOLBERG, J.M.; CORNEJO, C. Data acquisition system and irrigation controller based on CR10X datalogger and TDR sensor. In: SOIL AND CROP SOCIETY CONFERENCE OF FLORIDA, 2002, Gainesville. **Proceeding...** Gainesville: SCSF, 2002. p. 38-46.
- NYHAN, J.W.; DRENNON, B.J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 293-296, 1990.
- NZOKOU, P.; GOOCH, N.J.; CREGG, B.M. Design and Implementation of a soil matric potential-based automated irrigation system for drip irrigating Fraser Fir. **Hortechonology**, Alexandria, v. 20, p. 1030-1036, 2010.
- OR, D. Who invented the tensiometer? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1-3, 2001.
- PATEL, N.; RAJPUT, T.B.S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 1335-1349, 2008.
- PATHAN, S.M.; BARTON, L.; COLMER, T. Evaluation of a soil moisture sensor to reduce water and nutrient leaching in turfgrass (*Cynodon dactylon* cv. Wintergreen). **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 47, p. 215-222, 2007.
- PETERSON, D.L.; GLENN, D.M.; WOLFORD, S.D. Tensiometer-irrigation control valve. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 9, p. 293-297, 1993.

PHENE, C.J.; HOWEL, T.A. Soil sensor control of high frequency irrigation. **Transaction ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 2, p. 392-396, 1984.

PHENE, C.J.; HOFFMAN, G.J.; AUSTIN, R.S. Controlling automated irrigation with soil matric potential sensor. **Transaction ASAE**, St. Joseph, v. 16, p. 773-776, 1973.

PINHO, R.E.C. **Teores de água e solutos no solo: desempenho e sensibilidade do modelo Hydrus-1D**. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PINMANEE, S.; SPREER, W.; SPOHRER, K.; ONGPRASERT, S.; MULLER, J. Development of a low-cost tensiometer driven irrigation control unit and evaluation of its suitability for irrigation of lychee trees in uplands of Northern Thailand in a participatory approach. **Journal of Horticulture and Forestry**, Nairobi, v. 3, p. 226-230, 2011.

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, jan./mar. 2008.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

RICHARDS, L.A.; GARDNER, W. Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, p. 352-358, 1936.

ROH, M.Y.; LEE, Y.B. Control of amount and frequency of irrigation according to integrated solar radiation in cucumber substrate culture. **Acta Horticulture**, Leuven, n. 440, p. 332-337, 1996.

RUBIN, J.; STEINHARDT, R. Soil water relations during infiltration. I. Theory. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 27, p. 246-251, 1963.

SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; EVANS, D.E.; MILLEN, J.A. Corn canopy temperatures measured with a moving infrared thermometer array. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 45, p. 581-591, 2002.

SAMMIS, T.; SHARMA, P.; SHUKLA, M.K.; WANG, J.; MILLER, D. A water-balance drip-irrigation scheduling model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412001539>>. Acesso em: 20 jun. 2012.

SCALON, B.R.; CHRISTMAN, M.; REEDY, R.C.; PORRO, I.; SIMUNEK, J.; FLERCHINGER, G.N. Intercode comparisons for simulating water balance of superficial sediments in semiarid regions. **Water Resources Research**, Amsterdam, v. 38, p. 1-15, 2002.

SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions, **Soil Science**, London, v. 163, p. 765-779, 1998.

- SERRANO, L.; CARBONELL, X.; SAVÉ, R.; MARFA, O.; PEÑUELAS, J. Effects of irrigation regimes on the yield and water use of strawberry. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 13, p. 45-48, 1992.
- SHULL, H.E.; DYLLA, A.S. Irrigation automation with a soil moisture sensing system. **Transaction ASAE**, St. Joseph, v. 23, p. 649-652, 1980.
- SILVA, E.M.; AZEVEDO, J.A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1487-1494, 2002.
- SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A.; RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 323-330, fev. 2006.
- SIMUNEK, J.E.; HOPMANS, J.W. Modeling compensated root water and nutrient uptake. **Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 22, n. 4, p. 505-521, Feb. 2009.
- SKAGGS, T.H.; TROUT, T.J.; SIMUNEK, J.; SHOUSE, P.J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 304-310, July/Aug. 2004.
- SMAJSTRLA, A.G.; LOCASCIO, S.J. Tensiometer-controllerd, drip-irrigation scheduling of tomato. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 12, p. 315-319, 1996.
- SOCCOL, J.O.; CARARO, D.C.; SILVA, E.F.F.; ULLMAN, M.N. Condutância hidráulica e tempo de resposta de tensiômetros utilizados em cultivos fertirrigados. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v. 4, n.1, p. 3-10, 2005.
- STIEBER, T.D.; SHOCK, C.C. Placement of soil moisture sensors in sprinkler irrigated potatoes. **American Potato Journal**, New York, v. 72, p. 533-543, 1995.
- STIRZAKER, R.J.; HUTCHINSON, R.A. Irrigation controlled by a wetting 1 front detector: field evaluation under sprinkler irrigation. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, p. 935-943, 2005.
- UNIVERSITY OF ISRAEL. **Tensiometer and automatic irrigation control system utilizing same**. US 3910300. 21 Sept. 1973. 7 Oct. 1975.
- TESTEZLAF, R.; LARSEN, C.A.; YEAGER, T.H.; ZAZUETA, F.S. Tensiometric monitoring of container substrate moisture status. **Hortechonology**, Alexandria, v. 9, n. 1, p. 105-109, Jan/Mar. 1996.
- THOMPSON, R.Bd.; GALLARDO, M.; AGUERA, T.; VALDEZ, L.C.; FERNANDEZ, M.D. Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 24, p. 185-202, 2006.
- TORRE-NETO, A.; SCHULLER, J.K.; HAMAN, D.Z. **Networked sensing and valve actuation for spatially variable microsprinkler irrigation**. St. Joseph: ASAE, 2000. 17 p. (ASAE. Paper, 001158).

VACCARO, A.; BASEIL, R.; HAGRAS, H.; HO, M.; KREIN, P.; LARSEN, R.; McKNIGHT, G.; MODI, V.; PASCUAL, A.E.; PASSINO, K.; PERUSICH, K.; ZOBAA, A. **Reliable electric power to developing countries**. Humanitarian Technology Challenge. Disponível em: <<http://www.ieeehtc.org/challenges/electricity/>>. Acessado em: 20 maio 2012.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VELLIDIS, G.; SMAJSTRLA, A.G.; ZAZUETA, F.S. Continuous soil water potential measurement with a microcomputer-based data acquisition system. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 6, p. 733-738, 1990.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; KVIEN, C.; BEDNARZ, C. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 61, p. 44-50, Apr. 2008.

VERBURG, K.; ROSS, P.J.; BRISTOW, K.L. **SWIMv2.1 user manual**. Camberra: SCIRO, 1996. 109 p.

WANG, Z.; JAN FEYEN, D.Z. General irrigation efficiency for field water management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 30, p. 123-132, Sept. 1996.

WARRICK, A.W.; WIERENGA, P.J.; YOUNG, M.H.; MUSIL, S.A. Diurnal fluctuations of tensiometric readings due to surface temperature changes. **Water Resources Research**, Amsterdam, v. 34, n. 11, p. 2863-2869, Nov. 1998.

WHITE, S.; RAINE, S. **A grower guide to plant based sensing for irrigation scheduling**, Toowoomba: National Centre for Engineering in Agriculture, 2008. 57 p. (Technical Report, 1001574/6).

WIEDENFEL, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, p. 169-181, 2004.

ZOCOLER, J.L.; CESAR, L.E.V.; VANZELA, L.S. Efeito da posição relativa da linha lateral de um equipamento de irrigação do tipo 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.

ZUR, B.; BEN-HANAN, U.; RIMMER, A.; YARDENI, A. Control of irrigation amounts using the velocity and position of wetting front. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 14, p. 207-212, 1994.